KONZEPT EINER ALTERNATIVEN ANTRIEBSART FÜR PRALLLUFTSCHIFFE

S. Michel, P. Lochmatter, G. Kovacs
Materials and Engineering / Eidg. Materialprüfungs- und forschungsanstalt (Empa)
Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf
Schweiz

1. EINLEITUNG

1.1. Antrieb eines Prallluftschiffes und Ansteuerung von Steuerflächen

1.1.1. Antrieb von Luftschiffen

Für moderne Transport- und Trägersysteme werden seit ein paar Jahren wieder Konzepte „leichter als Luft“ in Betracht gezogen [1]. Während Starrluftschiffe (Zeppeline) zwischen 1900 und dem 2. Weltkrieg erfolgreich eingesetzt wurden, sind in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts die halbstarren Luftschiffe (Cargolifter, Bild 1 und Zeppelin NT) oder reine Prallluftschiffe (GEFA-FLUG Heissluft-Luftschiff, Bild 2) in den Vordergrund gerückt.

BILD 1. Projekt CargoLifter als Transportplattform für schwere Lasten (halbstarres Luftschiff)

BILD 2. Gesamtansicht eines Prallluftschiffes (GEFA-FLUG)

Während die starren und halbstarren Luftschiffe einen enormen Platz für die Lagerung beanspruchen sind die Prallluftschiffe im Prinzip entleerbar, siehe Bild 3 und können so auf einem viel kleineren Raum gelagert werden [2].

BILD 3. Hülle eines Prallluftschiffes im halb gefüllten Zustand

Der Antrieb von Luftschiffen wird ausschliesslich über Propeller oder Impeller (Bild 4) erzeugt. Drehmotoren bringen dabei ihre Leistung über eine rotierende Welle auf einen Propeller/Impeller. Dieser dreht im Bereich von einigen tausend Umdrehungen (1000 – 3000) pro Minute und hat typischerweise einen Durchmesser von ca. 2m. Begrenzt wird die Leistungsabgabe solcher Antriebskonzepte durch die maximale Geschwindigkeit die hinter dem Propeller erzeugt werden kann. Diese ist auf die Schallgeschwindigkeit begrenzt. Zudem ist auch die Geschwindigkeit am Blattende in Umfangsrichtung begrenzt. Übersteigt diese die Schallgeschwindigkeit treten Stosswellen auf, die enormen Lärm verursachen und den Wirkungsgrad erniedrigen (dieser Effekt ist als Helikopterknattern bekannt). Daher können weder die Drehzahl noch die Blattdurchmesser beliebig vergrössert werden. Bei einem höheren Leistungsbedarf muss die Anzahl der Propeller erhöht werden.

Im stationären Horizontalflug sind der Vortrieb des Propellerstrahls und der Luftwiderstand des Luftschiffkörpers im Gleichgewicht. Da jedoch die Querschnittsfläche des Luftschiffkörpers um ein vielfaches grösser ist als die Querschnittsfläche des vom Propeller überstrichenen Kreises (siehe Bild 5), muss die Geschwindigkeit des Luftstromes hinter dem Propeller viel grösser sein als die Vorwärtsgeschwindigkeit des Luftschiffs. Da die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der

Luft hinter dem Luftschiffkörper (Nachlauf) und der Luft hinter dem Propeller den Wirkungsgrad dieses Antriebskonzeptes beeinflusst, haben diese Antriebssysteme bei Luftschiffen einen schlechten Wirkungsgrad, siehe [3], Kapitel „Ineinandergreifen von Widerstands- und Antriebsmechanismus“.

Damit ergeben sich 3 bedeutende Nachteile:

1) Begrenzte Reisegeschwindigkeit durch die Begrenzung der Propellerstrahlgeschwindigkeit

2) Begrenzte Reisegeschwindigkeit durch die Begrenzung der Propeller-Blattendgeschwindigkeit

3) Ineffektive Konstruktion bei grossen Luftschiffen wenn viele Propeller-Antriebe nötig werden

4) Schlechter Wirkungsgrad durch grosse Geschwindigkeitsdifferenz Luftstrom – Nachlauf

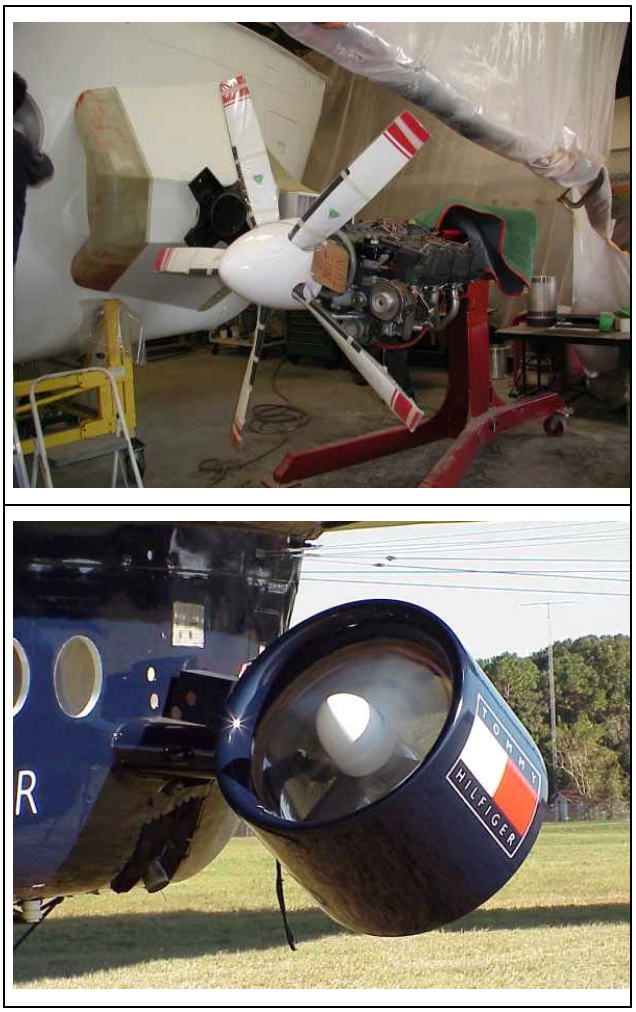

BILD 4. Impeller-Antriebseinheit (oben Propeller ohne Mantel, unten im Betrieb mit Vektorsteuerung)

1.1.2. Antrieb von Steuerflächen

Die Steuerflächen befinden sich aus aerodynamischen Gründen (dynamische Stabilität der Steuerung) am Heck des Luftschiffes. Dort ist der Luftschiffkörper aus aerodynamischen Gründen (Minimierung des Luftwiderstandes) tropfenförmig verjüngt, siehe Bild 6. Dies bedeutet, dass der voll gefüllte Auftriebskörper einen Auftriebsschwerpunkt hätte, der bugwerts verschoben ist. Diese Asymmetrie des Auftriebes muss mit bugseitig platzierten Luftkammern im Innern der Hülle (Ballonett) verhindert werden. Da damit Auftriebsvolumen verloren geht, erfordert eine optimale Ausnützung des Auftriebsvolumens eine möglichst geringe Masse der Heckpartie. Die Ansteuermotoren der Steuerflächen sind jedoch eher schwere Aggregate, die z. T. an starren Gestängen montiert sein müssen. Daher sind in der Regel heutige Luftschiffe im Heckbereich mit starren Fachwerkstrukturen versehen, die diese Aggregate aufnehmen (siehe z.B. CargoLifter, Zeppelin NT). Neuere Entwicklungen versuchen so genannte „pneumatische Muskeln“ als Servosteuerungen auf Prallluftschiffen einzusetzen, siehe [2]. Bei kleineren Prallluftschiffen wird die Steuerung manuell über Seilzüge erreicht. Diese Art von Steuerung hat den Vorteil, dass das Leitwerk ohne starre Innenstruktur gebaut werden kann, siehe Bild 2. Für grössere Luftschiffe reicht jedoch die manuelle Kraft nicht aus, um die nötige Kraft auf die Steuerflächen zu erreichen.

BILD 5. Grössenverhältnis zwischen Propellerstrahlfläche und Widerstandsfläche (Querschnittsfläche des Auftriebskörpers und der Gondel)

BILD 6. Typische Tropfenform eines Luftschiffes (halbstarres Konzept, Leitwerke mit starrer Innenstruktur liegen aus Gründen der Gewichtsverteilung nicht ganz am Heck, Durchmesser-zu-Längen-Verhältnis ca. 0.25)

1.2. Schwanzflossenschlag als Vortrieb und

Steuerung bei Fischen

Fische müssen ebenfalls einen Vortrieb erzeugen um im Wasser die hydrodynamische Widerstandskraft kompensieren zu können. Es gibt eine Vielzahl von Varianten wie dies erreicht wird, siehe [3]. Die Forelle z. B. erzeugt den Vortrieb durch eine oszillierende Biegung des Rumpfes und einer entgegengesetzt gerichteten Biegung der Schwanzflosse, siehe Bild 7.

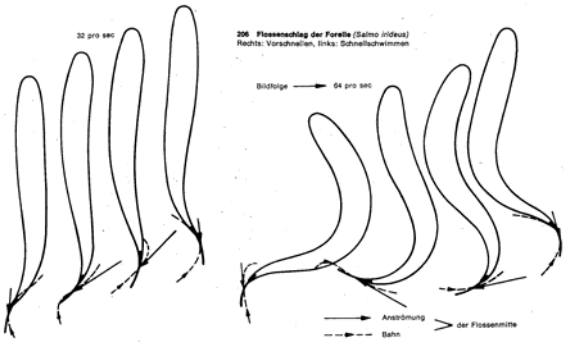

BILD 7. Flossenschlag der Forelle im Wasser (links Schnellschwimmen, rechts Vorschnellen (Start): In beiden Fällen ist die entgegengesetzt gerichtete doppelte Biegung des Fischkörpers deutlich zu erkennen, Hertel [3].

Hertel hat das Vortriebskonzept der Forelle hydrodynamisch analysiert. Er beschreibt dabei die Wechselwirkung zwischen den beiden gekoppelten Biegeschwingungen, die ähnlich einer Karman-Wirbelstrasse hinter dem Fischkörper stehende Wirbel hinterlässt. Wir nennen dieses Antriebskonzept oszillatorischer Antrieb. Er hat dieses Antriebskonzept auch technisch vereinfacht, indem er die beiden Körperbiegungen durch die Drehung dreier starrer Körper gegeneinander vereinfacht hat und hat diese Konfiguration „Biege-Dreh-Schwanzschlag“ genannt. Mit hydrodynamischen Untersuchungen (Bild 8) konnte er nachweisen, dass damit ebenfalls ein Vortrieb erreicht werden kann. Er wie auch andere Autoren (James Grey 1933, zitiert von Hertel) kommen dabei zum Schluss, dass diese Vortriebsart wesentlich effizienter ist als heute bekannte technische Lösungen. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass der Ort wo der Antrieb erzeugt wird mit dem Ort wo der Widerstand erzeugt wird zusammenfallen. Damit gibt es hinter dem Fisch weder ein Nachlauf noch ein Wasserstrahl, wie er durch einen seitlich an den Luftschiffkörper angebrachten Propeller erzeugt wird. Bei optimalen Verhältnissen bleiben nur an Ort stehende Wirbel (Karman-Wirbel) hinter dem Fisch zurück, die nicht viel Energie beinhalten. Darin sind die Geschwindigkeitsdifferenzen klein.

Dieses Antriebskonzept ermöglicht auch eine seitliche Kraft auf den Körper auszuüben. Erfolgt die Biegebewegung nicht symmetrisch nach links und rechts kann eine Richtungsänderung erreicht werden. Eine überlagerte Biegung des Rumpfes nach oben oder unten kann entsprechend auch eine Richtungsänderung in der vertikalen ergeben (z.B. Wale).

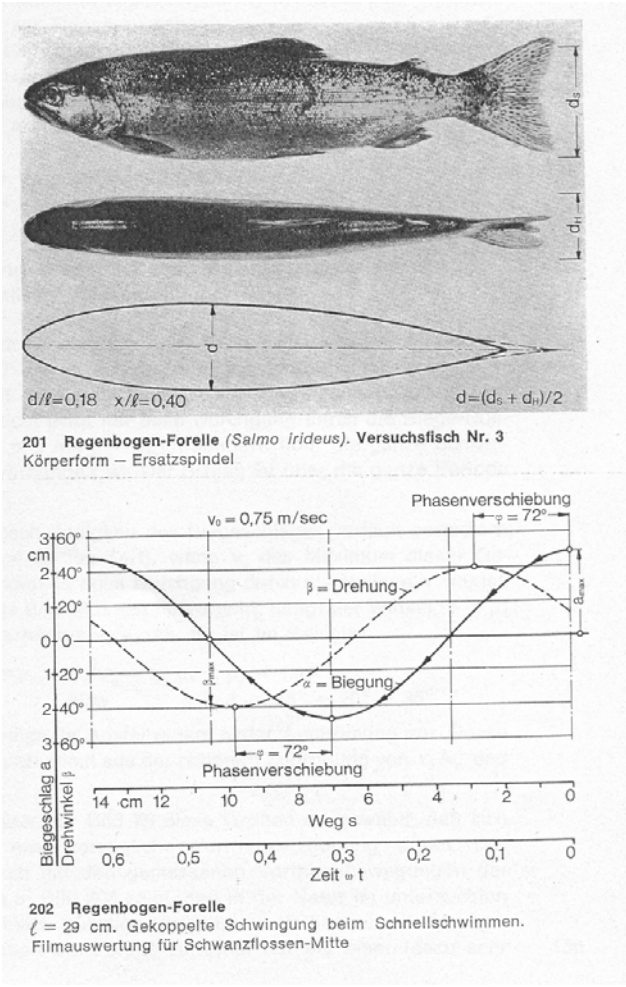

BILD 8. Hydrodynamische Analyse des Schwanzflossenschlages der Forelle, Hertel [3].

1.3. EAP-Technologie

Seit einigen Jahren sind in Robotik und biomedizinischer Technik ein neues Aktorprinzip, genannt elektroaktive Polymere (EAP) erforscht worden, siehe [4]. Es handelt sich dabei in den meisten Fällen um die so genannten Dielektrischen EAP. Im Prinzip handelt es sich dabei um einen verformbaren elektrostatischen Kondensator, der elektrische Energie in mechanische Arbeit umwandelt. Im Folgenden wird diese Technologie kurz erläutert.

1.3.1. Wirkprinzip

Ein Elastomerfilm (Acryl oder Silikon) liegt zwischen zwei sehr nachgiebigen Elektroden (z. B. Grafitpulver-Schichten)

Wird eine elektrische Spannung (ca. 5 kV) an die Elektroden angebracht werden elektrostatische Anziehungskräfte zwischen den beiden Elektroden erzeugt. Dadurch wird der Elastomerfilm senkrecht zur Ebene gequetscht. Da ein Elastomer praktisch inkompressibel ist, muss die Stauchung durch eine

Flächenvergrösserung kompensiert werden. Diese Verformung kann genutzt werden um mechanische Arbeit an der Umgebung zu leisten.

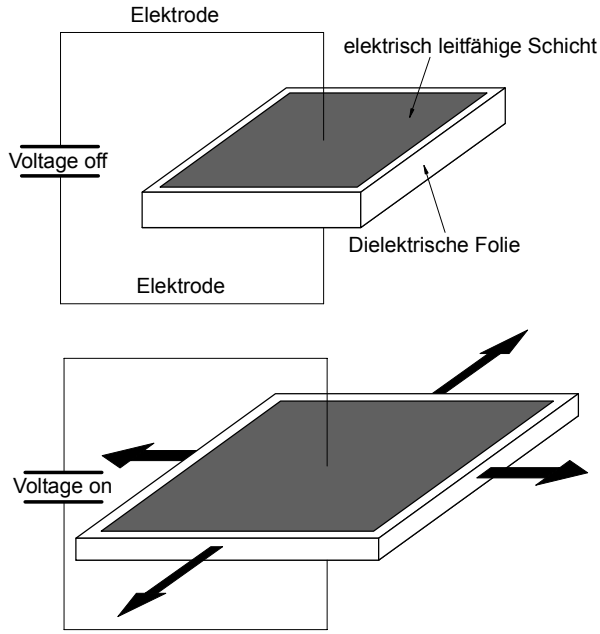

BILD 9. Funktionsprinzip Elektroaktiver Polymer Aktoren

1.3.2. Der Elektrodendruck

Der Elektrodendruck lässt sich aus der elektrischen Spannung, der Schichtdicke des Elastomerfilmes und Material- respektive Naturkonstanten berechnen:

$$(1) \qquad p = \tfrac{1}{2}\varepsilon_r\varepsilon_o E^2 = \tfrac{1}{2}\varepsilon_r\varepsilon_o\left(\frac{U}{z}\right)^2$$

Dabei ist

p: der Elektrodendruck [N/m^2],
ε_r: relative Dielektrizitätszahl des Elastomerfilms [-],
ε_o=8.85·10^{-12} [F/m] eine Naturkonstante,
E: elektrostatisches Feld [V/m],
U: el. Spannung [V],
z: Schichtdicke [m]

1.3.3. Stand der Technik

Verschiedene Prototypen (z. B. planare Aktoren, einschichtig und mehrschichtig, gerollte, und faserartige Aktoren) haben das Wirkprinzip gezeigt. Anwendungen sind denkbar als Pumpen, Lautsprecher, und als Stellglieder für die Automation. Bis heute ist noch keine kommerzielle Umsetzung erfolgt. Die weitere Entwicklung umfasst die Optimierung der Beschichtung, Verringerung der Schichtdicken, und die Bereitstellung von effizienten Herstellprozessen.

Vorteile	Nachteile
• Grosse spez. Leistungsdichte [W/kg] • Hoher Wirkungsgrad • Beliebig skalierbar • Deformierter Zustand /Druck wird unter Gleichspannung aufrecht erhalten • Grosse Verformungen möglich (> 300%) • Genügend schnelle Reaktionszeit • Gutes Langzeitverhalten	• Hohe el. Spannung erforderlich (kV) • Kleine Kräfte • Flächendehnung muss ausgerichtet werden • Z. T. mechanische Vorspannung erforderlich • Einsatzbereich limitiert durch Glastemperatur

TAB 1. Vor- und Nachteile der EAP-Technologie

2. PHYSIKALISCH-TECHNISCHE MACHBARKEIT

Im Weiteren wird die physikalisch-technische Machbarkeit eines auf EAP basierten oszillatorischen Antriebskonzeptes für Prallluftschiffe diskutiert. Dazu müssen vier Bedingungen erfüllt werden:

1) Physikalische Machbarkeit des oszillatorischen Antriebs für Prallluftschiffe
2) Strukturelle Anforderungen (Aufbau, Grösse, Form) an den Luftschiffkörper
3) Kinematische Anforderungen an die aktive Hülle (Verformbarkeit, innere Kräfte)
4) Technische Herstellbarkeit

2.1. Oszillatorischer Antrieb für Prallluftschiffe

Ein Fisch im Wasser und ein Luftschiff in Luft sind beides Körper, die sich in einem Fluid bewegen. Daher sind die fluiddynamischen Gesetzmässigkeiten gültig. Die Ähnlichkeitstheorie besagt, dass Resultate einer geometrisch ähnlichen Modellanordnung vollständig auf das Original übertragbar sind, falls folgende vier Grössen gleich sind, [5]:

1) Reynolds-Zahl
2) Strouhal-Zahl
3) Mach-Zahl
4) Froude-Zahl

Die Reynolds-Zahl beschreibt die Reibungskräfte, die Strouhal-Zahl die Kräfte infolge instationärer Strömungsanteile, die Mach-Zahl Kräfte infolge der Kompressibilität und die Froude-Zahl die Kräfte durch das Gravitationsfeld.

Beim Fisch und seinem Schwanzschlag sind nebst den Druckkräften, Trägheitskräfte, Reibungskräfte, und Kräfte infolge des instationären Strömungsanteils relevant. Die

Kompressibilität des Fluid beginnt erst eine Rolle zu spielen, wenn wir nahe bei der Schallgeschwindigkeit sind, d.h. bei Wasser im Bereich von 1500 m/s und bei Luft im Bereich von 330 m/s. Da wir im Bereich von einigen Metern pro Sekunden liegen, spielt die Kompressibilität in beiden Medien keine Rolle. Auch Gewichtskräfte sind nicht signifikant. Daher müssen für die Übertragung der Verhältnisse am Fisch im Wasser zum Luftschiff in Luft die beiden letzten Bedingungen nicht zwingend erfüllt werden. Es bleiben die beiden Bedingungen, dass die Reynolds-Zahl und die Strouhal-Zahl gleich sein müssen.

Die Forelle ist 0.3 m lang (l = 0.3 m) und hat ein Dickenverhältnis d/l = 0.18 in der Rücklage x/l = 0.45, schwimmt mit einer Geschwindigkeit von 1.2 m/s durch Wasser, indem sie mit 4.5 Hz mit dem Schwanz schlägt. Die Amplitude des Schwanzschlages erreicht dabei ca. 20% der Länge des Fisches. Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte für die Reynolds- und Strouhal-Zahl:

$$(2)\quad \mathrm{Re} = v_0 \cdot l \cdot \rho / \mu = 1.2m/s \cdot 0.3m \cdot 1.0 \cdot 10^3 kg/m^3 / 1.002 \cdot 10^{-3} kg/ms = 0.36 \cdot 10^6$$

$$(3)\quad St = l \cdot f / v_0 = 0.3m \cdot 4.5Hz / 1.2m/s = 1.125$$

Die folgende Rechnung zeigt, dass ein 6-Meter langes Luftschiff, das mit 1 m/s durch die Luft gleitet mit den Verhältnissen der Forelle vergleichbar ist, wenn das Luftschiff geometrisch ähnliche Bewegungen machen kann. Kann mit einer Frequenz von ca. 0.2 Hz die geometrisch ähnliche Bewegung (Amplitude des Schwanzschlages = 0.2 * 6m = 1.2m) durchgeführt werden, dann sind auch die Kräfteverhältnisse gleich. Damit könnte sich das Luftschiff mit dem gleichen Wirkprinzip wie die Forelle durch die Luft bewegen. Damit konnte gezeigt werden, dass der oszillatorische Antrieb für Prallluftschiffe aerodynamisch machbar ist.

2.2. Anforderungen an die Struktur

Ein Prallluftschiff muss sein Eigengewicht und die Nutzlast mittels dem Aerostatischen Auftrieb kompensieren können. Zudem müssen die Auftriebsverteilung und die Gewichtsverteilung derart sein, dass das Luftschiff in seiner horizontalen Lage stabil ist. Die erste Bedingung liefert bei vorgegebenem Eigengewicht pro Hüllenfläche die minimale Grösse damit ein Schwebezustand erreichbar ist. Wir nehmen an, dass das Volumen mit Helium gefüllt wird. Die aerodynamisch günstigste Form kann wiederum aus den Formen der Fische abgeleitet werden (die Ähnlichkeitstheorie ist auch hier gültig). Hertel hat beschrieben, dass Fische ein Breiten zu Längenverhältnis von 0.18 bis 0.24 aufweisen. Damit liegen sie nahe beim optimalen Grössenverhältnisse, das zu minimalem Widerstand führt. Der Einfachheit halber wählen wir einfache Verhältnisse: Ein Ellipsoid der Länge 6m, mit einem Dickenverhältnis von 0.25 (ergibt eine Rücklage von 0.5). Diese Form muss das Prallluftschiff im passiven Zustand aufweisen. Im aktivierten Zustand wird dieser Form eine doppelte Krümmung überlagert. Diese überlagerte Beweglichkeit wird im Folgenden diskutiert.

2.3. Anforderungen an die Kinematik

Die Analyse der Bewegung der Forelle durch Hertel zeigt, dass im Wesentlichen zwei sich gegenläufig schwingende Biegungen des Körpers notwendig sind um Vortrieb zu erreichen (einfachster Fall ist der Biege-Drehschlag). Die erste Biegung ist eine Rumpfbiegung, die zweite Biegung ist im Übergangsbereich von Rumpf zu Schwanz. Beide Biegungen erreichen beim Start der Forelle einen Krümmungsradius von ca. der doppelten Breite des Rumpfes an dieser Stelle(R/d = 2). Im nicht beschleunigten Schnellschwimmen sind die Krümmungsradien grösser (R/d = 0.5). Mittels einfacher Geometrie kann gezeigt werden, dass für die Haut der Forelle (Hülle des Prallluftschiffes) Dehnungen von bis zu 50% notwendig sind um diese Biegungen erzeugen zu können.

2.4. Herstellbarkeit

Die Hülle des Prallluftschiffes wird aus zwei funktionellen Lagen aufgebaut:

1) Stützhülle
2) EAP-Beschichtung

Die Stützhülle ist eine formstabile, flexible, möglichst leichte, gasdichte Membran. Idealerweise haben sie eine hohe Zugfestigkeit bei einer geringen Zug-Nachgiebigkeit bei einer sehr hohen Nachgiebigkeit im Druckbereich (Faltenbildung möglich). Ballonhüllen, die metallisch bedampft wurden haben diese Eigenschaften. Sie sind relativ reissfest, da sie aus zähem Kunststoff bestehen und sie sind dank der metallischen Bedampfung sehr gasdicht. Sie lassen sich gut falten. Die Form ist frei wählbar, da einzelne Teilflächen zu einer geschlossenen Hülle verschweisst werden können. Mit dieser Stützhülle werden folgende Funktionen an die Hülle des Prallluftschiffes erfüllt:

1) Gasdichtes Volumen (dicht gegenüber Helium)
2) Form gemäss Kapitel 2.2
3) Hohe Beweglichkeit unter Stauchung

Die EAP-Beschichtung besteht aus mind. einer Lage eines Sandwich-Aufbaues (leitende Schicht, dielektrische Folie, leitende Schicht) gemäss Kapitel 1.3. Falls diese EAP-Beschichtung im aktivierten Zustand mit der gestrafften Stützhülle (Zustand ohne Falten) vereint wird, erreichen wir folgende Eigenschaften der Gesamthülle:

Im allseits aktivierten Zustand kann unter kontrolliertem leichtem Überdruck die Hülle in die Grundform gebracht werden. Der Innendruck führt zu einer Zugvorspannung der Gesamthülle, wodurch diese ihre Grundform einnimmt. Falls, wie dies bei einigen dielektrischen EAPs notwendig ist, eine markante Zugvorspannung in der EAP-Beschichtung notwendig ist, kann der Innendruck erhöht werden, bis das gewünschte Gleichgewicht erreicht ist (d.h. die Hülle ist straff gespannt).

Werden nun Teilbereiche der Hülle deaktiviert, erfolgt in diesen Zonen eine Schrumpfung der EAP-Schicht. Da der Widerstand der Stützhülle gegen Stauchung klein ist wird diese in diesen Zonen gefaltet. Damit ist eine

Schrumpfung der Hüllenfläche in diesen Zonen erreicht. Falls die Kraft, die notwendig ist um diese Schrumpfung zu erwirken von einer einzelnen EAP-Beschichtung nicht aufgebracht werden kann (weil die Stützhülle sich nicht kraftlos falten lässt) müssen mehrere Lagen EAP-Beschichtung übereinander appliziert werden.

Da EAP-Aktoren bis über 200% Dehnung erreichen im aktivierten Zustand sollte eine lokale Schrumpfung von 50% im deaktivierten Zustand erreichbar sein.

Damit konnte gezeigt werden, dass die geforderte Bewegung des Luftschiffskörpers durch lokale Dehnungen der Hülle mittels EAP-Beschichtung erzeugt werden kann.

3. NUTZEN

Ein dem Fischflossenschlag nachempfundenen Antrieb für Luftschiffe ist sehr effizient, da er aus aerodynamischer Sicht einen hohen Wirkungsgrad erzielt (Verdoppelung des Wirkungsgrades möglich, siehe Hertel [3]). Wird diese doppelte Biegeschwingung mittels EAP realisiert ist auch diese Umsetzung relativ effizient, da EAP-Aktoren direkt elektrische Energie in mechanische Arbeit umsetzen können und dies mit einen hohen Wirkungsgrad (bis zu 70%).

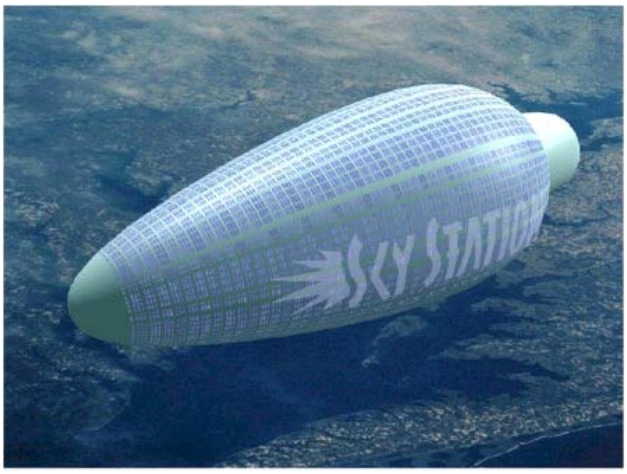

BILD 10. Projekt Sky Station (photovoltaischer Solarantrieb)

Denkbar sind in dieser Konstellation, dass die elektrische Energie aus Solarzellen auf der Oberseite der Luftschiffhülle kommt (siehe Projekt Lotte der Uni Stuttgart, [6] oder Sky Station, Bild 10). Da die sehr grosse Fläche genügend Sonneneinstrahlung hat, die von flexiblen Solarzellen in Niedrig-Volt Energie umgeformt werden kann. Leichte und effiziente Transformatoren sind erhältlich, die diese Niedrig-Volt Energie in Hochspannungs-Energie transformieren könnte.

Da mit diesem Antriebskonzept keine grossen Geschwindigkeitsdifferenzen erzeugt werden ist er zudem äusserst leise, was für den bevorzugten Einsatz zur Umweltbeobachtung sehr günstig ist, siehe [2].

[1] J. K. Bock, B. Knauer; „Leichter als Luft – Transport- und Trägersysteme – Ballone Luftschiffe Plattformen“; Verlag Frankenschwelle KG, Hildburghausen, 2003
[2] www.gefa-flug.de/gefa/news12082003.htm
[3] H. Hertel; „Struktur Form Bewegung“; Krausskopf-Verlag; Mainz, 1963
[4] J. Bar-Cohen (Ed); „Electro active Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles Reality, Potential, and Challenges”; SPIE Press, Bellingham, Washington, USA, 2001
[5] H. H. Thomann, P. Merkli; „Strömungslehre I“; AMIV-Verlag, Zürich, 1975
[6] www.isd.uni-stuttgart.de/lotte/lotte/index.htm