Diplomarbeit

Entwurf und Auslegung von dynamisch mittels Biegedrehschlagflossen angetriebenen Luftschiffen

cand. Ing. Martin Wähmer Matrikel-Nr.: 185080

Prof. Dr.–Ing. J. Thorbeck
Prof. DrIng. D. Peitsch
DiplIng. Andreas Becker
DiplIng. (ETH) Silvain Michel
26. Feb. 2010





INHALT

VEF	RWENDETE GRÖßEN	II
1	EINLEITUNG	1
1.1	Bedeutung	1
1.2	Aufgabenstellung	2
2	GRUNDLAGEN	3
2.1	Luftschiffe	3
2.2	Atmosphärische Bedingungen	6
2.3	Biologisches Vorbild	7
2.4	Entwurfsprozess	13
3	ENTWURF DES MODELL-LUFTSCHIFFES "AIRFISH"	17
3.1	Geometrie	17
3.2	Tragkraft	20
3.3	Gewicht	21
3.4	Schub	23
3.5	Widerstand	32
3.6	Struktur	34
3.7	Flugleistung	38
3.8	Realisierung Airfish 3.20	40
3.9	Entwurfsprogramm	44
4	ZUSAMMENFASSUNG	51
5	AUSBLICK	52
ANI	HANG	53
LIT	ERATUR	58

Verwendete Größen

Größe	Einheit	Bedeutung
S	-	Skalierungsfaktor
L	m	Länge
В	m	Breite
Н	m	Höhe
y(x)	m	Breitenkontur des Rumpfes
z(x)	m	Höhenkontur des Rumpfes
A_0	m ²	Oberfläche
V	m ³	Volumen
δ	-	Dicken-Längen-Verhältnis
F_{T}	Ν	Tragkraft
F_G	Ν	Gewichtskraft
F_{W}	Ν	Widerstandskraft
F_S	Ν	Schubkraft
М	Nm	Moment
Р	W	Leistung
c_{f}	-	Reibungsbeiwert der längs angeströmten Platte
c_{W}	-	Widerstandsbeiwert des Luftschiffes
c _{Schub}	-	Schubbeiwert
Re	-	Reynolds-Zahl
St	-	Strouhal-Zahl
С	Ah	Kapazität
η	-	Wirkungsgrad
μ	Pas	dynamische Viskosität
ν	m²/s	kinematische Viskosität
R	J/(kg [·] K)	spezifische Gaskonstante
ρ	kg/m³	Dichte
р	Pa	Druck
p _{innen}	Pa	Innenüberdruck (Differenzdruck)
Т	К	Temperatur
u	m/s	Geschwindigkeit des Luftschiffes in x-Richtung
p_0	Pa	Normdruck nach ISA: $p_0 = 101325$ Pa

T_0	Κ	Normtemperatur nach ISA: $T_0 = 273,15K$
A _T	K/m	Temperaturgradient nach ISA: $A_T = -0,0065 \text{K/m}$

Indizes

He	Eigenschaften des Traggases Helium
Luft	Eigenschaften der Luft
EAP	die EAP-Aktuatoren betreffend
Rumpf	den Rumpf betreffend
Flosse	die Flosse betreffend
Airfish	das gesamte Luftschiff betreffend
Akku	die Akkumulatoren betreffend

1 Einleitung

1.1 Bedeutung

Mit den Ballonen begann vor 227 Jahren die Luftfahrt mit Passagieren. Daraus wurden Luftschiffe entwickelt, um eine Steuerbarkeit zu erreichen. Vom Beginn des 20-ten Jahrhunderts bis in die 30er Jahre wurden Luftschiffe für große Reichweiten und Nutzlasten gebaut. Durch die rasante Entwicklung der Flächenflugzeugtechnik und die Brandkatastrophe von Lakehurst verlagerten sich die Aufgaben von Luftschiffen auf Beobachtungsflüge und Frühwarnsysteme. Ihre heutige Bedeutung liegt im Tourismus, in der Werbung sowie der Erforschung der Atmosphäre und der Erdoberfläche.

Das Ziel aktueller Forschung ist es, autonome Luftschiffe zu entwickeln, die ohne Personen an Bord aber mit einer Bodencrew ihre Aufgaben erfüllen können. Dabei sind Luftschiffgrößen von einigen Metern bis einige 100m Länge interessant. Eine wichtige Fragestellung ist die Art des Antriebes und die Verbesserung bestehender Systeme.

Ein neuer Ansatz für den Antrieb eines Luftschiffes ist die biologische Propulsion. Dabei wird das Luftschiff einem Fisch ähneln – in der Form und in der eleganten und effizienten Bewegung. An der Hülle angebrachte Flächenaktuatoren werden den Rumpf verformen und eine Schwanzflosse bewegen. Diese Antriebsart kombiniert hohe Wirkungsgrade und hohe Manövrierbarkeit auch bei geringen Geschwindigkeiten. So ist es möglich, Aufgaben zu erfüllen, bei denen eine lange Einsatzdauer mit großer Reichweite gewünscht sind oder wo es erforderlich ist, lange an einer Stelle zu verweilen. Ein weiterer Vorteil dieser Art des Antriebes ist die geringe Geräuschemission. Einsatzfelder, die sich aus diesen Eigenschaften ergeben sind z.B. Werbeträger auf Messen und Großveranstaltungen sowie Höhenplattformen über Städten zur Übertragung von Radio- und Fernsehsignalen.

Die Eidgenössische Materialprüfungs- und forschungsanstalt der Schweiz Empa entwickelt aktive Strukturen. Dabei hat sie viele Erfahrungen mit den elektroaktiven Polymeren (EAP) gewonnen. Besondere Eignung zeigen dabei die dielektrischen Polymere. Die EAP werden in ebener Form als künstliche Muskeln eingesetzt. Diese Flächenaktuatoren wurden bereits zur Rudersteuerung eines Modellluftschiffes verwandt in Kooperation zwischen der Empa und der TU Berlin [1, 2, 3].

Den Fisch als Vorbild haben auch bereits verwirklichte Fischroboter. Ein prominentes Beispiel ist der "RoboTuna" des Department of Ocean Engineering am MIT [4].

1

1.2 Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit:

Es soll ein numerisches Werkzeug für den Entwurf von Luftschiffen mit Flossenantrieb auf der Basis des generischen Entwurfsystems Compiler43V2[®] entwickelt und anhand von verfügbaren empirisch ermittelter Daten validiert werden. Dazu sind die für die Entwurfssynthese notwendigen flugphysikalischen Zusammenhänge der Aerodynamik, Antriebs-, Belastungs- und Flugmechanik zu modellieren. Insbesondere ist dabei der Biegedrehschlag zu berücksichtigen.

Aufgabenstellung:

- Einarbeitung in das Entwurfssystem Compiler 43 sowie in die relevanten flugphysikalischen Aspekte des Luftschiffentwurfs
- Modelllierung des Entwurfsproblems mit der vom Entwurfssystem geforderten Syntax
- Einbindung des Modells in das Entwurfsystem
- Entwurf eines flossenschlaggetriebenen Luftschiffes mit den Auslegungsforderungen des existierenden und vermessenen Prototypen
- Validierung und Bewertung des Entwurfswerkzeugs anhand der verfügbaren Messdaten
- Durchführung von parametrischen Variationsrechnungen zur Optimierung des Luftschiffes in Hinblick auf die maximale Geschwindigkeit, maximale Flugzeit und das minimale Traggasvolumen

2 Grundlagen

2.1 Luftschiffe

Luftschiffe werden der Leichter-als-Luft-Technologie zugezählt. Dem strukturellen Aufbau nach unterscheidet man zwischen Prallluftschiffen, halbstarren und Starrluftschiffen.

Das Prallluftschiff erzeugt die Stabilität seiner äußeren Form durch den Auftriebskörper selbst. Dieser steht unter einem geringen Überdruck von etwa 200- 800 Pa. Die Hülle kann aber keine Punktlasten aufnehmen, so sind Seile und so genannte Vorhänge für die Krafteinleitung notwendig. Auch müssen zur Aufrechterhaltung der Form Ballonets (Luftsäcke mit Ventilatoren) mit berücksichtigt werden.



Abbildung 1: Prallluftschiff vom Typ Skyship 600 [5]

Das Starrluftschiff besitzt ein Gerüst, das eine hohe Masse aufweist. Von Vorteil ist, dass Punktlasten von den Motoren, der Gondel und der Leitwerke gut aufgenommen werden können und an aerodynamisch günstigen Positionen am Luftschiff befestigt werden können. Auch stehen die Gaszellen des Traggases nicht unter Druck und sind nicht direkt der Witterung ausgesetzt.



Abbildung 2: Starrluftschiff LZ120 "Bodensee" [6]

Das halbstarre Luftschiff kombiniert Eigenschaften beider Luftschifftypen. So besitzen sie eine Innendruck beaufschlagte Hülle wie ein Prallluftschiff und gleichzeitig zum Einleiten der punktförmigen Kräfte ein Kiel bzw. ein Innengerüst.



Abbildung 3: Zeppelin NT vor der Zeppelin-Halle in Friedrichshafen [7]

Als Traggas für Luftschiffe wird vor allem Helium verwendet. Andere Gase, die leichter als Luft sind, sind Wasserstoff und Methan. Diese sind aber brennbar, was durch zusätzliche Sicherheitstechnik ausgeglichen werden muss. Ammoniak ist chemisch zu aktiv, so dass resistente und z. Z. noch zu schwere Hüllenmaterialien notwendig wären. Andere Gase wie Wasserdampf und Heißluft sind derzeit Forschungsgegenstand, da neuartige hitzebeständige und gut isolierende Folien entwickelt wurden [8].

Forderung für ein Luftschiff im unbeschleunigten Geradeausflug ist, dass die Tragkraft mit der Gewichtskraft im Gleichgewicht steht und die Schubkraft mit der Widerstandskraft. Die Tragkraft greift im Auftriebspunkt an, dessen Lage von der Gestalt des Traggaskörpers abhängt. Die Gewichtskraft ist die Summe der Einzelgewichte, die sich aus der Erdanziehung der Einzelmassen ergeben. Die Gewichtskraft greift am Schwerpunkt an. Dieser liegt bei einem Luftschiff unterhalb des Auftriebspunktes. In der Mitte zwischen Auftriebs- und Schwerpunkt greifen die Widerstands- und die Schubkraft an. Durch die Veränderung einer der vier Kräfte wird das Gleichgewicht mit der dazugehörigen Gegenkraft aufgehoben und es ändert sich der Flugzustand: Steigen, Sinken, Beschleunigen oder Verzögern.



Abbildung 4: Koordinatensystem und Kräfte

Zur Lokalisierung der Angriffspunkte der Kräfte und Momente sowie zur Beschreibung der Geometrie wird ein rumpffestes, rechtwinkliges Koordinatensystem gemäß der Luftfahrtnorm LN9300 zugrunde gelegt:

- x-Achse Rumpflängsachse, nach hinten positiv
- y-Achse Rumpfquerachse, in Flugrichtung gesehen nach rechts positiv, senkrecht zur Rumpfsymmetrieebene
- z-Achse Rumpfachse, nach oben positiv

Der Koordinatenursprung liegt in der Luftschiff-Nase.

Das Moment um die x-Achse, das Rollmoment, wird durch eine symmetrische Bauweise zu Null. Das Moment um die y-Achse, das Nickmoment, wird Null durch gezielte Positionierung der einzelnen Baugruppen auf der x-Achse. Das Moment um die z-Achse, das Giermoment, wird durch die Leitwerke und die ausgleichende Ansteuerung des Antriebes zu Null.

2.2 Atmosphärische Bedingungen

Ein Luftschiff schwebt in der ihm umgebenden Luft. Deshalb sind die Eigenschaften der Erdatmosphäre wichtige Parameter für den Entwurf.

Bis zu einer Höhe von 11000 m wird die Normatmosphäre (ISA-Standard) vorausgesetzt. Für die Höhe H=0m (Meeresniveau) gilt:

$$T_0 = 273,15K$$
 (2-1)
 $p_0 = 101325Pa$ (2-2)

$$p_0 = 101323Pa$$
 (2-

Die spezielle Gaskonstante der Luft R_{Luft} ist:

$$R_{Luft} = 287 \frac{J}{kg \cdot K} \qquad (2-3)$$

Luft wird hier als ideales Gas betrachtet. Damit ist die Dichte bei Normtemperatur und Normdruck:

$$\rho_{0_Luft} = \frac{P_0}{T_0 \cdot R_{Luft}} \qquad (2-4)$$

Da Luftschiffe in unterschiedlichen Höhen operieren, muss die Abhängigkeit des Drucks und der Dichte von der Höhe berücksichtigt werden.

$$p_{Luft} = p_0 \cdot e^{\frac{-\rho_{0_Luft} \cdot g \cdot H}{p_0}} (2-5)$$

$$\rho_{Luft} = \rho_{0_Luft} \cdot \frac{p_{Luft}}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_{Luft}} (2-6)$$

Wobei im Luftschiff ein Innendruck herrscht, der als Differenzdruck p_{innen} angegeben wird. Um diesen Differenzdruck ist der Druck im Innern des Luftschiffes höher als der Umgebungsdruck der Luft.

$$\rho_{He} = \rho_{0_{-}He} \cdot \frac{\left(p_{Luft} + p_{innen}\right)}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_{Luft}} \qquad (2-7)$$

In der Normatmosphäre wird angenommen, dass sich die Luft mit dem Temperaturgradient A_T von 6,5K je 1000m abkühlt:

$$A_T = -0,0065 \frac{K}{m}$$
 (2-8)

Somit ist die Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Höhe:

$$T_{Luft} = T_0 + A_T \cdot H \tag{2-9}$$

Die Eigenschaften der Atmosphäre werden zur Bestimmung der Tragkraft benötigt.

2.3 Biologisches Vorbild

Ähnlichkeitstheorie

Die Übertragung der Fischbewegung im Wasser auf die Bewegung eines Luftschiffes gelingt mit der Ähnlichkeitstheorie. Sie stützt sich auf dimensionslose Kennzahlen, die aus den Navier-Stokes-Gleichungen folgen [9].

Reynolds-Zahl Strouhal-Zahl Froude-Zahl Mach-Zahl

Für die Übertragung müssten die Kennzahlen beim Fisch die gleichen sein wie beim Luftschiff. In der Praxis ist die Übereinstimmung in allen vier Größen nicht möglich, es sei denn, Modell und Original haben gleiche Abmaße und besitzen gleiche Bewegungseigenschaften. Deshalb schätzt man den Einfluss jeder Kennzahl ab.

Reynolds-Zahl

Sie ist das Verhältnis aus den angreifenden Trägheitskräften und den Zähigkeitskräften am Fluid umströmten Körper. Die Trägheitskräfte gehen auf die entstehenden Druckdifferenzen und Strömungsablösungen zurück. Die Zähigkeitskräfte wirken aufgrund der inneren Reibung des Fluids.

$$\operatorname{Re}_{L} = \frac{u \cdot L}{\upsilon}$$
 (2-10)

u Vortriebsgeschwindigkeit

L charakteristische Länge

v kinematische Viskosität

Als charakteristische Länge wird für viele Anwendungen die Gesamtlänge L verwendet, was durch den Index an der Reynolds-Zahl kenntlich gemacht ist.

Bei sehr kleinen Reynolds-Zahlen, Re<1, überwiegen die Zähigkeitskräfte. Beispiel: Bakterium Escherichia coli, L=1,8µm, u=1µm/s, v_{Wasser} = 1,0·10⁻⁶ m²/s, Re=1,8·10⁻⁶. Die Tiere empfinden das Wasser als zähes Medium. Bei sehr großen Reynolds-Zahlen, Re>1000, überwiegen stattdessen die Trägheitskräfte. Beispiel: Blauwal, L=33m, u=6m/s, v_{Wasser} , Re=2,0·10⁸ [10].

Die Reynoldszahl ist groß, wenn die Trägheitskräfte den dominierenden Einfluss besitzen und die Zähigkeitskräfte klein sind.

Strouhal-Zahl

Sie ist eine dimensionslose Frequenz, mit der die Wirbelstruktur im Nachlauf eines umströmten Körpers beschrieben werden kann. Der Index "A_{PP}" bezieht sich auf die charakteristische Länge, die typischerweise die Peak-to-Peak-Amplitude, also die Doppelamplitude der Flossenendkante, ist:

$$St_{App} = \frac{A_{PP} \cdot f}{u}$$
 (2-11)

A_{PP} Peak-to-Peak-Amplitude der Flossenendkante
 f Flossenschlagfrequenz, Ablösefrequenz der Wirbel
 u Vortriebsgeschwindigkeit

Die Strouhal-Zahl ist ein Maß für das Verhältnis zwischen den Kräften durch instationäre Strömung verglichen mit den Kräften durch den stationären Strömungsanteil. (Bei Flächenflugzeugen ist diese Zahl bei Normalflug klein (Null), bei Resonanzphänomen wird sie groß). Bei ca. 1 sind beide Anteile etwa gleich.

Froude-Zahl

Sie ist das Verhältnis von Trägheitskräften zu Schwerekräften. Sie findet z.B. im Schiffbau ihre Anwendung zur Beschreibung der Grenzschicht der Fluide Wasser und Luft. Der Fisch und das Luftschiff sind aber vollständig von Wasser bzw. Luft umgeben. Ihre mittleren Dichten stimmen mit der Fluiddichte überein – sie schweben. Damit kann der Einfluss der Froude-Zahl in der Übertragung Fisch – Luftschiff vernachlässigt werden.

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot L}} \tag{2-12}$$

- u Vortriebsgeschwindigkeit
- L charakteristische Länge
- g Erdbeschleunigung

Mach-Zahl

Sie ist eine dimensionslose Geschwindigkeit und gibt das Verhältnis von Trägheits- zu Kompressionskräften an.

$$Ma = \frac{u}{a}$$
(2-13)
$$a = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}$$
(2-14)

- a Schallgeschwindigkeit
- κ Adiabatenkoeffizient
- R spezifische Gaskonstante
- T Temperatur

Bei einer Temperatur von 25°C ist die Schallgeschwindigkeit in Luft a=346m/s. Bei einer Machzahl von kleiner als Ma=0,3 kann von inkompressibler Strömung ausgegangen werden [11]. Das entspricht einer Geschwindigkeit von etwa 100m/s. Bei angestrebten Geschwindigkeiten bis maximal u=5m/s ist die Strömung inkompressibel und der Einfluss der Mach-Zahl kann vernachlässigt werden.

Vergleich Fisch-Luftschiff

Damit ist die Ähnlichkeit sichergestellt, wenn für Fisch und Luftschiff die Reynolds-Zahl und die Strouhal-Zahl übereinstimmen.

$$Re_{L_Luftschiff} = Re_{L_Fisch}$$
(2-15)
$$St_{App_Luftschiff} = St_{App_Fisch}$$
(2-16)

Als Vorbild aus der Natur wurde eine erwachsene Regenbogen-Forelle gewählt [12]. Die Größen für das Luftschiff ergeben sich wie folgt aus den Größen vom Fisch:

Größe		Fisch	Luftschiff	Einheit
Geschwindigkeit	u	1,2	1	m/s
kinematische Viskosität	ν	1,00E-06	1,67E-05	m²/s
Länge	L _{ges}	0,30	6,37	m
Breite	B_{Rumpf_max}	0,054	1,55	m
Frequenz	f	4,5	0,279	Hz
Amplitude	A _{PP}	0,12	1,61	m
Re-Zahl, längenbezogen	Re∟	3,60E+05	3,82E+05	
St-Zahl, bezogen auf A_{PP}	St _{App}	0,45	0,45	

Tabelle 1: Vergleich von Fisch und Luftschiff, Daten zur Regenbogen-Forelle [3]

Form und Bewegung der Forelle

Als Vorbild dient die Gestalt und das Bewegungsmuster der Regenbogen-Forelle *Oncorhynchus mykiss*. Sie wurde in vorangegangenen Machbarkeitsstudien an der EMPA ausgewählt [13]. Sie ist ein Generalist mit einer leichten Spezialisierung zum ausdauernden und schnellen Schwimmen [14].

Form

Die Forelle hat alle Lebensfunktionen, u. a. "Energieversorgung" und "Antrieb" in eine hydrodynamische Körperform gebracht. Sie ist höher als breit, um für den Vortrieb eine große Lateralfläche zur Verfügung zu stellen. Im Luftschiffprojekt wird dies durch einen geeigneten Querschnitt nachempfunden. Das Längen-Breiten-Verhältnis von Forellen beträgt 4-6 [12].



Abbildung 5: Regenbogen-Forelle [12]

Bewegung

Im Verlaufe der Evolution haben sich bei Fischen zwei große Gruppen der Fortbewegung (Lokomotion) herausgebildet [15]:



Abbildung 6: Lokomotionsformen bei Fischen und ihre aktive Länge nach [15]

Bei der axialen Lokomotion wird der Vortrieb durch eine Bewegung der Körperlängsachse erzeugt. Abhängig davon, ob der gesamte Körper oder nur der hinterste Teil zur Fortbewegung genutzt wird, wird noch einmal abgestuft:

- anguilliforme Lokomotion: Der gesamte Körper führt eine wellenförmige Bewegung aus, Bsp. Aal.
- subcarangiforme Lokomotion: Die Wellenamplitude ist im vorderen Teil noch gering, nimmt in der hinteren Körperhälfte stark zu und geht in einen kräftigen Flossenschlag über, Bsp. Regenbogen-Forelle.
- carangiforme Lokomotion: Ebenfalls wird der gesamte Körper in die Wellenbewegung einbezogen, wobei die Amplitude im vorderen Teil vergleichsweise gering ausgeprägt ist, Bsp. Hering.
- thunniforme Lokomotion: Diese Antriebsart geschieht fast ausschließlich durch die Bewegung der Schwanzflosse



Abbildung 7: Varianten der axialen Schwimmbewegung: (a) anguilliform, (b) subcarangiform, (c) carangiform, (d) thunniform [16]

Sehr intensiv wurde an der TU Berlin in den 1960er Jahren am Institut für Luft- und Raumfahrt das Bewegungsmuster der Regenbogen-Forelle untersucht. Ziel war es schon damals, die Ergebnisse der Evolution im Tierreich für Luftfahrzeuge zu nutzten. So erkannte man [12], dass sich die Regenbogen-Forelle mit einer Kombination aus Translation und Rotation vorwärts bewegt.



Abbildung 8: Regenbogen-Forelle. u=0,75m/s; Bewegung der Schwanzflosse; Translation h und Rotation θ; Schwimmbewegung von links nach rechts [12, verändert]

Auch wurde festgestellt, dass der Fisch eine Phasenverschiebung je nach angestrebter Geschwindigkeit zwischen diesen beiden Bewegungen einstellt. Der translatorischen Bewegung des Rumpfendes folgt die Rotation der Flosse mit einer Phasenverschiebung, die einem Fünftel der Gesamtperiode entspricht.



Abbildung 9: Regenbogen-Forelle. Translation h und Rotation θ mit Phasenverschiebung ψ und Geschwindigkeit u=0,75m/s [12, verändert]

Der Fisch erzeugt ein Wirbelmuster entsprechend einer inversen Kármánschen Wirbelstraße. Die Wirbel lösen sich periodisch von der Flosse in dem Moment, wenn sie ihre größte Auslenkung erfährt. Die Wirbelzentren verbleiben am Ort der Entstehung und treiben den Fischkörper voran. Dies geschieht ohne ein Nachlaufgebiet zu erzeugen, welches bei Motoren getriebenen Luftschiffen zu einem Anstieg des Druckwiderstandes führt.



Abbildung 10: Bei Translation und Rotation einer Platte entsteht bei passender Wahl der Parameter eine Kármánsche Wirbelstraße [12, verändert]

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung der Fischbewegung werden bei der Berechnung der Schubkraft angewendet.

2.4 Entwurfsprozess

Ausgangspunkt für den Entwurf ist die Aufgabe, die das Luftschiff erfüllen soll. Der Aufgabe entsprechend werden die geometrischen und physikalischen Parameter gewählt und auf einander abgestimmt. Dazu werden die Form, die Größe und die Eigenschaften ermittelt, die das Luftschiff besitzen wird, um die gestellte Aufgabe bestmöglich zu erfüllen. Als Leitfaden wurde die Dissertation von Ingolf Schäfer genutzt [17].

Parameter

Die Parameter sind die geometrischen und physikalischen Eigenschaften des Luftschiffes. Dabei wird unterschieden zwischen variablen Größen - den Entwurfsgrößen also den "Stellgrößen" - und festen Größen. Die festen Größen sind die Entwurfsdaten, wobei eine Teilmenge dieser Daten die vorab festgelegten Entwurfsforderungen sind.

Entwurfsparameter



Abbildung 11: Einteilung der Entwurfsparameter

Die entworfenen Luftschiffe unterscheiden sich in den Entwurfsgrössen. Diese Grössen können unabhängig voneinander geändert werden. Z.B. sind dies die Anzahl der Aktuatoren und deren Lagenzahl, der Skalierungsfaktor, die Flugzeit oder die Geschwindigkeit.

Die Entwurfsdaten können nicht variiert werden. Beispiele sind die Leistungsgewichte der Akkumulatoren, die meteorologischen Bedingungen, Festigkeit und Dichte von Karbon oder Glasfaser verstärkten Kunststoffen im Innengerüst.

Die Entwurfsforderungen werden vorab definiert und im Pflichtenheft festgehalten. Dies sind die Mindestgeschwindigkeit u = 1m/s, Traggas Helium, Einsatz innerhalb großer Räume und Hallen, Gestalt und Bewegung erlauben die Assoziation zum Fisch, Wiederverwendbarkeit, keine Nutzlast, Verwenden von EAP-Aktuatoren, eine Länge von etwa 6-8 m.

Entwurfslösungen

Im Laufe des Entwurfsprozesses nimmt die Informationsmenge zu. Zur Strukturierung des Gesamtsystems Luftschiff bietet sich eine Aufteilung des Gesamtmodelles in Teilmodelle an. Die Teilmodelle geben über Schnittstellen Daten untereinander weiter. Die folgende Grafik veranschaulicht die Teilmodelle, wie sie für dieses Projekt gewählt wurden – wobei aber auch viele andere Formen der Beschreibung möglich wären.

	Geol	metrie
Schub		Widerstand
Tragkraft		Gewicht
	Struktur	Flugleistungen

Abbildung 12: Unterteilung des Gesamtmodelles in Teilmodelle

Die Verknüpfungen zwischen den Entwurfsgrößen, den Teilmodellen und den Entwurfslösungen kann folgendermaßen zusammengefasst werden.



Abbildung 13: Verknüpfung der Entwurfsgrößen, der Teilmodelle und der daraus folgenden Entwurfslösung

Die Teilmodelle werden im Kapitel 3 im Einzelnen vorgestellt.

3 Entwurf des Modell-Luftschiffes "Airfish"

3.1 Geometrie

Die Größe des Luftschiffes ist ein Maß für das Volumen und somit der Menge an Traggas. Die Form des Luftschiffes beeinflusst den Widerstand und das Erscheinungsbild.

Für das Luftschiff-Projekt wurde ein "bauchiges" Längen-Breiten-Verhältnis von 4 gewählt, um viel Volumen für das Traggas bereitzustellen. Damit die Assoziation zur eleganten Fischform aufrechterhalten bleibt, wurde die Gestalt vom Industriedesigner Raoul Rüegsegger entworfen. Wichtig beim Design war neben den Abmaßen und dem Hüllenschnitt auch die Frage, welche Auswirkung der Innendruck auf die Form hat. Da nur konvexe Formen bei Druck von innen möglich sind, beim Original, der Forelle, dagegen auch konkave Gebiete vorhanden sind. Die Breiten- und Höhenkontur für den Design-Fall, welcher Symmetrie von oben-unten und links-rechts voraussetzt, lauten:

$$y(x,s) = \left(0,0028 \left(\frac{x}{s}\right)^4 - 0,0178 \left(\frac{x}{s}\right)^3 - 0,0914 \left(\frac{x}{s}\right)^2 + 0,5858 \left(\frac{x}{s}\right) + 0,0370\right) \cdot s \quad (3-1)$$

$$z(x,s) = \left(0,0058\left(\frac{x}{s}\right)^3 - 0,1385\left(\frac{x}{s}\right)^2 + 0,6562\left(\frac{x}{s}\right) + 0,0734\right) \cdot s$$
(3-2)

x Variable entlang der Längsachse

s Skalierungsfaktor

Um variabel in der Tragkraft und damit im Volumen zu sein, wurde der Skalierungsfaktor s eingeführt. Volumina skalieren mit s³, Flächen und Massen mit s², Längen skalieren mit s. Dies ist eine pragmatische Herangehensweise. Sie wird auf jedes Bauteil angewendet, hat aber bei Verkleinerung oder Vergrößerung um eine Größenordnung ihre Grenzen. Bei Entwurf eines sehr kleinen oder sehr großen Luftschiffes muss die Auswirkung der Skalierung detaillierter betrachtet werden - eine generelle Fragestellung im Luftfahrzeugentwurf.

Für den Design-Fall wurden weiterhin das Volumen des Rumpfes V_{Rumpf_Design} , die Rumpfoberfläche A_{Rumpf_Design} , das Volumen und die Oberfläche der Flosse V_{Flosse_Design} und A_{Flosse_Design} festgelegt.

Ein weiterer Entwurfsparameter ist der Volumenfaktor $f_{Volumenfaktor}$. Er ist ein Maß dafür, wie viel Volumen tatsächlich für das Traggas zur Verfügung steht. Um den Rumpf mit Hilfe der

EAP-Aktuatoren verformen zu können, ist eine Taillierung an den Gelenken notwendig. Dies hat zwei Vorteile: Die Drehung an den Gelenken findet mit geringerem Kraftaufwand statt. Und die flächige Reibung der Aktuatoren auf der Hülle wird auf ein Minimum beschränkt. Nachteil ist der Verlust an Volumen für das Traggas. Durch die Taillierung nimmt auch die Oberfläche zu. Dies drückt sich im Flächenfaktor $f_{Flächenfaktor}$ aus.



Abbildung 14: Größen im Teilmodell Geometrie

CAD-Modellierung mit CATIA V5

Mit CAD-Programmen, wie dem hier verwendeten und in der Industrie verbreiteten Programm CATIA V5, ist eine parametrisch-assoziative Modellierung möglich [19].

"Parametrisch" bedeutet, dass die Geometrie von Bauteilen über Parameter beeinflusst wird. Diese Parameter sind mit im Modell gespeichert und erlauben ein nachträgliches Ändern. Beispiele sind Radien, Längen, Winkel oder Skalierungsfaktoren.

"Assoziativ" bedeutet, dass Abhängigkeiten zwischen Bauteilen erstellt werden. So folgt z.B. die Innenstruktur der Hüllenkontur des Luftschiffes. Wird die Hüllenkontur geändert, so passt sich die Innenstruktur automatisch an.

Um diese Möglichkeiten nutzen zu können, müssen im Vorhinein die Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen zusammengetragen werden. Bauteile sind zu strukturieren, d.h. Teilbereiche sind zu definieren. Sich wiederholende Geometriedetails sind zu vereinheitlichen, wie z.B. die Radien von Ausrundungen. Wiederholteile sind einmalig zu konstruieren und Teilevarianten jeweils abzuleiten. Die Geometrie entsteht dann direkt auf der Basis der eingeführten Parameter. Die Parameter haben eine Dimension, z.B. Länge in Meter oder Winkel in Grad, und einen Wert. Die Werte lassen sich zuweisen als:

- diskrete Werte
- mathematische Formeln
- Einträge in Wertetabellen

Auf der folgenden Abbildung ist der Airfish dargestellt mit EAP-Aktuatoren an den Seiten zur Verformung des Rumpfes und am Scharnier zur Bewegung der Flosse. Blau sind die Akku-, die Steuer- und die Hochspannungseinheit. Die Hülle hat zwei Taillierungen an den Stellen, die durch die Aktuatoren belegt sind, um die Drehbewegung des Rumpfes zu vereinfachen.



Abbildung 15: Seitenansicht des Airfishs

Auf der nächsten Abbildung ist die linke Seite der Airfish-Hülle transparent. Zu sehen ist das Innengerüst, das aus den senkrechten Karbonstäben und den Sandwichstrukturen oben, unten und hinten besteht.



Abbildung 16: Geöffnete Seitenansicht mit Innenstruktur

3.2 Tragkraft

Die Tragkraft zieht das Luftschiff entgegen der Erdanziehung nach oben. Die Tragkraft wird oft als Auftrieb bezeichnet und kann zwei Ursachen haben. Der aerodynamische Auftrieb wird mithilfe von Tragflächen und Rümpfen erzeugt, die zur Luft eine Relativgeschwindigkeit besitzen. Durch die besondere Form der Flügel, ihr Einbauwinkel am Rumpf sowie den Anstellwinkel von Flügel und Rumpf entstehen Unterdruckgebiete. Die Gesamtheit der Unterdrücke bildet eine nach oben gerichtete Sogkraft . Dieser Auftrieb ist von der Fluggeschwindigkeit abhängig und damit an den Schub gekoppelt.

Aerostatischer Auftrieb entsteht durch die Verdrängung von Luft durch ein Medium mit geringerer Dichte. Aus dem Gewichtsunterschied dieser beiden Gase resultiert eine Tragkraft (Archimedisches Prinzip). Die Tragkraft kann genutzt werden, eine Struktur und Nutzlast zu tragen. Dabei sind Tragkraft und Schubkraft voneinander getrennt, was für spezielle Anwendungen von Vorteil ist.

Das Teilmodell Tragkraft hat folgende Eingangs- und Ausgangsgrößen:





Die Tragkraft ergibt sich aus der Differenz der Massen der verdrängten Luft und dem stattdessen vorhandenen Traggas, welches im Falle des Airfishes Helium ist:

	$F_T = F_{G_Luft} - F_{G_He}$	(3-3)
	$F_{T} = (\rho_{Luft} - \rho_{He}) \cdot V_{He} \cdot g$	(3-4)
F _T	Tragkraft	
F _{G_Luft}	Gewicht der Luft	
F _{G_He}	Gewicht des Heliums	
ρ_{Luft}	Dichte der Luft	
ρ_{He}	Dichte des Heliums	
V _{He}	Volumen des Traggases Heli	um
g	Erdbeschleunigung	

Das Nick- und das Rollmoment folgen aus der Tragkraft und der Position des Auftriebspunktes:

$$M_T = F_T \cdot x_T \qquad (3-5)$$
$$M_{Rollmoment T} = F_T \cdot z_T (3-6)$$

 $M_T \qquad \mbox{Nickmoment um die y-Achse, verursacht durch das Traggas } \\ M_{Rollmoment_T} \qquad \mbox{Rollmoment um die x-Achse, verursacht durch das Traggas }$

3.3 Gewicht

Aus den Massen und Positionen der einzelnen Baugruppen ergeben sich das Gewicht des Luftschiffes wie auch das Nick- und Rollmoment.

Das Teilmodell Gewichtskraft hat folgende Eingangs- und Ausgangsgrößen:



Abbildung 18: Größen im Teilmodell Gewichtskraft

Die einzelnen Komponenten des Luftschiffes sind:

•	Hülle:	Helium dichte, leichte Folie, die gut zu bearbeiten ist, z.B.
		Nonex® mit einem Masse-zu-Flächen-Verhältnis
		Vm_zu_A_Nonex
•	Rumpfaktuatorik:	EAP-Aktuatoren, die auf beiden Seiten der
		Rumpfoberfläche angebracht sind, haben eine wählbare
		Anzahl von Lagen nLagen_EAP_Rumpf, eine wählbare Anzahl
		von Aktuator-Flächen in der Höhe n _{EAP_in_Höhe} und in der
		Länge n _{EAP_in_Länge}
•	Struktur:	Innenstruktur des Rumpfes bestehend aus Sandwich-
		Strukturen, Karbonstäben $n_{Carbonstäbe_Rumpf}$ und Gelenken
		n _{Gelenke_Rumpf}
•	Scharnier:	EAP-Aktuatoren auf beiden Seiten der Flosse mit einer
		wählbaren Anzahl von Lagen n _{Lagen_EAP_Scharnier}
•	Flossen am Rumpf:	zwei kleine Flossen zur Steuerung der Höhe am vorderen
		Teil des Rumpfes
•	Flosse:	Schwanzflosse; Folie bespanntes Fachwerk
•	Akkueinheit:	liefern die Energie, Masse entsprechend Verhältnis Masse
		zu Kapazität m/CAkku und durch Verlagerung der Position
		Einstellen des Nickmomentengleichgewichtes

- Steuereinheit: steuert die Aktuatoren an
- Hochspannungseinheit: transformiert die Akkuspannung in Hochspannung
- Kabel: el. Verbindung zwischen Akku-, Steuer- und Hochspannungseinheit sowie den EAP-Aktuatoren
 Trimmasse: Masse zum Ausgleichen von Tragkraft mit der Gewichtskraft
- Diverse Zusatzmassen: kleine Zusatzmassen wie Schnüre, Halteschlaufen etc.

Die Gesamtmasse ist die Summe der Massen der Komponenten:

$$m_{ges} = \sum_{i=1}^{n} m_i$$
 (3-7)

Das Rollmoment und das Nickmoment einer Komponente ergeben sich aus Masse m_i, Erdbeschleunigung g und der Position in x-Richtung x_i bzw. z-Richtung z_i:

$$M_{i} = m_{i} \cdot g \cdot x_{i}$$
(3-8)
$$M_{Rollmoment_{i}} = m_{i} \cdot g \cdot z_{i}$$
(3-9)

Das Gesamtrollmoment und -nickmoment sind die Summen der einzelnen Momente:

$$M_{ges} = \sum_{i=1}^{n} M_{i} \qquad (3-10)$$
$$M_{Rollmoment_ges} = \sum_{i=1}^{n} M_{Rollmoment_i} (3-11)$$

3.4 Schub

Der Vortrieb des Luftschiffes wird durch den bionischen Antrieb ermöglicht, der Schub produziert.

Der effiziente Antrieb von Fischen wurde bereits mehrmals kopiert zur Fortbewegung im Wasser (Fisch-Roboter, U-Boot). Im vorliegenden Projekt wird die Fischbewegung an einem Modellluftschiff umgesetzt. Die wellenförmige Bewegung des Körpers soll dabei mittels "künstlicher Muskeln", genauer dielektrischen Elastomer- Aktuatoren (DEA) erzeugt werden. DEA sind elastische Kondensatoren, welche mit Hochspannung geladen werden und sich dadurch in der Fläche ausdehnen. Sie gehören zur Gruppe der Elektroaktiven Polymere (EAP).



Abbildung 19: Funktionsprinzip EAP-Aktuator [28]

Das Modellluftschiff dient dabei als Technologieplattform für diese neuen Materialien. Durch alternierendes Aufladen von paarweise angeordneten Aktuatoren nach dem Agonist-Antagonist- Prinzip wird eine Biegebewegung des Luftschiffes erzeugt, die sich aus einer Translation der hinteren Rumpfregion und einer Rotation der Flosse zusammensetzt, dem so genannten Biegedrehschlag.

Die EAP-Aktuatoren sind auf der Rumpfoberfläche im hinteren Teil paarweise auf der linken und der rechten Seite befestigt und verformen damit den Rumpf. Weiterhin befinden sich paarweise EAP-Aktuatoren am Ende des Rumpfes, dem Flossenwurzelpunkt. Sie lenken die Flosse oszillierend nach links und rechts aus. Dadurch entstehen periodisch Wirbel, die ortsfest bleiben und den Luftschiffkörper vorantreiben – es entsteht eine inverse Kármánsche Wirbelstraße.



Abbildung 20: Draufsicht auf den Airfish: Position und Wirkung der Aktuatoren

Künstliche Muskeln wurden bereits im Luftschiff C 20 genutzt, um die Seiten- und Höhenruder auszulenken. Die EAP-Aktuatoren sind in ihrem Aufbau und ihrer Wirkungsweise z.B. in [1, 2, 3, 20] beschrieben.



Abbildung 21: Modellluftschiff C 20 der EMPA und TU Berlin mit EAP-Aktuatoren zur Auslenkung der Seiten- und Höhenruder (schwarz innerhalb der weißen Leitwerksflächen)

Das Teilmodell Schubkraft hat folgende Eingangs- und Ausgangsgrößen:



Abbildung 22: Größen am Teilmodell Schubkraft

Dabei erfährt das Ende des Rumpfes, also die Schwanzflossenwurzel, eine Translation, Dies ist eine seitliche Bewegung von der Symmetrieebene weg. Das geschieht, da sich die EAP-Aktuatoren auf der einen Rumpfseite in der Länge ausdehnen durch Anlegen von elektrischer Spannung und auf der anderen Rumpfseite sich die Aktuatoren aufgrund ihrer mechanischen Vorspannung verkürzen.

Zur gleichen Zeit vollführt die Flosse an der Schwanzflossenwurzel eine Rotation um den Winkel θ , auch bezogen auf die Symmetrieebene. Beide Bewegungen werden sinusförmig ausgeführt. Elektronisch ist die Ansteuerung der künstlichen Muskeln so ausgelegt, dass Translation und Rotation einzeln und zeitversetzt, also mit einer Phasenverschiebung ψ , angesprochen werden können.

Aus Translation und Rotation zusammen ergibt sich die Auslenkung der Schwanzflossenendkante. Die doppelte Amplitude der Flossenendkante ist die Peak-to-Peak-Amplitude A_{PP} . Diese Amplitude geht neben der Geschwindigkeit und der Strouhal-Zahl St_{App} in die Berechnung der Schlagfrequenz ein.

$$f = \frac{u \cdot St_{App}}{App} \tag{3-12}$$

Dabei ist die Strouhal-Zahl vom Vorbild der Forelle entnommen. Grund dafür ist die Ähnlichkeit in der Bewegung einerseits und andererseits der hohe Vortriebswirkungsgrad wie wir ihn in den Windkanalversuchen an der ETH-Zürich nachweisen konnten [22].

Der Schub wird durch Auslenkung der Muskeln erzeugt, wodurch ein Biegedrehschlag verwirklicht wird. Dieser kann durch eine Kombination von einer Translation und einer Rotation beschrieben werden. Deshalb werden die beiden Bewegungen im Folgenden näher erklärt.

Translation

Die translatorische Auslenkung h_{max} der Flossenwurzel ist abhängig von der Dehnung der Muskeln ε . Ist die Ursprungslänge der Aktuatoren am Rumpf L_{EAP_Rumpf} , so verlängern sie sich durch die elektrische Aktivierung auf $(1+\varepsilon)$ · L_{EAP_Rumpf} . Der hintere Teil des Rumpfes mit der Flossenwurzel dreht sich dabei um den Winkel $\alpha_{Auslenkung}$. Die Rechnung geht dabei vereinfachend von einem Gelenk im Rumpf aus. Bei mehreren Rumpfgelenken werden sie zu einem mittleren Rumpfgelenk zusammengefasst, da sie auch gleichzeitig von der Elektronik angesprochen werden und somit die Dehnung synchron ausführen.



Abbildung 23: Auslenkung des Rumpfes: Translation

Der hintere Teil des Rumpfes bewegt sich um die Strecke $a_{Auslenkung}$ um den Winkel $\alpha_{Auslenkung}$. Dieser Winkel berechnet sich über mehrere Zwischenschritte (siehe Anhang), wobei die Dehnung der Aktuatoren ϵ mit eingeht. Die Strecke L_{Auslenkung} ist die Distanz vom Gelenk innerhalb des Rumpfes zum Flossenwurzelpunkt am Ende des Rumpfes.



Abbildung 24: Translation h_{max} in Abhängigkeit vom Auslenkwinkel a_{Auslenkung} des Rumpfendes

Die Auslenkung a_{Auslenkung} ist somit:

$$a_{Auslenkung} = 2 \cdot L_{Auslenkung} \cdot \sin \frac{\alpha_{Auslenkung}}{2}$$
(3-13)

Daraus ergibt sich die maximale und die momentane Translation zu

$$h_{\max} = a_{Auslenkung} \cdot \cos \frac{\alpha_{Auslenkung}}{2}$$
(3-14)

$$h = h_{\max} \cdot \sin(\varpi \cdot t) \tag{3-15}$$

Dabei ist ω die Kreisfrequenz der Bewegung, die aus der Frequenz, bzw. der Periodendauer, folgt:

$$\varpi = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \tag{3-16}$$

Rotation

Der Rumpf wird abgeschlossen durch die Endplatte, die eine Breite von 2'b besitzt. Die Flosse ist drehbar am Flossenwurzelpunkt auf der Endplatte befestigt. Die EAP-Aktuatoren reichen von der Außenkante der Endplatte bis zu der Stelle auf der Flosse, wo sie in einem Abstand von $L_{EAP_Anbringung}$ angebracht sind.



Abbildung 25: Auslenkung der Flosse durch EAP-Aktuatoren

Die Flosse wird durch EAP-Aktuatoren ausgelenkt. Von der ursprünglichen Länge $L_{EAP_Scharnier}$ verlängern sie sich auf $(1+\epsilon)$ · $L_{EAP_Scharnier}$. Aus der Dehnung ϵ ergibt sich der maximale Auslenkwinkel der Flosse $\theta_{max_nur_Flosse}$ bezogen auf die Senkrechte zur Endplatte (Rechnung siehe Anhang).

Zwischen der Translation h und der Flossenauslenkung θ wird beim Flug eine Phasenverschiebung ψ eingestellt, wenn mit konstanter Geschwindigkeit geflogen wird. Ein typischer Wert sind -72° [12]. Das negative Vorzeichen drückt aus, dass die Rotation der Translation folgt.

$$\psi = \frac{-2\pi}{5} = -72^{\circ} \tag{(3-17)}$$

Der Momentanwert des Auslenkwinkels der Flosse ergibt sich aus der Kreisfrequenz ω , der Zeit t und der Phasenverschiebung ψ :

$$\theta_{nur_Flosse} = \theta_{\max_nur_Flosse} \cdot \sin(\varpi \cdot t + \psi)$$
(3-18)

Bezogen auf die Symmetrieebene des Airfishes nimmt die Flosse den Winkel ein, der sich aus der Summe aus der reinen Flossenauslenkung ergibt θ_{nur_Flosse} sowie aus der Rumpfauslenkung bei der Translation $\alpha_{Auslenkung}$:

$$\theta = \theta_{nur_Flosse} + \alpha_{Auslenkung} \tag{3-19}$$

Die Auslenkung der Flosse y_{Flosse} erfolgt sinusförmig mit dem Winkel θ :

$$y_{Flosse} = L_{Flosse} \cdot \sin\theta \tag{3-20}$$



Abbildung 26: Ausschlag der Flossenendkante aus Translation und Rotation zusammen

Die maximale Auslenkung der Flossenendkante ergibt sich aus den Auslenkungen durch Translation und Rotation:

$$y_{\text{max}_Flossenendkant} = h + y_{Flosse}$$
 (3-21)

Bei der Phasenverschiebung $\psi = -2\pi/5$ liegt das Maximum der Flossenendkantenauslenkung zwischen dem Zeitpunkt, an dem die Translation maximal ist und dem Zeitpunkt, an dem die Auslenkung der Rotation maximal ist.



Abbildung 27: Translation h bezogen auf die max. Translation h_{max} , Rotation θ und Auslenkung der Flossenendkante y_{Flossenendkante}, bezogen auf die maximale Auslenkung der Flossenendkante y_{max_Flossenendkante}, bei einer Phasenverschiebung $\psi = -2\pi/5$

Der Schub ergibt sich somit aus der Dehnung der EAP-Aktuatoren. Durch die Gelenke innerhalb des Rumpfes und die Anbringung der Flosse am Flossenwurzelpunkt auf der Endplatte sind die Winkel $\alpha_{Auslenkung}$ für die Translation und θ_{nur_Flosse} für die Rotation definiert.

An der EMPA wurden EAP-Aktuatoren bezüglich Dehnung ε , Auslenkwinkel $\alpha_{Auslenkung}$ und erzeugter Kräfte F_{EAP} vermessen [20]. Dabei wurden unterschiedliche Lagenzahlen an EAP n_{Lagen} , und unterschiedliche Längen L_{EAP} und Höhen H_{EAP} verwendet und diese bezogen, so dass eine spezifische Kraft der Aktuatoren f_{Aktor} als Funktion des Auslenkwinkels angegeben werden kann.

Daraus wurden folgende empirischen Gleichungen für die Aktuatorenkraft pro Höhe des Aktuators gewonnen:

$$f_{Aktor_Rumpf} = -4.34 \cdot abs(\alpha_{Auslenkung}) + 3.22 \tag{3-22}$$

$$f_{Aktor_Scharnier} = -4.34 \cdot abs(\theta_{nur_Flosse}) + 3.22$$
(3-23)

Mithilfe der EAP-Lagenzahl nLagen_EAP und der Höhe der Aktuatoren H_{EAP} wird die Kraft bestimmt, die die künstlichen Muskeln aufbringen:

$$F_{Aktor_Rumpf} = n_{Lagen_EAP_Rumpf} \cdot f_{Aktor_Rumpf} \cdot H_{EAP_Rumpf}$$
(3-24)
$$F_{Aktor_Scharnier} = n_{Lagen_EAP_Scharnier} \cdot f_{Aktor_Scharnier} \cdot H_{EAP_Scharnier}$$
(3-25)

Die Kraft der Aktuatoren ist die Summe beider Anteile:

$$F_{Aktor_Rumpf} + F_{Aktor_Scharnier}$$
(3-26)

Diese erzeugte Kraft teilt sich auf in die Anteile Schub F_S und Seitenkraft $F_{Seitenkraft}$. Das Verhältnis dieser beiden Kräfte ist etwa 6, wie Auswertungen der Windkanalmessungen ergab [24]. Somit beträgt der Schub etwa:

$$F_{Schub} = -\frac{F_{Aktoren}}{7} \tag{3-27}$$

3.5 Widerstand

Bei bewegten Körpern innerhalb eines Fluids wirkt die Widerstandskraft der Schubkraft entgegen. Der Widerstand hängt von der Größe, der Form und der Oberflächenbeschaffenheit des Luftschiffes ab wie auch von der Vortriebsgeschwindigkeit und den atmosphärischen Bedingungen.



Abbildung 28: Größen des Teilmodelles Widerstandskraft

Die Widerstandsberechnung erfolgt nach der Methode von Hoerner [25]. Diese Methode zeigt trotz ihrer Einfachheit gute Ergebnisse [17]. Sie führt die Berechnung auf eine angeströmte ebene Platte zurück. Für die Korrektur wird das mittlere Dickenverhältnis herangezogen. Ausgangspunkt ist die längenbezogene Reynoldszahl, die von der Viskosität der Luft abhängt. Die dynamische Viskosität der Luft lässt sich mit der Sutherland-Formel bestimmen

$$\mu_{Luft} = \frac{1,458 \cdot 10^{-6} \cdot T_{Luft}^{1,5}}{T_{Luft} + 110,4}$$
(3-28)

T_{Luft} Lufttemperatur in Kelvin

Aus der dynamischen folgt die kinematische Viskosität durch Division mit der Luftdichte:

$$V_{Luft} = \frac{\mu_{Luft}}{\rho_{Luft}}$$
(3-29)

Für die längenbezogene Reynoldszahl werden die Geschwindigkeit in der Längsrichtung, die Gesamtlänge des Rumpfes des Luftschiffes und die kinematische Viskosität herangezogen.

$$\operatorname{Re}_{L_{Rumpf}} = \frac{u \cdot L_{Rumpf}}{v_{Luft}} \quad (3-30)$$

u Vortriebsgeschwindigkeit des Luftschiffes

L_{Rumpf} Rumpflänge

 v_{Luft} kinematische Viskosität der Luft

Hier wird von der Analogie zur angeströmten ebenen Platte ausgegangen: Der Reibungswiderstand der Oberfläche des Luftschiffes ist gleich der einer ebenen Platte gleicher Größe. Aus der längenbezogenen Reynoldszahl ergibt sich der Reibungsbeiwert der ebenen Platte

$$c_{F_Platte_Rumpf} = \left(\frac{1}{3,46 \cdot \log_{10}\left(\operatorname{Re}_{L_Rumpf}\right) - 5,6}\right)^2$$
(3-31)

Dann ist der Widerstand einer Platte mit einer Fläche, die der Oberfläche des Rumpfes entspricht:

$$F_{Widers \tan d_Platte_Rumpf} = q \cdot c_{F_Platte_Rumpf} \cdot A_{Rumpf}$$
(3-32)

Dabei ist q der Staudruck den das Luftschiff an der Luftschiff-Nase bei der Vorwärtsgeschwindigkeit u im Staupunkt erzeugt:

$$q = \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot u^2 \tag{3-33}$$

Nach Hoerner [17] kann der Widerstand eines Rotationskörpers abgeschätzt werden:

$$F_{Widers \tan d_Rumpf} = F_{Widers \tan d_Platte_Rumpf} \cdot (1+1,5\delta_{Rumpf}^{3/2} + 7\delta_{Rumpf}^3)$$
(3-34)

Diese Gleichung berücksichtigt den Einfluss des Druckwiderstandes. Der Airfish ist etwas höher als breit, weicht also von der Rotationsform ab und hat einen etwas höheren Druckwiderstand, was aber wieder ausgeglichen wird, da sich an den Rumpf die Flosse anschließt. Dabei ist δ_{Rumpf} das Dicken-Längen-Verhältnis des Rumpfes

$$\delta_{Rumpf} = \frac{H_{Rumpf_max} + B_{Rumpf_max}}{2 \cdot L_{Rumpf}}$$
(3-35)

 $\begin{array}{ll} H_{Rumpf_max} & max. \ Rumpfhöhe \\ B_{Rumpf_max} & max. \ Rumpfbreite \end{array}$

Die Flosse selbst wird als ebene Platte angenähert:

$$\operatorname{Re}_{L_{Flosse}} = \frac{u \cdot L_{Flosse}}{v_{Luft}}$$
(3-36)

$$c_{F_Platte_Flosse} = \left(\frac{1}{3,46 \cdot \log_{10} \operatorname{Re}_{L_Flosse} - 5,6}\right)^2$$
(3-37)

$$F_{Widers \tan d_Flosse} = q \cdot c_{F_Platte_Flosse} \cdot A_{Flosse}$$
(3-38)

Anbauten und Interferenzwiderstände machen etwa 30% des Widerstandes des Rumpfes aus [17].

$$F_{Widers \tan d Anbauten} = 0,30 \cdot F_{Widers \tan d Rumpf}$$
(3-39)

Der Gesamtwiderstand des Luftschiffes ergibt sich aus der Summe dieser drei Anteile:

$$F_{W} = F_{Widers \tan d Rumpf} + F_{Widers \tan d Flosse} + F_{Widers \tan d Anbauten}$$
(3-40)

3.6 Struktur

Das Luftschiff wird in der halbstarren Bauweise gebaut. Die Hülle wird durch den Innendruck prall gehalten und ein Innengerüst nimmt die Punktlasten der Anbauten und der Flosse sowie die Kräfte aus den EAP-Aktuatoren auf. Die Struktur hat mindestens ein Gelenk.



Abbildung 29: Größen im Teilmodell Struktur

Da der Innendruck p_{innen} radial auf die Hülle wirkt, würde sie eine Kugelform oder bei lang gestrecktem Hüllenzuschnitt Zylinderform annehmen. Angestrebt ist eine Form, die höher ist als sie breit ist, um eine Lateralfläche für den Antrieb, ähnlich wie bei der Forelle, zu erhalten.

Das Verhältnis von Höhe zu Breite beträgt nach dem Design 1,3: 1. Um diese von der Kreisform abweichende Gestalt zu erzeugen, hat das Innengerüst die Aufgabe, die Hülle in der Symmetrieebene zu strecken. Es entsteht in der y-z-Ebene eine bikonvexe Linse.



Abbildung 30: Linsengestalt in der y-z-Ebene durch Innendruck und Struktur

Die Membrankräfte sind mit den Druckkräften innerhalb der Struktur im Gleichgewicht. Die Struktur besteht aus Sandwichmaterial und Karbonstäben.

Glasfasersandwich (GFK) und Kohlefasersandwich (CFK) laufen auf der Bauch- und der Rückenseite vom Bug bis zur Endplatte. Die Endplatte ist ebenfalls aus CFK. Kohlefasersandwich ist stabiler aber auch schwerer, deshalb wird es an Gebieten mit geringerer Belastung wie im Bug durch GFK ersetzt. Zur Gewichtsersparnis haben die Sandwichplatten Aussparungen. Durch Zugbänder wird ein Durchbiegen verhindert.



Abbildung 31: Sandwichstruktur aus GFK (hell) und CFK (dunkel) mit Zugbändern und Aufnahmehülsen für Karbonstäbe

Die Sandwichplatten besitzen Aufnahmehülsen für die vertikalen Karbonstäbe. Die Karbonstäbe sind parallel angeordnet und ihre Anzahl ist $n_{Carbonstäbe}$. Der Abstand zwischen den Karbonstäben L_{Abstand_Carbonstäbe} ist:

$$L_{Abstand_Carbonstäb} = \frac{L_{Rumpf}}{n_{Carbonstäb}}$$
(3-41)

So dass die spezifische Kraft auf einen Karbonstab lautet:

$$f_{Carbonstab} = \frac{F_{Carbonstab}}{L_{Abs \tan d_{-}Carbonstäb}}$$
(3-42)

Das Gleichgewicht der spezifischen Kräfte von Innenstruktur und Membran lautet:



Abbildung 32: Gleichgewicht aus Linienlast n_z und spezifischer Druckkraft f_{Carbonstab} auf einen Karbonstab in der y-z-Ebene

Der Winkel acarbonstab ergibt sich aus geometrischen Betrachtungen an einem Kreissegment:

$$\alpha_{Carbonstab} = 4 \cdot \arctan\frac{B}{H}$$
 (3-44)

Der Winkel $\alpha_{Carbonstab}$ ist von der Position x und dem Skalierungsfaktor s abhängig, da die Breite B und die Höhe H eine Funktion von x und s sind.

Die Linienlast in z-Richtung n_z am Umfang des Äquators $U_{Aquator}$ entsteht durch den Innendruck p_{innen} , der auf die Äquatorfläche $A_{Aquator}$ wirkt.





$$n_{z} = \frac{p_{innen} \cdot A_{\ddot{A}quator}}{U_{\ddot{A}quator}}$$
(3-45)

Die Linienlast n_z ist ein Wert für den gesamten Rumpf. Dies ist der größte annehmbare Wert gemäß der "Kesselformel" also eine konservative Annahme. Die Äquatorfläche A_{Äquator} und der Umfang des Äquators U_{Äquator} ergibt sich aus geometrischen Betrachtungen, wenn man die Äquatorfläche in kleine Streifen teilt, z.B. $n_{Flächenstücke} = 50$. Aus der Breitenkontur y(x,s) und der Länge $\Delta x = L_{Rumpf} / (s n_{Flächenstücke})$ folgen die Flächen der Streifen, ihre Aufsummation ergibt die Fläche. Und die Kantenlängen der Streifen bilden in ihrer Summe den Umfang. Aus den gewonnenen Größen kann somit die Kraft auf einen Karbonstäbe $n_{Carbonstäbe}$ ermittelt

werden F_{Carbonstab}(x, s, n_{Carbonstabe}).

Diese Kraft muss kleiner sein als die kritische Knickkraft nach Euler F_{Euler_Carbonstab} [26].

$$F_{Carbonstab} < F_{Euler_Carbonstal}$$
(3-46)

Die Karbonstäbe sind oben und unten in der Sandwichstruktur eingebaut. Die Sandwichstruktur genügt aber nicht der vereinfachten Annahme der Festlager: Zug, Druck und Momente beliebiger Größe aufnehmen zu können. Es wird deshalb vom Euler-Knickfall 2 ausgegangen mit einem Festlager und einem Loslager, bei der die Knicklänge gleich der Länge der Karbonstäbe ist. Das ist konservativ angenommen, erlaubt aber dadurch, Schwächungen des Knickstabes durch Torsion mit aufzunehmen.

$$F_{Euler_Carbonstab} = \pi^2 \cdot \frac{E_{Carbon} \cdot I_{Carbonstab}}{L_{Carbonstab}^2}$$
(3-47)

E_{Carbon}

Elastizitätsmodul des Karbonmaterials der Stäbe

I_{Carbonstab} Flächenträgheitsmoment eines Karbonstabes

L_{Carbonstab} Länge eines Karbonstabes

Der Elastizitätsmodul des Karbons beträgt $E_{Carbon} = 1,1.10^5 \text{N/mm}^2$ [27]. Das Flächenträgheitsmoment eines Rohres mit Außenradius R_A und Innenradius R_I beträgt:

$$I_{Carbonstab} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(R_A^4 - R_I^4 \right) \tag{3-48}$$

Karbonstäbe als Röhren haben im Vergleich zu einem Vollstab aus dem gleichen Material und bei gleicher Masse ein größeres Flächenträgheitsmoment und damit eine größere Knickkraft (siehe Anhang). Damit bieten sich Karbonstäbe in Röhren-Form im Luftschiff an. Die Karbonstäbe reichen von der Unterseite bis zur Oberseite des Luftschiffes. Die Länge eines Karbonstabes ergibt sich deshalb aus seiner x-Position und der Höhenkontur:

$$L_{Carbonstab} = 2 \cdot z(x, s) \tag{3-49}$$

3.7 Flugleistung

Bei Vorgabe der Kapazität und der Anzahl der Akkumulatoren, der gewünschten Geschwindigkeit und dem aerodynamischen Widerstand des Luftschiffes können die Leistung und daraus die Flugzeit und die Reichweite bestimmt werden. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen des Teilmodelles Flugleistung lauten:



Abbildung 34: Größen im Teilmodell Flugleistung

Aus dem Teilmodell Widerstand ist die Widerstandskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bekannt. Bei gleichförmiger Bewegung, also Geradeausflug mit konstanter Geschwindigkeit, muss die Schubkraft gleich der Widerstandskraft sein. Es kann auf die fluiddynamische Leistung geschlossen werden, die benötigt wird, das Luftschiff voranzutreiben:

$$P_{fluiddynamisch} = F_{Widerstan\,d} \cdot u \tag{3-50}$$

F_{Widerstand} aerodynamischer Widerstand des Luftschiffesu Vortriebsgeschwindigkeit des Luftschiffes

Die Muskeln verformen den Rumpf und bewegen die Flosse, um das Luftschiff zu bewegen. Die dabei auftretenden Verluste durch Wirbelbildung und Wärmeerzeugung an den Gelenken und der verformten Hülle werden im fluiddynamischen Wirkungsgrad $\eta_{\text{fluiddynamisch}}$ zusammengefasst.

$$P_{EAP_mech} = \frac{P_{fluiddynamisch}}{\eta_{fluiddynamisch}}$$
(3-51)

In den Muskeln selber treten Verluste auf bei der Umwandlung der elektrischen Leistung in mechanische Leistung der Verformung. Dies beschreibt der Wirkungsgrad der EAP-Aktuatoren η_{EAP} :

$$P_{EAP_el} = \frac{P_{EAP_mech}}{\eta_{EAP}}$$
(3-52)

In den Akkumulatoren wird die Ausgangsspannung im niedrigen Volt-Bereich, z.B. Gleichspannung 11V, bereitgestellt. Durch Hochspannungsgeneratoren wird auf mehrere

tausend Volt Gleichspannung transformiert. Der Strom wird über Kabel zu den EAP-Aktuatoren geführt. Auch treten geringfügige Verluste in der Steuerelektronik auf. Zusammen machen sie den elektrischen Wirkungsgrad η_{el} aus, was zu einer mittleren elektrischen Leistung führt:

$$P_{el_mittel} = \frac{P_{EAP_el}}{\eta_{el}}$$
(3-53)

Die zeitliche Variation der Größen wird durch den Wirkfaktor nel charakterisiert.

$$P_{el_max} = P_{el_mittel} \cdot n_{el} \tag{3-54}$$

Der benötigte Strom aus den Akkumulatoren I_{Akku} ergibt sich dann mit der Akkuspannung U_{Akku} zu:

$$I_{Akku} = P_{el_max} / U_{Akku}$$
(3-55)

Da die Flugzeit t_{Flug} vorgegeben ist, folgt daraus die Kapazität die die Akkus benötigen $C_{Akku_benötigt}$:

$$C_{Akku_benötigt} = I_{Akku} \cdot t_{Flug}$$
(3-56)

Eine Annahme aus dem Flugmodellbau ist, dass den Akkus nur 80% ihrer Kapazität entnommen werden können, ausgedrückt durch das Verhältnis von benötigter zu enthaltener Kapazität $v_{C_{benötigt_{zu}=nthalten}}$:

$$C_{Akku_enthalten} = \frac{C_{Akku_benötigt}}{v_{C_benötigt_zu_enthalten}}$$
(3-57)

Für die Bestimmung der einzelnen Bauteilmassen ist die Akkumasse von Interesse. Aus der Massenverteilung typischer Lithium-Polymer-Akkumulatoren wurde das Verhältnis von Masse zu enthaltener Kapazität $v_{m_{zu_{C_{enthalten}}}}$ bestimmt. Daraus ergibt sich dann direkt die Akkumasse m_{Akku} :

$$m_{Akku} = v_{m_{zu}C_{enthalten}} \cdot C_{Akku_{enthalten}} \quad (3-58)$$

Die Reichweite R ist das Produkt aus Fluggeschwindigkeit u und Flugzeit t_{Flug}:

$$R = u \cdot t_{Flug} \tag{3-59}$$

Die verrichtete Arbeit als das Produkt aus Kraft und Weg ist dann

$$W = F_{\text{Reibung}} \cdot R \tag{3-60}$$

3.8 Realisierung Airfish 3.20

An der EMPA in Dübendorf-Schweiz und an der TU Berlin wird z. Z. ein Prototyp, der Airfish 3.20, gebaut. An ihm werden die einzelnen Komponenten im Zusammenspiel getestet. Er soll den Nachweis erbringen, dass ein Antrieb mit EAP-Aktuatoren möglich ist. Des Weiteren sollen die Erfahrungen im Bau und Betrieb in den Airfish 3.10 einfließen. Der angestrebte Entwurf, Airfish 3.10, unterscheidet sich vom Prototypen darin, dass er mit etwa 6m Länge kleiner sein wird, leichter und in allen Details die im Pflichtenheft festgehaltenen Anforderungen erfüllt.



Abbildung 35: Struktur des Airfish 3.20; Rumpf mit zwei Gelenken am 3. und 4. Karbonstab; Sandwich-Material oben, unten und in der Endplatte;

Christian Gebhardt (zusammen mit Milan Habovcik): Hülle, Mitte: Martin Wähmer, Erich Fink: Struktur

Bei der Firma aeroix® wurde die Innenstruktur und die Hülle gefertigt. Die Innenstruktur besteht aus sechs Karbonstangen, Sandwichplatten auf der Ober- und Unterseite und aus einer Endplatte, die ebenfalls als Sandwichplatte gefertigt ist. Mittels Wasserstrahlschneiden sind in die Sandwichstrukturen Löcher geschnitten, um ein möglichst geringes Gewicht zu erzielen. Am dritten und vierten Karbonstab sind Gelenke eingebaut, wodurch die Innenstruktur an diesen Stellen beweglich ist.



Abbildung 36: Gelenk der Innenstruktur: zwei Sandwichplatten durch Karbonstab verbunden und dadurch drehbar

Die Endplatte schließt die Innenstruktur nach hinten ab. An Ihr sind drehbar die Flosse und links und rechts die EAP-Aktuatoren des Scharniers zur Bewegung der Flosse befestigt. Die Hülle besteht aus Nonex® einer 9-lagigen Folie, die Helium dicht, strapazierfähig und gleichzeitig sehr leicht ist. Die Hüllengeometrie hat die Besonderheit, dass an den Stellen der Gelenke Taillen eingearbeitet sind.

Abmaße

Um die erforderliche Tragkraft zu besitzen wurde ein Skalierungsfaktor von 1,2 gewählt. Das führte zu einer Luftschifflänge, Breite, Höhe und Volumen von:

Größe	Symbol	Wert	Einheit
Länge	L	7,57	m
Breite	В	1,84	m
Höhe	Н	2,31	m
Volumen	V	11,0	m ³

Tabelle 2: Abma β e des Airfishs 3.20

Massen

Im folgenden Diagramm werden die Massen und ihr prozentualer Anteil an der Gesamtmasse veranschaulicht.



Abbildung 37: Massenanteile der Komponenten des Airfish 3.20

Mit fast einem viertel der Masse ist die Innenstruktur die schwerste Baugruppe, gefolgt von der Rumpfaktuatorik. Einen weiteren großen Anteil haben die Akku-, die Steuer- und die Hochspannungseinheit wie auch die elektrischen Kabel zwischen diesen Einheiten.

In der nächsten Grafik sind die Baugruppen bezüglich ihrer Position aufgetragen. Die Innenstruktur, die Hülle und mit entgegen gesetztem Vorzeichen auch die Tragkraft sind an acht Stützstellen berechnet. Da die Innenstruktur im vorderen Bereich aus GFK besteht, das leichter ist als das weiter hinten verwendete CFK, sind die Gewichte am Bug des Luftschiffes geringer. Am Rumpfende steigt das Gewicht aufgrund der Endplatte nochmals an. Das Hüllengewicht nimmt zur dicksten Stelle des Rumpfes zu und wird am Rumpfende wieder geringer. Da die Hülle das Traggas Helium umschließt, zeigt die Tragkraft ein ähnliches Verhalten. Die anderen Baugruppen sind als Punktmassen idealisiert.



Abbildung 38: Gewichtskraft der Baugruppen und Tragkraft des Heliums in Abhängigkeit von der Position

Auf dem folgenden Foto ist der Prototyp in der Werkhalle der Empa zu sehen. In dieser Halle wurden die ersten Flugversuche durchgeführt. Gut zu erkennen sind die EAP-Aktuatoren auf der Rumpfseite. Die schwarze Farbe rührt von den Kohlenstoffelektroden her. Die Hülle hat die Form eines Fisches und darin ist das Innengerüst aus senkrechten Kohlestäben und den Sandwichstrukturen zu erkennen. An den Rumpf schließt sich die Flosse an. Die Scharnier-Aktuatoren zur Auslenkung der Flossen sind nicht zu sehen, nur ihre Anbindungslaschen an die Endplatte des Rumpfes sind erkennbar. Auf der Unterseite des Luftschiffes sind die Akku-, die Steuer-, die Hochspannungseinheit und das Trimmgewicht angebracht. Im ersten Fünftel des Rumpfes sind an beiden Seiten die zwei Höhenflossen angebracht, erkennbar durch das weiße Kreuz, auf denen je ein Ansteuerservo befestigt ist. Diverse Zusatzmassen in Form von Schnüren und einem kleinen Stoßdämpfer an der Rumpfnase sind auch gut zu sehen.



Abbildung 39: Airfish 3.20 mit EAP-Aktuatorik, Elektronik und Rumpfflossen in der Flugversuchshalle der EMPA in Dübendorf-Schweiz; Lukas Dürer: Pilot, Christa Jordi: Aktuatorik und Gesamtsystem, Christian Dürager(zusammen mit Lars Paasche): Elektronik

3.9 Entwurfsprogramm

Der Design Compiler 43V2® dient dem Entwerfer als Unterstützung in den frühen Phasen des Entwurfs [18]. Er hilft, möglichst schnell einen passenden Entwurf zu finden.

Die Modellierung eines Gesamtsystems ist aufwändig, vor allem bei komplexen Systemen. Es wird schwierig, die Interaktionen der Teilmodelle und das Zusammenwirken der Baugruppen zu überblicken. Der Entwurf eines Luftschiffes ist multidisziplinär: Aerodynamik, Aerostatik, Flugmechanik, Strukturmechanik, Bionik, Elektrotechnik und Design.

Deshalb wurde von der IILS[®], der Ingenieurgesellschaft für intelligente Lösungen und Systeme mbH, in Kooperation mit dem ISD, dem Institut für Statik und Dynamik der Universität Stuttgart, der Design Compiler 43V2[®] entwickelt. Er dient dem Aufbau und der Wartung, in diesem Falle der Konsistenzhaltung, des Gesamtsystems Luftschiff. Der Compiler findet aber auch Anwendung in anderen Systemen wie z.B. im Entwurf von

Fahrzeugen, Raumstationen oder Produktionsanlagen, weshalb der Design Compiler 43V2[®] bereits in mehreren Diplomarbeiten und Dissertationen seine Anwendung fand.

Im Entwurf werden verschiedene Modellsprachen verwand, die jeweils für einen Aspekt besonders geeignet sind. Das sind mathematischen Gleichungen zur Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge, CAD-Modelle für die Geometrie, fluiddynamische Simulationsrechnungen zur Beschreibung der Kräfte und Ausprägung der Strömung, Finite-Element-Methoden für die Spannungen in den Bauteilen und Flugsimulationsprogramme zur Modellierung des Flugverhaltens.

Die Entwurfssprache ist aufgebaut aus Vokabeln, Regeln und Programmen. Die Vokabeln repräsentieren Baugruppen und Bauteile, denen Entwurfsinformationen wie Abmessungen und Gleichungen zugeordnet sind. Das Gesamtsystem wird dazu aufgeteilt in wiederkehrende Untereinheiten, man spricht in diesem Zusammenhang von Entwurfsdekomposition. So gibt es die Vokabel Airfish, die Vokabeln Hülle, Innenstruktur, Flosse, EAP-Aktuatorik und Gondel, bis zu den kleinsten Unterbaugruppen. In der folgenden Grafik sind die zwei Vokabeln Airfish und Hülle dargestellt. Der Übersichtlichkeit wegen sind nur 3 bzw. 2 Variablen eingezeichnet. Beide beinhalten Variablen, die über einen Verbund (Link) von der anderen Vokabel abgerufen werden kann. Die Verbindung ist bidirektional, so dass jede Vokabel alle Variablen der anderen Vokabel zugreifen kann.



Abbildung 40: Zwei Vokabeln, die miteinander verbunden sind

Die Verbindung geschieht durch Gleichungen, so wird in diesem Beispiel die Masse der Hülle berechnet. Das Verhältnis von Masse zu Fläche $v_{MasseZuFlaeche}$ des Hüllenmaterials ist in der Vokabel Huelle gespeichert. Die Oberfläche des Rumpfes a_{Rumpf} und der Flächenfaktor $f_{Flaechenfaktor}$ sind in der Vokabel Airfish abgelegt und werden durch die Verbindung linkAirfish der Vokabel Huelle übergeben.

Constraints:		Language spg Save
(?) <mark>mHuelle =vMasse</mark> 2	?uFlaeche *linkAirfish.aR	$\label{eq:mhuelle} multiple = \forall MasseZuFlaeche * linkAirfish.aRumpf * linkAirfish.fFlaechenfaktor$
\$	>	Evaluate

Abbildung 41: Gleichung mit Zugriff auf eine andere Vokabel

Der Airfish ist aus 14 Baugruppen aufgebaut. In der Vokabel Airfish sind geometrische und physikalische Größen des Gesamtsystems enthalten. Drei Vokabeln beinhalten die Tragkraft, den Schub und den Widerstand. Es bestehen viele bidirektionale Verbindungen zwischen den insgesamt 18 Vokabeln:



Abbildung 42: Die Vokabeln des Airfishs mit ihren Verbindungen untereinander

Regeln geben an, wie mit den Vokabeln gearbeitet wird. So werden die Entwurfsgrößen solange verändert, bis die drei Gleichgewichtsbedingungen erfüllt sind:

$$\sum F_{vertikal} = F_G + F_T = 0 \qquad (3-61)$$

Das Gleichgewicht aus Gewichtskfraft und Tragkraft ist erreichbar durch anpassen des Skalierungsfaktors s und durch die Gewichtskraft des Trimmgewichtes $F_{G_Trimmmasse}$.

$$\sum F_{horizontal} = F_S + F_W = 0 \qquad (3-62)$$

Das Gleichgewicht aus Schubkraft und Widerstandskraft ist durch das Anpassen der Lagenzahl der EAP-Aktuatoren auf dem Rumpf und am Scharnier möglich.

$$\sum M_{Nickmomente} = M_{ges} + M_T = 0 \qquad (3-63)$$

Das Nickmoment kann durch das Verlagern der Akkueinheit ausgeglichen werden.



Abbildung 43: Mögliche Verknüpfung der Entwurfsgrößen mit den Gleichgewichtsbedingungen zur Erzeugung von Entwurfslösungen

In der nächsten Grafik wurden die Regeln angewandt für 7 unterschiedliche Luftschiffe.

Dies wurde leider noch "per Hand" gemacht. Der Design Compiler 43V2[®] würde genau die gleiche Abfolge der Tätigkeiten durchführen, jedoch in einer sehr kurzen Zeit. Die Implementierung dieser Automatisierung hätte jedoch noch etwas mehr Zeit gekostet.

Bei den folgenden Entwurfslösungen wurde die Lagenzahl der EAP-Aktuatoren variiert, von einer Lage bis sieben Lagen. Die Geschwindigkeit ist dann ein Ergebnisparameter genau wie die Reichweite oder die Länge des Airfishs. Die Grafik lässt erkennen, dass mit zunehmender Flugzeit, in diesem Falle 4 Stunden, die Entwürfe größer ausfallen. Das hat seine Ursache in der größeren notwendigen Akkumasse und der daraus folgenden größeren Tragkraft und Volumen an Traggas.



Abbildung 44: Entwürfe für unterschiedliche Lagenzahlen an EAP-Aktuatoren auf dem Rumpf und am Scharnier für zwei Flugzeiten und den sich daraus ergebenden Reichweiten, Geschwindigkeiten und Luftschifflängen

Ein Luftschiff, das entworfen werden soll, um eine große Reichweite zu erzielen: R_{max} , sollte somit über eine große Zahl an Lagen EAP-Aktuatoren verfügen, groß sein, schnell fliegen und über viel Schub verfügen.

Die Schubkraft und die Widerstandskraft müssen im Gleichgewicht sein. Der Betrag dieser Kräfte wächst aber auch mit der Lagenzahl, da bei größeren Luftschiffen die Oberfläche und damit der Widerstand wächst. Das typische Ansteigen des Widerstandes, und zur Erfüllung des Gleichgewichtes auch des Schubes, mit wachsender Geschwindigkeit ist gut zu erkennen.



Abbildung 45: Anwachsen der Schub- und Widerstandskraft mit der Geschwindigkeit bei zwei unterschiedlichen Flugzeiten

Ein Luftschiff min minimalem Volumen: V_{min} wird über wenig Schub verfügen, wenige Lagen EAP-Aktuatoren und mit geringer Geschwindigkeit fliegen.

Ein Luftschiff, das das Ziel hat, schnell zu fliegen: u_{max} , wird viel Schub besitzen, viele Lagen EAP-Aktuatoren tragen, groß sein und für eine große Reichweite ausgelegt.

Mit wachsender Größe wird die Lateralfläche des Rumpfes und die Fläche der Flosse größer und damit ihre Wirkung zur Schuberzeugung. Deshalb schlagen die Flossen der Luftschiffe, die für 4 Stunden ausgelegt sind, mit einer geringeren Frequenz. Da die Peak-to-Peak-Amplitude auch zunimmt bei größer werdenden Luftschiffentwürfen, kann die Frequenz bei konstant Halten der Strouhal-Zahl wieder abnehmen.



Abbildung 46: Entwürfe mit unterschiedlichen Lagenzahlen an EAP-Aktuatoren für zwei verschiedene Flugzeiten

Die unten stehende Tabelle zeigt drei Entwürfe mit den unterschiedlichen Zielen:

1) maximale Flugzeit, 2) minimales Volumen und 3) maximale Geschwindigkeit. Denkbare Einsatzszneraien wären 1) ein Luftschiff auf einer Messe, 2) ein Luftschiff mit geringem Platzbedarf und Traggaskosten und 3) Außeneinsätze bei mäßigem Wind.

Größe	Einheit	t_{Flug_max}	V _{min}	V _{max}
u	m/s	0,5	0,5	5
t _{Flug}	h	20	1	1
s		1,03	1,00	3,22
N Lagen_EAP_Rumpf		1	1	10
N Lagen_EAP_Scharnier		1	1	10
N_{EAP_in_Länge_Rumpf}		1	1	2
N_{EAP_in_Höhe_Rumpf}		1	1	2
V _{x_zu_L_} Akkueinheit		0,27	0,44	0,49
f	Hz	0,14	0,14	0,24
L _{ges}	m	6,5	6,3	20,3
R	km	36	1,8	18

Tabelle 3: Drei Entwürfe mit den Zielen: 1) lange zu fliegen, 2) kleine Baumaße und 3) höchste Geschwindigkeit

4 Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit wurde eine Methode entwickelt, um Modell-Luftschiffe parametrisch bezüglich der Geometrie und der Flugphysik zu entwerfen. Damit kann ein maßgeschneidertes Modell-Luftschiff gebaut werden. Als Entwurfsziel kann hierbei maximale Geschwindigkeit, maximale Flugzeit oder minimales Volumen vorgegeben werden. Das hier entwickelte Werkzeug erlaubt die Optimierung des Gesamtentwurfs des flossenschlagangetriebenen Luftschiffes bezüglich des Entwurfsziels.

Beim Übertragen der physikalischen Abhängigkeiten auf ein Groß-Luftschiff müssen allerdings genauere Bauteilinformationen hinzugefügt werden, da die Skalierung nichtlinear wird.

Das Modell-Luftschiff Airfish 3.20 wurde parallel zu dieser Arbeit gebaut, wodurch die Teilmodelle mit genaueren Werten berechnet werden konnten. Gleichzeitig konnten die schon vorhandenen Zwischenergebnisse für den Bau genutzt werden. Die Entwurfsergebnisse wurden in ersten Flugversuchen nachgewiesen.

5 Ausblick

Das Luftschiff ist als Ganzes beschrieben. Weitere Arbeiten können nun die Teilmodelle konkretisieren. Durch Versuche am fliegenden Airfish können weitere Verbesserungen in das Modell einfließen und der Bau weiterer Luftschiffe mit Flossenschlagantrieb begonnen werden.

Durch die Parametrisierung des Entwurfs und die erfolgte Implementierung in den Entwurfscompiler 43V2® können nun noch die Regeln eingefügt werden, womit die Exploration des Entwurfsraumes noch effizienter wird. Auch sind dann die Schnittstellen zu den anderen Programmen wie Flugsimulations- und Finite-Elemente-Programmen. Und damit wären in Zukunft die vielen Vorteile des Entwurfscompilers nutzbar.

Die weiteren Flugversuche werden zeigen, welche Stärken und Schwächen diese neuartige Form des Antriebes hat. Was Raum für Verbesserungen geben wird und neue Forschungen anstoßen wird. Und vielleicht werden diese eleganten, effizienten und lautlosen Modell-Luftschiffe ihre Anwendung als Stratosphärenplattform, für Messaufgaben und zur Luftwerbung über Veranstaltungen und Städten haben [27].

Anhang



Abbildung 47: Größen bei der Translation des Flossenwurzelpunktes

Vergleich der Flächenträgheitsmoment von Rohr und Vollstab

Vorausgesetzt ist gleiche Masse:

$$m_{Rohr} = m_{Vollstab} \tag{0-1}$$

$$\rho \pi L \left(R_A^2 - R_I^2 \right) = \rho \pi L R^2 \tag{0-2}$$

$$I_{Rohr} - I_{Vollstab} = \frac{\pi}{4} \left(R_A^4 - R_I^4 \right) - \frac{\pi}{4} R^4 \quad (0-3)$$

$$I_{Rohr} - I_{Vollstab} = \frac{\pi}{4} \left[\left(R_A^2 - R_I^2 \right) \left(R_A^2 + R_I^2 \right) - \left(R_A^2 - R_I^2 \right) \left(R_A^2 - R_I^2 \right) \right]$$
(0-4)

$$I_{Rohr} - I_{Vollstab} = \frac{\pi}{4} \left(R_A^2 - R_I^2 \right) \cdot 2R_I^2 > 0$$
 (0-5)

Winkel a innerhalb des Linsenkörpes



somit ist
$$B = 2\left(R - R \cdot \cos\frac{\alpha}{2}\right) = 2R\left(1 - \cos\frac{\alpha}{2}\right)$$

R eingesetzt
$$B = 2 \cdot \frac{H}{2\sin\frac{\alpha}{2}} \cdot \left(1 - \cos\frac{\alpha}{2}\right) = H \cdot \frac{1 - \cos\frac{\alpha}{2}}{\sin\frac{\alpha}{2}}$$

Additions theorem
$$B = H \cdot \tan \frac{\alpha}{4}$$

Somit ist
$$\alpha = 4 \cdot \arctan \frac{B}{H}$$

Fläche der Linse

Die Linsenfläche ist die Differenz von Kreissegment und Dreieck, und das mal 2 genommen.



Die Fläche eines Kreissegmentes ist:



Fläche des Kreissegmentes
$$A_{Kreissegment} = \frac{\alpha}{2\pi} A_{Vollkreis} = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \pi R^2 = \frac{\alpha R^2}{2}$$

Fläche des Dreiecks

$$A_{Dreieck} = H \cdot \frac{R \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}{2} = 2R \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{R \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}{2}$$
$$A_{Dreieck} = R^2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$$

$$A_{Linse} = 2 \cdot (A_{Kreissegment} - A_{Dreieck})$$

$$A_{Linse} = 2 \cdot \left(\frac{\alpha R^2}{2} - R^2 \cdot \sin\frac{\alpha}{2} \cdot \cos\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$A_{Linse} = R^2 \left(\alpha - 2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right)$$

Additionstheorem

$$A_{Linse} = R^2 (\alpha - \sin \alpha)$$

Einsetzen von R
$$A_{Linse} = \left(\frac{H}{2\sin\frac{\alpha}{2}}\right)^2 \cdot (\alpha - \sin\alpha)$$

Umfang der Linse

$$U_{Kreis} = 2\pi R$$

Kreissegment

$$\frac{U_{Kreissegment}}{\alpha} = \frac{U_{Kreis}}{2\pi} = R$$

Linsenumfang

$$U_{Linse} = 2 \cdot U_{Kreissegment}$$
$$U_{Linse} = 2 \cdot \alpha \cdot R$$

einsetzen von R
$$U_{Linse} = 2 \cdot \alpha \cdot \frac{H}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

Somit

$$U_{Linse} = \frac{\alpha \cdot H}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

Literatur

- Michel, S., Jordi, C. et al. "Biomemetics in Airship Design", EMPA Dübendorf, Document ID:71204, 2007
- [2] Zobel, M., "Charakterisierung des ersten mit EAP-Klappe ausgerüsteten ¹/₄-Leitwerks für ein frei fliegendes Modellluftschiff im Windkanal" Studienarbeit TU Berlin 2008
- [3] Michel, S., Bernasconi, M., Bormann, A., Zobel, M., Fink, E. "Feasability studies for a bionic blimp with fish-like propulsion system, AIAA LTA, 2007
- [4] Barrett, D. et al. "The optimal control of a flexible hull robotic undersea vehicle propellers by an oscillating foil", In Proc. 1996 IEEE, AUV-Symp., S. 1-9
 "naro" der ETHZ (siehe http://www.naro.ethz.ch/) und robot.watch.impress.co.jp, oder
 "G8" a robotic fish developed by scientists from Essex University (http://www.youtube.com/watch?v=eO9oseiCTdk&feature=related), festo-Fisch,
- [5] http://www.airshipman.com/NewsArticles/Athens%20July%202004%20065cr.jpg
- [6] http://www.pilotundluftschiff.de/zzPL0932.jpg
- [7] www.zeppelin-nt.de
- [8] Bormann, A., Skutnik, S. HeiDAS, Heiβdampfaerostat TU Berlin und aeroix®
- [9] Dillmann, Vorlesungsscripte zur Strömungslehre I, II; TU Berlin 2005
- [10] Nachtigall, W. "Natur macht erfinderisch. Das große Buch der Bionik", Verlag für Bauwesen, Berlin 1973
- [11] Sigloch, H. "Technische Fluidmechanik: Strömungslehre", Schroedel-Verlag Hannover, Berlin, Darmstadt, Dortmund, 1980
- [12] Hertel, H. "Struktur, Form, Bewegung" Krauskopf-Verlag Mainz, 1963
- [13] Schori, S. "Machbarkeitsstudie für eine aeroelastische Flosse basierend auf dem FinRay-Konzept für den Schwanzflossen-Antrieb eines Luftschiffes", Bachelor-Arbeit ETH Zürich 2007
- [14] Webb, P.W. "Steady Swimming Kinematic of Tiger Musky, an Escoform Accelerator, and Rainbow Trout, a Generalist Cruiser", J.Exp.Biol.138, S.51-69
- [15] Nägele, T. "Bioaquatic Locomotion: Characteristic Definition and Transfer to Lighterthan-Air Aircrafts", Studienarbeit Universität Stuttgart 2006
- [16] Lindsey, C.C. "Form, function and locomotory habits in fish" Fish Physiology Vol. VII Locomotion, edited by W.S. Hoar and D.J.Randall. New York: Academy Press. S.1-100, 1978

- [17] Schäfer, I. "Ein Verfahren zur Entwurfsoptimierung von Luftschiffen", Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart, Bericht aus dem Institut 15-97, 1997
- [18] Bölling, M. "Multidisziplinärer Vorentwurf von Luftschiffen", Diplomarbeit am Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart 2005
- [19] Rembold, R.W. "Einstieg in CATIA V5", Carl Hanser Verlag München, 2007
- [20] Frohne, V. "Charakterisierung von Aktuatoren basierend auf elektroaktiven Polymeren für einen fischähnlichen Antrieb eines Luftschiffes", Bachelor-Arbeit, Hochschule Bremen, 2008
- [22] Fink, E. "Windkanaluntersuchungen an fischähnlichen aeroelastischen Flossen als Antrieb für Leichter-als-Luft-Fahrzeuge", Studienarbeit TU Berlin 2007
- [23] Wuttke, S. "Studie zur Kinematik aeroelastischer fischähnlicher Flossen als Antrieb für Leichter-als-Luft-Fahrzeuge im Windkanal, Bachelor-Arbeit, Hochschule Bremen, 2008
- [24] Albrecht, K. "Studie zur Aerodynamik fischähnlicher, aeroelastischer Flossen als Antrieb für Leichter-als-Luft-Fahrzeuge im Windkanal", Bachelor-Arbeit, Hochschule Bremen, 2008
- [25] Hoerner, S.F. "Fluid Dynamic Drag", Midland Park, New Jersey, 1958
- [26] Gross, D. "Formeln und Aufgaben zur Technische Mechanik", Band II, 5. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998
- [27] Bock, J.K. und Knauer, B. "Leichter als Luft : Transport- und Trägersysteme Ballone, Luftschiffe, Plattformen", Verlag Frankenschwelle KG, Hildburghausen 2003
- [28] Vortrag Silvain Michel: Workshop 3. 5. 04. 08 "Gesamtsystem EAP-Blimp", Dübendorf, Schweiz

Danksagung

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Thorbeck danke ich für die Möglichkeit, diese interessante Diplomarbeit in seiner Arbeitsgruppe anfertigen zu können. Und für sein stetes und förderndes Interesse für die Aerostatik. Meinem Betreuer Andreas Becker danke ich für die Hilfe beim Gesamtentwurf. Johannes Hartmann danke ich für die Hilfe bei der Auslegungsrechnung und der Geometrieparametrisierung mittels CATIA V5.

Meinem externen Betreuer Silvain Michel von der EMPA in der Schweiz danke ich ganz herzlich. Silvain Michel, zusammen mit Christa Jordi, Christian Dürager, Katharina Albrecht, Stefani Wuttke, Verena Frohne und Lukas Dürer, danke ich für die experimentellen Daten zu den Muskeln und Schubkräften aus der Flossenbewegung sowie für die Daten und Gespräche zum Gesamtsystem und bedanke mich auch bei ihnen für die gute Zusammenarbeit in Dübendorf und am Windkanal der ETH-Zürich.

Dr. Alexander Bormann von der Firma aeroix ®, zusammen mit Erich Fink, Milan Habovcik und Christian Gebhardt, danke ich für die Informationen und die Hilfe bei den Rechnungen zu Struktur und Hülle sowie die vielen guten Anregungen für das Gesamtsystem.

Dr. Stephan Rudolph und Michael Bölling vom ISD Stuttgart und der Firma iils® danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der Anwendung des Entwurfscompilers 43V2®.

Meinen Kommilitonen Martin Zobel, Erich Fink und Lars Paasche danke ich für die Diskussionen und die Vermittlung ihres Fachwissens, das sie sich im Zusammenhang mit ihren Praktika und Studienarbeiten am Airfish in Dübendorf/Schweiz angeeignet haben.

Yousif Abdel Gadir danke ich für sein Engagement für die Luftfahrt und seine reichhaltigen Erfahrungen, die er gern mit mir und den anderen Studierenden der Projektwerkstatt teilt.

Meiner Freundin Claudia Seydel, meinen Eltern und Geschwistern danke ich von Herzen für ihre Unterstützung und die Liebe zur Fliegerei.

Hiermit erklärt der Autor an Eidesstatt, dass er die Arbeit ohne unerlaubte Hilfsmittel unter ausschließlicher Verwendung der genannten Quellen angefertigt hat.

Berlin, den 26. Feb. 2010