

ENTFALTUNGSMECHANISMEN FÜR DEN LEICHTBAU AUF BASIS BIONISCHER ELEMENTE

BMBF-Ideenwettbewerb Bionik — Innovationen aus der Natur

C. Sickinger, J. Melcher, T. Ströhlein, J. Nickel

christoph.sickinger@dlr.de, joerg.melcher@dlr.de, tobias.stroehlein@dlr.de, joerg.nickel@dlr.de

C. Schillo, M. Mayser, C. Altenkirch

c.schillo@tu-bs.de, m.mayser@gmx.de, carolin@altenkirch.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

Zusammenfassung: *Entfaltbare Leichtbaustrukturen spielen in vielen technischen Anwendungen eine zunehmend wichtige Rolle. Grundlegende Designanforderungen nach Mobilität und einfachem Transport, nach geringer Systemkomplexität und damit Robustheit sowie nach einer energieeffizienten Entfaltung finden sich bei technischen Systemen genauso wie bei natürlichen Vorbildern. Biologische Entfaltungsprozesse liefern daher wichtige Ansätze, die auf technische Entwicklungen Einfluss nehmen können. Typische Anwendungsgebiete sind entfaltbare Raumfahrtssysteme und Strukturen der temporären Architektur für den Einsatz im Katastrophenschutz. Der Entfaltungsprozess eines Libellenflügels verläuft zum Beispiel ähnlich dem Aufblasen druckbeaufschlagter technischer Systeme und die Entfaltung eines Chamäleonschwanzes findet ihre Analogie bei einem aufgerollten Ultraleichtbaumast, den das DLR als lasttragendes Element zur Entwicklung treibstoffloser Solar Sail Raumfahrtantriebe einsetzt. Im Rahmen der Studie werden biologische Vorbilder analysiert und ihr Potenzial im Hinblick auf eine technische Anwendung sowohl in der Raumfahrt als auch für terrestrische Strukturen untersucht. Einfache Tests zeigen Möglichkeiten aber auch Grenzen der bionischen Lösungsansätze.*

EINLEITUNG UND MOTIVATION

Entfaltbare Strukturen gewinnen für Raumfahrtanwendungen immer mehr an Bedeutung. Große, flexible Solarzellenausleger mit gesteigerter Leistungsfähigkeit oder Reflektoren mit bis zu 25 m Durchmesser sind typische Anwendungsfälle, deren Bedarf aktuell bei der Europäischen Raumfahrtagentur ESA im Rahmen von Technologieharmonisierungen ermittelt wird. Zukünftige treibstofflose Solar Sail Antriebskonzepte basieren auf extrem leichten, großen, entfaltbaren Strukturen, die unter Verwendung des solaren Strahlungsdrucks den Verzicht auf chemische Antriebe ermöglichen. Für terrestrische Anwendungen leiten sich Bedarfe nach Entfaltungsstrukturen zum Beispiel aus dem Katastrophenschutz ab. Temporäre, schnell und sicher zu errichtende Zeltstädte sind eine Zielsetzung, die ähnlich wie Camouflage-Hangars und Hallen im militärischen Bereich von synergetischen Effekten aus den Entwicklungen profitieren können. Die Hauptanforderungen sind extremer Leichtbau, geringes Packvolumen im gestauten Zustand, ein robustes, das heißt fehlertolerantes Design sowie die Minimierung der zur Entfaltung notwendigen Energie. Dabei spielt der sichere und reproduzierbare Entfaltungsvorgang eine zentrale Rolle.

BIONISCHER LÖSUNGSANSATZ

Im Rahmen des Projekts wurden zunächst eine Reihe möglicher biologischer Entfaltungsprinzipien theoretisch untersucht und im Abgleich mit technischen Anforderungen bewertet. Interessante Ansätze für Entfaltungsprozesse

lassen sich unter anderem aus druckbeaufschlagten biologischen Systemen ableiten. Bei der Notochord-Rückenseite (*Chorda dorsalis*) handelt es sich zum Beispiel um ein temporäres zentrales Achsenorgan im frühen Stadium der embryonalen Entwicklung. Es besteht aus einem speziellen Zellmantel mit umlaufenden Kollagenfasern und realisiert durch osmotische Innendruckbeaufschlagung in gewisser Weise einen Entfaltungsprozess [2]. In ähnlicher Form entfalten Insekten ihre membranartigen Flügel. Im gefalteten Zustand verhält sich das Material relativ steif und unelastisch, gewinnt unter Einwirkung eines Hormons während der druckbeaufschlagten Entfaltung signifikant an Flexibilität und ermöglicht auf diese Weise eine Überdehnung des Flügelmaterials bis zur vollständigen irreversiblen Entfaltung [7]. Während der Projektlaufzeit wurden detaillierte Filmaufnahmen der Flügelentfaltung der Großen Heidelibelle (*Sympetrum striolatum*) und der Herbst-Mosaikjungfer (*Aeshna mixta*) angefertigt (Abbildung 1). Die eigentliche Aushärtung des Flügelmaterials erfolgt erst im Anschluss an die Entfaltung durch einen Trocknungsprozess. Die Flügelmembranen werden dabei wahrscheinlich durch Materialschumpfung zwischen den Versteifungsstreben gespannt.

Im Sinne des Leichtbaus, der für eine Reihe möglicher technischer Anwendungen eine sehr wichtige Rolle spielt, ist das Ausnutzen gespeicherter Federenergie als treibende Kraft für den Entfaltungsprozess ein weiterer sehr interessanter biologischer Ansatz, der im Rahmen des Projekts verfolgt wurde. Kängurus nutzen zum Springen beispielsweise die elastische Deformationsfähigkeit der Plantaris-Sehnen als energetischen Zwischenspeicher und durch das

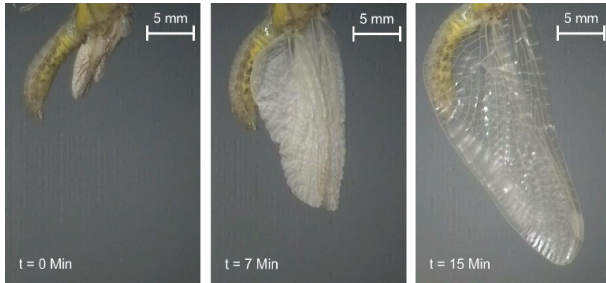


Abb. 1: Große Heidelibelle (*Sympetrum striolatum*): Entfaltungsvorgang membranartiger Insektenflügel durch Innendruckbeaufschlagung, Entfaltungsdauer ca. 10–20 min [3].

koordinierte Strecken des Wadenmuskels (*Gastrocnemius*) wird auf diese Weise eine sehr energieeffiziente Fortbewegung realisiert. Muskuläre Aktuatorik kann in der Relaxationsphase in gewisser Weise der Dissipation von gespeicherter Federenergie gleichgestellt werden. Im Rahmen des Projekts wurde daher eine Analogie zwischen dem aufgerolltem Zustand eines Chamäleonschwanzes und einem DLR-Patent für aufrollbare Leichtbaumasten gesucht (Abbildung 2). Bei den Masten handelt es sich um eine Leichtbauvariante sogenannter STEM-Booms (Storable Tubular Extendible Member), die bereits seit den 1960er Jahren in verschiedenen Ausführungen für Raumfahrtanwendungen eingesetzt werden. Das DLR benutzt eine Ultra-Leichtbauvariante dieser Masten aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff für die Entwicklung von treibstofflosen Solar Sail Antriebskonzepten. Im aufgerollten Zustand speichern die Masten Federenergie, die während der Entfaltung als Energiequelle für den Entfaltungsvorgang genutzt werden kann.

TECHNISCHE UMSETZUNG

Aufblasbare Leichtbausysteme, die in ähnlicher Weise wie biologische Entfaltungsvorgänge funktionieren, konnten in der Raumfahrttechnik bereits erfolgreich umgesetzt werden [1]. Eine Analogie zur untersuchten Libellenflügelentfaltung lässt sich vor allem in Bezug auf den Entfaltungsprozess ziehen. Unausgehärtete Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffhalbzeugen (Prepregs) können im flexiblen Zustand sehr platzsparend transportiert werden. Durch Innendruckbeaufschlagung werden die Strukturen aufgeblasen und im Anschluss an die Entfaltung ausgehärtet. Der Aushärtungsvorgang kann z. B. thermisch, durch UV-Strahlung oder durch das Ausdampfen flüchtiger Bestandteile eingeleitet werden. Bei der Libellenflügelhärtung konnte beobachtet werden, dass durch den Einfluss eines Hormons der Charakter des Materials je nach Anforderung der aktuellen Entfaltungsphase zwischen starren und flexiblen Eigenschaften veränderbar ist. Ein ähnliches Verhalten lässt sich technisch ansatzweise durch den Einsatz katalytisch wirkender Gase als Entfaltungs- und Aushärtungsmedium erreichen. Thermoplastische Materialien besitzen

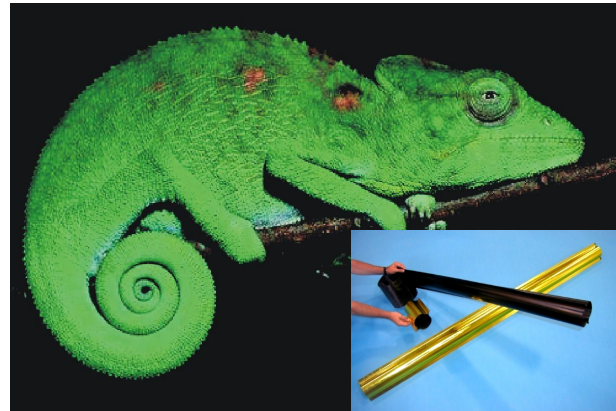


Abb. 2: Chamäleonschwanz: Muskuläre Aktuatorik als Vorbild für ein entfaltbares Mastkonzept auf Basis gespeicherter Federenergie.

zudem die Eigenschaft, jenseits der Glasübergangstemperatur sehr flexibel und dehnbar zu sein. Bei tiefen Temperaturen sind die molekularen Bindungen praktisch eingefroren und der Werkstoff verhält sich zunehmend glasartig spröde. Wenngleich keine direkte Analogie zu der beobachteten Libellenflügelentfaltung gezogen werden kann, so existieren bei diesem technischen Konzept aufgrund der teilweise erheblich unterschiedlichen Materialcharakteristiken des Werkstoffs in Abhängigkeit der Temperatur doch deutliche Parallelen. In einfachen Tests ließ sich während des Projekts nachweisen, dass sich zwar eine Analogie im Hinblick auf das Entfaltungsverfahren relativ einfach darstellen lässt. Die Verlässlichkeit und Qualität des Entfaltungsprozesses und der anschließenden Aushärtung hängen jedoch sehr stark von gezielt variierenden Materialeigenschaften ab, die sich beim biologischen Vorbild durch den Einfluss von Hormonen offensichtlich sehr genau steuern lassen. Die Möglichkeiten technischer Werkstoffe sind in dieser Hinsicht als sehr eingeschränkt zu bewerten und die Entwicklung „technischer Hormone“ ist aus heutiger Sicht noch nicht abzusehen.

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung des aufrollbaren Chamäleonschwanz-Mastkonzepts wurden konstruktive Arbeiten und praktische Fertigungstests inklusive einfacher Funktionstests im Rahmen des Projekts durchgeführt (Abbildungen 3, 4). Als technischer Anwendungsfall wurde dabei ein sogenanntes Solar Kite Konzept untersucht. Es handelt sich hierbei um eine miniaturisierte Variante eines 40 m x 40 m Solar Sail zum Einsatz in Kombination mit Nano-, Pico- und Femto-Nutzlasten (< 1 kg). Grundsätzlich sind mit der geometrischen Größe der Entfaltungsstruktur gewisse Schwierigkeiten verknüpft. Tendenziell ergeben sich mit zunehmenden Dimensionen sehr flexible Strukturen mit geringen Eigenfrequenzen. Eine Analogie zur Biologie lässt sich auch in diesem Fall ziehen: die größten nachgewiesenen Libellen haben im Perm gelebt (*Meganeura*); sie hatten eine Flügelspannweite von ca. 70 cm. Sie waren — wenn überhaupt — nur zu lang-

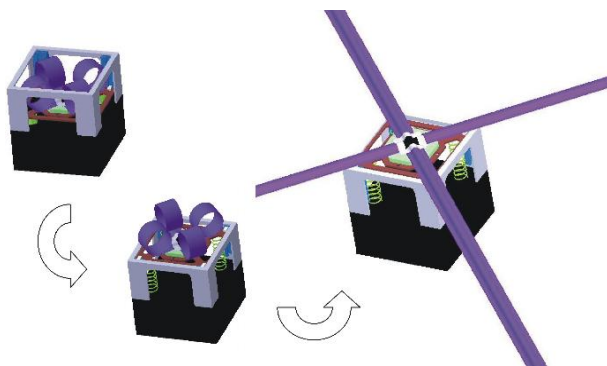


Abb. 3: Solar Kite Konstruktion: Entfaltungskonzept für miniaturisierte Solar Sail Ultra-Leichtbaustruktur [4].

samen Flügelbewegungen in der Lage und wahrscheinlich eher zum Gleiten geeignet. Die größten Flugsaurier waren mit ihren kleinen Körpern und großen Spannweiten von bis zu 10 m zwar ideale Segler. Sie waren allerdings kaum in der Lage, die Flügel zu schlagen. Tendenziell nimmt die Fähigkeit auf geänderte Randbedingungen der Umgebungsbedingungen und physikalische Störungen flexibel zu reagieren mit der Größe und Trägheit der Struktur ab. Miniaturisierung kann daher als aktiver Beitrag zur Reduzierung der Komplexität und damit des Risikos interpretiert werden, die auch im Falle des Solar Sail Konzepts Anwendung finden könnte. Im Allgemeinen ist es bei raumfahrtrelevanten Entfaltungstechnologien nicht möglich, eine chaotische, das heißt nicht zu jedem Zeitpunkt steuerbare, Entfaltung zu realisieren. Im Rahmen der Projektarbeiten wurde zur Vermeidung aufwändiger Entfaltungsmechanismen allerdings bewusst auf eine gerichtete Entfaltung verzichtet und der Erfolg der Entfaltung einzig an dem Endergebnis gewertet (Abbildung 4). Diese mehr technisch motivierte Vorgehensweise weicht von dem biologischen Vorbild der steuerbaren muskulären Aktuatorik eines Chamäleonschwanzes ab. Sie zeigt, dass eine 100%-ige Kopie biologischer Vorbilder oftmals nicht möglich und teilweise technisch auch nicht sinnvoll ist: die extremen Leichtbauanforderungen wären in diesem Fall mit entsprechenden Steuerungsmechanismen nicht zu erfüllen gewesen. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben im Wesentlichen die Annahmen bestätigt. Für die miniaturisierte Variante der entfaltbaren Masten ist eine chaotische Entfaltung weniger kritisch zu bewerten als für geometrisch größere Masten.

VERWERTUNG UND KOOPERATION

Neben den wissenschaftlichen Inhalten aus den Gebieten der Biologie und der Ingenieurwissenschaften wurde während der Projektlaufzeit außerdem Wert auf die mögliche Verwertung der Ergebnisse gelegt. Dazu gehört die Analyse der wirtschaftlichen Randbedingung als auch der Aufbau möglicher Kooperationen im Falle einer Fortführung der Arbeiten.

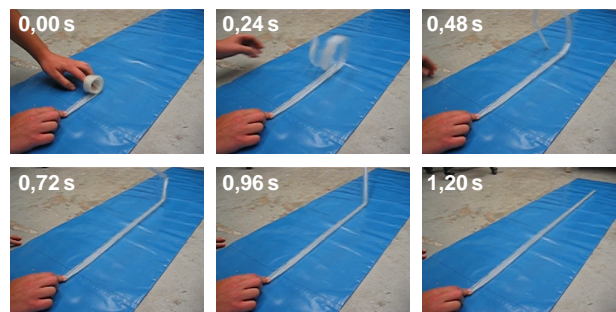


Abb. 4: Chaotische Entfaltungssequenz glasfaserverstärkter, ca. 1 m langer Chamäleonschwanz-Masten [4]. Entfaltungsdauer ca. 1,2 s. Entwicklung für Solar Kite Konzept.

Für zukünftige Raumfahrtssysteme auf Basis entfaltbarer Leichtbausysteme, etwa große orbitale Solarkraftwerke, ausfahrbare Masten, Kommunikationsantennen und Solar Sails, ist aktuell ein deutlicher Bedarfstrend festzustellen. Kurz- bzw. mittelfristige wirtschaftliche Erfolgsaussicht ergeben sich unter anderem durch die momentane Abhängigkeit von US-amerikanischen Lieferanten und teilweise vorhandenen Exportbeschränkungen. Durch die Harmonisierung europäischer Raumfahrttechnologien durch die ESA im Rahmen des *European Space Technology Master Plan* (ESTMP) wird der Bedarf für bestimmte Schlüsseltechnologien identifiziert und mittelfristig durch die Etablierung von Forschungsprogrammen gefördert. In 2000 wurden beispielsweise „Solar Arrays“ und „Synthetic-Aperture Radar (SAR)“ Technologien harmonisiert. Beide Technologien sind potenzielle Anwendungsgebiete für entfaltbare Strukturen. Darüber hinaus wurde in 2003 die ESTMP-Harmonisierung für aufblasbare Systeme und ausfahrbare Masten eingeleitet und seit 2004 betreibt die ESA die Harmonisierung von entfaltbaren Antennenreflektoren mit Durchmessern von bis zu 25 m.

Im Bereich der temporären Architektur zeigen globale Entwicklungen und die Prognosen für ein Zunehmen von Naturkatastrophen infolge wachsender Klimaverände-

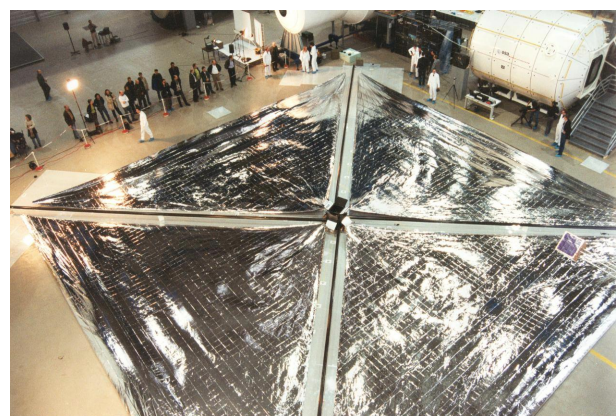


Abb. 5: Anwendungsgebiet Solar Sail: Entfaltbare Ultra-Leichtbaustruktur für treibstofflose Raumfahrtantriebe [5, 6].



Abb. 6: Designstudie *Temporäre Architektur*: Entfaltbares Leichtbauzelt für den Einsatz im Katastrophenschutz.

rungen einen steigenden Bedarf nach leichten, mobilen, robusten und schnell zu errichtenden Entfaltungsstrukturen, zum Beispiel zur Bereitstellung von Notunterkünften für Erdbeben- und Flutopfer im Katastrophenschutz (Abbildung 6). Für militärische Anwendungen spielen Mobilität und Robustheit eine ähnlich wichtige Rolle, etwa zur schnellen Verlegung von Einheiten. Entfaltbare Strukturen könnten zum Beispiel für Camouflage-Hangars eingesetzt werden. Mittel- bis langfristige Perspektiven ergeben sich auch für das Bauwesen, etwa im Messebau oder aber auch für sehr große und leichte Architekturen durch die Anwendung neuartiger Werkstoffe und Bauprinzipien.

Zur Verwertung der Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts mögliche Kooperationspartner für eine Fortführung der Arbeiten identifiziert. Bei der Auswahl wurde bewusst der interdisziplinäre Ansatz der bionischen Forschung verfolgt. Er schließt branchenübergreifend Partner aus Biologie, technischer Entwicklung und industrieller Umsetzung ein. In Zusammenarbeit mit dem Zoologischen Institut der Technischen Universität Braunschweig wurden die Entfaltungsprinzipien von Libellenflügeln mit hochauflösenden Filmaufnahmen dokumentiert (Abbildung 1). Die Raumfahrtunternehmen Kayser-Threde GmbH und HPS GmbH wurden über die Projektarbeiten informiert und die industriellen Kontakte führten schließlich zur Einreichung einer gemeinsamen Projektskizze bei der ESA. Un erwähnt bleiben sollte nicht, dass im Sinne der Ausbildung wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projekts jeweils eine Studien- und Diplomarbeit sehr erfolgreich absolviert wurden (siehe [3, 4]). Darüber hinaus wurden durch praktische Designstudien und Studentenpraktika in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Industriedesign der Hochschule Bildende Künste, Braunschweig die Möglichkeiten eines Technologietransfers in den Bereich der temporären Architektur angedeutet und Verwertungspotenziale mit dem Aachener Architektur- und Stadtplanungsbüro OX2 diskutiert.

Danksagung: Die dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung initiierten Bionik-Ideenwettbewerbs — Innovationen aus der Natur

erarbeitet. Unser besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Rüppell, Zoologisches Institut, TU Braunschweig für die Unterstützung bei der Anfertigung der Filmaufnahmen der Libellenflügelentfaltung.

LITERATUR

- [1] D. P. Cadogan and S. E. Scarborough. Rigidizable materials for use in Gossamer space inflatable structures. In *42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference & Exhibit*, Seattle, USA, April 16–19 2001. AIAA 2001-1417.
- [2] M. A. R. Koehl, K. J. Quillin, and C. A. Pell. Mechanical design of fiber-wound hydraulic skeletons: The stiffening and straightening of embryonic notochords. *Amer. Zool.*, 40:28–41, 2000.
- [3] M. Mayser. Analyse von Faltungsmechanismen in biologischen Systemen und Prüfung der technischen Eignung ausgewählter Mechanismen für den Ultraleichtbau. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig, 2005.
- [4] C. Schillo. Solar Kite: Technische Umsetzung biologischer Entfaltungsverfahren für den Ultraleichtbau. Konstruktive Studienarbeit, Technische Universität Braunschweig, 2005.
- [5] C. Sickinger, L. Herbeck, and E. Breitbach. Structural engineering on deployable CFRP booms for a solar propelled sailcraft. In *54th International Astronautical Congress*, Bremen, Germany, Sep 29 – Oct 03 2003. IAC-03-I.4.05.
- [6] C. Sickinger, L. Herbeck, T. Ströhlein, and J. Torrez-Torres. Lightweight deployable booms: Design, manufacture, and smart materials application. In *55th International Astronautical Congress*, Vancouver, Canada, Oct 04 – Oct 08 2004. IAC-04-I.4.10.
- [7] J. F. V. Vincent. Deployable structures in nature. Centre for Biomimetics, The University of Reading, UK, 1998.