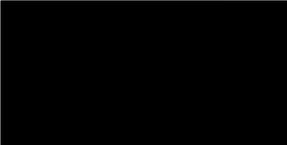


Seminararbeit



BIONIK IN DER LUFTFAHRT

Ivo Georgiev - Alexander Wimmer - Daniel Heller

Salier-Gymnasium Waiblingen

Schuljahr 2010/2011

Seminarkurs „Fliegen“

Betreuende Lehrkräfte: Prof. Kranzinger und Frau Riedel

Bionik in der Luftfahrt

-

Wie kann man die Prinzipien
der Natur für die Luftfahrt nutzen?

Vorgelegt von

Ivo Georgiev, Alexander Wimmer, Daniel Heller

23.05.2011

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt Frau Riedel und Herrn Prof. Kranzinger,
die uns durch unser überaus interessantes Thema begleitet
und wertvolle Ratschläge gegeben haben.

Desweiteren bedanken wir uns bei Dr. Pittschellis von der Firma Festo
für seine Bereitschaft uns ein Interview zu geben.

Großer Dank geht auch an unsere Eltern,
welche eine große Ausdauer beim Korrekturlesen gezeigt haben.

Wir versichern, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst
und keine anderen, als die im Literatur- und Quellenverzeichnis angegebenen Hilfsmittel
verwendet haben. Insbesondere versichern wir alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen
aus anderen Materialien kenntlich gemacht zu haben.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

1. GESCHICHTE	9
1.1 Daidalus und Ikarus.....	9
1.2 Leonardo da Vinci.....	11
1.3 Otto Lilienthal	13
2. ERRUNGENSCHAFTEN DER BIONIK.....	20
2.1 Gewölbte Tragflächen.....	20
2.2 Leichtbau.....	22
2.3 Widerstandsreduktion.....	23
2.3-1 Gleitflug am Limit	23
2.3-2 Der Handschwingeneffekt	27
2.4 Rückstromklappen.....	30
2.4-1 Die Problematik	30
2.4-2 Die Lösung der Vögel	31
2.4-3 Technische Umsetzung	32
2.5 Vorflügel	37
2.5-1 Daumenfittiche bei Vögeln	37
2.5-2 Das Hochauftriebssystem Vorflügel	38
2.5-3 Bionisches Optimierungspotenzial	42
2.6 Flügelpfeilung	43
2.6-1 Das Vorbild Vogel	43
2.6-2 Technischer Einsatz von Vorderkantenwirbel	46
2.6-3 Dynamische Veränderung der Flügelgeometrie	48
2.6-4 Bionische Zukunftsperspektive	49
2.7 Haifischhaut/ Die Riblet-Folie	49

2.8 Spindelförmiger Rumpf.....	52
2.9. Libelle und der Hubschrauber	53
3. ASPEKTE DER BIONIK	57
3.1 Gesellschaftliche Aspekte der Bionik	57
3.2 Wirtschaftliche und politische Aspekte der Bionik.....	58
3.3 Wissenschaftliche Aspekte der Bionik.....	61
3.4 Umweltliche Aspekte der Bionik	63
4. Ausblick in die Zukunft.....	66
5. Unter der Lupe: Industrielle Forschungsarbeit im Bereich der Bionik.....	69
5.1 Das Unternehmen FESTO.....	69
5.2 Interview mit Dr. Reinhard Pittschellis.....	72
QUELLENVERZEICHNIS.....	75

BIONIK – Lernen von der Natur

Wir befinden uns auf der weltweit größten Messe für Kameras. Die besten Hersteller haben sich an diesem Ort versammelt, um ihre technischen Wunderwerke zu präsentieren. Zahlreiche Prachtexemplare sollen mit ihren unzähligen Eigenschaften die Besucher anziehen. Jahrelange Optimierung und menschliche Entwicklungsarbeit auf höchstem Niveau stecken hinter den intelligenten Technologien. Die Aufregung ist groß und der Konkurrenzkampf noch größer, doch ich denke wir haben gefunden wonach wir gesucht haben. Ein Objekt technischer Begierde, das beispiellos alles andere in den Schatten stellt. In vergleichbarer Größe eines Speicherchips, bietet das Hightech Gerät unvorstellbare Funktionen. Mechanische, optische und elektronische Komponenten sind dreidimensional integriert. Sämtliche eintreffende Signale werden im Echtzeitmodus verarbeitet. Einzelne Elemente sorgen mit variablem Brechungsindex für die nötige Bildschärfe bei möglichen Erschütterungen. Auch die Mikrolinsen verarbeiten das eingestrahelte Licht in einer sensationellen Qualität. Überdies soll die Miniaturkamera auch noch umweltfreundlich sein: Um zu funktionieren, wird weder eine Quecksilber-Cadmium-Batterie noch ein Gehäuse aus Kunststoff oder einer Metalllegierung gebraucht. Sie denken es handelt sich dabei womöglich um ein weiteres Meisterstück fernöstlicher Innovationen. Nein – es ist lediglich eine Kurzbeschreibung des Auges einer Fliege, welche bloß auf das überdimensionale Gehäuse einer ausgestellten Kamera verweilt.

Die Natur türmte in Folge von Jahrtausenden Erfindung auf Erfindung, während der Mensch eigentlich gerade erst damit begonnen hat und obendrein noch glaubt, er hätte die Schöpfung übertroffen. Eine Entwicklung von globaler Tragweite ist im Anmarsch, seit die Wissenschaft erkannt hat welche ungeahnte Wunder in der Natur schlummern, und nur darauf warten entdeckt zu werden. Der zunehmende Trend verspricht die evolutionären Strategien, Konstruktionen und Verfahrensabläufe auf die menschlichen Bedürfnisse zu übertragen. Von internationalen Konferenzen wird berichtet, dass Ingenieure in Zusammenarbeit mit Biologen und Physikern die Schatztruhe der Evolution nach Problemlösungen durchforsten, welche ihnen zunächst als völlig unbrauchbar erschienen. Das Wissen des Menschen im Hinblick auf technische und organisatorische Abläufe ist bislang weit entfernt von der ausgereiften Vielfalt der Natur. Erst wenn Arzneimittel so spezifisch wirken wie körpereigene Abwehrstoffe, Energietechnik und Energieverbrauch den biologischen Vorbildern nahe kommen, wenn

Computer so arbeiten wie das menschliche Gehirn, könnte man von einer technischen Revolution sprechen. Das Ziel wissenschaftlichen Forschens sollte deshalb lauten: Vorwärts zur Natur!

Das interdisziplinäre Fach Bionik soll dieses phantastische Potenzial für Inspirationen zur Kenntnis nehmen. Der Begriff Bionik (im Englischen bekannt als bionics oder biomimetics) setzt sich aus der ersten Silbe des Wortes „Biologie“ und der zweiten Silbe des Wortes „Technik“ zusammen, wodurch eine einfache Erklärung des Forschungsgebietes gegeben ist. Bionik ist eine Kombination aus beiden und vereint scheinbar prinzipielle Gegensätze. Erstmals geprägt wurde der Name vermutlich 1960 vom amerikanischen Luftwaffenmajor J.E. Steele, wobei er darunter das „Lernen der Technik von der Natur“ verstand. Zumindest im deutschsprachigen Raum wird dank Prof. Werner Nachtigall, ein weltweit anerkannter Vorläufer in diesem naturwissenschaftlichen Fachgebiet, zwischen der Technischen Biologie und der Bionik differenziert. Max Planck hat einmal gesagt: „Dem Anwenden muss das Erkennen vorausgehen“. Folglich benötigt man zwei Arbeitsrichtungen. Eine, die Erkenntnisse sammelt, und eine, die sie technisch umsetzt. Mit Hilfe von physikalischen und technischen Methoden werden bei der Technischen Biologie lebende Organismen erforscht. Hier findet ein Austausch von der Technik in die biologische Forschung statt. Umgekehrt verhält sich dahingegen die Bionik, welche Erkenntnisse aus der Natur in technischen Anwendungen umsetzt. Letztlich sind beide Arbeitsrichtungen voneinander abhängig und gehören wie Kopf und Zahl einer Münze immer zusammen. Angesammelte Erkenntnisse durch die Technischen Biologie würden nur in Bibliotheken verstauben, gäbe es nicht die Bionik, die sie weiterführt und umsetzt. Auf der anderen Seite kann die Bionik nichts realisieren, wenn nichts bekannt ist.

Die Bionik erkennt und überträgt bestimmte Vorbilder der Natur, kopiert sie aber nicht. Dies wäre vom heutigen Stand der Technik betrachtet auch gar nicht möglich. Es fallen deutliche Unterschiede auf, wenn man Lebewesen mit technischen Geräten vergleicht. Lebende Organismen dienen streng genommen keinem bestimmten Zweck. Ihre Aufgabe besteht einzig darin, ihr Leben als Individuum zu erhalten und sich fortzupflanzen. Die Technik dagegen wird stets zu einem bestimmten Zweck hergestellt. Zudem verfügen Lebewesen über einen dynamischen Körperaufbau, welcher nicht aus vorgefertigten Teilen besteht. Denn einzelne Organe bilden sich aus gemeinsamem Material des Keimlings heraus. Zusätzlich erfüllen Teile immer mehrere Funktionen zugleich. Im Gegensatz dazu sind Objekte menschlicher Schöpfung statisch angelegt und können ihren Aufbau nicht verändern. Sie sind

aus vorgefertigten Teilen zusammengesetzt, wobei jedes Teil meist nur eine Funktion erfüllt. Trotz Unterschiede unterliegen sowohl Lebewesen als auch Maschinen denselben physikalischen Gesetzen, und deshalb lassen sich lebende Systeme bis in ihre Erbstrukturen aus technischer Sicht beschreiben. Die Lebewesen lassen sich zwar nicht ohne weiteres nachbauen, doch mit Hilfe der Bionik können wir Vorbilder aus der Natur zum Zweck unserer eigenen Bedürfnisse kreativ nutzen. "Man muss Ideen aus der Natur nicht genau nachbauen, sondern man kann alle Erkenntnisse beliebig variieren und durch Kombination am Ende zu einer Idealform gelangen." ¹

So vielfältig wie die Vorbilder aus der Natur, so verschieden können auch die Einsatzmöglichkeiten der Bionik sein. Ein Teilgebiet lautet Bewegungsbionik, worauf in der vorliegenden Hausarbeit der Fokus gelenkt wird. Laufen, Schwimmen, und Fliegen sind die grundlegenden Hauptfortbewegungsmittel im Tierreich. Auf welche Art und Weise bewegte Körper optimale Strömungsanpassung verwirklichen, welche Antriebsmechanismen genutzt werden, um hohe Wirkungsgrade zu erzielen, sind Fragen, die in diesem Bereich erläutert werden.

¹Prof. Dr. Werner Nachtigall: <http://www.geo.de/GEOLino/technik/58976.html>

1. Geschichte

1.1 Daidalus und Ikarus

Im Folgenden wird Bezug genommen auf die lateinische Version des römischen Dichters Ovid (43 v. Chr. – 17 n. Chr.):

Die Sage von Daidalus und Ikarus aus der griechischen Mythologie handelt von einem Künstler namens Daidalus, der als größter Baumeister und Bildhauer seiner Zeit galt. Die Eifersucht brachte ihn einst dazu, einen Schüler, der ihn an Kunstfertigkeit zu übertreffen drohte, zu töten. Deshalb musste er mit seinem Sohn Ikarus aus seiner Vaterstadt Athen nach Kreta fliehen. Der tyrannische König der Insel, Minos, wusste die künstlerischen Fähigkeiten seines Gastes zu schätzen und beschäftigte ihn. Daidalus litt sehr unter Heimweh nach seinem Geburtsort. Aber Minos lies den kunstfertigen Mann nicht gehen und so wurde der Aufenthalt für Daidalus zur Gefangenschaft. Eines Tages kam Daidalus die Idee durch den Himmel zu fliehen. Um diese Tat vorzubereiten, baute er für seinen Sohn und sich Flügel aus Federn und Wachs. Nachdem der Vater Ikarus das Fliegen beigebracht hatte, flohen beide von der Insel. Trotz der Warnung seines Vaters wurde Ikarus während des Flugs über das Meer übermütig und flog so hoch, dass er der Sonne zu nahe kam. Das Wachs, das seine Flügel zusammenhielt, schmolz und Ikarus stürzte ins Meer und starb.

Der Traum vom Fliegen ist ein Urtraum des Menschen. Wie diese Sage zeigt, träumte man schon in der Antike davon, sich wie die Vögel leicht in die Luft zu erheben und die Freiheit im Luftraum zu entdecken. Das Fliegen war schon immer Inbegriff der grenzenlosen Freiheit. Man beobachtete die scheinbar schwerelos und leicht fliegenden Vögel und benutzte sie als Metapher für wahre Freiheit. So wie Ikarus sein Gefängnis auf der Insel und seine Fesseln löste, indem er sich einfach in die Luft erhebt, wollten die Menschen ihren Sorgen und Probleme, die ihre Seelen fesselten, davonfliegen.

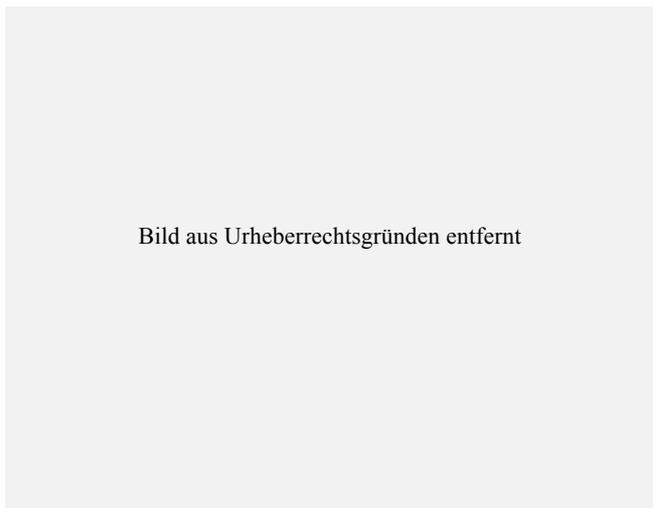
Da die technischen Möglichkeiten zu dieser Zeit jedoch noch rar waren und vor allem das wissenschaftlich-physikalische Grundwissen fehlte, blieb das Thema Fliegen zunächst nur Gegenstand in Sagen. Man erkannte allerdings, dass das Fliegen für Menschen prinzipiell durch technische Erfindungen realisiert werden könnte.

Ikarus war der Sage nach der erste Mensch, der im Gegensatz zu den Göttern, die durch ihr Wesen befähigt sind zu fliegen, mit Hilfe einer technischen Vorrichtung wie ein Vogel durch

die Luft flog. Welchen Eindruck dieser Mythos auf die Menschen noch heute hat, zeigt sich daran, dass es Dutzende Flugzeuge, Segelflugclubs und Modellbauvereine gibt, denen Ikarus ihren Namen gab.

Schon damals nahm man sich die Natur zum Vorbild, so baute Daidalus für seinen Sohn und sich kunstfertig Flügel aus Vogelfedern zusammen. Daidalus erkannte also die hohe Perfektion der Lebewesen und machte sie sich für seine Vorrichtung zu Nutze. Man könnte hier im weitesten Sinne von Bionik sprechen.

Die Sage zeigt zudem, dass die Menschen der Antike schon erkannten, was für eine Bedeutung die Fähigkeit zu fliegen in Hinblick auf Mobilität, Kriegsführung und Freizeit(sport) für die Menschheit hätte. In der Sage wird zum Beispiel beschrieben, wie das ganze Heer des Königs gegen Daidalus und Ikarus, die durch die Luft flüchten, machtlos ist. Außerdem sei der Flug zügig gewesen, sodass sie schnell von der Insel Kreta ans griechische Festland kamen. Auch der „Spaßfaktor“ des Fliegens wird an Hand von Ikarus beschrieben, wobei das dadurch entstehende Risiko und die Gefahr des Einzelnen nicht unterschlagen wird. Der Übermut Ikarus und sein Streben nach einem höheren Flug führen schließlich dazu, dass er abstürzt. Auf die heutige Zeit übertragen, könnte man es auch so deuten, dass nicht nur der wirkliche übermütige Flug in einem Absturz enden kann, sondern dass auch großwahnwitzige „Höhenflüge“ in der Entwicklung zu einem Absturz, also zu schwerwiegenden Nachteilen für die Menschheit und die Umwelt führen können. Während Daidalus die Mechanik und Technik seiner „Maschine“ durchschaut und beherrscht, sie rational kontrolliert und mit kalkulierbarem Risiko benutzt, verfällt Ikarus der Faszination der Maschine und dem Freiheitsdrang. Somit macht die Sage auch darauf aufmerksam, dass mit jeder neuen Erfindung auch Gefahren verbunden sind und daraus folgend Verantwortung und Voraussicht bei der Verwendung dieser nötig ist. Dies ist für die heutige Zeit, in der technische Möglichkeiten weitgehend unser Leben bestimmen, durchaus von großer Bedeutung.



1.1 Abbildung 1: "Sturz des Ikarus", Carlo araceni, 1606/07

<http://onerasora.blogspot.com/2011/02/der-fall-ikarus-rolando-villazon.html>

1.2 Leonardo da Vinci

Die Menschheit hatte seit ihrer Existenz fliegende Vorbilder vor Augen. Angeregt von der Erkenntnis, dass auch Objekte, die schwerer als Luft sind, die Schwerkraft überwinden können, entstand der Wunschtraum des Fliegens. Der über Jahrhunderte andauernde Entwicklungsweg zeichnet sich durch zahlreiche Theorien und spektakuläre Experimenten aus. Die ersten Anfänge sind auf das Genie Leonardo da Vinci zurückzuführen. Der wohl bekannteste Mensch der europäischen Geschichte wird heute allgemein als „Universalgenie wie kein anderer seiner Zeitgenossen“ bezeichnet. Der Versuch die Grenzen des Wissens seiner Zeit radikal zu erweitern, sowohl als Wissenschaftler, Ingenieur aber auch Künstler, ist ein Beweis dafür wie weit er Mitte des 15. Jahrhunderts seiner Epoche voraus war. Ein Forschungsgebiet unter vielen anderen, war das Fliegen, mit dem sich Leonardo erstmalig wissenschaftlich befasste. Der grenzenlose Wissenshunger, aufgrund der damals fehlenden grundlegender Kenntnisse über die Bewegungsabläufe von Vögeln, veranlassten ihn dazu den Flugvorgang zu analysieren und Rückschlüsse auf das Grundprinzip zu schließen. In seinen Arbeiten war er stets danach bestrebt die Natur als Vorbild mit Hilfe von technischen Mitteln nachzuahmen. Das gewonnene Wissen über bestimmte Zusammenhänge und Konstruktionen wurde auf die Technik übertragen, wobei man nicht außer Acht lassen darf, dass die handwerklichen Fähigkeiten im Mittelalter nicht mit den heutigen zu vergleichen sind und eine optimale Ausführung nur beschränkt möglich war.

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

1.2 Abb. 3: Schwingenflugapparat

<http://www.flugzeug.kilu.de/index.php/home.html>

Bild aus
Urheberrechtsgründen
entfernt

1.2 Abb. 1:
Selbstportrait von
Leonardo da Vinci

<http://www.angelfire.com/electronic/awakening101/leonardo.html1606/>

Bild aus
Urheberrechtsgründen
entfernt

1.2 Abb. 2:
Vogelflugbeobachtung

<http://www.explo-heidelberg.de/ausstellung/Flug>

Sein gesamtes Studium des Vogelflugs beschreibt er in einer knapp 5000 Seiten umfassenden Niederschrift über den Schwingenflug der Vögel und Fledermäusen. Ebenso eine Sammlung von ungefähr 160 Skizzen veranschaulicht seine experimentelle Umsetzung. Man kann dabei feststellen, dass die Konstruktion der Flugapparate ausschließlich dem Körperbau der Tiere

nachempfunden wurde. Somit konnte Da Vinci grundlegende Erkenntnisse über Flugstabilität, Gewichtsproblematik und Schwerpunkt gewinnen, die für den Aufbau bedeutend waren.

In seinem Lebenswerk widmet sich Leonardo ausschließlich dem Grundgedanken vom Schwingenflug. Die Überzeugung davon, dass der Mensch in der Lage ist aus eigener Muskelkraft ein solches Fluggerät zu bedienen, trägt eine Problematik mit sich, welche nicht genau betrachtet wurde. Wohl unbeachtet verbleibt das Verhältnis der Muskelkraft zum Körpergewicht im Vergleich zu Vögeln. Mit einer Spannweite von 18m eines sogenannten „Ornithopters“, erscheint ein Flug aufgrund der viel zu schweren Werkstoffe, beinahe unmöglich.

Erste Ansätze zur Steuerung konnte Leonardo anhand von Beobachtungen am Verhalten der Vögel im Fluge erkennen. Die Bedeutung der stabilisierenden Wirkung eines Höhenleitwerks sowie die Funktion eines Höhenruders sind beispielsweise bis heute als wichtige Elemente des Fliegens erhalten geblieben.

Die fundierten Forschungen gerieten jedoch nach seinem Tod schnell in Vergessenheit. Verständlich wird dies, wenn man Leonardo im Fokus der Kirche betrachtet. Da Wissenschaft und technischer Fortschritt nicht mit dem Weltbild der Kirche übereinstimmten, bestand für ihn die Gefahr durch Spionen der Kirche in Verdacht zu geraten. Eine Verfolgung durch die Inquisition konnte Leonardo einzig verhindern, indem seine schriftlichen Erläuterungen verschlüsselt wurden. Sämtliche Unterlagen wurden in einer Spiegelschrift ausgeführt. Diese Art des Dokumentierens, aus Angst vor der Kirche, ist auch von Galileo Galilei bekannt.

Erst Ende des 19. Jahrhunderts wurden seine Schriften gedruckt und für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Da die beschriebenen Erkenntnisse bereits bekannt waren, sowie die Theorie vom Schwingenflug, allein mit Hilfe der Muskelkraft zu fliegen, widerlegt wurde, konnte seine Forschung keinen Einfluss auf die Entwicklung der Flugapparate nehmen.

Nichtsdestotrotz hatten Leonardos Forschungen eine Bedeutung in Hinblick auf die Kultur. Die Lehre der Kirche, dass nur den Heiligen und Christus selbst die Himmelfahrt zustehe, zerfiel mit dem zunehmenden Interesse an Naturwissenschaften.

Ungeklärt bleibt jedoch die Frage, warum die Analyse des Segelflugs bei Vögeln in seine Niederschriften außer Acht gelassen wurde. Seine Beobachtungen, Versuche und die darauf basierenden Theorien beharrten allein auf die Idee vom Schwingflügelapparat.

Nach Aussagen vieler Luftfahrthistoriker wurden weder Schwingen- noch Gleitflugversuche durchgeführt. Jahrhunderte später wird der Gleitflug von anderen Pionieren erforscht und praktiziert. Als Grundvoraussetzung für den Übergang zum Motorflug, spielt er eine wichtige Rolle.

Die völlige Inspiration von der Natur wurde Leonardo zum Verhängnis und hinderte ihn am Erfolg. Bis heute ist der Mensch nicht in der Lage, die Flugtechnik von Vögeln zum Zweck der Luftfahrt zu imitieren. Nichtsdestotrotz sind physikalische Gesetze, die sich die Vögel zu Nutze machen, von großer Bedeutung für die Bionik.



1.3 Otto Lilienthal

Der Mann, welcher der Menschheit Flügel schenkte. Bis heute gilt er als der erste erfolgreiche Flieger der Menschheit. Er ist der Pionier des Menschenflugs. 1891 gelang ihm sein erster Flug. Natürlich hatten auch vor ihm schon viele Menschen versucht, den Traum vom Fliegen zu verwirklichen. Einer der Ersten war Leonardo da Vinci, der Modelle für Fluggeräte schuf. 1505 beschäftigte er sich theoretisch mit der Möglichkeit, Fledermausflügel nachzubauen. Im Gegensatz zu Lilienthal ist da Vinci mit seinen Geräten wahrscheinlich nie geflogen.

1.3 Abb. 1: Otto Lilienthal

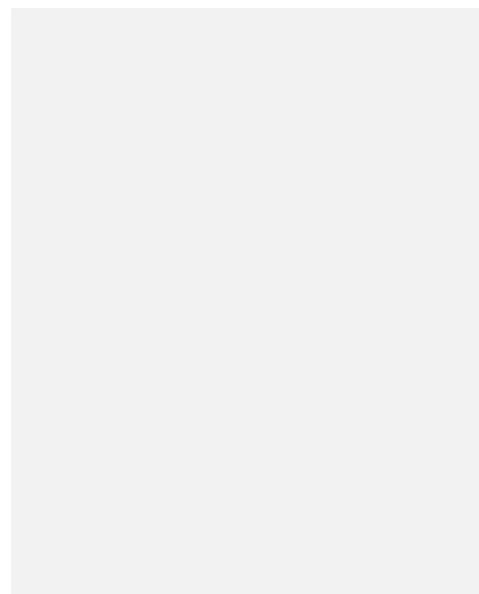
<http://www.deutsches>

[museum.de/ausstellungen/verkehr/Luftfahrt/luftfahrt](http://www.museum.de/ausstellungen/verkehr/Luftfahrt/luftfahrt)

bis-1918/

Karl Wilhelm Otto Lilienthal wurde am 23. Mai 1848 geboren. Er war das älteste von acht Kindern. Trotz des frühen Todes seines Vaters und der dadurch finanziell angespannten Lage ermöglichte ihm seine Mutter den Besuch des Gymnasiums. Zeitlebens unterstützte sie die Vorhaben von Otto und seinem Bruder Gustav.

Bereits während der Schulzeit interessierte sich Otto Lilienthal für das Fliegen. Im Alter von 18 Jahren begann er mit dem Studium des Vogelfluges und führte selber verschiedene Flugversuche und – experimente durch, immer unterstützt von seinem Bruder Gustav. Er beobachtete Möwen und Störche, zog sogar Jungvögel auf, um zu verstehen, wie der Flügelschlag funktioniert. Er wollte unbedingt begreifen und verstehen, wie Vögel fliegen können. Mit



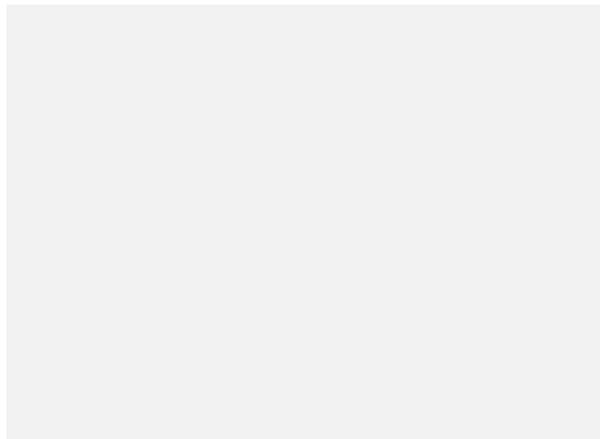
der Gründlichkeit eines Ingenieurs näherte sich Lilienthal seinem Traum des Fliegens

Er suchte nach dem Grundprinzip der Aerodynamik, nämlich dem Auftrieb – ein Thema, über das die Physiker damals fast nichts wussten. Schnell erkannte er, dass Flügel gewölbt sein müssen, um im Luftstrom nach oben zu steigen. Beobachtet man den menschlichen Körper im Windkanal, gestreckt in der Horizontalen, sieht man sofort, dass sich überall kleine Luftwirbel bilden. Der Mensch besitzt also keine gute Aerodynamik. Das alles führte auch Otto Lilienthal zu der Überzeugung, dass der Mensch zum Fliegen einen Flugapparat braucht. Den Menschen selbst muss man so gut es ging im Inneren eines Flugkörpers "verstecken", damit er das Fliegen nicht stört.

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt
1.3 Abb.2: Versuchsapparatur
<http://www.lilienthal-museum.de/olma/34.htm>

So baute mit seinem Bruder 1862 Flügel aus Leisten und Buchenspanbrettern, die nach dem Vorbild von Vögeln, besonders Störchen, konstruiert waren. Allerdings hielten sie ihre Experimente geheim und experimentierten deshalb hauptsächlich nachts, um nicht verspottet zu werden. Wie bereits erwähnt unterstützte ihre Mutter die beiden und bestärkte sie in ihrem Vorhaben, den einen Menschenflug durchzuführen.

Um sich weiter zu bilden und um Wissen zu erwerben, das ihm hilfreich bei seinen Forschungen sein konnte, schrieb sich Lilienthal an der königlichen Gewerbeakademie in Berlin ein und erhielt ein Stipendium. Nebenher widmete er sich aber weiterhin seinen Flugversuchen und –experimenten. Darunter auch Experimentiergeräte, mit denen sich Auftrieb dank Flügelschlagens erzeugen lässt. Er baute eine Apparatur auf, die von der Form her an ein Riesenspiel erinnert. Ein Gestell dreht sich um eine senkrechte Achse, welche am oberen Ende, ähnlich wie ein Hubschrauber, zwei horizontal verlaufende Stangen trug. Am Ende dieser Stangen waren gewölbte Tragflächen montiert. Ein Fallgewicht im Inneren des Gestells versetzte die Stangen mit den beiden jeweiligen Versuchskörpern in wirbelnde Umdrehungen. An der Basisverankerung des rätselhaften Gestells zeigte eine Waage zunehmende Entlastung an. Durch diese merkwürdig aussehende Apparatur stellte Lilienthal zum ersten Mal fest, dass eine gewölbte Fläche einen viel stärkeren Auftrieb erhielt, als seine



bisherigen ebenen Flächen. Das Ergebnis war eine hebbare Masse von 40kg. Er erforschte dabei auch die Luftströmungen an einem gewölbten Flügel.

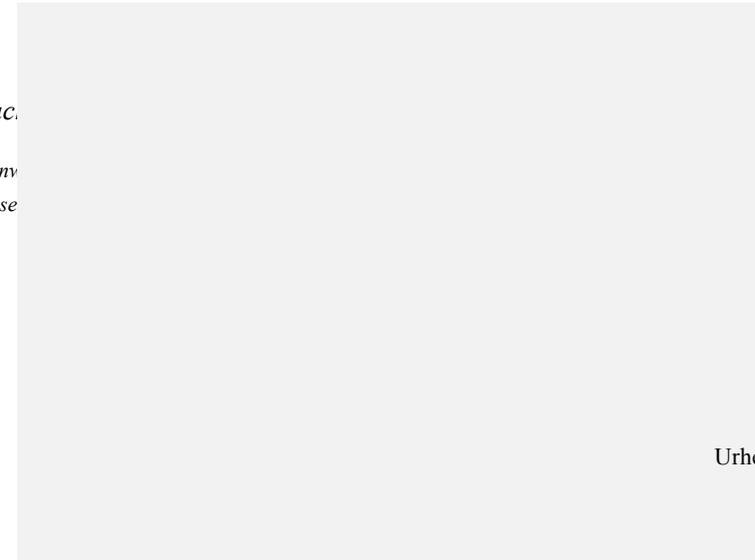
Als sein Studium beendet war, meldete er sich als „Einjährig-Freiwilliger“ und nahm am Deutsch-Französischen Krieg teil. Dabei war er an der Belagerung von Paris beteiligt. Er beobachtete wie ein paar in Paris eingeschlossene Menschen zwei Luftballons benutzten, um zu fliehen. Die breite Masse der Öffentlichkeit war damals überzeugt, dass das Fliegen nur möglich sei, nach dem Prinzip „leichter als Luft!“, d.h. also mit Heißluftballons oder Luftschiffen.

Nach dem Krieg kehrte er zurück und gründete mit seinem Bruder ein eigenes Unternehmen die „Dampfkessel- und Maschinenfabrik Otto Lilienthal“, um genug Geld zu verdienen, damit sie ihre Forschungen für den Menschenflug finanzieren konnten. Nach anfänglichen Startschwierigkeiten gelang ihnen 1881 mit einem Schlangenrohrkessel der wirtschaftliche Durchbruch. Ihre Werkstatt wuchs zu einer Fabrik mit 60 Angestellten heran. Natürlich bekam die Fabrik einen eigenen Bereich für den Flugzeugbau.

1887 baute er dann mit seinem Bruder einen Flugapparat. Dieser bestand aus Palisanderholz und Gänsefedern. Die Flügel, waren wie bei Vögeln, beweglich. Allerdings brachte genau deshalb dieser Versuch keinen Erfolg. So mussten sie sich die Brüder fragen, ob es überhaupt möglich sei, mit Muskelkraft zu fliegen, da die meisten angesehenen Wissenschaftler jener Zeit, wie z.B. Hermann von Helmholtz, sagten, dass "... es kaum wahrscheinlich sei, dass der Mensch auch durch den allergescheitesten flügelähnlichen Mechanismus, den er durch seine eigene Muskelkraft zu bewegen hätte, in den Stand gesetzt werden würde, sein eigenes Gewicht in die Höhe zu heben und dort zu erhalten". Dieser Ausspruch wurde von der Öffentlichkeit falsch gedeutet, wodurch diese dachte, dass ein Flug grundsätzlich nicht möglich sei. Durch diese kleine Umdeutung, mussten sich die beiden Brüder ständig damit auseinandersetzen, dass die Gesellschaft ihre Flugversuche und –experimente größtenteils als nutzlos ansah. Trotz alledem gab Otto Lilienthal nicht auf.

Er sah den Erfolg des Fliegens weiterhin in den gewölbten Tragflächen ähnlich wie bei den Störchen. Durch seine Beobachtungen von diesen und Möwen hat er bereits früh erkannt, dass die Flügel am Körperansatz schwerer sind, sich wenig bewegen, aber dort ihre höchste Tragfähigkeit besitzen. Zu den Flügelenden nimmt gleichzeitig die Bewegung zu und das Gewicht ab. Lilienthal erkannte dass mit Muskelkraft und nachgeahmtem Vogelflug kein

erfolgreiches Weiterkommen im Bau seines Flugapparats zu erwarten war. Denn ein Geheimnis der bisweilen majestätisch anmutenden Akrobaten der Lüfte ist ihr Gewicht. Vogelknochen sind viel leichter gebaut als die des Menschen. Der bräuchte, um überhaupt abheben zu können, eine gewaltige Flügelspannweite und enorme Muskeln. Alle Versuche, es den Vögeln gleich zu tun, waren daher zum Scheitern verurteilt.



Seine Erkenntnisse schrieb er 1889 in seinem Buch „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ nieder. Darin nannte er als den zentralen Punkt des Fliegens: „Alles Fliegen beruht auf der Erzeugung von Luftwiderstand, alle Flugarbeit besteht in der Überwindung von Luftwiderstand.“² Als Erster zerlegte er die Luftkraft (Luftkraftresultierende) in ihre hebende (Auftrieb) und ihre

hemmende (Widerstand) Komponente. Dabei zeigten sich für beide Komponenten klare Vorteile der gewölbten gegenüber einer ebenen Fläche.

Dieses Buch gilt heutzutage als das wichtigste flugtechnische Buch des 19. Jahrhunderts. Allerdings fand das Buch zur Zeit Otto Lilienthals keinen großen Anklang. Die Bevölkerung beachtete nur den Ballonflug, was Lilienthal schwer behinderte. In seinem Buch betont Otto jedoch immer wieder, man müsse den Vogelflug nachahmen, weil er sich sicher war, dass dies der Weg zum Ziel sei: *„Die Nachahmung des Segelflugs muss auch*

² *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, Berlin, 1889, S. 33.*

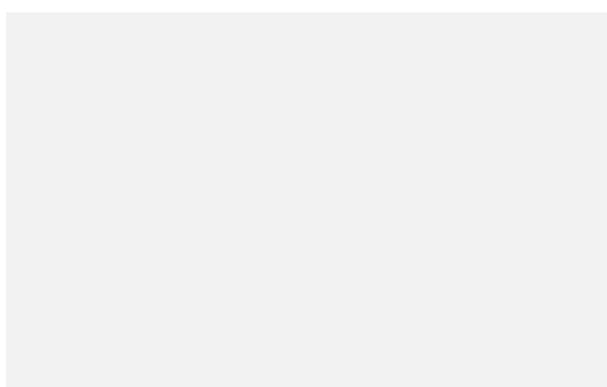
dem Menschen möglich sein, da er nur ein geschicktes Steuern erfordert, wozu die Kraft des Menschen völlig ausreicht."

Anhand seiner Beobachtungen an Möwen fand er heraus, dass, wenn der Flügel der Möwe hinten nach unten geneigt ist, die Möwe offenbar einen Auftrieb erfährt. Dies übertrug er nun auf seinen Flugapparat und benutzte gewölbte Tragflächen, anstatt ebenen, um mehr Auftrieb zu erzeugen.

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

Diese Erkenntnis besaßen zwar auch andere Wissenschaftler, dennoch war Lilienthal der einzige, der dies mit einer systematischen Vogelflugbeobachtung und mit exakten Messungen, an eigens dafür konstruierten Apparaten verband. Lilienthal erklärte sein Vorgehen damit: *„Es gibt nichts Verkehrteres, als auf Grund theoretischer Arbeiten sogleich eine Flugmaschine fix und fertig bauen zu wollen. Beim Herumraten und planlosen Probieren*

komme für die Fliegekunst überhaupt nichts heraus. Der Übergang müsse vielmehr planvoll und schrittweise erfolgen.“. Durch seine Vorgehensweise (mehr als 20 Jahre Beobachten und



Experimentieren) und die daraus gewonnen Erkenntnis gelang ihm 1891 endlich einen 25m langen Gleitflug, entgegen der Meinung der Öffentlichkeit, dass dies unmöglich sei. Die Brüder bewiesen damit, dass man nicht nur mit dem Prinzip „leichter als Luft“ sondern auch mit dem Prinzip „schwerer als Luft“ fliegen kann. Sein Flugapparat bestand aus einem mit Schirting (mit Lack überzogenes Baumwollgewebe) bespannter

Weidenholzrahmen. Seine Ausmaße: 6,6 m Spannweite, ca. 14 m² Tragfläche und eine größte Flügeltiefe von 2,5 m. An diesem ersten Gleitflug nahm sein Bruder sowohl aus gesundheitlichen wie auch beruflichen Gründen jedoch nicht mehr teil, weshalb der erste Menschenflug heutzutage ausschließlich mit Otto Lilienthal in Verbindung gebracht wird, wengleich sein Bruder an den Vorbereitungen entscheidend mitgewirkt hatte.

Die gesamte freie Zeit nutzte Otto für zahllose Versuche, wobei er jeden Flug auswertete und den Apparat kontinuierlich verbesserte. Später sprang Otto Lilienthal mit weiteren, verbesserten Flugapparaten verschiedene Hügel und Berge hinunter und schaffte schließlich einen Gleitflug mit 250m Länge.

3 Abb.5: Flugversuch

<http://muenster.rotaract.de/lerthen/fliegen>

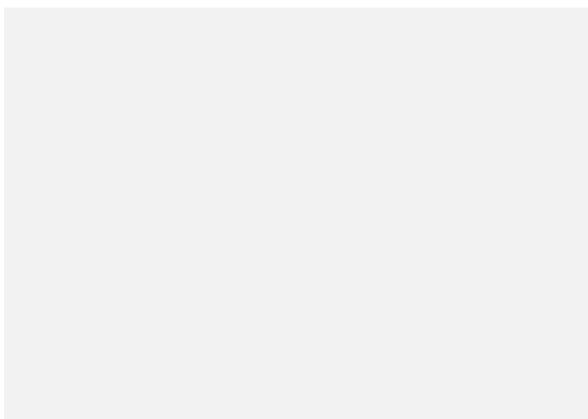
Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

Durch diese Gleitflüge erregte Otto Lilienthal die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit. Auf einmal wurde er berühmt und alle, die ihn bisher verspottet hatten, sahen ein, dass er Recht gehabt hatte. Er hatte bewiesen, dass das Prinzip „schwerer als Luft“ auch zum Fliegen geeignet ist. Über seine Flüge wurde nun im In- und Ausland berichtet. Es wurden Fotos von ihm beim Fliegen geschossen, die man in wissenschaftlichen und populären Veröffentlichungen in vielen Ländern wiederfand. Er gab die Ergebnisse seiner Flüge dem „Verein zur Förderung der Luftschiffahrt“, die dann in der „Zeitschrift für Luftfahrt“, „Physik der Atmosphäre“ und „Prometheus“ erschienen. Es bestand sehr große Nachfrage nach Otto Lilienthal, wodurch seine Artikel und Berichte sogar in den USA, in Frankreich und Russland Anklang fanden.

Er bekam von vielen anerkannten Wissenschaftlern Besuch, darunter Samuel Pierpont Langley aus den USA, Nikolai Jegorowitsch Schukowski aus Russland, Percy Pilcher aus England und Wilhelm Kress aus Österreich.

Damit gilt Otto Lilienthal als erster Mensch, der dank genauer Messungen wiederholt kontrolliert geflogen ist und der dadurch das Flugproblem gelöst hat. Womit er 1896 seinen Normalsegelapparat als ersten serienmäßigen Flugapparat bauen und verkaufen konnte.

Einige seiner Flugmodelle ließ Lilienthal sogar in Serie fertigen und verkaufte sie. Immer enthielten sie einen Beipackzettel, der vor den Gefahren des Fliegens warnte: „Also bedenken Sie, dass Sie nur ein Genick zum Zerschlagen haben.“



Den Wahrheitsgehalt seines Beipackzettels erfuhr Otto Lilienthal am eigenen Leib.

Es liefen nicht alle Gleitflüge von ihm ohne Probleme ab. Verstauchungen, Knochenbrüche etc. waren an der Tagesordnung.

Am 9. August 1896 jedoch stürzte er bei Stölln am Gollenberg ab. Grund dafür war ein starker Aufwind aufgrund Überhitzung am Boden, der starke Turbulenzen verursachte. Wahrscheinlich gelang es ihm nicht, den Aufwind auszusteuern, weshalb er aus ca. 15m Höhe abstürzte. Dabei brach er sich das Rückgrat und starb einen Tag später am 10. August an seinen schweren Verletzungen.

Auch heute noch gibt es immer wieder Flugzeugabstürze, zwar nicht aus 15 Metern Höhe sondern meist wesentlich höher, das Ergebnis ist jedoch dasselbe bzw. noch verheerender als bei Lilienthal. Es kostet nicht nur einem Menschen das Leben, sondern meistens vielen.

Die Ursachen sind auch heute noch wie damals, trotz sicherer und komfortabler Flugzeuge oftmals schlechte Witterungsbedingungen aber auch technische Defekte. Auch heute noch ist Fliegen nicht ungefährlich, im Vergleich zu den Anfängen zwar um ein Mehrfaches sicherer und komfortabler.

2. Errungenschaften der Bionik

2.1 Abb.6: Zeichnung eines Storchens Flügel

2.1 Gewölbte Tragflächen

Im Windschatten seiner Lagerhalle für Spezialdampfkessel hatte der junge Berliner Fabrikant Otto Lilienthal an selbstgebauten Apparaturen getüftelt, um das Geheimnis vom Auftrieb der Vögel zu entschlüsseln. Nach ausführlicher Beobachtung hatte er erkannt, dass ein

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

Storchenflügel gewölbt war, und im Querschnitt ein Profil aufwies, das vorne dick war und nach hinten nur noch so dünn wie die Spitzen der Federn. Erst mit dieser entscheidenden Erkenntnis konnten hohe Auftriebskräfte am Tragflügel erzielt werden, welche für die spätere Flugzeugentwicklung eine bedeutende Rolle spielen sollten.

Ein Vogel oder ein Flugzeug erfahren stets eine Gewichtskraft nach unten, die durch eine mindestens gleich große nach oben gerichtete Kraft ausgeglichen werden muss. Diese Kraft wird von den Tragflügeln erzeugt und man bezeichnet sie als Auftrieb. Da der Auftrieb aufgrund der Bewegung zwischen Luft und Körper entsteht, wird er dynamischer Auftrieb genannt. Anders hingegen spricht man von einem statischen Auftrieb, wenn der Körper eine geringere Dichte als Luft besitzt (z.B. bei einem Heißluftballon). Zum Verständnis des dynamischen Auftriebs sind

insbesondere die physikalischen Größen Druck und Geschwindigkeit entscheidend. Aufgrund der Krümmung auf der Oberseite werden die Strömungsfäden umgelenkt und beschleunigt. Das

2.1 Abb.9: Kontinuitätsgleichung

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

Prinzip kann mit einem strömenden Medium in einem schmal zulaufenden Rohr verglichen werden. Da sich das Medium nicht ohne weiteres komprimieren lässt, ist das fließende Volumen V pro Zeiteinheit t in beiden Teilen des Rohres gleich. Ausgehend davon, dass beide Ströme I gleich sind, muss sich folglich die Strömungsgeschwindigkeit v antiproportional zur

2.1 Abb.10: Durchströmtes Flügelprofil
 Querschnittsfläche A verhalten (Siehe Formel für die Kontinuitätsgleichung). Dies bedeutet,

http://www.mcb-bregenz.at/joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=21&Itemid=89 dass die Zunahme der einen Größe eine Abnahme der zweiten hervorruft. Diese Gesetzmäßigkeit zwischen den beiden Größen ist in beiden Rohrabschnitten enthalten. Im

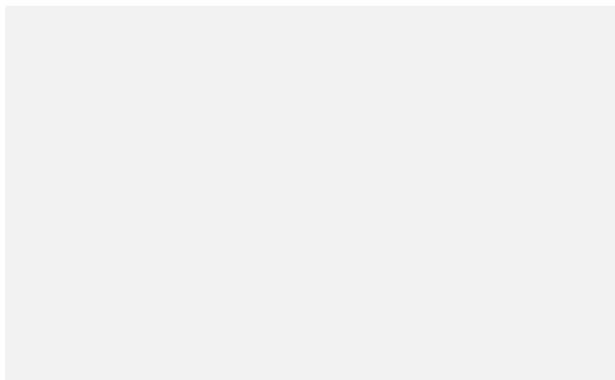
breiteren Bereich ist die Querschnittsfläche größer, dafür aber die Strömungsgeschwindigkeit geringer. Da sich der Strom I nicht verändert, muss folglich im Bereich der kleineren Querschnittsfläche eine höhere Geschwindigkeit vorhanden sein.

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t} = \frac{\Delta V_2}{\Delta t}$$

$$\frac{A_1 \cdot \Delta s_1}{\Delta t} = \frac{A_2 \cdot \Delta s_2}{\Delta t}$$

$$\boxed{A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2}$$



Überträgt man diese Erkenntnis auf ein durchströmtes Flügelprofil, so haben die Teilchen, die oberhalb des Flügels fließen, eine höhere Geschwindigkeit. Dort wo die Luft schneller strömt, herrscht nach den Strömungsgesetzen von Bernoulli ein geringerer Druck. Auf der Flügeloberseite liegt also ein Unterdruck (Sog), auf der Flügelunterseite ein Überdruck vor (vergleichbar mit dem Atmosphärendruck).

Aus dem Unterschied zwischen Ober- und Unterseite ergibt sich schließlich der Auftrieb. Grundsätzlich ist der Sog auf der Oberseite stärker an der Auftriebserzeugung beteiligt, als der Druck der Unterseite. Somit wird der Flügel eher nach oben gesaugt als von unten gedrückt. Im Bereich der Flügelvorderkante lässt sich aus der starken Krümmung der Strömungslinien folgern, dass an dieser Stelle der größte

<http://www.westermann.de/pdf/978-3-14-330513-1.pdf>

Unterdruck herrscht. Die Auftriebskraft lässt sich mit Hilfe des Auftriebsbeiwertes c_A , der Luftdichte ρ , der Anströmgeschwindigkeit v und der Tragflügelfläche A berechnen. Es gilt:

$$F_A = \frac{1}{2} c_A \rho v^2 A$$

Aus der Formel lässt sich schließen, dass die Auftriebskraft mit dem Quadrat der Anströmgeschwindigkeit zunimmt, d.h. bei doppelter Geschwindigkeit vervierfacht sich der Wert für den Auftrieb. Aus diesem Grund haben Flugzeuge für große Geschwindigkeiten nur vergleichsweise kleine und nur geringfügig gewölbte Tragflächen. Segelflugzeuge und Propellerflugzeuge werden daher mit besonders gewölbten Tragflächen gebaut, die auch bei niedrigen Geschwindigkeiten ausreichend großen Auftrieb erzeugen. „Dicke“ Tragflächen bewirken jedoch auch einen hohen Strömungswiderstand und verhindern hohe Geschwindigkeiten. Überschallflugzeuge besitzen folglich dünne Tragflügel mit geringer Wölbung, um den Strömungswiderstand möglichst zu reduzieren. Dafür aber müssen zum Abheben vom Boden höhere Geschwindigkeiten erreicht werden.

2.2 Leichtbau

Im Laufe der Evolution haben sich Vögel an das Leben in der Luft angepasst. Für die Fortbewegung in

	Körperlänge	Masse
Feldhase	65 cm	4000 g
Stockente	61 cm	1200 g
Igel	28 cm	700 g
Amsel	25 cm	100 g
Feldmaus	15 cm	30 g
Kohlmeise	14 cm	18 g

der Luft ist ein möglichst leichter Körperbau erforderlich. Die auf den Vogel stets wirkende Gewichtskraft setzt sich aus seiner Masse zusammen. Wenn also das Gewicht optimal reduziert wird, benötigt der Vogel weniger Energie, um Auftrieb zu erzeugen und kann unter Überwindung der Gewichtskraft länger in der Luft bleiben ohne mit den Flügeln schlagen zu müssen. Vergleicht man die Masse von Vögeln mit etwa gleich großen Säugetieren, so lassen sich deutliche Unterschiede feststellen (Siehe Tabelle). Folglich muss das verminderte Gewicht eine wichtige Rolle für die Anpassung an ihren Lebensraum und den erforderlichen Energieaufwand spielen.

Dies wird bestätigt wenn man das Vogelskelett und den Aufbau anderer Körperteile betrachtet. Schädelknochen

bestehen lediglich nur aus einer dünnen Knochenschicht. Während bei anderen Wirbeltieren die Knochen mit Knochenmark ausgefüllt sind, besitzen Vögel Luft besetzte Beinknochen. Nichtsdestotrotz sind Vogelknochen sehr hart und widerstandsfähig. Ähnlich wie bei einem Fachwerkhaus, bewirken die vielen Verstreben in den Knochen eine hohe Stabilität. Zudem bestehen sowohl Federn als auch Schnabel aus Horn, einem besonders leichten Material. Ausstülpungen der Lunge in Form von Luftsäcken durchziehen den gesamten Körper, sogar im Inneren von Muskeln und Organen. Die zahlreichen Verzweigungen der Luftsäcke reichen sogar tief in die Knochen hinein. Neben der Reduzierung des Energieverbrauchs, sollen sie beispielsweise Zugvögel bei der Überquerung von Gebirgen in einer Höhe von bis zu 5000 m mit Sauerstoff versorgen. Hinzu kommt, dass das breit ausgebildete Brustbein bei Vögeln ebenso aus dem leichten und elastischen Material Knorpel besteht. Sogar die Verdauung läuft äußerst schnell, um die Masse beim Fliegen gering zu halten. Dank der enormen Leichtbauweise sind Vögel in der Lage beeindruckende Flugleistungen zu bewerkstelligen.

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

Welche Bedeutung eine leichte Bauweise für die Energieeffizienz haben kann, hat auch die Luftfahrtindustrie angesichts der immer knapper werdenden Ressourcen erkennen müssen. Titan sowie kohlenstoff- und glasfaserverstärkte Kunststoffe werden immer mehr für die Herstellung von Bauteilen in der Luftfahrt verwendet, da sie eine leichtere und zugleich stabilere Konstruktionsweise bieten als früher verwendete Metalle. Hohlräume sowie Verstreben lassen sich ebenso im Aufbau eines Flugzeugflügels erkennen. Zusammenfassend findet also auch hier ein Prinzip aus der Natur eine technische Anwendung und erweist sich als effizient.

2.3 Widerstandsreduktion

2.3-1 Gleitflug am Limit

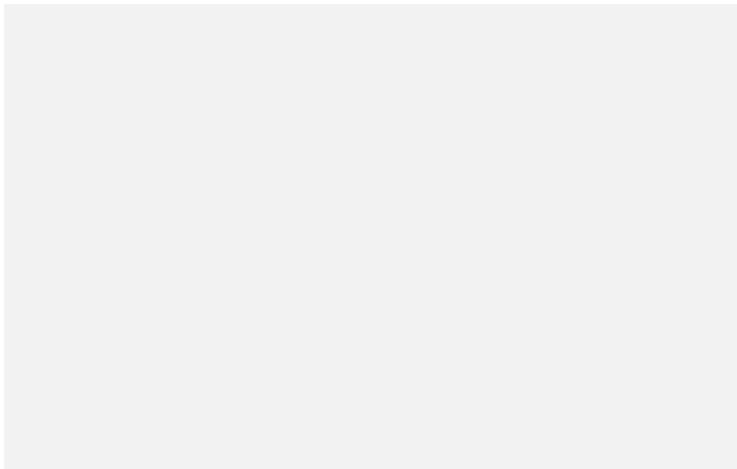
Mit einer Flügelspannweite von bis zu 4,5 Meter und einem durchschnittlichen Gewicht von 12 kg, gilt der Wanderalbatros (wissenschaftlicher Name: *Diomedea exulans*) als der größte

flugfähige Vogel der Welt. Die faszinierende Verbindung von größtmöglicher Spannweite mit maximalem Gewicht bringt den Wanderer der Meere an der physiologischen Grenze der Flugfähigkeit. Eine Studie japanischer Forscher beweist, dass die Muskelkraft des Vogels, bereits bei geringer Überschreitung der Masse, zum Fliegen nicht ausreichen würde. Da ein ausreichend schnelles Flügelschlagen nicht möglich wäre, kann der schwere Körper nicht in der Luft gehalten werden, falls der energiesparende Segelflug ausfällt. Dennoch ist der Wanderalbatros ein hervorragender Flieger, der die meiste Zeit seines Lebens elegant in der Luft verbringt. Sein außerordentlich gutes Gleitverhalten dominiert vor jedem durchschnittlichen Segelflugzeug. Trotz der langen und schlanken Flügel wird eine hohe Flugstabilität bei Sturm auf rauer See ermöglicht. Beobachtet man das Flugverhalten, so sind die Vögel in der Lage über längere Zeit ohne jeglichen Flügelschlag durch die Luft zu segeln, nutzen dabei unterschiedlich schnelle Luftströmungen und erreichen Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 110 km/h. Über die Gebiete rund um die Antarktis, beherrschen sie den dynamisch-topographischen Segelflug an der Windgrenzschicht des Meeres mit großer Geschicklichkeit. Eher unbeholfen erscheinen die Tiere am Boden. Grund dafür sind hierbei auch das hohe Gewicht und die langen Flügel, wodurch eine lange Anlaufstrecke für den Start erforderlich ist und zahlreiche Bruchlandungen herbeigeführt werden. Des Weiteren ist er bei einer Windgeschwindigkeit unter 12km/h nicht flugfähig. Somit stellt sich die Frage, warum sich die langen Flügel und das schwere Gewicht im Laufe der Evolution durchgesetzt haben, wohingegen sie das Flugverhalten stark beeinträchtigen? Der Wanderalbatros vermeidet den Schlagflug über längere Zeit, da dies bei seiner erheblichen Spannweite ein zu großer Energieaufwand wäre. Hinzu kommt, dass sich solch lange Flügel nur mühsam in der Luft kontrollieren lassen. Damit der Flügel beim Segelflug möglichst stabilisiert wird, hat der Vogel einen Arretiermechanismus im Ellenbogen- und Schultergelenk entwickelt. Dieser behält eine ausgestreckte Position bei und verhindert, dass die Muskulatur Arbeit verrichten muss. Dabei verschiebt sich beim Ausstrecken der Unterarmknochen (Radius) über einen winzigen Höcker und rastet am zweiten Knochen (Ulna) ein. Damit er Strecken von bis zu 5000 Kilometern innerhalb von nur 10 Tagen schaffen kann, muss das seltene Flügelschlagen durch einen möglichst geringen Gesamtwiderstand kompensiert

Formel für den induzierten Widerstand

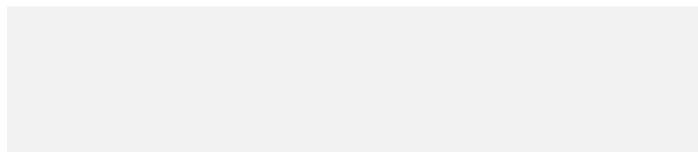
2.3-1 Abb.3: Auftriebsverteilung am Flügel
 Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

steht werden. Dieser setzt sich aus drei Komponenten zusammen: Reibungswiderstand F_{WR} , induzierter Widerstand F_{WI} (durch Druckausgleich an den Flügelspitzen entstehende Widerstandskomponente) und Druckwiderstand F_{WD} (Folge von abgelösten Grenzschichten am Profil). Um den Gesamtwiderstand zu minimalisieren, muss eine Komponente bzw. mehrere reduziert werden. Welcher Zusammenhang zwischen den wirkenden Kräften besteht, zeigt die Abbildung 2. Hierbei stellt man fest, dass der Anteil des induzierten Widerstands bei abnehmender Geschwindigkeit zunimmt und der Reibungswiderstand dagegen abnimmt. Umgekehrt verhält sich der Einfluss beider Kräfte bei einem Geschwindigkeitszuwachs (vgl. 2.3-1 Abb. 2: Widerstand in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit).
 Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt



Insbesondere bei Fluggeschwindigkeiten eines Vogels spielt jedoch der induzierte Widerstand eine größere Rolle, weshalb der Albatros seine Flügelform daran anpassen muss. Aus der physikalischen Formel geht hervor, dass sich der induzierte Widerstand antiproportional zu der Größe der Spannweite verhält. Je größer die Spannweite desto kleiner der Widerstand. Dabei entspricht F_A der Auftriebskraft, p_S dem Staudruck und S der Spannweite.

$$F_{WI} = \frac{F_A^2}{\pi \cdot p_S \cdot S^2}$$



enen

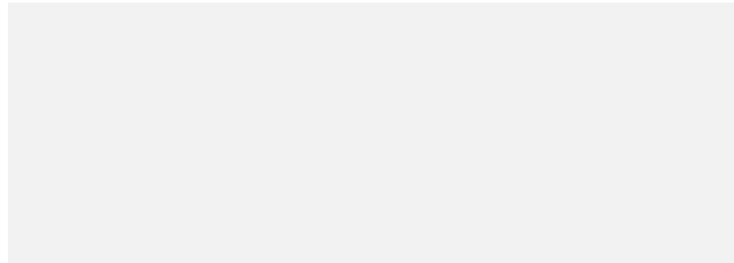
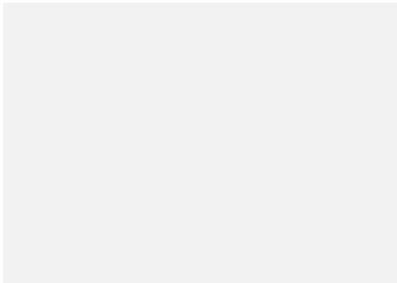
2.3 Der Grund für diesen Zusammenhang besteht in der elliptischen Auftriebsverteilung entlang eines Flügels (vgl. 2.3-1 Abb.3). Tatsächlich wird am Ende der Flügelspitze weniger Auftrieb

<http://www.bunnen.de/87/87202.htm>

html

erzeugt als in Nähe des Rumpfes. Folglich ist durch den geringen Auftrieb auch der Druckunterschied zwischen der Ober- und Unterseite kleiner und damit kann der Wanderalbatros den induzierten Widerstand mit Hilfe seiner langen Flügel erheblich reduzieren.

Vergleicht man die Größe der entstehenden Randwirbel bei kurzen und langen Flügel, so gibt es klare aerodynamische Vorteile für den Wanderalbatros, welcher die größte Spannweite aller Vögel besitzt (vgl. 2.3-1 Abb.4).



Für den ebenfalls erzeugten Reibungswiderstand F_{RW} ist der Einfluss der Profiltiefe (vgl. 2.3-1 Abb.5) von Bedeutung. Aus der Formel für den Reibungswiderstand (Die Formel entspricht abgesehen vom spezifischen Reibungsbeiwert der für die Auftriebskraft.) kann entnommen werden, dass dieser mit zunehmender Größe der angeströmten Fläche erhöht wird. Da wiederum das Ausmaß der Tragfläche abhängig ist von der Profiltiefe, kann auf eine Proportionalität zum Reibungswiderstand zurückgeschlossen werden. Deshalb hat der Albatros zusätzlich noch sehr schmale Flügel. Ebenso wären breite Flügel äußerst ungünstig, da das Gewicht, aufgrund der zusätzlich erforderlichen Muskelmasse, zunehmen würde und der Vogel nicht mehr flugfähig wäre. Tatsächlich befindet sich der Albatros mit seinem Gewicht bereits an der Grenze des Möglichen. Einzig durch seine enorm hohe Flächenlast, welche das Verhältnis zwischen der Gewichtskraft und der Flügelfläche darstellt, kann eine

derart gute Gleitzahl erreicht werden, die sogar vom Menschen auf das Gleitverhalten optimierte durchschnittliche Segelflugzeuge übertrifft.

Die Konstruktion aller Hochleistungssegler basiert letztlich auf die Anatomie von Meeresseglern wie dem Wanderalbatros. Um die Flugfähigkeit zu verbessern, nutzten Ingenieure die optimale Reduzierung des Widerstandes durch den Bau von langen und schmalen Flügel. Ebenso wird wie beim Albatros versucht eine möglichst hohe Flächenlast zu erreichen, um damit auch das Gleitverhalten zu verbessern, weshalb bei Segelflugzeugen auf den Leichtbau wenig Wert gelegt wird.

Nichtsdestotrotz geht die heutige Technik unter Verwendung von Hightech-Materialien, sowie einer noch längeren Flügelstreckung, weit über das Gleitverhalten vom Albatros. Mit einer Gleitzahl von $c_A/c_W = 40$ kommt die Natur nicht an Hochleistungsseglern wie z.B. dem Nimbus 4 DM und ASH 25 mit $c_A/c_W = 57$, welche komplett aus Kunststoff gebaut sind (vgl. 2.3.1 Abb.8). Trotzdem ist es für die Wissenschaft unerklärlich, wie der Albatros mit derart hoher Flächenlast solche gute Gleitzahlen erreichen kann.

2.3-2 Der Handschwingeneffekt

Neben den eleganten Seglern der Meere gibt es auch Landvögel wie den Andenkondor (wissenschaftlicher Name: Vultur gryphus), welche bezüglich ihrer Flügelform gegensätzliche Merkmale aufweisen, und dennoch in der Lage sind ihre zunächst aerodynamisch ungünstig erscheinende Flügel und den dadurch entstehenden Luftwiderstand mit Hilfe einer Finesse der Natur auszugleichen. Ohne großen Kraftaufwand kann der Kondor täglich Strecken von bis zu 250 km überfliegen und dabei mit bis zu 55 km/h durch die Lüfte gleiten. Ähnlich wie beim Wanderalbatros, hat auch in diesem Fall der induzierte Widerstand bei geringen Fluggeschwindigkeiten einen großen Anteil am Gesamtwiderstand.

Wie bereits oben beschrieben, ist eine hohe Spannweite in Verbindung mit einer kleinen Profiltiefe für den Energieverbrauch vorteilhafter. Die kurzen und breiten Flügel sind bedingt durch die erforderliche Manövrierfähigkeit, welche entscheidend für den Lebensraum solcher Greifvögel ist. Lange Flügel würden dagegen die Wendigkeit in der Luft stark beeinträchtigen und das Abheben

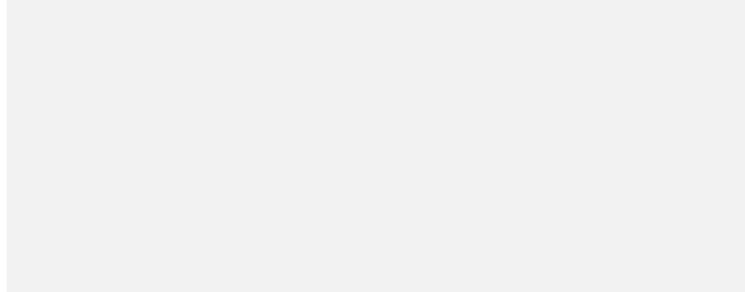
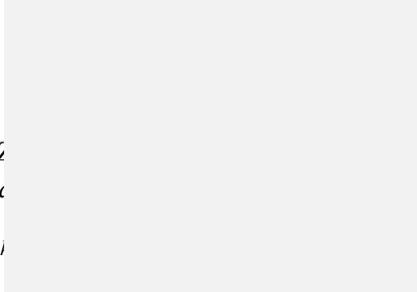
vom Boden erschweren. Mit seinen stark ausgeprägten Handschwingen macht sich der Kondor einen genialen Trick zu Nutze. Die langen kräftigen Schwungfedern am Handteil des Vogelflügels verschmälern sich zu den Spitzen und werden beim Flug aufgefächert, wodurch V-förmige Lücken entstehen (vgl. 2.3-2 Abb.2).

2.3-2 Abb.2: V-förmige Lücken

2.3-2 Abb.3: Wirbelfäden

<http://der-rick.biz/share/Projektseite/inh/kon.html>

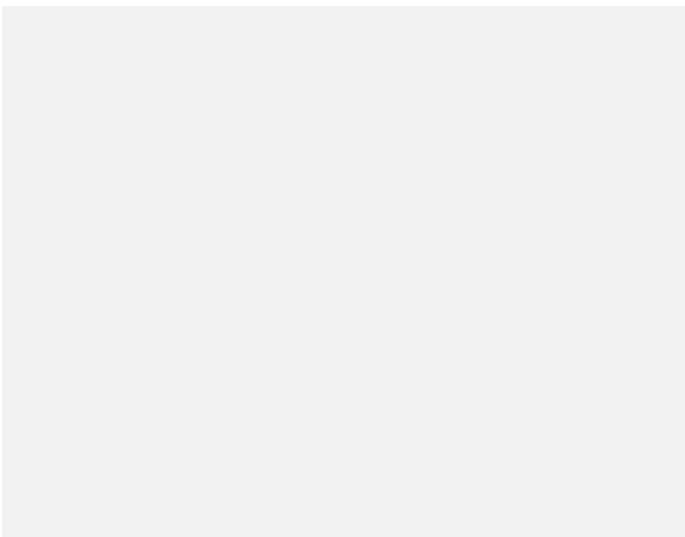
http://der-rick.biz/share/Projektseite/inh/kon/wie_2.html



2.3-2 Abb.4: 2
Widerstand und

<http://der-rick.biz/si>

Infolge eines Druckunterschiedes an der Flügelunterseite und Oberseite bilden sich sogenannte Randwirbel, welche die Ursache für den induzierten Widerstand sind. Die Funktion der Handschwingen besteht darin den großen Randwirbel in kleine Wirbel aufzuspalten, denn diese enthalten weniger Energieverlust als der einzelne Wirbel eines konventionellen Flügels. Durch gegenseitige Beeinflussung folgt eine spiralförmige Windung der einzelnen Wirbelfäden (vgl. 2.3-2 Abb.3). Der dabei entstehende Wirbeltrichter saugt Luft durch sein Inneres und wirkt als Strömungsbeschleuniger, wodurch der induzierte Widerstand reduziert wird. Die Abbildung 4 veranschaulicht zusätzlich die Beziehung zwischen der Stärke des aufgefächerten Flügelendes und des damit zusammenhängenden Widerstands.



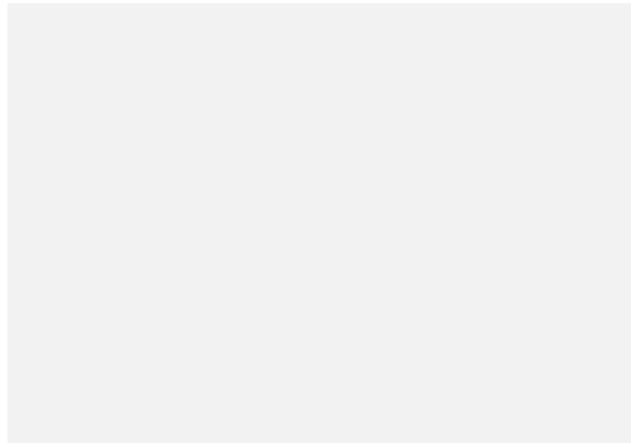
Bemerkenswert sind die langen Schwungfedern auch wegen der damit flexibel einstellbaren Spannweite. Somit kann der Vogel durch schnelles Verändern der Flügelform den induzierten Widerstand verringern und sich an unterschiedliche Flugsituationen bzw. Fluggeschwindigkeiten mühelos

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

anpassen. Die Widerstandsreduktion spielt insofern eine Rolle, dass sie die Sinkrate im Gleitflug verkleinert und folglich das Flügelschlagen auf ein Minimum beschränkt.

Des Weiteren werden die Handschwingen effektiv zur Verhinderung des Strömungsabrisses durch langsamen Flug und hohem Anstellwinkel genutzt. Jede Schwungfeder fungiert als kleiner unabhängiger Flügel, welcher sich am Luftstrom so ausrichtet, dass der Anstellwinkel jeder einzelnen Feder zur Anströmrichtung möglichst gering ist. Falls die Strömung am Hauptflügel abreißen sollte, bleibt sie dennoch an den frei beweglichen Handschwingen anliegend und der Auf- und Vortrieb des Vogels bleibt erhalten.

Die technische Umsetzung von Ingenieuren der Luft- und Raumfahrt fand in der Konstruktion sogenannter Winglets (vgl. 2.3-2 Abb.5), welche als stark vereinfachte Nachbildung der Handschwingen gelten. Der dadurch hervorgerufene Effekt ist trotzdem derselbe: Reduzierung des induzierten Widerstands durch den aufgespaltenen Randwirbel. Bereits im Jahre 1897 wurde die Grundidee eines Winglets präsentiert und wurde später in den 70er von der NASA für Forschungszwecke wieder herangezogen. Heute ist die serienmäßige Ausstattung von Verkehrsflugzeugen und Segelflugzeugen mit Winglets keine Seltenheit mehr. Bei Verkehrsflugzeugen mit Fluggeschwindigkeiten über 950 km/h spielt jedoch der Reibungswiderstand eine bedeutendere Rolle, während die Reduzierung des induzierten Widerstands durch Winglets ein Energieersparnis von „nur“ 5-10 % erbringt. Vorteilhafter ist die bionische Anwendung für den Einsatz von langsamer fliegenden Propeller- und Segelflugzeugen.



Insgesamt sind Winglets sehr umweltschonend, da sie die benötigte Start- und Landestrecke deutlich verkürzen und einen steileren Start ermöglichen. Die Verringerung des verbrauchten Treibstoffes sowie die reduzierte Lärmbelastigung kommen Mensch und Natur zugute.

2.4 Rückstromklappen

2.4-1 Die Problematik

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

Flugzeugingenieure und Piloten beschäftigt seit Beginn der Fliegerei die Problematik des Strömungsabrisses. Dieser gefürchtete Effekt tritt besonders bei kritischen Flugsituationen mit großen Anstellwinkeln und niedriger Geschwindigkeit wie zum Beispiel bei der Landung auf, kann aber auch durch eine plötzliche Änderung der Anströmrichtung eintreten, wie sie von Böen verursacht wird. Beim Landen will man niedrige Geschwindigkeiten erreichen. Allerdings verhält sich die Auftriebskraft proportional zur Geschwindigkeit im Quadrat und dem Auftriebsbeiwert. Mit Erhöhung des Anstellwinkels kann auch der Auftriebsbeiwert erhöht werden. Jedoch nur bis zu einem bestimmten Grad, darüber hinaus führt die Strömungsablösung zum Verlust des Auftriebs. Zu jeder Fluggeschwindigkeit gehört ein maximaler Anstellwinkel,

2.4-1 Abb. 1: Ein Strömungsabriss. www.technik.tu-berlin.de/institut/ski

der geflogen werden kann, bevor die Strömung abreißt. Geringe Geschwindigkeiten lassen nur einen kleinen Anstellwinkel zu. Bei einem Strömungsabriss kann die Luft, welche die Tragfläche umströmt, dem Profil auf der Oberseite nicht mehr folgen. Die Strömung löst sich zuerst an der Hinterkante von der Tragfläche ab. In Strömungsrichtung hinter der Ablösestelle kommt es auf Grund eines Druckunterschiedes zu Rückströmung nahe der Profilloberfläche. Es entstehen Wirbel, die sich bei steigendem Anstellwinkel über die Tragfläche ausbreiten. An den Stellen der Wirbel wird kein Auftrieb mehr erreicht. Zudem verschiebt sich die Stelle der ablösenden Strömung weiter nach vorne in Richtung der Flügelnase, bis sich schließlich die Wirbel von der Tragfläche ablösen und der gesamte Auftrieb zusammenbricht (vergl. Abb. 1). Physikalisch kann man sich das Ganze auch im Impulsbild vorstellen. Wenn die Luft oberhalb des Tragflügels dem Profil nicht mehr folgen kann, wird die Luft folglich nicht nach unten abgelenkt. Die Luftteilchen der oberen Strömung besitzen keinen vertikalen Impuls und die Tragfläche erfährt daher keinen

vertikalen Gegenimpuls. Der Auftrieb bleibt aus, der Flügel hat nur noch einen Strömungswiderstand.

Bild aus Urheberrechts- und Markenrechten entfernt

2.4-2 Die Lösung der Vögel

Auch Vögel die seit Jahrmillionen die Lüfte beherrschen und die durch Anpassung in dieser

Zeit aerodynamische Gesetzmäßigkeiten sehr viel besser ausnutzen als die modernsten von

1-2 Abb.2: Braun-Skuua in der

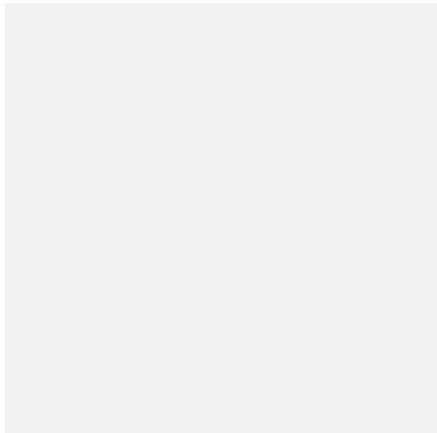
tarktis

Menschen entwickelten Luftfahrzeuge, haben mit diesem Kernproblem des Fliegens zu

1-2 Abb.3: Aufgestelltes Deckgefieder des Skuas

kämpfen

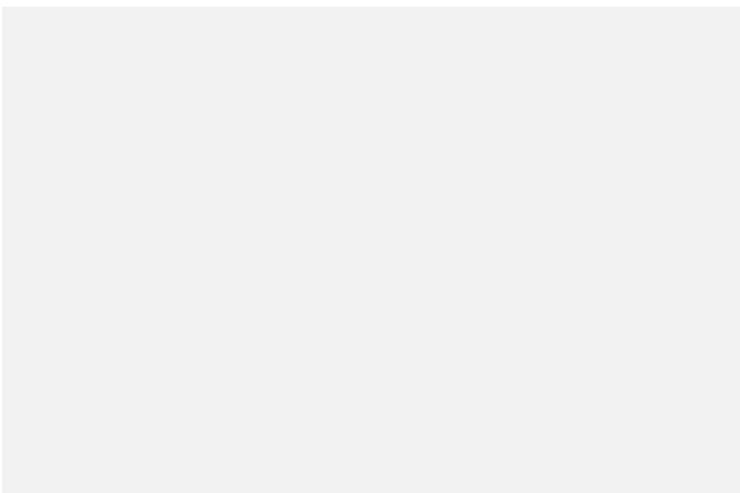
lin.de/institut/skua/berlin.de/institut/skript/B1Fol7.ppt



Bei einer bestimmten Art der Raubmöwen dem *Skua*, der vor allem in Gebieten mit ständig wechselnden, böigen Winden, wie über dem offenen Atlantik, fliegt, wurden spezielle Anpassungen beobachtet. Auf dessen Flügel im Bereich der oberen Armdecken wurden Deckfedern entdeckt, die sich bei eintretender Rückströmung und beginnendem Strömungsabriss aufstellen und sogenannte Rückstromtaschen bilden (Abb.2). Dadurch wird die Rückströmung an vielen Stellen behindert. Wodurch sich kleinere Wirbelbereiche bilden, die sich relativ kontrolliert verhalten und sich nicht ablösen.

Somit liegt die Umströmung enger am Profil als ohne Rückstromtaschen. Ein plötzlich eintretender Strömungsabriss kann verhindert werden.

Das Gefieder wird vom Vogel allerdings nicht aktiv durch Muskelkraft aufgestellt. Vielmehr bringt die Rückströmung selbst die Deckfedern in eine aufgestellte Position, indem die zurückströmende Luft aus Richtung der Flügelhinterkante unter die Federn dringt und sie aufstellt.



Die Federn an sich weisen eine hohe Steifigkeit auf, wobei die äußersten Federspitzen sehr flexibel sind. Die Flexibilität der Spitzen ist wichtig, damit diese empfindlich auf die Rückströmung reagieren können und das Aufstellen auslösen

können. Für ein komplettes Wiederanlegen der Federn nach dem Verringern des Anstellwinkels müssen die Federn recht steif gebaut sein. Um das Rückschlagen der Rückstromtaschen zu verhindern, sind die Federn so in die Haut eingelagert, dass die Federspulen an der Muskulatur ansetzen und so nur eine beschränkte maximale Auslenkung erlauben. Dieser komplizierte Aufbau des Rückstromtaschenmechanismus ist jedoch noch nicht perfekt. Es würde sich deutlich negativ auf die Widerstandbeiwerte auswirken, wenn die Rückstromtaschen sich bereits abheben, obwohl die Strömung noch nicht abgelöst ist. Um dies zu vermeiden sind die Vogelfedern bis zu einem bestimmten Grad luftdurchlässig ausgelegt. Somit kann der Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite der Federn, der zu einem zu frühen Abheben führt, wirksam ausgeglichen werden.

Außer Vögel, die wie der Skua zum Teil in abrupt wechselnden Winden fliegen, nutzen andere Vögel die zu Rückstromtaschen aufgerichteten Deckfedern beim Landen mit der hohen Anstellwinkeln. Die durch die Rückstromtaschen hervorgerufene enger anliegende Strömung bewirkt eine Verzögerung des Strömungsabrisses und einen höheren Auftrieb. Der Vogel kann folglich kontrollierter landen.

2.4-3 Technische Umsetzung

Die Wirksamkeit der Rückstromtaschen als System, das einen plötzlichen Strömungsabriss verzögert, steht außer Zweifel. Trotzdem ist die Abstrahierung auf ein technisches System nicht unproblematisch.

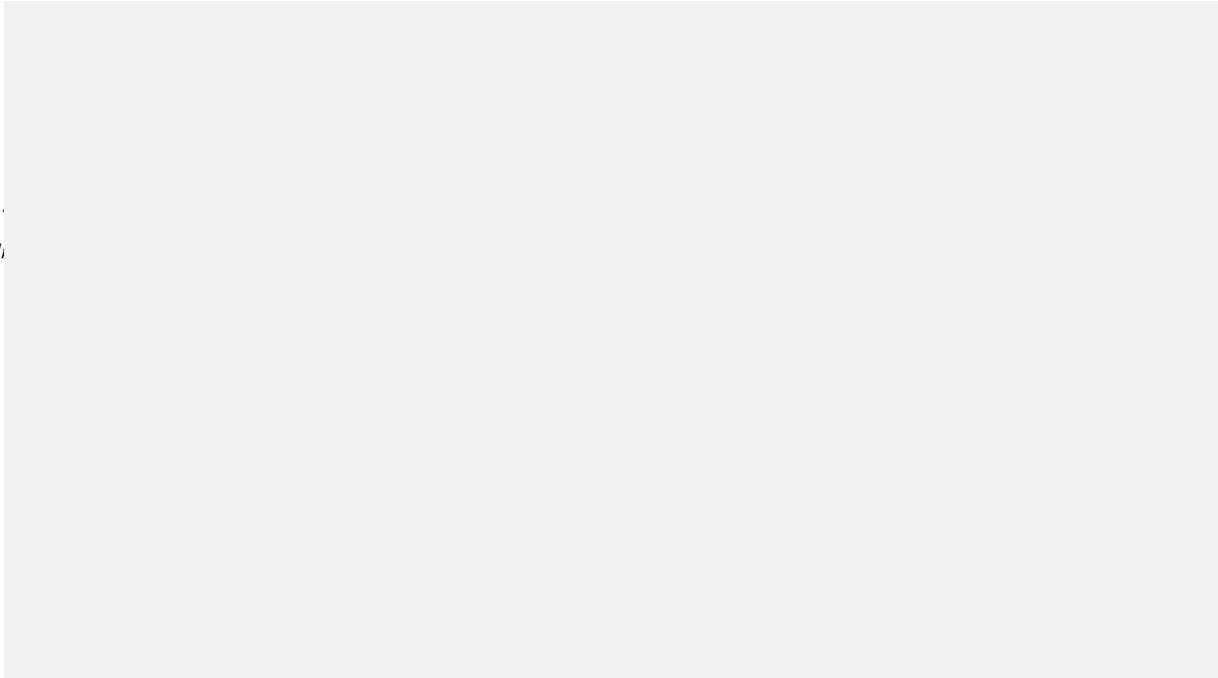
Bereits 1939 wurde die Funktion des aufgestellten Deckgefieders von Prof. Dr. Wolfgang Liebe entdeckt. Er beobachtete Alpendohlen beim Flug im steilen Aufwind am Berghang und wurde auf die Rückstromtaschen auf den Vogelflügeln aufmerksam. Um seine Deutung ihre aerodynamischen Funktion zu überprüfen, machte er Abkippsversuche mit einer Me-109-E, auf dessen rechte Tragfläche ein Lederlappen als Rückstromklappe angebracht war. Er konnte an der präparierten Tragfläche bei großen Anstellwinkeln eine Auftriebserhöhung nachweisen.

1984 führte man im Zuge eines Projektes einer wissenschaftlichen Vereinigung Flugversuche mit Rückstromklappen aus Kunststoff an einem Segelflugzeug durch. Als Ergebnis konnte man festhalten, dass das Flugzeug sich bei großen Anstellwinkeln stabiler verhielt und sich daher in diesen kritischen Situationen besser steuern lies.

Nachdem diverse experimentelle Studien die technische Anwendbarkeit aufgezeigt hatten, beschäftigten sich einige wissenschaftlichen Arbeiten mit der genauen aerodynamischen Funktionsweise von technisch angewandten Rückstromklappen.

Robert K. J. Mayer arbeitete in seiner Promotion³ im Jahr 2000 eine technische Umsetzung von Rückstromklappen aus. Ihm gelang der messtechnische Nachweis der positiven Beeinflussung von Strömungsablösungen durch Rückstromklappen.

Diese frei beweglichen Rückstromklappen wurden von ihm bionisch optimiert. So wurden die wichtigsten konstruktiven Merkmale, wie gelenkige Einspannung der Vorderkante der Klappen, begrenzter Öffnungswinkel und weitere Detailverfeinerungen wie Perforation, geschlitzte Ausführung oder flexible Hinterkante im Grunde von den Vogelfedern übernommen und in experimentellen Windkanalmessungen erprobt. Diese sind wichtig dafür, dass sich die Klappen wie gewünscht genau zum richtigen Zeitpunkt der Ablösung selbstständig öffnen und auch wieder sauber schließen. Es konnte im Hochauftriebsbereich kurz vor dem Kritischen Anstellwinkel je nach Anzahl und Größe der Klappen c_{Amax} -Steigerungen von bis zu 23% erreicht werden.



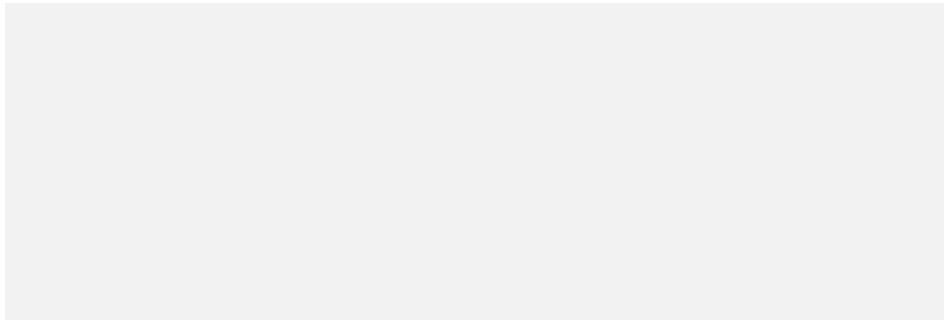
2.4-3 Abb.
<http://www.dli>

³ „Experimentelle Untersuchung von Rückstromklappen auf Tragflügeln zur Beeinflussung von Strömungsablösungen“, TU Berlin

Nachdem mit Hilfe von Kraftmessungen⁴ die Wirkung der Klappen, also die Änderung des Auftriebs messtechnisch erfasst wurde, versucht Mayer mit Druckmessungen und Methoden der Strömungssichtbarmachung die Funktionsweise zu erklären. Das Ablösegebiet wird von

4-3 Abb.5: Strömungsbild mit Rückstromklappe
der Rückstromklappe in zwei Bereiche unterteilt, es bilden sich unterschiedliche Druckniveaus vor und hinter der Klappe, die für die auftriebssteigernde Wirkung verantwortlich sind (siehe Abb.5). Die Rückstromklappe wirkt dabei als Barriere für den Rückstrom, womit sich das Unterdruckniveau vor der Klappe länger halten kann. Die Strömung löst sich in Strömungsrichtung weiter hinten ab. Folglich entsteht mehr Auftrieb. Den Messungen nach übt die Rückstromklappe auch einen Einfluss auf den Druck an der Flügelunterseite aus. Der dort gemessene höhere Druck im Vergleich zum Flügel ohne die Rückstromklappe trägt ebenfalls zur Auftriebssteigerung bei. Vor der Klappe entsteht ein stationärer Wirbel, durch den die Strömung im Vergleich zum „nackten“ Flügel weiter nach unten abgelenkt wird, sodass die Strömung im Ablösegebiet stabilisiert wird. Hinter der Rückstromklappe bildet sich ein zweiter Wirbel, jedoch ein turbulent ablösender Wirbel. Die Ablösung ist dabei geringer als beim Vergleichsflügel. Solange die Hinterkante der Rückstromklappe Kontakt zur Außenströmung hat, kann der positive Effekt dieser Vorrichtung beobachtet werden.

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt



Des Weiteren wurden von ihm Freiflugversuche mit den technisch abstrahierten Rückstromklappen bei realen Flugbedingungen auf einem Motorsegler (Abb.6) durchgeführt. Die getesteten Klappen funktionierten bei allen Geschwindigkeiten zuverlässig und öffneten bei Strömungsablösung selbstständig und schlossen sich danach wieder vollständig. Sie sind reproduzierbar und lassen sich gut mit konventionellen Klappensystemen wie Wölbklappen

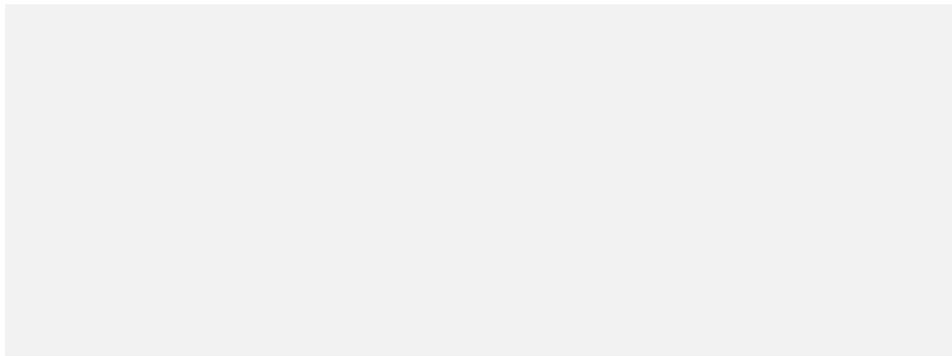
⁴ Mithilfe der Kraftmessung können die universellen Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte C_A bzw. C_W ermittelt werden siehe Profilpolare in Abb. 4

kombinieren. Insgesamt konnte der Testpilot bei den Versuchsflügen ein verbessertes Flugverhalten im kritischen Langsamflugbereich feststellen. So war ein ruhiges und kontrolliertes Annähern an die Überziehgeschwindigkeit möglich. Gleichzeitig konnte ein höherer Auftrieb nachgewiesen werden, womit die Windkanalmessungen bestätigt waren.

4-3 Abb.6: Motorsegler Stemme S-10, ausgerüstet mit Rückstromklappen

[tp://www.dlr.de/at/PortalData/2/Resource/Dokumente/at/promotion_mayer.pdf](http://www.dlr.de/at/PortalData/2/Resource/Dokumente/at/promotion_mayer.pdf)
Prinzipiell sind nach Mayer Rückstromklappen besonders für Profile geeignet, bei denen moderate Hinterkantenablösungen auftreten, weniger dort wo Vorderkantenablösungen vorkommen oder bei stark gepfeilter Flügelgeometrie.

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt



Eine weitere wissenschaftliche Arbeit von Markus Schatz (Dissertation an der TU Berlin: „Numerische Simulation der Beeinflussung instationärer Strömungsablösungen durch frei bewegliche Rückstromklappen auf Tragflügeln“, 2003) umfasst eine 2-Dimensionale Simulation (Abb.7) von Rückstromklappen und deren Auswirkung auf die Strömungsverhältnisse. Dabei wurden gute Übereinstimmungen mit experimentellen Vergleichsdaten erzielt. Auch hier konnte der Maximalauftrieb in der Simulation mit den Klappen sehr deutlich gesteigert werden. Die meisten Erkenntnisse, die zuvor von Mayer formuliert worden waren, konnten bestätigt werden. Eine Verzögerung des Strömungsabrisses konnte in dieser Untersuchung jedoch nicht festgestellt werden. Trotzdem wurde auch hier die prinzipielle Praktikabilität und darüber hinaus eine Möglichkeit aufgezeigt, bereits vorhandene Klappen wie Spoiler oder Querruder durch gezielte Ansteuerung mit demselben Effekt als Rückstromklappe zu verwenden. Somit wäre zumindest theoretisch auch der Einsatz an Verkehrsflugzeugen denkbar.

t-3 Abb.7: Simulierte Strömungsverhältnisse mit Rückstromklappe bei verschiedenen Anstellwinkeln

https://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2003/542/pdf/schatz_markus.pdf

Einer bisherigen serienmäßigen Realisierung stand vor allem das hohe Sicherheitsrisiko, das mit ihrem Ausfall verbunden wäre, im Wege. Eine Lösung dafür wäre, die Klappe während des Fluges zu verriegeln, um ein ungewolltes Öffnen zu verhindern, und nur in kritischen Flugsituationen und beim Landen freizugeben.

Abschließend kann man sagen, diese bioinspirierte Entwicklung würde in ihrer technischen Umsetzung in Form von frei beweglichen Rückstromklappen eine höhere Flugsicherheit gewährleisten, da die Stabilität bei hohen Anstellwinkeln und niedriger Fluggeschwindigkeit erhöht wird und ein plötzlicher Auftriebseinbruch bis zu einem bestimmten Grad verhindert wird. Die Entwicklung dieser Klappentechnik steht jedoch noch am Anfang und hat in der Wirtschaft noch keinen Förderer gefunden.

2.5 Vorflügel

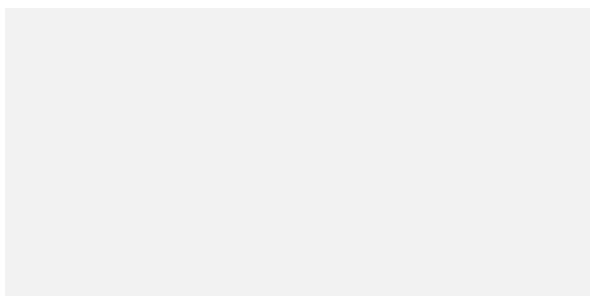
Ein weitere Hochauftriebshilfe, die ähnlich wie Rückstromklappen einem frühzeitigen Strömungsabriss entgegenwirkt und dabei niedrigere Fluggeschwindigkeiten bei höheren Anstellwinkeln ermöglicht sind Vorflügel, auch „Slat“ genannt.

Bei dieser Erfindung handelt es sich nicht um einen bionischen Entwicklungsprozess im eigentlichen Sinne. Vielmehr wurde diese Vorrichtung vermutlich von Ingenieuren unabhängig von dem nahezu gleichen Lösungsansatz der Evolution entwickelt. Andere Quellen beschreiben, dass den Forschern die Idee nach der Aufnahmen eines Taubenfluges kam, denn die Parallelen sind offensichtlich. Trotz allem gibt es noch eine erfolgversprechende Möglichkeit diese technische Umsetzung, die bereits lange Zeit in Gebrauch ist, bionisch zu optimieren.

2.5-1 Daumenfittiche bei Vögeln

Auch Vögel sind gegen die Gefahren des Strömungsabrisses nicht gefeit. Ihre Flugsicherheit und Flugstabilität bei einem großen nutzbaren Anstellwinkelbereich erhöhen sie unter anderem mit einem einfachen Trick. Viele Vögel, darunter auch der Turmfalke, besitzen zwischen Arm- und Handschwingen so genannte Daumenfittiche (Aula). Diese sind wenige, breite und feste zugespitzte Federn am Daumen des Vogelflügels. Sie können je nach Vogelart unterschiedlich groß ausgeprägt sein. Der Vogelforscher W. Nachtigall beschrieb 1975 die Wirkung des abgespreizten Daumenfittichs bei großen Anstellwinkel: Der Vogel erreicht mit dieser Technik eine Vergrößerung des Auftriebsbeiwertes bei nahezu unverändertem Widerstandsbeiwert. Er führte diesen Effekt auf die aerodynamische Wirkung

des Spalts zwischen Daumenfittich und dem eigentlichen Flügel, der eine länger anliegende Strömung ermöglicht, zurück.



Andere Wissenschaftler bestätigten die Theorie in jüngerer Zeit, so merkte jedoch der niederländische Professor für Bionik und evolutionäre Biomechanik John J. Videler an,

dass sich die Daumenfittiche nicht über die gesamte Spannweite erstrecken und es daher nicht

die Hauptaufgabe dieser sei, eine Strömungsablösung hinauszuzögern. Man vermutet die Daumenfittiche als Verlängerung des Armflügels könnten auch eine wichtige Funktion innehaben, um Vorderkantenwirbel (LEV, Leading Edge Vortices) zu induzieren. Den Vorderkantenwirbeln ist ein eigenes Kapitel gewidmet.

Die abgespreizten Daumenfittiche sind im Vogelflug bei großen Anstellwinkeln nachweislich wirksam und die Parallelen zwischen dem technischen Vorflügel und den natürlichen Spezialfedern der Vögel in Bezug auf Struktur und Mehrertrag an Flugstabilität sind nicht zu leugnen.

2.5-2 Das Hochauftriebssystem Vorflügel

Dennoch unterscheiden konstruktive Merkmale die Lösungen an Tier und Maschine. Um die Funktionsweise eines Vorflügels zu erläutern, müssen zwei Szenarien unterschieden werden. Zum einen der Langsamflug, bei dem der positive Effekt der Vorrichtung auftritt, und zum anderen der Schnellflug, bei dem der Vorflügel eher negative Auswirkungen mit sich bringt.

Zu einem geringen Anteil trägt die durch die Vorflügel vergrößerte Flügeltiefe zu einer Auftriebssteigerung bei, da die Flügelfläche größer wird und diese proportional mit der Auftriebskraft zusammenhängt.

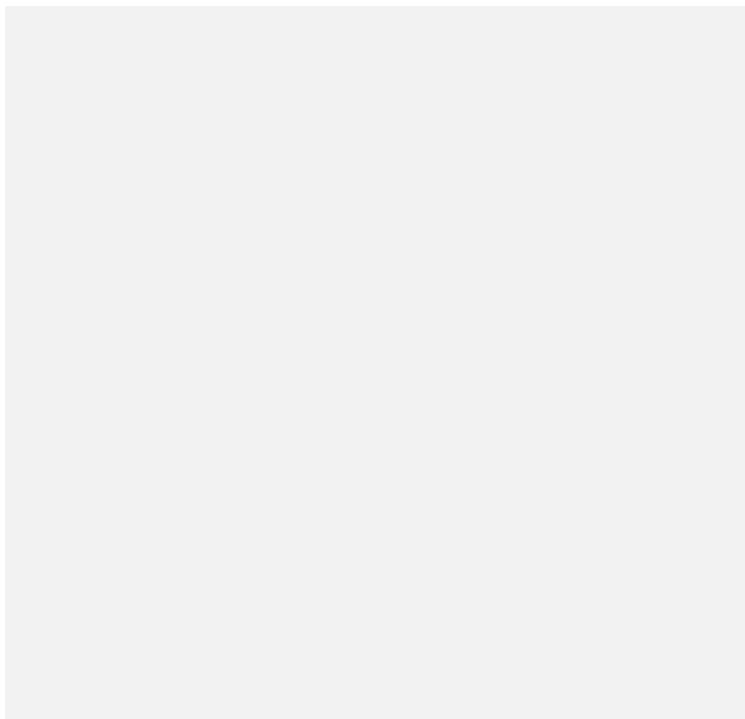
Wichtiger ist es die Strömungsverhältnisse am Profil mit Vorflügel während des Langsamflugs näher zu betrachten. Hierbei gibt es verschiedene Erklärungsmöglichkeiten, wie es zu einer länger anliegenden Strömung kommt. Die unterschiedlichen Erklärungen kommen auch daher zustande, weil es bei der Ausführung verschiedene Formen gibt, die im Detail verschieden aerodynamisch wirken, aber dennoch im Gesamten dieselbe Wirkung besitzen.

1. Mit steigendem Anstellwinkel verlagert sich der Staupunkt von der ursprünglichen Lage direkt an der Spitze des Profilnase hin zur Unterseite des Profils. Man könnte annehmen, dass die Strömung ab einem kritischen Winkel die Nase nicht mehr mit ausreichender Geschwindigkeit umströmen kann und so auch nicht mehr dem Profilverlauf folgen kann. Der Spalt zwischen Vorflügel und dem eigentlichen Flügel dahinter bietet der Strömung nun eine Art Abkürzung zu Oberseite genau an der Stelle, wo der Staupunkt liegt (siehe Abb.2). So können die Luftteilchen dem Konturverlauf folgen und der Auftrieb bleibt erhalten.

2. Der Einsatz des Vorflügels beeinflusst die Grenzschicht, indem ein Luftstrom durch den sich verengenden Schlitz beschleunigt und auf die Flügeloberseite geleitet wird. Somit wird die Grenzschicht auf der Oberseite angeblasen und stabilisiert, sodass zusätzliche

kinetische Energie in die Grenzschicht eingeht. Diese löst sich nun später ab, der Strömungsabriss wird verzögert.

3. Da der Staupunkt im Langsamflug auf der Prifiloberfläche liegt, muss die Strömung teilweise von unten um die Nase herumlaufen. Es tritt deshalb an einer lokalen Stelle eine sehr hohe Strömungsgeschwindigkeit auf. Auf Grund der daraus folgenden starken Druckminderung (→Unterdruck/Sog) an dieser Stelle spricht man auch von einer Saugspitze. Wenn man den Vorflügel getrennt betrachtet, so erkennt man, dass dieser bei großen Anstellwinkeln bezogen auf die Sehne des Vorflügels ziemlich genau von vorne angeströmt wird. Der Vorflügel ist, wie der Name schon sagt, nicht nur eine flache Leiste vor dem eigentlichen Flügel, sondern besitzt genauso wie der Hauptflügel ein aerodynamisch wirksames Profil (vergl. Abb.3). Auf der Oberseite generiert er somit einen Unterdruck und auf der Unterseite einen Überdruck. An der Flügelnase, dort wo der starke Unterdruck (Saugspitze) vorkommt, entsteht nun durch den Vorflügel eine Druckerhöhung. Die Folge ist, dass der Saugspitzeneffekt abgeschwächt wird. Die Spaltbreite zwischen Vorflügel und Flügel reduziert sich nach oben hin, damit der Teil der Strömung, der durch den Spalt verläuft, beschleunigt wird (mit gleichzeitiger Druckabnahme) und kontinuierlich in die weitere Umströmung übergeht. Insgesamt betrachtet bewirkt der Vorflügel einen weicheren



Geschwindigkeitsanstieg über das Profil und einen schwächeren Abfall zum Profilende hin. Die Saugspitze ist geringer ausgeprägt und der Druckberg⁵ kleiner. Es kommt daher erst später zu Rückströmungen und Wirbelablösungen, die schließlich zu einem Strömungsabriss führen.

⁵ Der Querschnitt des Luftpaketes über der Tragfläche nach hinten wird auf Grund der Flügelform größer, nach der Kontinuitätsgleichung wird die Geschwindigkeit der Teilchen kleiner und nach Bernoulli der statische Druck größer, da die Luft normalerweise von einem Hochdruck zu einem Tiefdruckgebiet strömt → Druckberg

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

5-2 Abb.3: Auftriebsbeiwert in Abhängigkeit vom Anstellwinkel
nes Profils mit und ohne Vorflügel

[v://modell-aviator.de/gallery/?gallery=39&image=566&entry=5830](http://modell-aviator.de/gallery/?gallery=39&image=566&entry=5830)

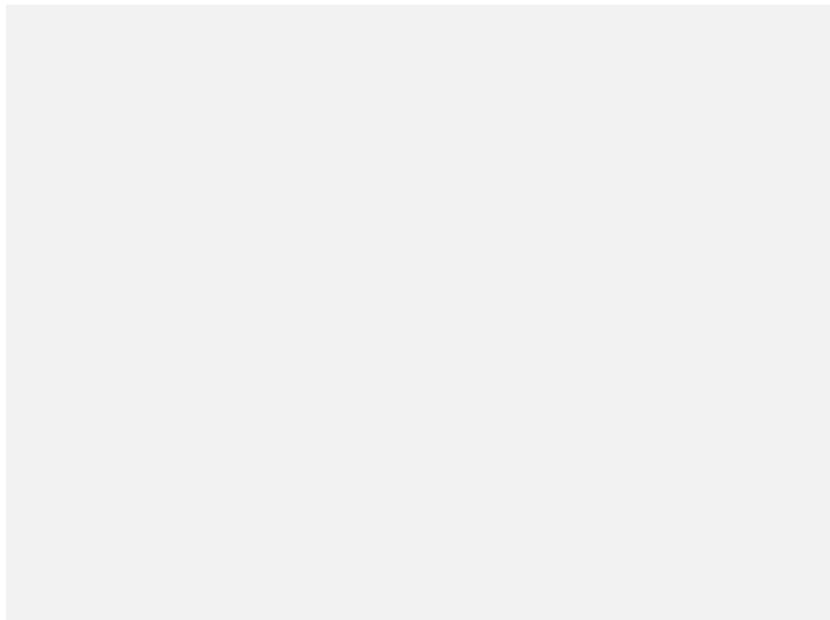
Fest steht, dass Vorflügel es möglich machen, noch langsamer nahe an der Strömungsabrissgrenze zu fliegen. Neben dem Mehrgewinn an Sicherheit liegt der größte Vorteil darin, dass man mit dieser Hochauftriebshilfe zum Beispiel auch in Kombination mit Landeklappen bei niedrigen Geschwindigkeiten größere Anstellwinkel und somit noch genügend Auftrieb erreichen kann (vergl. Abb.3). Damit werden kürzere Start- und Landestrecken notwendig.

Im Schnellflug ist ein Vorflügel für das Flugzeug hinderlich, da der geringe Anstellwinkel in dieser Situation zu anderen Strömungsverhältnissen und zu einer c_w -Wert Zunahme führt.

Auf Grund des Unterdrucks auf der Flügeloberseite und des Überdrucks auf der Flügelunterseite wird die Strömung in gewissem Maße durch den Spalt nach oben fließen. Der Vorflügel hat in dieser Fluglage die Wirkung eines Turbulators, der Wirbel direkt vor der Nase des Flügels verursacht. Es bilden sich daher sowohl auf der Unterseite durch Druckunterschiede am Spalt, als auch auf der Oberseite durch die nach oben gezogenen Wirbel eine turbulente Umströmung. Eine turbulente Grenzschicht besitzt jedoch im Vergleich mit einer laminaren Grenzschicht einen deutlich höheren Reibungswiderstand. Die Turbulenz ist beim Vorflügeleinsatz um einiges höher als bei „normalen“ turbulenten Profilen oder Flügeln mit Turbulatoren. Um bei Reisegeschwindigkeit den Luftwiderstand zu verringern und Treibstoff zu sparen, aber trotzdem nicht auf die positiven Eigenschaften mit Vorflügeln verzichten zu müssen, kam man im Laufe der Entwicklung auf die Idee, diese in den Profilverlauf einzufahren.

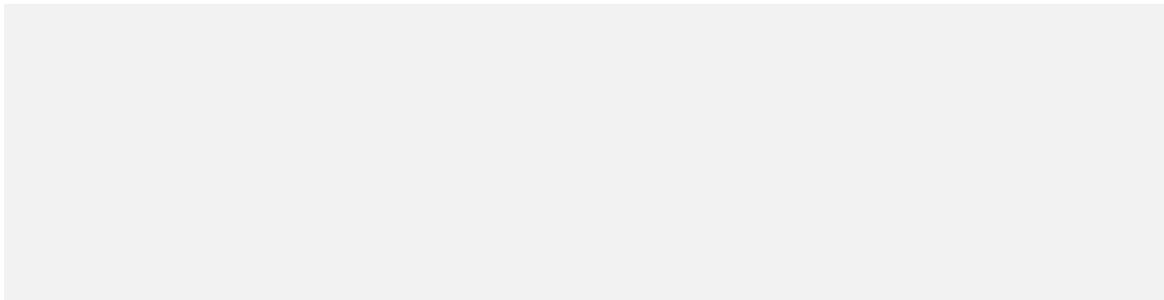
Die Geschichte des Vorflügels begann 1918, als der deutsche Aerodynamiker Gustav Lachmann, seine Erfindung zum Patent anmelden wollte, diese aber vom deutschen Patentamt abgelehnt wurde. Daraufhin entwickelte er für die Flugzeugfirma Handley Page in England den ersten Vorflügel für Flugzeuge mit kurzen Start- und Landestrecken. Wobei die ersten Bauformen fest angebrachte Vorflügel waren, wurde während des zweiten Weltkrieges der automatische Vorflügel entwickelt. Dieser fährt sich bei niedrigen Fluggeschwindigkeiten selbstständig aus, im normalen Flug presst ihn der Staudruck an das Profil. Ein bekannter Vertreter eines Flugzeugs mit festem Vorflügel war das deutsche Aufklärungsflugzeug Fieseler Fi 156, mit dem Spitzname „Storch“, das während des zweiten Weltkrieges in der Lage war sehr langsam zu fliegen und beim Start und bei der Landung nur eine extrem kurze Piste benötigte. Das bekannte deutsche Kampfflugzeug Messerschmitt Bf-109 war dagegen mit automatischen Vorflügeln konstruiert. Heutzutage sind Vorflügel an nahezu jedem modernen Verkehrsflugzeug zu finden. Allerdings werden die Vorflügel bei diesen Maschinen aus Sicherheitsgründen elektrisch oder hydraulisch gesteuert. In der heutigen Zeit ist es wichtig, dass große Passagierflugzeuge auf relativ kurzen Pisten starten und landen könnten. Besonders in Ländern mit hoher Bevölkerungsdichte sind freie Flächen für große Flughäfen teuer und auch die Lärmbelastung von lange anfliegenden Flugzeugen darf nicht unterschätzt werden.

2.5-2 Abb.4: Ausgefahrene Vorflügel an einem Airbus A 318
http://bionik.fbsm.hs-bremen.de/elearning_aerodynamik/aero.html



2.5-3 Bionisches Optimierungspotenzial

Der zunehmende Luftverkehr erfordert von den Flugzeugbauern die Konstruktion von lärmreduzierten Luftfahrzeugen. Auch wenn sich die Lärmbelastung durch die kürzere Anflugphase von modernen Verkehrsflugzeugen, die mit Vorflügeln ausgestattet sind, flächenmäßig verringern lässt, so ist ein landendes Flugzeug trotz gedrosselten Triebwerken annähernd so laut wie ein Startendes. Dafür sind die Vorflügel selbst verantwortlich. Vögel mit ausgeprägten Daumenfittichen wie der Falke hingegen gleiten lautlos durch die Luft und sind als Raubvögel sogar darauf angewiesen, damit sie sich ihrer Beute nicht durch Fluggeräusche ankündigen. Der Hauptunterschied der beiden Ausführungen liegt in der Materialbeschaffenheit, die die Lärmproduktion maßgeblich beeinflusst. Während die Daumenfittiche aus flexiblen nach hinten „ausfransenden“ Federn bestehen, sind technische Vorflügel mit einer scharfen, geraden Hinterkante aus steifem Material realisiert.



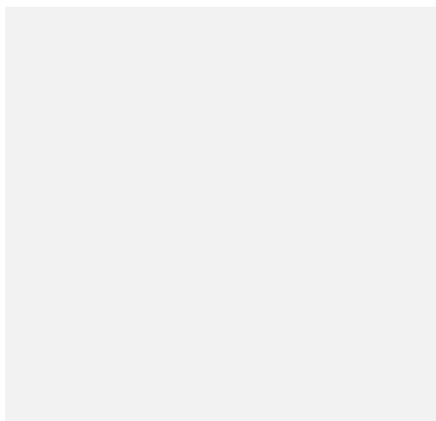
Hier birgt die Bionik ein großes Potential zur Optimierung des technischen Systems. Erkenntnisse, die aus der Analyse von Lösungen in der Natur gewonnen wurden, werden auf diese Problemstellung übertragen. So wurden schon die Federenden eines Vogelflügels zu bürsten- artigen Strukturen abstrahiert (Abb.5) und dabei eine deutliche Lärmreduktion gemessen. Verschieden Experimente, die vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) unternommen wurden, zeigten, dass die Lärmemission vor allem von der geometrischen Form der Vorflügelhinterkante abhängig ist. Ein internationales Projekt von Bionik-Studenten bestätigte die geräuschreduzierende Wirkung bürstenartiger Strukturen, indem sie Lüfterrotoren mit abstrahierten Vorrichtungen nach Vorbild von Eulenfedern und Mottenflügeln ausstatteten. Allerdings verringerte sich der Auftrieb bisher, wenn man die Bürstenstruktur an den Vorflügel eines Flugzeugs anwendet. Würde man dieses Problem mit Hilfe von weiteren bionischen Forschungsarbeiten in den Griff bekommen, könnte ein großer Faktor für den Fluglärm reduziert werden. Es ist zu erwarten, dass in der Zukunft ähnliche biologische inspirierte Strukturen geräuschreduzierte Starts und Landungen ermöglichen werden.

2.6 Flügelpfeilung

Bei den so genannten Vorderkantenwirbeln, im Englischen auch als Leading Edge Vortices (LEVs) bezeichnet, handelt es sich um einen aerodynamischen Effekt, den sich Flugbewesen genauso wie Flugzeugingenieure durch bestimmte Bauformen zu Nutzen machen. Der Effekt des Vorderkantenwirbels ermöglicht eine neue Art der Auftriebsgenerierung, die sich stark vom Auftrieb durch konventionelle Flügelprofile unterscheidet. Vorderkantenwirbel wurden in der Technik verwendet, bevor die Aerodynamik der Vögel erforscht war. Dennoch soll in diesem Kapitel aufgezeigt werden, was die Forschungsergebnisse der Vogelfluganalyse und die Entdeckung der analog genutzten Prinzipien für weitere bionische Innovationsprozesse bedeuten können. Denn auch hier gilt: Die Perfektion der natürlichen Systeme ist noch lange nicht erreicht, wir können noch einiges von der Natur lernen.

2.6-1 Das Vorbild Vogel

Der Mauersegler ist ein bemerkenswerter Flugkünstler, der einen Großteil seines Lebens in der Luft verbringt. Sowohl ausdauernde Langstreckenflüge in die südlich gelegenen Überwinterungsgebiete, als auch wendige Flüge zur Nahrungsjagd sind für ihn kein Problem. Sogar schnelle Sturzflüge und teilweise Gleit- und Segelflüge stellen für den Vogel keine



Herausforderung dar. Diese Vielseitigkeit, die vom Hochgeschwindigkeitsflug bis zum genauen Abbremsen vor dem an Felsen oder Mauern befindlichen Nest reicht, ist für die Bionik höchst interessant.

Es wurde lange angenommen, dass der Auftrieb am Vogelflügel ausschließlich auf konventionelle Art zu Stande kommt, denn Querschnitte durch die Armflügel

zeigten eine gewölbte Tragfläche, mit starker Ähnlichkeit zu Flugzeugprofilen. An einem Flügelmodell des Mauerseglers wurde im Zuge einer Studie des Professors J. J. Videler im Jahre 2004 nun jedoch ein weiterer Auftriebsmechanismus nachgewiesen: Der

Vorderkantenwirbel, der bisher nur beim Insektenflug beobachtet worden war.

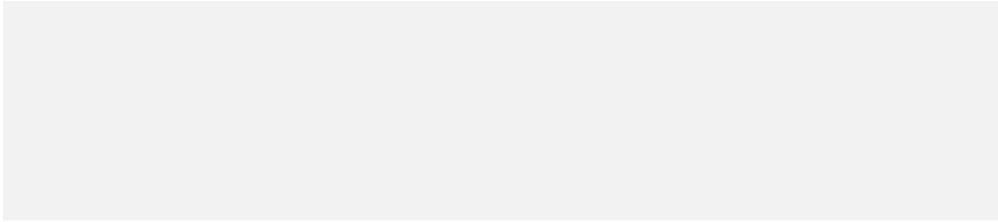
Der strukturelle Unterschied des Mauerseglerflügels zu den Flügeln der meisten anderen Vögel besteht darin, dass der Handflügel mit 85% der Gesamtfläche stärker ausgeprägt ist.

Entgegen einem konventionellen Profil besitzt dieser eine scharfe Vorderkante und die

Bild aus Urheberrechtsgesetz und Urheberrechtsgründen entfernt

-1 Abb.2: Querschnitte durch Handflügel (HF) und Armflügel (AF) des Mauerseglers

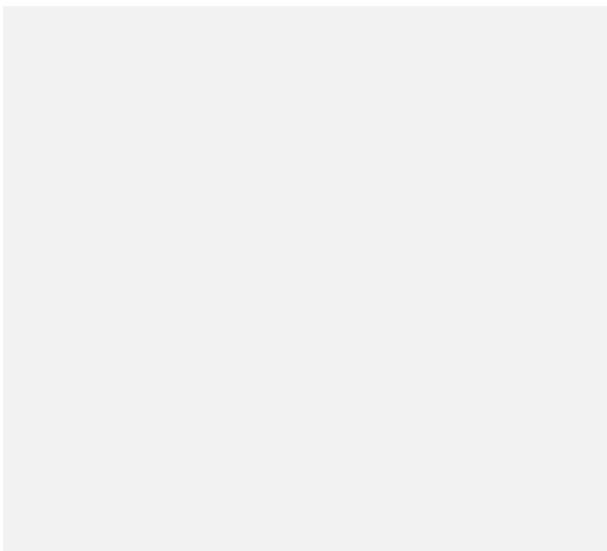
//bionik.fbsm.hs-bremen.de/elearning_aerodynamik/aero.html



Profildicke ist relativ gering (Abb.2).

-1 Abb. 3: Vereinfachte Darstellung des stabilen Vorderkantenwirbels

//bionik.fbsm.hs-bremen.de/elearning_aerodynamik/aero.html



Der Strömungsabriss wird durch eine so geformte Profilnase mit geringem Radius und scharfer Kante begünstigt.

Schon bei geringen Anstellwinkeln löst sich die Strömung in Wirbeln ab und ist für den bekanntlich starken Auftriebsverlust verantwortlich. Dieser negative Effekt tritt aber nur auf, solange die Flügel komplett gestreckt sind. Wird der Pfeilungswinkel mit dem Zurückklappen der Flügel erhöht, so kann die Anströmung in zwei Komponenten aufgeteilt werden. Die

Komponente senkrecht zur Vorderkante trägt zur Auftriebgenerierung bei, wohingegen die Komponente entlang der Kante den Wirbel in Richtung Flügelspitze zwingt. Entlang der vorderen schrägen Kante haftet nur ein stabiler nach innen drehender Vorderkantenwirbel an, der sich außen an der Flügelspitze kontrolliert ablöst (vergl. Abb.3).

Am anderen Flügel entsteht der derselbe LEV, der sich gegensinnig auch nach innen in Richtung zum Körperrumpf dreht. Der Drehimpulserhaltungssatz ist somit gewährleistet und der Vogel wird nicht um die Längsachse gedreht, sondern hält seine Flugposition bei.

Die eigentliche Auftriebssteigerung bewirkt die hohen axialen Geschwindigkeiten und der daraus resultierende starke Unterdruck im Wirbelkern.

Wenn LEVs bei der Auftriebserzeugung beteiligt sind, ist die Auftriebskraft nicht mehr proportional zum Anstellwinkel α , weshalb man vom nichtlinearen Auftrieb spricht. Die Auftriebssteigerung kann man an der zur y-Achse hin abknickenden Geraden im c_a - α -Diagramm (auch Abb.5) erkennen.

Die im Verhältnis zum Handflügel relativ kleinen Armflügel zeigen die typischen Profileigenschaften wie runde Vorderkante, Profilwölbung und gerade Hinterkante. Bei höheren Geschwindigkeiten und Anstellwinkeln, die für LEVs zu gering sind, erzeugt der Mauersegler den Auftrieb daher auf konventionelle Weise mit dem Handflügel zusammen mit dem Armflügel.

Diese Art der Auftriebserzeugung scheint in der Vogelwelt weit verbreitet zu sein, denn auch viele andere Vögel außer dem Mauersegler besitzen Handflügel mit scharfer Vorderkante. Vermutlich nutzen auch sie den Effekt der Vorderkantenwirbel in extremen Flugsituationen.

Vor allem zum Landen halten Vögel ihre Handflügel in einer gepfeilten Stellung um einen Vorderkantenwirbel zu stabilisieren. Der Anstellwinkel wird vergrößert, die konventionelle stationäre Strömung reißt ab und es bilden sich LEVs (instationäre Strömung). Der große Anstellwinkel zusammen mit den Vorderkantenwirbeln hilft durch den stark erhöhten Strömungswiderstand beim extremen Abbremsen, gleichzeitig erzeugen die LEVs bei diesen geringen Geschwindigkeiten noch genügend Auftrieb für eine sichere Landung.

Im Hochgeschwindigkeitsflug, z.B. beim Sturzflug klappen Vögel ihre Flügel zurück. Nicht jedoch zur Induzierung von LEVs, da die konventionelle Auftriebsmethode genügend Auftrieb liefert und die LEVs sogar nur noch mehr Strömungswiderstand verursachen würde, sondern um mit der durch die erhöhte Pfeilung verringerte Stirnfläche eine Reduktion des Gesamtwiderstands zu erhalten. Außerdem verformen sich die Flügel in gepfeilter Stellung bei den starken mechanischen Belastungen durch die hohen Geschwindigkeiten weniger.

Die Vorderkantenwirbel helfen dem Vogel nicht nur bei langsamen Geschwindigkeiten, sondern ermöglichen ihm laut Videler auch eine bessere Manövrierfähigkeit. Neben dem Auftriebseffekt können diese auch so auftreten, dass sie eine abwärts gerichtete Kraft bewirken. So werden die LEVs von Vögeln auch zur Flugsteuerung eingesetzt und ermöglichen z.B. enge Kurven, plötzliche Haken und schnelle Steuerungen.

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

2.6-2 Technischer Einsatz von Vorderkantenwirbel



5-2 Abb.4: Oberhalb der Tragflächen einer fliegenden Concorde sind Vorderkantenwirbel zu erkennen

<http://adg.stanford.edu/aa241/highlift/sstclmax.html>

Im Flugzeugbau werden stark gepfeilte Tragflächen mit kurzer Streckung und geringer Profiltiefe und besonders dreiecksförmige Deltaflügel bei schnell fliegenden Jagdflugzeugen eingesetzt. Die kurze Streckung ermöglicht höhere Drehraten, die Flügelgeometrie hohe Verwindungssteifigkeit und die Form bietet günstige Eigenschaften im Überschallbereich. Zahlreiche andere Faktoren lassen diese Bauform den Anforderungen von Kampffjets am ehesten gerecht werden. Bei

hohen Geschwindigkeiten bieten diese Flügelausführungen geringen Widerstand bei ausreichendem Auftrieb auf konventionelle Art. Bei hohen Anstellwinkeln erhalten Flugzeuge mit gepfeilter Flügelkonfiguration ihren Auftrieb über die LEVs. Insbesondere bei der Landung sind sie auf Vorderkantenwirbel angewiesen, weil das flach geformte Profil bei geringen Geschwindigkeiten nicht genügend Auftrieb erzeugt.

Der Nachteil von konventionellen Tragflächen ist, dass bei der Landung, bei der man eine geringe Fluggeschwindigkeit benötigt, der Anstellwinkel auch mit Hochauftriebshilfen nicht sehr weit erhöht werden kann, um einen hohen Strömungswiderstand und bei der langsamen Geschwindigkeit genügend Auftrieb zu erhalten. Mit gepfeilten Flügeln ausgestattete Flugzeuge können beim Landen hohe Anstellwinkel mit stark ausgeprägten und damit viel Auftrieb erzeugenden LEVs nutzen. Flugzeuge und Vögel nutzen also hier denselben aerodynamischen Effekt.

Ein weiterer Vorteil der Vorderkantenwirbel ist ein großer Sicherheitsaspekt. Es bleibt ein vollständiger plötzlich entstehender Strömungsabriss aus. Trotzdem kann der Flügel natürlich nicht beliebig stark angestellt werden. Mit immer größer werdendem Anstellwinkel liegt der Wirbel nicht mehr vollständig an der Vorderkante an, sondern biegt in Richtung der Hauptströmung über dem Flügel ab. Folglich wirkt der Vorderkantenwirbel nur auf der Innenseite des Flügels, wo hingegen die Strömung am Außenflügel zusammenbricht. Zusätzlich kann der stabile Wirbel auch von hinten her langsam aufplatzen. Der Auftrieb verringert sich und das Steuerverhalten wird schlechter. (siehe *Auftriebsverlust in Abb.5*)

Flügel mit großer Streckung und mäßiger Pfeilung⁶

...kleiner Streckung und großer Pfeilung

Bilder aus Urheberrechtsgründen entfernt

2.6-2 Abb.5: At

<http://www.aer.mw>

Dies ist jedoch weniger gefährlich, da sich dies dem Pilot durch ein langsam steileres Durchsacken bemerkbar macht, dem schnell entgegengewirkt werden kann.

Es gibt technische Vorrichtungen, die die Wirkung des Vorderkantenwirbels weiter verbessern, indem z.B. so genannte *Strakes* eingesetzt werden. Strakes sind spezielle Flügel-Rumpf-Übergänge, die aus einem kurzen Stück der Vorderkante des Hauptflügels, das stark gepfeilt nach vorne gezogen wurde, bestehen. Der zusätzlich am Strake entstehende Wirbel verdrängt den Hauptwirbel nach außen und stabilisiert ihn an der Außenseite. Der Auftrieb bleibt an größeren Bereichen der Flügelfläche erhalten und die Steuerflächen werden wirksamer angeströmt.

Der hohe Strömungswiderstand beim Eintreten der Vorderkantenwirbel wird übrigens von Space Shuttles genutzt, um beim Sinkflug in der Erdatmosphäre kontrolliert Energie abzugeben. Da Vorderkantenwirbel hauptsächlich bei Jagdflugzeugen Verwendung finden, können diese die Verluste im Normalflug mit den hohen Schubreserven kompensieren.

⁶ Die Proportionalität zw. C_A und α des konventionellen Auftriebs (linke Seite) kann durch die einfache Formel $C_A(\alpha) = C_{A0} + C_{A\alpha} \cdot \alpha$ mit $C_{A\alpha} = dC_A/d\alpha$ beschrieben werden
beim Auftrieb mit LEV liegt keine Proportionalität vor: $C_A(\alpha) = f(\alpha^2, C_{A\alpha}^{-1})$

6-2 Abb.7: Sichtbarer Vorderkantenwirbel im Wasserkanal des ILR Aachen; abbiegender Wirbel mit Wirbelaufplatzen; Modell eines Raumtransporters

<http://www.ilr.rwth-aachen.de/index.php?id=140&L=1%27>
Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

2.6-2 Abb.8: Ein vom Strake erzeugter innerer Wirbel an einer F-16

http://www.aer.mw.tum.de/fileadmin/tumwaer/www/pdf/lehre/Praktikum-aeroflugzeug/CB_Pres_V5.pdf

2.6-3 Dynamische Veränderung der Flügelgeometrie

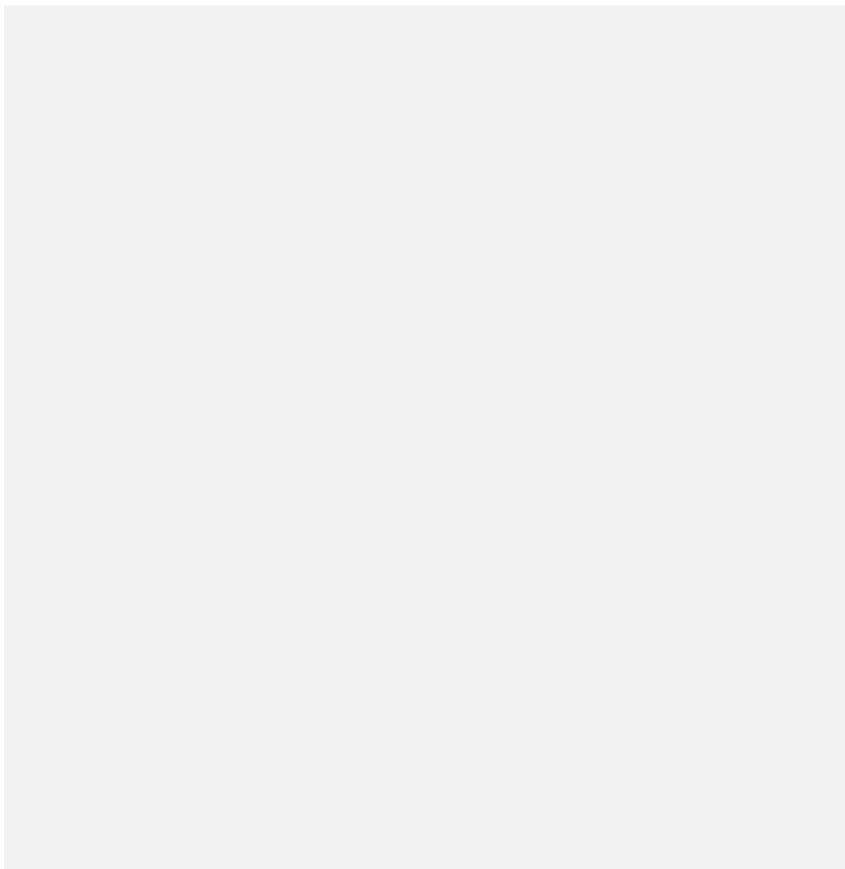
Vögel verändern ihre Flügelform dynamisch um die günstigste aerodynamische Eigenschaft für die entsprechende Flugsituation zu erhalten. Diese Variation ermöglicht eine größere aerodynamische Leistungsbreite. Beispielsweise könnte man für jede Pfeilung eine eigene Profilpolare mit daraus resultierenden verschiedenen Eigenschaften aufnehmen. Beim Langstrecken- und Gleitflug nutzt der Mauersegler eine geringe Flügelpfeilung. Beim schnellen Flug klappt er wegen der geringen Widerstandskraft die Flügel nach hinten und bei extremen Flugmanövern und bei der Landung werden durch eine hohe Pfeilung die Vorderkantenwirbel hervorgerufen.

In der Technik gibt es ein Parallelbeispiel dafür: der Schwenkflügel. Die Vorrichtung lässt eine Verstellung der Vorderkantenpfeilung zu. Der europäische Kampfflugzeug Panavia Tornado und das US Flugzeug Grumman F-14 besitzen eine solche Ausstattung. Im Langsamflug, und auch bei der Landung und beim Start fliegen diese mit geringer, im Schnellflug mit großer Pfeilung. Hier zeigt sich ein Unterschied zwischen der Tierwelt und den Entscheidungen der Ingenieure. Bei variierbaren Flügeln setzen die Ingenieure bei der Landung lieber auf die konventionelle Auftriebserzeugung, wobei Vögel in dieser Situation LEVs bevorzugen.

2.6-4 Bionische Zukunftsperspektive

Bis heute scheitert man daran den Schwingenflug (Schlagflug) der Vögel technisch in großem Stil nachzuahmen. Dabei hätte es für technische Flugobjekte extreme Vorteile, wie Energieeffizienz, extreme Manövrierfähigkeit und wenig notwendiger Platz für Starts und Landungen. Bei der Aerodynamik des Schlagfluges sind Vorderkantenwirbel und die dynamische Pügelgeometrie vermutlich von großer Bedeutung. Forschungen in diesem Bereich der Tiere bringt ein neues Verständnis der physikalischen Effekte mit sich, das uns die Türen für neue bionische Optimierungen und Erfindungen öffnet. Vielleicht lernen unsere Flugzeuge ja in Zukunft den Schlagflug.

2.7 Haifischhaut/ Die Riblet-Folie

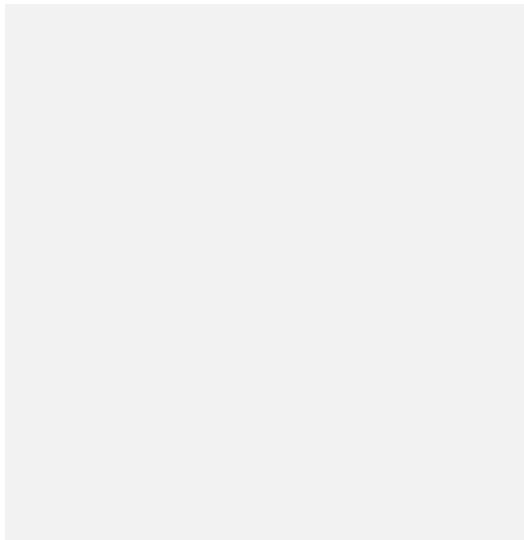


In den frühen 80er Jahren hat sich in Tübingen der Paläontologe, Ernst Reif, mit der Beschreibung fossiler und rezenter Haie befasst. Die meisten Haie tragen bekanntlich Schuppen. Reif hat festgestellt, dass diejenigen, die -nach modernen Verwandten zu urteilen- besonders schnell geschwommen sind, besonders feine und tief geriefte Schuppen tragen und dass deren Schuppen-Oberseiten unter leichten Überlappungen schließen.

Das Seltsame ist, dass sich manche der Riefen-Reihen über viele Schuppen längs der Körper- oder Flossenkonturen laufen.

Dies war an sich längst bekannt, doch hat sich kaum jemand etwas dabei gedacht. Reif vermutete, dass diese Rillen oder auch Riefen genannt einen strömungsdynamischen Vorteil gegenüber der glatten Haut darstellen könnten. Da sich die Riefen der einzelnen Schuppen zu Linien ergänzen, die sich wie Stromlinien -oder besser Streichlinien- um den Hai herumziehen beeinflussen die Riefung die Feinumströmung, mit anderen Worten: die Grenzschicht des Wassers, die direkt am Hai entlang streicht. Die mikroskopisch kleinen Riefen sind alle zur Schwanzflosse des Tieres hin ausgerichtet. Dadurch wird das vorbei strömende Wasser kanalisiert und die großen Reibungswiderstände, für deren Überwindung ein solch schneller Hochseeschwimmer einen großen Teil der zur Vorwärtsbewegung nötigen Energie aufbringen muss, werden vermindert. Dies geschieht, weil die Riefen durch die Kanalisierung des Wassers Querturbulenzen verhindert. Desweiteren wird die turbulente wand nahe Schicht an den Rippen entlang der Strömungsrichtung geführt und der starke Querstromanteil wird gemindert.

Dämpfung des Reibungswiderstands ist ein wunderbares Mittel, mit gegebener Energie entweder schneller zu schwimmen oder bei gegebener Reisegeschwindigkeit Energie einzusparen: Beides wäre ökologisch günstig.



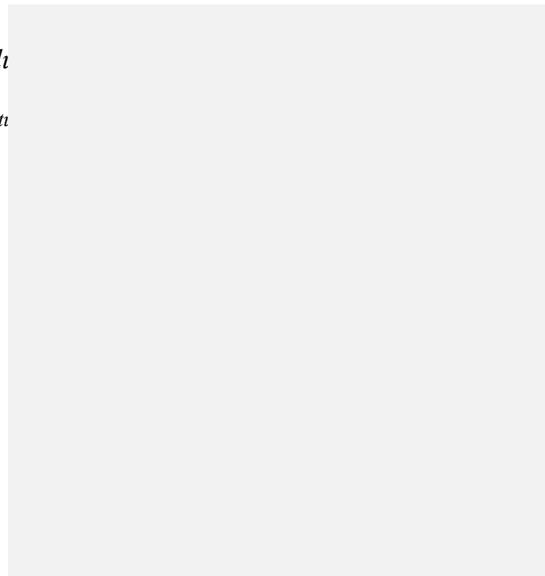
Die anfängliche Vermutung von Reif, dass eine raue Oberfläche strömungsdynamischer ist, widersprach der gängigen Theorie, „dass jede Art von Unebenheit den Reibungswiderstand einer Oberfläche erhöht.“⁷

Der Berliner Strömungsmechaniker Dr. Bechert hat nun in Strömungskanaluntersuchungen herausgefunden, was passiert, wenn man eine Fläche mit einer Folie beklebt, in die feine Riefen eingewalzt sind, die das geriefte Schuppenkleid eines Haies technologisch adäquat nachahmen. Diese Untersuchungen sind aus Gründen der Reynold'schen Ähnlichkeit nicht in Wasser durchgeführt worden, sondern in Öl. Man kann im Öl mit größeren Riefen arbeiten, die leichter zu fertigen und leichter zu handhaben sind, da sie im Öl dasselbe Ergebnis erzielen

⁷ <http://www.scinexx.de/dossier-detail-61-12.html>

wie kleinere Schuppen im Wasser. Dr. Bechert konnte nun durch seine Experimente die vermutete Wirkung, dass die Riefen Querturbulenzen verhindern, bestätigen. Das Resultat seiner Arbeit war, dass der Überzug der geriefen Folie bis an die 10 Prozent Reibungswiderstand spart. Dies geschieht dadurch, dass das Wasser bzw. Öl, Luft etc. durch die Riefen in Bahnen gelenkt wird und so die Entstehung von störenden und dadurch bremsenden Querströmungen verhindert.

Da der Reibungswiderstand, den die Ribelt-Folie vermindert, nur einer von mehreren



möglichen Widerstandserzeugern am Flugzeug ist, kann der Effekt in der Praxis nicht so groß sein. Ein Airbus A320, den die Lufthansa zur Verfügung gestellt hat und der an allen zugänglichen und möglichen Stellen mit dieser Folie beklebt worden ist, hat insgesamt etwa 2 Prozent weniger Treibstoff verbraucht. Auf den ersten Blick mag das nicht gerade viel erscheinen. Rechnet man jedoch für einen Flug von Frankfurt nach New York mit einem Verbrauch von 10 Kubikmetern Flugbenzin, wäre die Ersparnis von ca. 0,2 Kubikmetern nicht von der Hand zu weisen. Je nach Größe des

Flugzeuges und der zurückzulegenden Flugstrecke ließe sich durch die Reduzierung des Flugbenzins gleichzeitig auch das Gewicht reduzieren (weniger Kerosin, weniger Gewicht) was zusätzliche Einsparungen zur Folge hätte.

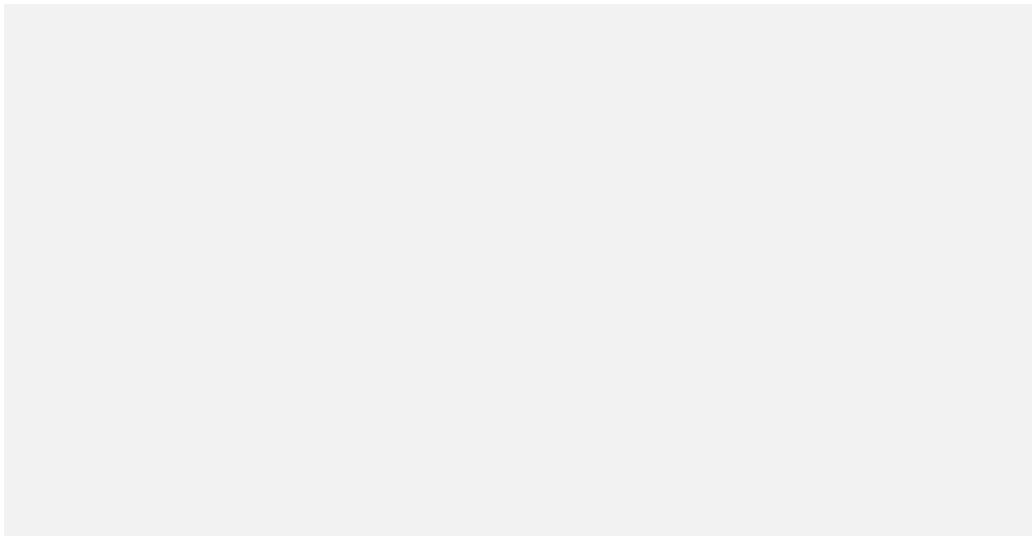
Der Betreiber von Passagier- und Luftfrachtflügen würde von den Einsparungen profitieren, einerseits weniger Tankkosten andererseits kann durch die Gewichtsreduzierung zusätzliche Fracht bzw. Passagiere aufgenommen werden, was bestimmt die anfänglichen Mehrkosten für die Anbringung der Folie relativ schnell amortisiert.

Nicht zu vergessen, der größte Gewinner ist die Umwelt, durch die reduzierten Abgase würde die Belastung mit Schadstoffen auf Dauer gesenkt. Denn die Bioniker brauchen die Umwelt um die darin wohnenden Lebewesen als Forschungsobjekte nutzen zu können.

Allerdings weist die Folie noch Haltbarkeits- und Wartungsprobleme auf, weshalb sie sich im Luftverkehr bisher nicht durchsetzen konnte.

2.8 Spindelförmiger Rumpf

Es war lange Zeit unklar, warum rundliche Tiere, die anscheinend nicht stromlinienförmig gebaut sind, sich im Wasser mühelos und schnell bewegen können. Man begann Pinguine zu untersuchen, da diese im Vergleich zu Delphinen mit einem relativ starren Rumpf schwimmen. Dies ist für die Technik besonders praktisch, da Flugzeuge ebenfalls starre Körper sind. Auch wenn Pinguine an Land sehr unbeholfen in ihrer Fortbewegung wirken, sind sie im Wasser Meister des leistungsarmen Schwimmens. „Ein Pinguin ist in der Lage, eine Entfernung von 1.500 km zurückzulegen und dabei lediglich einen Energiebetrag zu verbrauchen, der einem Liter Treibstoff entspricht...“⁸ Grund dafür ist, dass ein spindelförmiger Rumpf einen geringeren Widerstand hat als ein für uns stromlinienförmiger erscheinender Körper, wie zum Beispiel ein Düsenjet. Der geringe Widerstand des spindelförmigen Körpers, auch Laminarrumpf genannt, entsteht dadurch, dass die Strömung überall anliegt und sich nicht ablöst. Dadurch wird verhindert, dass sich an manchen Orten eine Rückströmung bildet, die durch ihre entgegengesetzte Richtung zur Schwimm- bzw. Flugrichtung, den Gesamtwiderstand des bewegten Körpers erhöht.



Wissenschaftler kamen deswegen bei ihren Messungen zu dem Ergebnis, dass die Spindelform des Pinguinkörpers einen extrem niedrigen c_w -Wert besitzt, ca. 0.05. Zum Vergleich: Bei einem PKW wird ein c_w -Wert von 0.3 schon als günstig eingestuft.

Nach der Formel für den Luftwiderstand

⁸ <http://www.bionikvitrine.de/mediapool/99/996537/data/PDFs/Pinguindesign/Pinguindesign.pdf>

$$F_w = \frac{1}{2} * c_w * \rho * v^2 * A$$

bedeutet dies, dass der Widerstand durch diesen sehr niedrigen c_w -Wert, ebenfalls bedeutend kleiner wird. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen würden Flugzeuge mit dicken Rumpfen mehr Sinn machen. Weil sie auf der einen Seite weniger Luftwiderstand erzeugen und dadurch den Treibstoffverbrauch reduzieren, auf der anderen Seite, weil ein dickerer Rumpf mehr Stauraum für Fracht bietet. Desweiteren wäre diese Form noch geräuschärmer, was besonders Wohngebieten bei Flughäfen zu Gute kommen würde. Trotzdem hat sich diese Form der Flugzeuge bisher noch nicht durchgesetzt, da die Herstellung von dieser Rumpfform schlichtweg zu teuer ist. Jedes Teil müsste einzeln angefertigt werden, im Gegensatz zu den heutigen Flugzeugen, die durch ihre Zylinderform aus vielen gleichgestalteten Teilen zusammengesetzt werden können.

2.9. Libelle und der Hubschrauber

Wir haben nun schon verschiedene Erfindungen der Bionik kennengelernt, die von den Vögeln abgeschaut wurde. Der Mensch hat vom Vogel gelernt, dass gespreizte Flügeln den Strömungswiderstand vermindern, der durch den Randwirbel verursacht wird, darauf hin konstruierte er die Winglets. Er betrachtete auch andere Lebewesen, wie Pinguine und Haie und entdeckte, dass diese durch besondere Körperformen oder Oberflächenstrukturen ihren Widerstand vermindern und setzte diese Erkenntnisse technisch um. Nun aber wollen wir ein kleineres Lebewesen betrachten. Ganz gleich in welche Richtung es fliegt oder mit welcher Geschwindigkeit, es kann auf der Stelle stoppen und sofort wieder in die entgegengesetzte Richtung zurückfliegen. Es kann die Geschwindigkeit eines olympischen Läufers, knapp 40km/h, erreichen. Es ist ein Insekt, das auf der Stelle in der Luft stehen kann.

Die Libelle kann mit schnellem Schlag und Stellungsänderung der Flügel ein Stehen in der Luft ermöglichen. Natürlich werden viele denken, das sei nichts besonderes, denn ein Hubschrauber kann das auch. Aber ein Hubschrauber hat bisher noch nie die Perfektion seiner natürlichen Vorbilder erreicht.

Auch wenn auf Messen häufig die Perfektion eines modernen Kampfhubschraubers gelobt wird, die wahre Genialität steckt immer noch in den winzigen Flugapparaten, die wir reichlich in der Schöpfung der Natur sehen. Aber woran liegt dies? Warum erreichen unsere Hubschrauber nicht die Perfektion einer Libelle? Das Geheimnis liegt in den Flügeln der Insekten. Die Flügel einer Libelle sind extrem leicht und fest. Dies liegt daran, weil die feinen Äderchen im Flügel einer Libelle, welche ein völlig abstrakt scheinendes Muster bilden, in Wirklichkeit feste Röhren sind, die ähnlich wie bei einem Fachwerkhaus eine große Festigkeit erzeugen. Die Äderchen sind innen Hohl und mit Luft gefüllt, was sie noch leichter macht, als sie ohnehin schon sind. Sie werden von einer Membran überzogen, die fest und leicht ist. Warum dies so ist haben die Wissenschaftler bisher noch nicht herausfinden können. Trotzdem werden die Flügel nicht zu steif, da sie sonst bei kleineren Zusammenstößen oder durch den enormen Druck beim schnellen Fliegen zerbrechen würden. Die Flügel verjüngen sich zur Spitze hin, wodurch die Enden biegsam werden. D.h. bei einem Aufprall kann der Flügel nachgeben und sich sofort danach wieder aufrichten. Aber dies ist noch nicht alles was die Libelle so perfektioniert hat. Die Libelle kann während des Fluges ihre Flügel verformen, wodurch sie immer den größtmöglichen Auftrieb erfährt. Natürlich gibt es noch mehr Faktoren und viele weitere Einzelheiten, die es der Libelle ermöglichen einen möglichst großen Auftrieb zu erzeugen, was die Grundlage für das Fliegen ist. Insekten haben über ein Dutzend verschiedener komplizierter Bewegungsabläufe und Möglichkeiten ihre Flügel zu steuern und einen Auftrieb und eine Vorwärtsbewegung zu erzeugen. Die Libelle ist ein Meister des Auftriebs, ein wahres Wunderwerk der Natur. Sie kann das Zwei- bis Zweieinhalbfache ihres eigenen Gewichtes tragen. D.h. sie könnte dreimal so viel Gewicht in die Luft heben, wie das *nt* leistungsfähigste Luftfahrzeug, *au* wenn man es auf dieselbe Größe umrechnet. Durch drehen der Flügel erzeugt die Libelle auf der Oberfläche ihrer Flügel sehr kleine Luftwirbel. Diese kleinen Luftströmungen und deren Kraft nutzt die Libelle. Wissenschaftler versuchten diese Erkenntnisse nun umzusetzen. Das Ergebnis war ein Helikopter.

Der Erste, welcher damit wohl begonnen hat war Leonardo da Vinci. Er wollte ein Fluggerät entwickeln, das ähnlich wie die Libelle fliegen und dabei in der Luft stehen bleiben kann.

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt



2.9 Abb.2: Le

<http://www.bfn.de>

Allerdings merkte er schnell, dass es ihm nicht möglich ist einen Apparat zu bauen, der vier asynchron schlagende Flügel besitzt, d.h. wenn sich die zwei vorderen Flügel heben, senken sich die hinteren nach unten. Stattdessen entwickelt er einen Apparat, der seine Flügel 360 Grad um seine eigene Achse kreisen lässt. Er gelangte, dank des griechischen Mathematikers und Physiker Archimedes (287-212v.Chr.), der behauptete, dass jeder in Flüssigkeit oder Gase

getaucht Körper entsprechend seinem spezifischen Gewicht einen Auftrieb erhält und dessen Überlegungen über die Funktion der Schraube, zu der Erkenntnis, dass sich ein in der Luft drehendes Blatt ein Auftrieb erzeugen muss. Er folgerte, dass sich eine runde Fläche, welche an einem vertikalen Mast in eine Rotation versetzt wird, imstande sein muss eine Last vom Boden zu heben. Dieses Prinzip ist vollkommen richtig, allerdings konnte er durch den damaligen Stand der Technik, keinen Fläche bzw. Flügel so schnell in eine Rotation versetzte, dass ein Auftrieb erzeugt wurde. Erst im 20.Jahrhundert, als sich die Technik weit genug entwickelt hat, konnten die ersten Hubschrauber, die stabil über einen längeren Zeitraum flogen, konstruiert werden. Louis Charles Breguet's und René Dorand's „Gyroplane-Laboratoire“ war der erste Hubschrauber der dies vermochte. Es erfolgten weitere Verbesserungen der Hubschrauber bis zu den heutigen High-Tech Flugapparaten. Aber alle funktionieren immer noch nach demselben Prinzip und derselben Technik.

Ein Motor (heute zu Tage meist eine Gasturbine) treibt über eine Kupplung ein Rotorgetriebe an. Dieses Rotorgetriebe überträgt die Kraft und die Drehenergie auf einen vertikalen Hauptrotormast. An diesem ist ein Rotorkopf angebracht, der mit den Rotorblättern durch Blatthaltern verbunden ist. Diese Verbindung wird nun über Zahnräder und Antriebswellen in Rotation, die von der Turbine bzw. vom Motor ausgeht, gebracht. Die Rotorblätter dienen sowohl als Propeller als auch als Tragflügel. D.h. sie erzeugen wie von Leonardo da Vinci gesagt, einen Auftrieb. Wenn der Hubschrauber höher fliegen soll, braucht man mehr Auftrieb, dieser

wird dadurch erzeugt, dass der Pilot die Anstellwinkel der Rotorblätter erhöht (s. gewölbte Tragflächen). Eine Richtungsänderung wird durch die Taumelscheibe erzeugt. Die Taumelscheibe kippt die Rotorblätter, dadurch wird die Luft in eine Richtung verdrängt und der Hubschrauber fliegt in die Entgegengesetzte. Der Hubschrauber wird dadurch im Vergleich zum Flugzeug sehr viel wendiger. Er kann nach oben und auch gleichzeitig an Ort schweben oder seitwärts, vorwärts, rückwärts davonfliegen. Das macht ihn flexibel. Verringert er den Anstellwinkel, dann verringert sich auch der Auftrieb, wodurch die Schwerkraft bzw. das Gewicht den Flugkörper wieder nach unten zieht. Soll der Helikopter schweben, d.h. in der Luft stillstehen, stellt der Pilot den Anstellwinkel so ein, dass der Auftrieb, den die Rotorblätter erzeugen, die Schwerkraft und das Gewicht gerade ausgleichen. Der Helikopter weist im Gegensatz zu der Libelle, die vier Flügel besitzt, noch einen weiteren Rotor auf, den Heckrotor. Dieser hat die Aufgabe das Drehmoment des Motors aerodynamisch auszugleichen. Wenn er nicht wäre würde sich das Gehäuse des Helikopters in die entgegengesetzte Richtung der Rotorblätter bewegen. Grund dafür ist das dritte Newton'sche Gesetz: Aktion gleich Reaktion.

Es ist sehr schwer einen Helikopter richtig zu beherrschen. Es erfordert eine lange und sehr intensive Schulung der Piloten und immer höchste Konzentration, denn nur so kann er den sehr wendigen und beweglichen Helikopter beherrschen. Umso verblüffender ist es zu sehen, mit welcher Leichtigkeit es uns die Libellen vormachen. Wobei diese ein noch viel aufwendigeres Prinzip benutzen, bei dem sich jeder Flügel einzeln bewegt und bis zu 30.000mal pro Minute schlägt. Natürlich stellt sich einem die Frage:“ Wenn die Libelle so viel besser ist, warum traut sich niemand, einen echten Libellen-Hubschrauber zu bauen?“ Rechenberg: Wegen der Massenträgheit. Sie steigt bei großen Flugapparaten in der vierten Potenz. Damit kann man keinen Flatterflügler bauen, der so groß wie ein Passagier-Hubschrauber ist. Das kann es nicht geben. Aber bei kleinen Geräten funktioniert das Libellen-Prinzip.“⁹

Einige Prototypen von ferngesteuerten künstlichen Libellen, wie z.B. das „Micromechanical Flying Insect“ der Universität Berkeley beweisen dies.

Das Ziel ihrer Schöpfer: Scharen künstlicher Insekten, die schlaue Teams bilden und somit Katastrophenopfer finden, Kraftwerke kontrollieren, Abwasserkanäle inspizieren, lokalen Kartoffelkäferbekämpfung durch Grünblattduftsensoren durchführen oder aber als Spione einsetzbar sind.

⁹ <http://www.welt.de/die-welt/vermishtes/article7637448/Wie-aus-der-Libelle-ein-Hubschrauber-wurde.html>

3. Aspekte der Bionik

Bild aus Urheberrechtsgründen entfernt

3.1 Gesellschaftliche Aspekte der Bionik

Oftmals werden in der Gesellschaft biologische Phänomene und Strukturen an Hand von Beispielen aus der Welt der Technik verständlich gemacht. Das menschliche Herz wird mit einer Pumpe verglichen, das Gehirn mit einem Großcomputer und das Auge mit einer Kamera. Genau genommen müssen die genannten Vergleiche umgekehrt betrachtet werden. Eine Membranpumpe funktioniert so ähnlich wie unser Herz, allerdings weit primitiver, denn das Herz hat im Laufe der Evolution eine Jahrtausende längere Entwicklung hinter sich als die technische Erfindung des Menschen. Es erscheint letztlich äußerst naiv zu glauben, dass wir besser seien als die Schöpfung selbst. Dieser Gedanke in der Gesellschaft hält sich seit tausenden von Jahren. Auch in den Religionen werden der Mensch und sein Verstand über die anderen Geschöpfe und die Natur gestellt. In der Bibel heißt es: „Machet euch die Erde Untertan.“ Den Menschen wird schon von klein auf impliziert, dass sie höher gestellt sind, wie der Rest der Schöpfung, wodurch auch gedacht wird, dass die menschlichen Erfindungen genialer sind, wie die Natur selbst.

Die Bionik räumt mit diesen Vorurteilen auf. Sie zeigt den Menschen, dass sie doch nicht die besten Erfinder der Welt sind, sondern dass gerade sie noch am meisten von der Natur zu lernen haben. Die Natur hat sich durch Jahrtausende Evolution perfektioniert. Die Gesellschaft erkennt dieses große Potenzial aber noch nicht in seinem vollen Ausmaß, letztlich auch durch die schon lang andauernde Selbstüberschätzung des menschlichen Verstandes. Die Bionik versucht nun der Gesellschaft zu zeigen, dass die Natur schätzenswert ist und viel mehr geachtet und beachtet werden muss, da man bei genauerem Hinschauen ein Menge von ihr lernen kann.

Wenn die Gesellschaft von Anfang an das Potenzial der Natur und ihrer Erfindungen erkannt hätte, wären Flugzeuge und viele andere technische Errungenschaften heute völlig anders konstruiert. Durch die Bionik wird das Verpasste sozusagen nachgeholt. Der Mensch

konzentriert sich nun auf die Natur und versucht durch sie zu lernen und nicht mehr sie zu beherrschen.

Dieses ökologische oder naturnahe Konstruieren wird heutzutage auch immer mehr von den Konsumenten gefordert und unterstützt, wodurch es sich immer mehr durchsetzt. Kaum eine Automobilfirma bzw. ein Flugzeughersteller gibt es, die sich zurzeit nicht für Bionik interessiert. Energieeinsparung durch Widerstandsverminderung und extreme Leichtbauweise sind die beiden hauptsächlichen Anforderungskriterien. All dies nützt einer günstigen Energiebilanz, und daran werden sich Kraftfahrzeuge bzw. Flugzeuge in der heutigen Gesellschaft messen lassen müssen. Ein Auto, das sowohl eine schöne Form hat und das man ökologisch noch am ehesten akzeptieren kann und darüber hinaus auch noch einen attraktiven Eindruck macht, steht heutzutage in der Käufergunst ganz oben. Denn der einzelne Konsument verfolgt selbstverständlich insbesondere in Zeiten der Wirtschaftskrise und Rohstoffverknappung, was zu einer allgemeinen Kraftstoffpreiserhöhung führt, eigene volkswirtschaftliche Interessen. Daher wird er ein spritsparendes und somit ökologisches Fahrzeug bevorzugen.

Die größte Faszination erweckt die Bionik wohl bei den jüngeren Menschen in unserer Gesellschaft. Bei Ingenieuren von heute, denen ein Vortrag über die bionischen Konstruktionen in der Natur gehalten wird, kann man sich sicher sein, dass sie auf großes Interesse stoßen wird. Da gerade die Lehre der Bionik ihre Spuren in der geistigen Grundeinstellung und im konstruktiven Vorgehen der zukünftigen Ingenieure, Naturwissenschaftler, Techniker, Wirtschaftler und Politiker hinterlässt. Denn die junge Generation ist besorgt um ihre Zukunft, sie erkennt auch ihre Verantwortung für nachfolgende Generationen. Sie zweifelt die kurzfristige Denkweise des heutigen Politikgeschehens an. Hierbei wäre zum Beispiel die Kernenergie zu nennen, so ist es nicht verwunderlich, dass wie in BW eine ökologisch orientierte Partei wie die weitgehend aus jüngeren Leuten bestehenden Grünen die Regierung übernehmen.

3.2 Wirtschaftliche und politische Aspekte der Bionik

Will man die Handlungen in der Politik und Wirtschaft näher betrachten, so muss man zu aller erst von der allgemeinen gesellschaftlichen Situation ausgehen. Diese wird heutzutage besonders in den Industriestaaten durch eine hohe Bevölkerungsdichte und eine umfangreiche

hoch produktive Industrie charakterisiert, die einen breiten Wohlstand ermöglicht. Doch die Schattenseiten der gesellschaftlichen Realität zeichnet sich durch eine nicht zu unterschätzende Umweltbelastung durch Verschmutzung, Flächenversiegelung und Abgasemissionen aus. Diese Problematik ist auch im globalen Zusammenhang zu beleuchten, wo sie in Form des Klimawandels eine akute Bedrohung darstellt. Angesichts dieser weltumfassenden Entwicklung, bei der die Ursachen bekannt, die Folgen aber noch nicht vorhersehbar sind, ist das Umweltbewusstsein ebenso in der Bevölkerung als auch in der Politik im Vergleich zum Beginn des 20. Jahrhunderts drastisch gestiegen. So wurden in der jüngeren Vergangenheit bei Treffen internationaler Regierungschefs wie dem Welt-Klimagipfel Abkommen und Ziele beschlossen, denen die meisten Industrienationen der Welt zugestimmt haben.

Um die internationalen Verträge nun zu verwirklichen, ist die Politik der einzelnen Länder angewiesen Gesetze und Richtlinien auf nationaler Ebene zu formulieren. Natürlich ist die nationale Regierung nicht ausschließlich ein Instrument oder Vermittler internationaler oder kontinentaler Bündnispolitik (z.B. EU), sondern verfasst hauptsächlich andere Bestimmungen, die sich aus der gesellschaftlichen Notwendigkeit heraus ergeben. An dieser Stelle wären einige Beispiele zu nennen: Lärmschutzbestimmungen; Sicherheitsstandards; Gesetze, die den maximalen CO₂-Ausstoß festlegen und Steuern, wie die Kerosinsteuer.

Ein weiterer Ansatz, anstelle der Wirtschaft reine Forderungen zu stellen, wäre die gezielte finanzielle Unterstützung wissenschaftlicher Arbeit. Ein Beispiel dafür ist das staatlich geförderte „Kompetenznetz Bionik“, dem inzwischen mehr als 30 bionisch orientierte Hochschulbereiche deutscher Universitäten angehören.

Auch von der Wirtschaft ist die Politik nicht ganz unabhängig, eine direkte Beeinflussung durch Lobbyismus ist nicht unüblich. Trotzdem sind politische Entscheidungen für das wirtschaftliche Handeln maßgeblich. Die Politik gibt die Rahmenbedingungen vor und schränkt die ansonsten freie Wirtschaft gegebenenfalls durch Gesetze ein.

Wirtschaftliches Handeln wird so erstens wie oben genannt durch Politikvorgaben, die ja aus den gesellschaftlichen Bedürfnissen hervorgehen, geprägt und zweitens ist es eine Folge ein wirtschaftlicher Interessen der einzelnen Unternehmen. Diese sind wohl überall dieselben: Gewinnmaximierung, Steigerung des Umsatzes und des Profits, möglichst als erster fortschrittliche Innovationen auf den Markt bringen und Produktionskosten senken, um billig anbieten zu können. Als drittes wäre die wirtschaftliche Notwendigkeit zu nennen, mit der ich

den Druck meine, dem die Firmen im Konkurrenzkampf um eine solide Marktstellung mit vor allem nordamerikanischen und zunehmend asiatischen Wettbewerbern ausgesetzt sind.

Somit wird das individuelle wirtschaftliche Handeln der einzelnen Unternehmen durch die soeben genannten drei Faktoren beeinflusst.

Was nun benötigt wird, ist eine neue Erfindung, eine Innovation die sowohl ökonomisch und damit wettbewerbsfähig ist, als auch den Anforderungen der Umweltverträglichkeit, also den fest definierten Standards entspricht. Ein Produkt, das beispielsweise durch die Steigerung der Energieeffizienz ökonomischer wird, kann dadurch gleichzeitig auch ökologischer werden, muss es aber nicht zwingend.

Hier kommt nun endlich die Bionik ins Spiel. Für Systeme und Entwicklungen, an die so hohe Anforderungen gestellt werden, sind fundierte Grundlagenforschungen von Nöten. Genau dort setzt die fachübergreifende Wissenschaft der Bionik an und ist daher für die Wirtschaft sehr interessant.

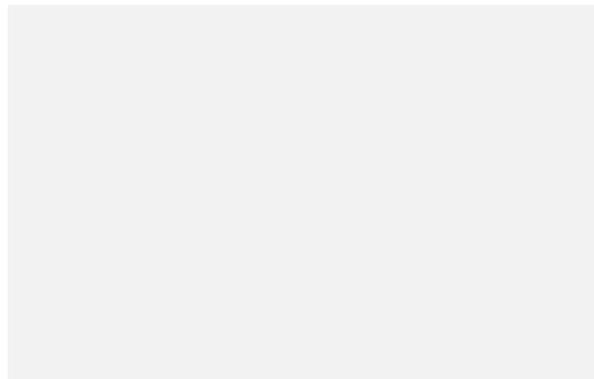
Natürliche Organismen, von denen man in der Bionik neue Erkenntnisse gewinnt, sind allesamt sehr energieeffizient, hochspezialisiert und optimal angepasst. Lösungen für technische Probleme in Ingenieurwissenschaften sind oftmals in der Natur schon lange vorhanden. Sich an den bewährten Prinzipien zu orientieren ist um einiges zeit- und kostensparender als neue Ansätze auf experimentellen Wegen zu erforschen. Zudem sind die „Patente der Natur“ in fast unbegrenzter Menge vorhanden. Der Grund dafür liegt in der langen Geschichte der Evolution. Der Überlebenskampf und der Trieb sich durchzusetzen und die eigene Spezies weiter fortzupflanzen haben zu einer natürlichen Auslese geführt, wodurch alle heute lebenden Organismen nahezu perfekte Systeme zeigen. Erreicht man nun mit Hilfe der Bionik nach Vorbild der Natur sparsame Maschinen oder Geräte zu bauen, wären diese an sich ökonomisch und ökologische Anforderungen könnten unter dem Gesichtspunkt der Energieeinsparung auch erfüllt werden.

An einem konkreten Beispiel erläutert: Ein Flugzeug verringert dank der bionischen Entdeckung von Winglets den Luftwiderstand, deshalb es weniger Schubkraft und somit weniger Treibstoff benötigt. Die Umwelt wäre dahingehend geschont, als dass das Flugzeug weniger CO₂-Emissionen ausstieße und wegen der Treibstoffeinsparung ressourcenschonend weniger Öl gefördert und aufbereitet würde. In wirtschaftlicher Hinsicht könnte der Flug mit solch einem Flugzeug deutlich billiger angeboten werden. Der Privatmann hätte dadurch selbstverständlich genauso einen enormen Nutzen.

Jedoch muss man bei dieser Gedankenführung vorsichtig sein: Nicht alles was ökonomisch ist, wird dadurch auch ökologischer. Ob das Produkt die Umwelt wirklich schont, hängt besonders von der Art, Dauer und Intensität dessen Nutzung ab. Im Beispiel bedeutet dies, wenn die Flüge durch die neue (bionische) Technik billiger wird, könnte der Flugverkehr zunehmen und der ^{3.3 Abb.1: Großaufnahme einer Qualle}insgesamte Schadstoffausstoß größer werden, obwohl das einzelne Flugzeug an sich weniger Treibstoff benötigt. <http://www.allmystery.de/themen/tp62727-1/>

3.3 Wissenschaftliche Aspekte der Bionik

Zu keinem Zeitpunkt in der Menschheitsgeschichte war die Differenz zwischen dem vorhandenem Wissen einerseits und dem gleichzeitigen Nichtwissen in unserer Gesellschaft andererseits größer als heute. Mit



anwachsendem Expertenwissen in einem Spezialgebiet wird die Kluft zwischen Wissen und Unwissen immer größer. Heute ist grundsätzlich jeder Fachmann, und sei es sogar ein Nobelpreisträger, ein Laie auf allen anderen Gebieten. Die Zeit, als eine Gesamtschau der Welt wie bei Alexander von Humbold oder Johann Wolfgang von Goethe üblich war, ist schon längst vorüber. Durch den rapiden Anstieg des Wissensschatzes wird jeglicher Rahmen des menschlichen Vorstellungsvermögens gesprengt. Andererseits ist ohne Spezialisierung kein Fortschritt möglich. Das Gesamtwissen der Zeit (wenn auch nur in einem Fach z.B. Physik) in einem Menschen zu vereinen, wie es Universalgelehrte wie Leonardo Da Vinci noch konnten, ist heute unmöglich. Eine Gesamtschau wie sie leider immer mehr fehlt aber dringend notwendig wird, ist damit auch nicht gemeint, sondern eher eine interdisziplinäre Vernetzung durch Kooperation. Somit kommt das "Große Ganze" mehr in den Fokus.

Deshalb sollten die Wissenschaftler in der Zukunft lernen enger zusammenarbeiten. Da die Bionik die Verbindung zwischen der Biologie und der Technik ist, werden Biologen und Ingenieure dazu übergehen müssen, voneinander zu lernen. Natürlich können die Ingenieure nicht gezwungen werden von der Natur abzuschauen, allerdings bietet es sich an, zu schauen, wie die Natur dieses oder jenes Problem gelöst hat. „Es [die Bionik] ist ein Werkzeug. Man

kann's benutzen man muss es nicht benutzen. Allerdings wäre es unweise von den Ingenieuren, wenn sie das System, das vorhanden ist, außer Acht lassen würde. Die Natur ist in all ihrer Hülle und Fülle an Verfahrenstechniken, Konstruktionen und Evolutionsprinzipien vorhanden. Man muss als Techniker nicht darauf schauen, aber, wenn man es nicht tut, macht man nach meiner Meinung einen Fehler¹⁰ Es ist von Vorteil, wenn die Naturwissenschaften, zumindest die der physikalisch-chemischen Naturwissenschaft, Ergebnisse der Nachbarwissenschaften vor allem der unbedeutend scheinenden Schatztruhe Biologie zur Kenntnis nehmen. Die Techniker sollen über den Rand ihres eigenen Fachgebietes hinaus, in das andere Fachgebiet hinein schauen und mit den Fachleuten kooperieren.

Natürlich stellt sich die Frage, wie eine solche Zusammenarbeit in der Praxis aussehen soll. Die Technik muss mit einem Problem an die Biologie herantreten. Diese kann dann durch vergleichbare Grundlagenforschung zusammen mit der Technik eine Konzeption entwickeln. Die vergleichbare Grundlagenforschung beinhaltet das Finden eines Lebewesens, das mit denselben Problemen zu kämpfen hat wie die Technik und von diesem dann die Lösung zu übernehmen. Durch den gesammelten Informationspool ergibt sich für die Technik die Möglichkeit das gefunden Wissen auf ihr Problem zu übertragen und das technische Problem zu lösen.

Somit könnte durch die Bionik und deren enge Zusammenarbeit ein Umdenken in den Wissenschaften einkehren, eine Art Revolution angetrieben durch fachübergreifendes Denken.

Das wiederum könnte sich auf die Gesellschaft auswirken und ein besseres Naturverständnis und auch damit eine Naturverbundenheit bewirken.

Es könnte der Anschein erweckt worden sein, dass die Bioniker besser geeignet wären neue Erfindungen und Konstruktionen zu bauen, allerdings wollen die Biologen und die Bioniker nicht den Ingenieur ersetzen, sondern sie wollen ihm die Wege weisen, die er alleine nicht findet.

¹⁰ Prof. Dr. Werner Nachtigall

3.4 Umweltliche Aspekte der Bionik

Was bedeutet eigentlich Bionik in der Luftfahrt für die Umwelt? Knapper werdende Energieträger und Rohstoffe sowie das zunehmende Bewusstsein für den Klimaschutz und Nachhaltigkeit, welches insbesondere seit den sichtbaren Folgen der Umweltverschmutzung an Bedeutung gewinnt, erfordern qualitative Lösungsansätze mit Zukunft versprechenden Perspektiven.

Seit der erste Jäger seinen frierenden Körper mit einem Tierfell umhüllte, haben Menschen immer wieder in die Natur eingegriffen. Unsere gesamte Geschichte basiert auf eine unendliche Folge von menschlicher Anpassung durch Selbstveränderung oder Veränderung unserer Umwelt. Als ein Halbfabrikat ist der Mensch gezwungen seine natürlichen Mängel mit Geschick und Intelligenz zu kompensieren. Wo ihn die Natur unvollkommen ausgestattet hat, musste er seine Evolution selbst in die Hand nehmen, um zu überleben. Somit sind wir von Natur aus auf Künstlichkeit, also Kultur und Zivilisation, angewiesen. Wir erschaffen uns eine zweite, kultivierte Natur, welche ausschließlich an uns optimiert ist, ohne dabei Rücksicht auf andere Wesen zu nehmen. Bald tritt der minimale Überlebenswille in den Hintergrund, da unser immer größer werdendes Verlangen nach Lebensqualität überwiegend unser Handlungsvermögen prägt. Das Eingreifen in die naturbelassenen Kreisläufe verbirgt Spätfolgen für uns, welche bekämpft werden müssen, um unseren Lebensstandard zu sichern. Schuld daran ist zum Teil auch unsere primitive Sichtweise auf die Natur. Im Zeitalter der Industrialisierung war es beispielsweise lange Zeit verpönt, Hilfe aus der Natur heranzuziehen, um damit künstliche Systeme zu erschaffen. Man war der Meinung, dass der menschliche Erfindergeist unermesslich über der Natur stehe. Die damalige Überheblichkeit des Menschen hinderte somit die Technik von der unerschöpflichen Biointelligenz zu profitieren. Erst die sich häufenden Rückschläge in Bereichen der Technik, Medizin als auch Wirtschaft, führten zu der Frage, wie es die Natur gemeistert hat, sich über so viele Jahrmillionen nicht nur zu erhalten, sondern auch zu ständig höheren Formen zu entwickeln. Als technologisches Supersystem, besitzt die Natur einen Energie- und Stoffumsatz mit gewaltigen Ausmaßen und zudem unglaublichen Wirkungsgrad. Organisationsform, Management und Logistik sind im Entferntesten nicht mit unseren zu vergleichen. Durch die geschickte Nutzung von Wirkungskopplungen, Energieketten, Symbiosen und Selbstregulationsprozessen schafft die Natur ein System ohne Rohstoffknappheit und Arbeitslose, ohne Absatzprobleme und Schulden, das eine wahre Schatztruhe voller Energie sparenden Tricks darstellt. Welche Eingriffe in die Natur insbesondere durch die Luftfahrt

entstehen und wie diese mit Hilfe von der Bionik umweltverträglicher gemacht werden können, soll im Folgenden erläutert werden.

Obwohl sie sich am Himmel in scheinbar sicherer Ferne bewegen, haben Passagierflugzeuge trotz einer durchschnittlichen Flughöhe von 10 Kilometern undenkbare Auswirkungen auf das Leben am Boden. Damit hängt vor allem der erhöhte Kraftstoffverbrauch zusammen, welcher durch das bevorzugte Reiseverhalten mit einem Flugzeug, aufgrund der immer mehr sinkenden Flugpreisen, zusätzlich verstärkt wird. Die dabei in der Luft freigesetzten Schadstoffe sollen nach wissenschaftlichen Untersuchungen besonders für die Bevölkerung in Flughafennähe, wegen der oftmaligen Grenzwertüberschreitungen und dem Kontrollmangel, ein beträchtliches Lungenkrebsrisiko herbeiführen. Im Angesicht der Einwirkung auf die Atmosphäre sollen nach IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) die verursachten Emissionen in den Flughöhen eine dreifache Klimaschädlichkeit im Vergleich zu der gleichen Menge Abgase am Boden verursachen. Die Luftschadstoffe sind neben den gesundheitlichen Folgen auch am Abbau des lebenswichtigen Ozons beteiligt. Des Weiteren treten die entstehenden Stickoxide aus den Flugzeugtriebwerken in Verbindung mit Schwefel zu stark ätzendem Gift auf und schädigen als „sauren Regen“ Pflanzen und Bauwerke. Der Ausstoß an Kohlenstoffdioxid in den letzten 15 Jahren ist um fast 70 % angewachsen, worauf die Politik durch Steuern auf den Luftverkehr entgegenwirkt und den ökonomischen Anreiz schafft möglichst große Mengen an Kerosin einzusparen. Hinzu kommt der erzeugte Fluglärm welcher für Mensch und Tier eine starke Beeinträchtigung der Lebensqualität bedeutet sowie mit gesundheitlichen Schäden verbunden ist. Über 10 Millionen Menschen in Europa haben darunter zu leiden. Zusätzlich werden enorme volkswirtschaftliche Schäden durch den Wertverfall von Häusern und Grundstücken sowie der Belastung des Gesundheitssystems aufgrund lärmbedingter Krankheiten verursacht. In diesem Fall können Innovationen aus dem Bereich der Bionik eine entscheidende Rolle spielen. Patente der Natur wie beispielsweise Tragflächenformen nach dem Vorbild von Vögeln bieten Ingenieuren eine Quelle an effizienten Ideen, um den Gesamtwiderstand am Flugzeug zu optimieren und damit eine hohe Kraftstoffersparnis zu erreichen. Die Reduktion des Widerstandes hat auch insofern eine Bedeutung, da sie Start- und Landestrecken erheblich verringert und somit die am Flughafen anliegende Ortschaft vom Fluglärm entlastet.

Die Bionik strebt neben dem Lernen von Konstruktions-, Verfahrens- und Entwicklungsweisen der Natur ebenso eine positive Vernetzung von Mensch, Umwelt und Technik an. Bisher wird das Gefüge der drei Teilgebiete, welche in Beziehung zueinander

stehen, immer weiter auseinandergetrieben. Der Mensch nutzt die Technik, um zu überleben oder vielmehr seine Lebensqualität zu verbessern. Seine technische Innovation hat allerdings negative Auswirkungen auf die Umwelt. Die Beeinträchtigung der Umwelt als Lebensgrundlage betrifft letztlich den Menschen und der Kreislauf schließt sich. Die Bionik bietet hingegen die Möglichkeit alle drei Facetten annähernd unter positiven Beziehungen zu verbinden, wovon jedes Gebiet profitieren kann.

Es stellt sich nun die Frage, welche Art von Natur wir eigentlich durch Bionik schützen möchten. Wenn man die Wahl hätte zwischen einem frischen unbehandelten Apfel und einem gespritzten und gewachsenen, dann wäre die Entscheidung klar: natürlich Natur. Man setzt dennoch voraus, dass der Apfel nicht gerade pockennarbig und voller Würmer ist. Die naturbelassene Natur muss uns also entsprechen und man erwartet, dass sie kultiviert ist. Wenn wir uns für Bionik entscheiden, müssen wir auch in Kauf nehmen, dass die Natur, die geschützt werden soll, nicht unbedingt unseren perfekten Wunschvorstellungen entspricht. Ist also jemand, der sich entscheidet Bionik im Bereich der Luftfahrt zu fördern, daran interessiert die naturbelassene Natur durch die verminderten Emissionen zu schützen, oder verfolgt er das Ziel seine kultivierte Natur, seine Lebensqualität, zu fliegen anstatt seine natürliche Fortbewegung zu Boden, zu erhalten?

Die effiziente Nutzung der begrenzten Ressourcen durch die hohe Ausbeute der eingesetzten Energie mag aus unserer Sicht nachhaltig aussehen. Doch möglicherweise kann auch hier etwas von der Natur abgeschaut werden, die weder auf Gewinn noch auf Wachstum ausgerichtet ist. Für einen Organismus in der Natur steht das Überleben als das Notwendigste an erster Stelle, wohingegen der Mensch eine Verbesserung anstrebt und sich mit dem Minimum nicht zufrieden gibt. Die Bionik an sich darf daher nicht als absolute Lösung für die anwachsenden Umweltproblemen betrachtet werden. Vielmehr besteht ein Bedarf darin unsere an das Maximum orientierte Lebensweise zu ändern und uns bewusst zu machen, welche Auswirkungen unser Handeln haben kann.

4. Ausblicke in die Zukunft

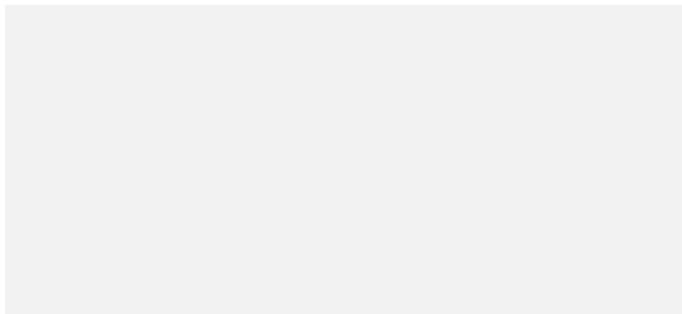
Abb.1: Vergleich der Rosettenpflanze mit dem

Wohngebäude in Rom

Die Bionik ist eine aufstrebende Wissenschaftsdisziplin, die das Lernen von der Natur systematisiert und die Prinzipien biologischer Systeme in neue Erfindungen umsetzt. In ihrem heutigen Umfang und Verständnis ist sie jedoch noch ein sehr junger Wissenschaftsbereich der erst seit 1960 unter diesem Namen geführt wird.

Soll man einen Ausblick auf die Zukunft der Bionik allgemein oder im Besondern (Flugzeugbau) geben, muss man betonen, dass Bionik richtig eingeschätzt werden muss.

Denn „Bionik ist weder eine Heilslehre, noch eine Naturkopie, sondern ein Werkzeug und ein gutes Hilfsmittel zur Problemlösung“.1 Sie ist eine Umsetzung von Prinzipien der Natur in der Technik. Die Bionik darf nicht als allgemeiner Problemlöser aufgefasst werden. Es gibt Bereiche, bei denen die Bionik keinen Anregungscharakter besitzt (z.B. bei der Atomkraft). Trotzdem ist sie fallweise ein machtvolles Hilfsmittel. Ein Beispiel hierfür ist der Klettverschluss, der nach dem Vorbild der Klettfrüchte entwickelt wurde und aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken ist.



Aber auch in anderen Bereichen wie z.B. dem Hausbau werden bionische Erkenntnisse untersucht. Im Wohngebiet Santa Maria in Rom wurde ein Haus nach dem Vorbild einer Rosettenpflanze errichtet. Der Vorteil dieser Bauweise ist, dass sich die Wohneinheiten im Sommer bei starker Sonne gegenseitig beschatten, während sie sich im Winter möglichst wenig Sonne wegnehmen und dadurch

Energie einsparen (Sommer Klimaanlage/Winter Heizung). Genauso wie es die Rosettenpflanze mit ihren Blättern macht.

Die Baubionik ist nur eine Facette der Bionik, weitere Bereiche sind die Strukturbionik, Konstruktionsbionik, Sensorbionik, Bewegungsbionik, etc.

Diese Aufzählung zeigt, dass bionische Forschungen bereits in vielen Bereichen der Technik Einzug gehalten hat. Es werden neue Institute gegründet, bestehende erweitert und neue Studiengänge eingerichtet. Dies lässt darauf schließen, dass der Wissenschaftszweig Bionik auch in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird.

K.G. Blüchel schreibt in seinem Buch „Faszination Bionik, die Intelligenz der Schöpfung“: „Gäbe es einen Nobelpreis für die aussichtsreichste Zukunfts-Disziplin, wäre die Bionik eine der heißesten Anwärterinnen, denn die Natur kennt weder Energie- noch Rohstoffsorgen, weder Müllhalden noch lebensbedrohliche Umweltbelastungen. Auch Hunger und Arbeitslosigkeit, Überbevölkerung und Kriege hat sie im Verlauf ihrer Entwicklung vermieden bzw. erst gar nicht entstehen lassen.“

Technische Lösungen nach dem Vorbild der Natur können dazu beitragen, mit Ressourcen sparsamer umzugehen und die Umwelt zu schonen. So könnten z.B. in der Fliegerei, leichtere und gleichzeitig stabilere Materialien oder Konstruktionen zum Einsatz kommen, die den Treibstoffverbrauch mindern. Genauso könnten andere Bauformen und eine anders gestaltete Außenhaut mit haifischhautähnlichen Strukturen, den Treibstoffverbrauch senken. Der erste Airbus A 340, der im Liniendienst der Cathay Pacific Airways mit einer 30prozentigen Beschichtung fliegt, verbraucht nachweislich ein Prozent weniger Kerosin. Bei optimaler Folienbeschichtung könnte das Flugzeug wegen des eingesparten Treibstoffs 15 Passagiere mehr mitnehmen.

Daneben könnte der Nachbau von Libellenflügeln, die durch ihre extrem leichte, aber trotzdem stabile Bauweise die Forscher brennend interessieren, eine Vorlage für ultraleichte Tragflächen werden.

Auch die fortschreitende Technik im Bereich der Sensorbionik wird es möglich machen, dass der Menschen im Cockpit bald völlig wegrationalisiert wird. Computer übernehmen schon lange die Bestimmung der Flugbahnen und Überwachung der Bordsysteme, nun könnte auch noch Pilot und Copilot ersetzt werden. Entsprechende Versuche laufen bereits.

Ein weiteres Forschungsziel sind absturzsichere Flugzeuge. Auch hier dienen die Vögel als Vorbild, die mit abstehenden Deckfedern auf ihren Flügeln die Strömungsablösung des Luftstroms verhindern.

Insekten sind filigrane und virtuose Flieger, zum Beispiel wenn sie im Flug mit ihrem langen Rüssel einen engen Blütenkelch treffen müssen, die schon lange vor den Vögeln durch die Urwelt surrten. Ob sich ihre Flugtechnik zur technischen Nachahmung eignet, ist aber fraglich. Erst in Zeitlupenaufnahmen sieht man die ausgeklügelten Bewegungsabläufe, die zu den kompliziertesten Fortbewegungsarten im Tierreich gehören.

Trotzdem befassen sich einige Forscher mit dem Bau von Mikro-Fluginsekten da diese im Gegensatz zum Vogel schneller und wendiger sind. Der Star unter den Fluginsekten aber ist die unscheinbare Schwebefliege. Sie kann unglaubliche Kunststücke, zum Beispiel auf dem Rücken fliegen. Außerdem schafft sie eine Geschwindigkeit von 25 Kilometer pro Stunde und eine Beschleunigung von 15 G (das 15-fache des Körpergewichts). Zum Vergleich: ein gut trainierter Kampffjet-Pilot wird bei etwa 9 G ohnmächtig. Ohne Schutzanzug schon wesentlich früher.

Wie man sieht hat in Sachen Fliegen die Natur als Vorbild noch lange nicht ausgedient – ganz im Gegenteil.

5. Unter der Lupe: Industrielle Forschungsarbeit im Bereich der Bionik

In den vorigen Kapiteln haben wir uns sowohl bisherige Erfindungen aus der Wissenschaft der Bionik angeschaut und zukünftiges Entwicklungspotential aufgezeigt, als auch die Auswirkungen der Bionik auf die Politik, Gesellschaft, Wissenschaft und Umwelt beschrieben. Im Bereich Wirtschaft haben wir festgestellt, dass die Bionik für Unternehmen eine zunehmend wichtigere Rolle spielt. Wie aber genau sieht das „Abschauen“ von der Natur in fortschrittlichen Betrieben konkret aus? Um diese Frage zu beantworten, werden wir uns eine Firma, die im Bereich der Bionik tätig ist, genauer anschauen.

5.1 Das Unternehmen FESTO

Bei unseren Recherchen sind wir auf die hier in der Region ansässige Firma Festo AG & Co. KG gestoßen. Das seit 1925 bestehende Familienunternehmen ist ein weltweit führender Anbieter von Automatisierungstechnik. Der Hauptsitz der Firma, die insgesamt ca. 12000 Mitarbeiter beschäftigt, liegt in Esslingen am Neckar. Angeboten werden sowohl Einzelkomponenten, als auch fertige kundenspezifische Systeme für den pneumatischen und elektrischen Betrieb von Prozessautomationen. Namenhafte Automobilhersteller wie Daimler, Ford, GM, VW und Volvo setzen bei der automatisierten Produktfertigung in ihren Fabriken unter anderem auf Systeme aus dem Hause Festo.

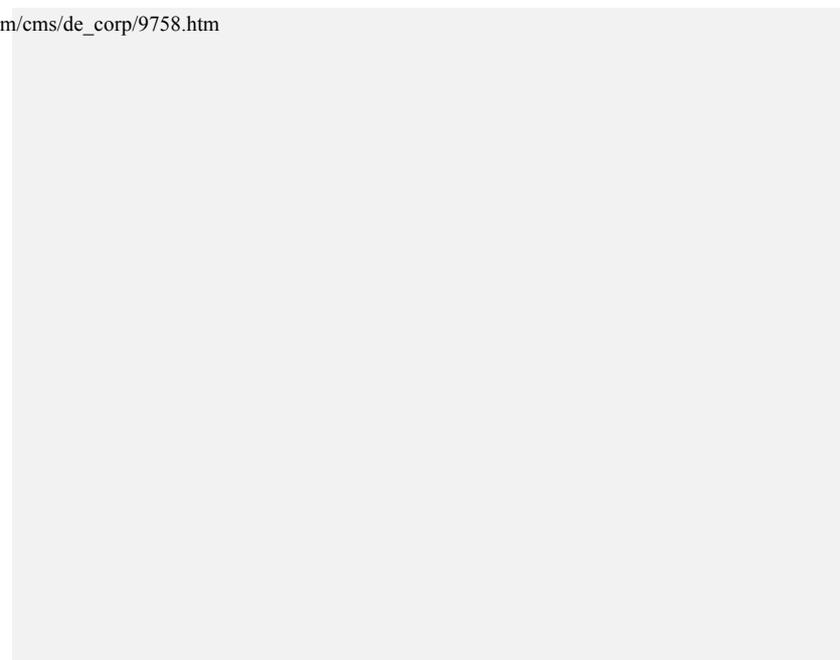
Als global ausgerichteter Leistungsführer dieser Branche muss sich Festo mit Innovationen und Problemlösungskompetenzen auf dem internationalen Markt behaupten. Deshalb ist ein Thema für das Unternehmen auf dem Weg zu einer optimalen Energieausnutzung und somit einer weiterhin führenden Position im Konkurrenzkampf der Wirtschaftsunternehmen ganz besonders wichtig: die Energieeffizienz. Genauso wie die natürliche Auslese der Evolution nur die effizientesten Lebensformen erhalten lässt, könnte der Aspekt Energieeffizienz auch für Firmen in Zukunft für das „Überleben“ maßgeblich sein.

So wirbt Festo mit modernen Systemen, die den Wirkungsgrad bestehender Anlagen übertrifft und in der Gesamtbetrachtung bei richtiger Auslegung die Effizienz erhöht. Darüber hinaus

wird mit dem *Festo Energy Saving Service*¹¹ eine Dienstleistung angeboten, bei der komplette Automatisierungsanlagen mit Festo Komponenten auf eventuelle Leistungsverluste analysiert werden. Mit entsprechenden Verbesserungsmaßnahmen soll der Anlagenbetrieb um einiges effizienter gestaltet werden. Für Kunden bedeutet dies sinkende Produktionskosten und ein daraus resultierender Marktvorteil. Der *Festo Energy Saving Service* wurde 2009 mit dem Umwelttechnikpreis des Landes Baden Württemberg in der Kategorie Mess-, Steuer- und Regelungstechnik ausgezeichnet. Auch bei der eigenen Produktion wird mit Hilfe firmeneigener Blockheizkraftwerken, Brennstoffzellen und Photovoltaikanlagen nach dem Geist der Zeit Energie optimal genutzt und eingespart.

In Sachen Energieeffizienz ist die Natur das ultimative Vorbild. Das hat auch die Unternehmensleitung der Festo AG schon lange erkannt. So wurde das *Bionic Learning Network* gegründet und die Grundlagenforschung im Bereich der Bionik wurde fester Bestandteil der Entwicklung. Das Bionic Learning Network ist ein Verbund namenhafter Hochschulen (u.a. Technische Universität Stuttgart) und Entwicklungsfirmen (z.B. Evologics GmbH), die ebenfalls die Bionik in ihrer Forschungsarbeit integriert haben. In unserer Wohlstandsgesellschaft sind die meisten Maschinen und technischen Vorrichtungen Assistenzsysteme für die Arbeit

des Menschen in Industrie und Haushalt. Insbesondere Robotiksysteme in der Industrie sind



in der herkömmlichen mechatronischen Entwicklungsweise Grenzen gesetzt. Festo versucht nun im Zuge der Arbeit des Bionik Netzwerkes bionische Grundprinzipien zu erkennen und diese in Kombination mit bekannten Konzepten in neue Innovationen umzusetzen,

¹¹ http://www.festo.com/cms/de_de/Energy_Saving_Service.htm

die die „Mensch-Technik-Kooperation“¹² entscheidend verbessert oder erst möglich macht. Für die effiziente Automatisierungstechnik sind laut Festo drei bionische Prinzipien besonders entscheidend: höchste Flexibilität, Selbstregulation und geringe bewegte Masse durch Leichtbau. Seit 2006 entstanden einige Projekte, die nicht nur mit einer fortschrittlichen funktionalen Technik ausgestattet sind, sondern auch ein zum Teil mit Design Awards ausgezeichnetes Design besitzen. Auch wenn die Projektergebnisse, wie der *Air Penguin*, auf den ersten Blick wie technische Spielereien aussehen, so stecken doch für die Weiterentwicklung der Festo-Produkte bedeutsame Erkenntnisse darin. Ein konkretes Beispiel wäre der *Fin Ray Effect*®¹³. Die Entdeckung, dass sich Fischeschwanzflossen bei seitlicher Krafteinwirkung anstatt in Krafrichtung abzuknicken gegen diese wölben und ein Fisch erst dadurch die ganze Kraft seines Flossenschlags entfalten kann, hat zur technischen Adaption z.B. in Form des *Airacuda*, *Aqua_Ray*, *AirJelly* und des *AirPenguin*¹⁴ geführt. Die weiterführende entsprechende industrielle Applikation wäre der *FinGripper* (vgl. Abb.1), der die bionischen Grundprinzipien der hohen Flexibilität zusammen mit extremem Leichtbau zu einem präzisen Greifarm für die Automatisierungstechnik vereint. Noch eine Stufe perfektionierter ist der Bionische Handling Assistent. Dessen hohe Flexibilität ermöglicht es dem Greifarm durch ein mechatronisches System aus Sensorik und Steuerungs-/Regelungstechnik auf unterschiedlichen Wegen ähnlich wie ein Arm einen bestimmten Punkt im Raum zu erreichen. Als Vorbild für diese Entwicklung diente der Elefantenrüssel. Da der gesamte Greifarm aus leichten pneumatisch gefüllten Luftkammern besteht und das Material strukturell nachgiebig ist, besteht auch bei direktem Kontakt zwischen Mensch und Maschine keine Gefahr mehr. Unter diesem Gesichtspunkt kann man von einer gelungenen Mensch-Technik-Kooperation sprechen. Für diesen dritten Arm für Industrie und Haushalt wurde Festo gemeinsam mit dem Fraunhofer IPA der Deutsche Zukunftspreis 2010 verliehen.

Auch das Projekt *Air Jelly* vereint wichtige Erkenntnisse für neue Innovationsprozesse. Diese autonome Qualle, die mittels innovativer Sensorik kollektives Verhalten realisiert, ist ein Paradebeispiel für ein selbststeuerndes und selbstorganisierendes System. In der Prozessautomation könnten solche intelligenten Steuerung und Regelung Ausfallzeiten durch Kommunikation zwischen den Bauteilen und Maschinen verringern.

¹² http://www.festo.com/cms/de_corp/10729.htm

¹³ Marke der Evologics GmbH: <http://www.evologics.de/>

¹⁴ Videos mit Funktionsvorführungen zu diesen Projekten im offiziellen YouTube Kanal des Bionic Learning Network <http://www.youtube.com/user/FestoHQ>



b.2: Der Smart Bird ein elektrischer
gel

[://www.festo.com/cms/de_corp/11369.htm](http://www.festo.com/cms/de_corp/11369.htm)

Mit der neuesten Bionik-Erfindung dem *Smart Bird* ist es Festo gelungen, eine der ältesten Träume der Menschheit zu erfüllen: Den Vogelflug zu entschlüsseln und in technisch zu nutzen. Ergebnis der Forschungsarbeit ist ein leichtes und wendiges Flugmodell, das gleichsam einem Vogel mit Flügelschlägen Vortrieb und Auftrieb erzeugt. Dabei gleicht das äußere Erscheinungsbild des *Smart Bird* genauso wie die Fähigkeit die Flügel zu verdrehen oder den Kopf zu drehen seinem Vorbild, dem Vogel. Vor allem der Ultraleichtbau, aber auch Know-How über Strömungsverhältnisse sind bei

diesem Projekt die entscheidenden Gewinne für das Unternehmen. Festo hat es vorgemacht, nun darf man gespannt sein ob andere Firmen sich ebenfalls daran probieren den Vogelflug nachzuahmen. Vorteile gibt es genügend für Vogelflug gegenüber der Flugweise herkömmlicher Flugzeuge. Denn eins steht fest, diesen hohen Wirkungsgrad im Flugbetrieb des Vogels wird man auf die konventionelle Weise nie erreichen. Zudem ist die Wendigkeit und Flexibilität, auch in Bezug auf Start-und Landestrecken unübertroffen.

Um Informationen über das *Bionic Learning Network* bei Festo aus erster Hand zu bekommen, haben wir im Folgenden mit Dr. Reinhard Pittschellis, Produkt Manager bei der Festo, ein E-Mail Interview geführt. Dazu liesen wir ihm einen selbst verfassten Fragenkatalog zukommen, den er uns freundlicher Weise beantwortet hat.

5.2 Interview mit Dr. Reinhard Pittschellis

1. Welche konkreten Ziele verfolgt Ihr Unternehmen mit dem Bionic Learning Network?

„Direkte Wirkung: Interessante Messeexponate, die Festo als innovatives Unternehmen darstellen

Indirekte Wirkung: Grundlagenforschung, die mittelfristig zu innovativen Produkten führt“

2. Lohnt es sich in wirtschaftlicher Hinsicht für Unternehmen prinzipiell ihre Forschung auf das Fachgebiet der Bionik auszuweiten? Anstatt Geld für die Analyse der Natur auszugeben, könnte man doch auch den menschlichen Erfindergeist bemühen.

„Die Frage kann man nie generell beantworten. Genauso gut können Sie fragen, ob Grundlagenforschung sich lohnt.“

3. Wie sehen die wichtigsten Arbeitsschritte bei der Entwicklung einer Natur inspirierten Innovation bei Ihnen aus?

„Ideenfindung – Umsetzung als Messeexponat – Weiterentwicklung zum Serienprodukt“

4. Für den bionischen Entwicklungsprozess ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit, insbesondere zwischen Biologen, die die Natur untersuchen und erforderliches Wissen schaffen, und Ingenieuren, die dieses Wissen technisch umsetzen, gefragt. Mit welchen Einrichtungen stehen sie in Verbindung, um biologischen Grundlagenwissen zu erwerben?

„Im Rahmen des Bionic Learning Network haben wir Kontakt zu allen wichtigen Bionik-Forschern in Deutschland, z.B. die Uni Freiburg oder die Firma Ecologic, um nur zwei zu nennen.“

5. Sind die bisherigen Forschungsprojekte den Anforderungen des heutigen Weltmarkts gewachsen? Wenn ja, bei welchen Projekten sehen Sie in naher Zukunft Marktrelevanz? Wenn nein, inwiefern sehen Sie Schwierigkeiten bionische Innovationen trotz all ihrer Effizienzvorteile erfolgreich zu vermarkten?

„Wie gesagt steht beim Bionic Learning Network nicht das Serienprodukt im Vordergrund. Viele Innovationen werden nie ein Produkt werden. Bei manchen stellt sich die Produktrelevanz aber erst später heraus. Beispiel: FinRay-Effekt. Abgeleitet von der Fischflosse als effizienter Antrieb wurde der FinRay zuerst als Antrieb des AirJelly eingesetzt (geringe Produktrelevanz). Dann kam die Idee des flexiblen Greifers hinzu. Dieser wird nun tatsächlich verkauft.“

6. Energieeffiziente Einzelprodukte sind an sich umweltfreundlicher. Doch eine erhöhte Produktivität und vermehrter Einsatz der Produkte, bedeutet ein stärkerer Eingriff in die Natur. Ihrer Ansicht nach ist Energieeffizienz „der Schlüssel für erhöhte Produktivität und sinkende Kosten“. Sehen Sie in der angestrebten Energieeffizienz, die Sie mit der Bionik zu verwirklichen versuchen, auch eine Gefahr, sodass durch die Rationalisierung und verbesserte Energieausbeute, die Umwelt aufgrund des wirtschaftlichen Vorteils geschädigt wird?

„Die Frage muss doch sein, wie wir es schaffen, immer mehr Menschen Zugang zu Wohlstand zu verschaffen. Wie wollen wir allen Chinesen verbieten, Auto zu fahren. Was wir tun können: zeigen, wie man viel effizienter als bisher Mobilität realisieren kann. Dann gewinnen alle. Dass unsere heutigen Autos wenig umweltfreundlich sind, wird die Chinesen (nur ein Beispiel) nicht daran hindern, Auto zu fahren. „

7. Konnten Sie bereits gewonnenes Know-How aus dem Bionic Learning Network für die eigentliche Produktion ihrer Automatisierungstechnologien verwerten?

„FinRay-Greifer, Bionic Handling Assistant, generell Leichtbau“

8. Im Rahmen des Bionic Learning Networks ist es Ihnen gelungen den Vogelflug, einer der ältesten Menschheitsträume, zu entschlüsseln und in Form des SmartBirds technisch umzusetzen. Welche Relevanz könnte das errungene Wissen für die zukünftige Entwicklung im Flugzeugbau haben?

„Kann ich derzeit kaum beurteilen. Ich glaube, der extreme Leichtbau ist hier das Entscheidende. Dies könnte im Flugzeugbau hilfreich sein. Der Antrieb eher weniger.“

Quellenverzeichnis

Einleitung

- Kurt G. Blüchel: Bionik - Wie wir die geheimen Baupläne der Natur nutzen können. C. Bertelsmann Verlag, 2005
- Prof. Dr. Bernd Hill: Bionik - Lernen von der Natur. Duden Paetec Schulbuchverlag, 2006
- Doris Freudig: Faszination Biologie. Spektrum Akademischer Verlag, 2005
- Jahrbuch Ökologie 2008. Verlag C.H.Beck, 2007

Daidalus und Ikarus

- http://www.ovid-verlag.de/Download/Ovid%20Verlag_Daedalus%20und%20Ikarus.doc
- http://www.bunse-latein.de/Latein-Homepage/autoren/hyp-ovid/ovid-interpretation.htm#Daedalus_und_Icarus__
- http://www.cjd-koenigswinter.eu/faecher/latein/latein_ovid/elisabeth/index.htm

Leonardo da Vinci

- Herbert Groß: Luftfahrt-Wissen. Motorbuch Verlag, 2004
- Daniel Kupper: Leonardo da Vinci. Rowohlt Taschenbuch Verlag, 2007, S.109
- <http://www.suite101.de/content/leonardo-da-vinci--und-der-vogelflug-a71626>
- <http://www.nzzfolio.ch/www/d80bd71b-b264-4db4-afd0-277884b93470/showarticle/c62d976a-6ece-4574-a03f-965519894363.aspx>
- <http://www.angelfire.com/electronic/awakening101/leonardo.html>

Otto Lilienthal

- http://www.museumnet.lilienthal-museum.de/digitalisate/gl_10.pdf
- <http://www.inventors-day.com/de/Otto-Lilienthal.php>
- <http://www.lilienthal-museum.de/olma/biog.htm>
- http://de.wikipedia.org/wiki/Otto_Lilienthal
- <http://www.weltdererfinder.de/flugpionier-otto-lilienthal/>
- <http://wase.urz.uni-magdeburg.de/anitsch/Jumpnfly/sprung.pdf>
- <http://www.lilienthal-museum.de/olma/otto.htm>
- http://149.219.195.71/natur_technik/luftfahrt/fliegen/index.jsp

Leichtbau

- <http://www.westermann.de/pdf/978-3-14-150515-3-5-1.pdf>

Gewölbte Tragflächen

- <http://www.planet-schule.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/s1.html>
- Prof. Dr. Bernd Hill: Bionik - Lernen von der Natur. Duden Paetec Schulbuchverlag, 2006
- Prof. Kranzinger: Aerodynamik-Fliegen-Flugzeuge

Widerstandsreduktion

- <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/news/296123.html>
- http://bionik.fbsm.hs-bremen.de/elearning_aerodynamik/inh/alb.html
- <http://der-rick.biz/share/Projektseite/inh/kon.html>

Rückstromklappen

- http://bionik.fbsm.hs-bremen.de/elearning_aerodynamik/inh/moe.html
- <http://www.bionik.tu-berlin.de/user/giani/klappen/evo.html>
- http://www.dlr.de/at/PortalData/2/Resources/dokumente/at/promotion_meyer.pdf
- http://www.cfd.tu-berlin.de/~schatz/PUBLICATIONS/aachen_2003.pdf
- http://www.cfd.tu-berlin.de/Lehre/thesis/abgeschlossen/tnacke_auf.htm
- http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2003/542/pdf/schatz_markus.pdf
- <http://www.mbsroegner.bizland.com/FLUWIB.pdf>

Vorflügel

- http://bionik.fbsm.hs-bremen.de/elearning_aerodynamik/aero.html
- <http://modell-aviator.de/wissen/vorflugel-genial-aber-keine-groese-sache/>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Vorfl%C3%BCgel>
- <http://www.aerodesign.de/aero/slats.htm>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Alula>
- <http://www.rug.nl/fwn/onderzoek/programmas/esrig/oe/organisatie/personalpages/videler>
- <http://www.rug.nl/biologie/onderzoek/onderzoekGroepen/oe/organisatie/personalpages/videler>

Vorderkantenwirbel

- http://bionik.fbsm.hs-bremen.de/elearning_aerodynamik/aero.html
- <http://people.eku.edu/ritchisong/554notes2.html>
- <http://adg.stanford.edu/aa241/highlift/sstclmax.html> *über Google Übersetzer*

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Strakes>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Deltafl%C3%BCgel>
- http://www.aer.mw.tum.de/fileadmin/tumwaer/www/pdf/lehre/Praktikum-aeroflugzeug/CB_Pres_V5.pdf

Spindelförmiger Rumpf

- <http://www.bionikvitrine.de/mediapool/99/996537/data/PDFs/Pinguindesign/Pinguindesign.pdf>
- <http://www.geo.de/GEOlino/technik/58976.html>
- http://www.planet-wissen.de/natur_technik/
- Werner Nachtigall: Bionik-Was ist das? Was kann das? Was soll das? Hörbuch supposé Aufnahme 2006

Ribelfolie

- http://download.mmag.hrz.tu-darmstadt.de/media/bitz/einfuehrung_in_die_bionik_ws_0304_abschnitt5.pdf
- http://www.focus.de/digital/computer/chip-exklusiv/tid-10233/bionik-von-haifischhaut-inspiriertes-hightech_aid_306681.html
- <http://www.innovations-report.de/html/berichte/materialwissenschaften/bericht-75413.html>
- <http://www.scinexx.de/dossier-detail-61-12.html>
- <http://www.uni-saarland.de/fak8/bi13wn/projekte/umsetzung/fischhaut.html>
- http://www.planet-wissen.de/natur_technik/
- Werner Nachtigall: Bionik-Was ist das? Was kann das? Was soll das? Hörbuch supposé Aufnahme 2006

Libelle

- http://www.planet-wissen.de/natur_technik/tierisches/tierische_flieger/flug_insekten.jsp
- <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,514467-2,00.html>

- http://www.planet-wissen.de/natur_technik/
- http://149.219.195.71/natur_technik/luftfahrt/hubschrauber/index.jsp
- http://149.219.195.71/natur_technik/luftfahrt/fliegen/index.jsp

Umweltliche Aspekte der Bionik

- Kurt G. Blüchel: Bionik - Wie wir die geheimen Baupläne der Natur nutzen können. C. Bertelsmann Verlag, 2005
- Prof. Dr. Bernd Hill: Bionik - Lernen von der Natur. Duden Paetec Schulbuchverlag, 2006
- Verband Deutscher Biologen: Wohin die Reise geht... . Wiley Verlag, 2002
- Jahrbuch Ökologie 2008. Verlag C.H.Beck, 2007

Ausblick in die Zukunft

- <http://www.bionikforschung.at/baubionik/>
- <http://reise.germanblogs.de/archive/2007/01/25/1cyvvgx9fj7k5.htm>
- <http://www.manager-magazin.de/magazin/artikel/0,2828,240974-4,00.html>
- Werner Nachtigall: Bionik-Was ist das? Was kann das? Was soll das? Hörbuch supposé Aufnahme 2006

Festo: Bionic Learning Network

- http://www.festo.com/cms/de_corp/9617.htm
- <http://www.evologics.de/>
- <http://www.youtube.com/user/FestoHQ>