

Manuskript / Themen / Stichworte

Thema: **Biologie und Technik**

Schlüsselworte: Auf politischer Ebene: nachhaltige, wirtschaftlich leistungsfähige, sozial gerechte und ökologisch verträgliche Entwicklung von Technik und Technologie wird gefordert.

In den Jahrmlionen der Evolution werden Lebewesen teilweise bis an den Rand des physikalisch Möglichen optimiert

Natur als Vorbild für: struktur- und gestaltbildenden Verfahren

Vorbild für: innovative und integrative Technik

Ziel: Produkte effizient, ressourcenschonend und leistungsfähig

Thema: **Biologie und Segeln**

Schlüsselworte: fluidischer Systeme / biologische / künstliche / (fliegende, schwimmende, gleitende, tauchende)

fluidische Biosysteme: Vögel, Säugetiere, Flugsaurier

Ursache von Effizienz: Häufigkeit ihres Auftretens.

Hitec-Produkt Vogel: Evolution hat viel Entwicklungsarbeit investiert

Die energetischen Kosten für das Fliegen sind hoch

in der Fluidmechanik wirken die dynamischen Kräfte

Trickkiste der physikalischen Effekte und Wirkmechanismen

Thema: **Ähnlichkeitsbetrachtungen in der Fluidmechanik.**

Schlüsselworte: Ähnlichkeit der Probleme, Aufgaben und Anforderungen führt auf gleiche physikalische Phänomene

Wichtige Kennzahlen

Widerstandsbeiwert C_w

Reynold-Zahl R

Froude-Zahl F_n

Thema: **Tongiaki**

Schlüsselworte: In Europa: Vor dem Wind segeln / Ausnahmen Pfahlewer

In Polynesien: am Wind

Navigation und Naturerfahrung /

vollendeten Segelkunst / ausgereifter Schiffbau

Hochentwickelte Segelboote / Rumpf und Rigg

Migration von Wissen über Technik und deren Handhabung

Thema: **Galeeren**

Schlüsselworte: Trireme um 600 v.Chr. / Rammdorn / Wulstbug / Tümmeler und Delfine

Thema: **Kajaks der Alaskaeskimos**

Schlüsselworte: Inuit / Küstennähe /

Formwiderstand / Bugkonstruktion nach dem Vorbild der Seeotter

Wellenwiderstand / flexibler Rumpf / Skelett / Fachwerk /

Bewegung ist (Zwangs-) Antwort auf Beaufschlagung

harmonische Ganzkörperbewegung / Totwasser / Entschleunigung

Biologie und Segeln

techn. S-Kö.: Mitgeschleppte Wassermasse bis 0.7 (1.0) Displacement
 abbremesen der Masse von $v = v(\text{Schiff})$ auf $v = v(\text{ruhend})$
 negativ beschleunigen = Entschleunigen

Thema: **Widerstandsarten**

Schlüsselworte: Form-, Oberflächen-, induzierter Widerstand

Thema: **Formwiderstand / Volltaucher**

Schlüsselworte: Pinguin / starrer Körper / cw-Wert / Messungen von R. Bannasch
 Story: Wasserbau-Versuchsanstalt
 Pinguine im Kraftflug: Wirbelringe

Thema: **Wellenwiderstand / Schiffe sind Halbtaucher**

Schlüsselworte: Satz: Länge läuft / Froude-Zahl / Kanalfahrt
 Oberflächenwellen / Superposition / ggf. Auslöschungen
 Nichtsymmetrischer Abgang von Wellensystemen
 Katamaranrumpf (S-Schlag)
 Satz: Die Welle bleibt im Schiff / Gestaltung der Rumpfform

Thema: **Der Rumpf der Pavane**

Schlüsselworte: Gleiter liegen im Trend
 Pavane = Experimentier-Plattform: Verdränger
 Einige (Teil-) Konzepte nach dem Vorbild der belebten Natur
 Schwert mit Wirbelspule / Ruder mit Gefiedertaschen / BoESe /
 und Rumpf (Skelett-Konstruktion) / siehe UDK-Kajak
 S-Schlag / negativer Decksprung (Halbtaucher-Delfin)
 Modelle: 10er Jolle von Brix / Pavane / (L = const & Displ. = const).
 Modelle: Bootsbaus Schule, Brake (Weser)
 Konstruktion und Pläne: Fassmer-Werft, Bremerhafen
 Schleppversuche im offenen Kanal (Brix =100%) (Pavane = 87%)

Thema: **Widerstandsarten**

Schlüsselworte: Form-, Oberflächen-, induzierter Widerstand

Thema: **Delfine**

Schlüsselworte: Oberflächenwiderstand /
 Autodynamisches System /
 schwingungsfähiges Oberflächensystem
 Kramer Modellbildung: Feder-Dämpfer- Masse
 künstliche Delfinhaut

Thema: **Haie**

Schlüsselworte: Oberflächenwiderstand /
 Bechert (Berlin) Modellbildung: Feder-Dämpfer- Masse
 Experimente mit Babyöl und großen (Schwingungs-) Schuppen
 Vereinfachen bis Folien
 Physik Hai-Schuppen: Q-Anteile / Wirbelzöpfe / stromabwärts
 Einsatz beim Americas Cup 1987 (Stars&Stripes) und Sieg

Biologie und Segeln

Verbot von Haifolien in allen Regattaklassen
Dimensionenbetrachtung / Reynold / Einsatz: Airbus

Thema: **Forellen**
Schlüsselworte: Oberflächenwiderstand /
Biosystem: Fischschleim/ ständige Produktion / Masseverbrauch
Künstlicher Schleim (Handelsname: PolyOx)
Experimente an der TU Berlin
Einsatz bei Löschwasser

Thema: **Widerstandsarten**
Schlüsselworte: Form-, Oberflächen-, induzierter Widerstand

Thema: **Fliegen I** Lilienthal
Schlüsselworte: Segeln als zweidimensionales Fliegen
Lilienthal / Gleitflug der Störche
Erste Optimierungsstrategie mit Flügelkarussell
Auftriebskräfte / Überdruck / Unterdruck
No free lunch: der auftriebbedingte (induzierte) Widerstand
(künstliches) Flugsystem: 30% -50% des ges. Widerstands
Kastenflügel / Unterliek eines Segels

Thema: **Fliegen II biologische Flieger**
Schlüsselworte: Strategien der Widerstandreduzierung
Seevogel / Landsegler
Albatros: schlanker Dreieckflügel
Milan: Auffingerung

Thema: **Wirbelspule I**
Schlüsselworte: aufgefingertes Vogelflügel
Wirbelkeime / partielle Wirbelfäden
(Zwei) gleichsinnige Wirbel rotieren um gemeinsames Zentrum
Wirbelfäden bilden eine mantelförmige Wirbelspule
Das Gesetz von Biot und Savart (Konzentration der Feldlinien)
Analogie: Feldlinien / Stromlinien
(Konzentration der Stromlinien)
biologischer Jetantrieb (Leistungsbilanz: $P \sim v^2$)

Thema: **Wirbelspule II**
Schlüsselworte: Gaffelrigg der HEX 3
Wirbelspuleneffekt funktioniert in Fluid allgemein
unabhängig von den Medien

Thema: **Gefieder**
Schlüsselworte: Gefieder ist weit mehr als nur eine farbenprächtige Verpackung
Federn sind mikrostrukturiert / Selbstreinigungseffekte
speichert Luftmasse / Barriere gegen Wärmeaustausch
Tragfläche bildet Gefieder einen Universalflügel

Biologie und Segeln

Kraftflug, Gleiten und Bodeneffekt-Segeln

Gefieder neigt dazu, sich im Fluge elektrostatisch aufzuladen

Eine einzelne Feder ist gasdurchlässig

Der Massendurchfluss in einem Gefieder ist variant

Morphologie: funktioniert nach dem Prinzip Klettverschlusses

zerzaust sich ihr Gefieder, genügt eine rasche kämmende Bewegung (putzen) um den Auftriebsapparat zu reformieren.

Thema:

Gefiedertaschen

Schlüsselworte:

OK: Tragflügel in einem Winkel von etwa 5° Grad angeströmt

Unterdruckgebiet ist extrem anfällig gegenüber Störungen

Stalleffekt / plötzlichen Strömungsabriss / ca. 20° Anstellwinkel

Achterliek der Segeltragfläche: schädliche Umströmung.

Fluidbewegung entgegen der Hauptströmungsrichtung

Strömung breitet sich an (techn.) Tragflächen rasant aus

Zusammenbruch des Unterdruckgebietes auf Segeloberseite.

Flugzeug: Überschuss an Auftrieb der „intakten“ Flügelseite

Fähigkeit von Gefieder: den Strömungsabriss unterbinden.

Aufstellen des Deckgefieders: „Landeklappen“???

unabhängig von Landemanövern

Indikatorfunktion des Gefieders

Vogelflügel zu der gefürchteten Rückströmung

im Stallzustand steilen sich die Federn auf.

Das rückströmende Fluid kriecht quasi unter das Gefieder

Der Rückfluss kommt lokal zum Stillstand

die Grenzschicht quillt nicht auf / Profil leistet kontinuierlich Auftrieb

Bereich bis 30° bis 40° Anstellwinkel

Gefiederklappen nicht ohne weiteres realisierbar

Thema:

Gefiederfolien

Schlüsselworte:

Fluide im Allgemeinen / reynold'sche Ähnlichkeit /

„Ausheilen einer Strömung / Begrenzung der Rückströmung“

Verminderung des Auftriebseinbruchs bei Stallströmung

Das Ruderblatt gehört zum Lateralplan / wie Schwert einer Jolle

induzierte Widerstand

Trainer lassen die Kids mit abmontierter Ruderanlage üben

Das gelegte Ruder:

produziert bei geringen Anstellwinkeln enormen Widerstand

ein „hart“ gelegtes Ruder quirlt das Kielwasser förmlich auf.

Energieeinträge in die Strömung kolossal

„Flügel Ruderblatt“ im Stallzustand.

Erkennbar: Die Wirbelbewegung im Nachlauf der Strömung

Machbarkeitsstudie: künstliches Gefieder =

Gefiederfolien für das Ruderblatt einer Jolle

Thema:

Schlusswort: Biologie im Yachtdesign

Schlüsselworte:

Strategie der belebten Natur

Innovative Produkte / verträgliche, effiziente Technik /

Biologie und Segeln

Methoden: Biologie in der Produktentwicklung

Biologie und Technik an Berliner Hochschulen:

TU Berlin: Fachgebiet Bionik und Evolutionstechnik

TU Berlin: Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik

TFH Berlin: Bionik Engineering Design

UDK Berlin: Bionik & Design / Planungs- und Prozesswissenschaften

Manuskript / (Auszüge)

Thema: Biologie und Technik

Schlüsselworte: Auf politischer Ebene: nachhaltige, wirtschaftlich leistungsfähige, sozial gerechte und ökologisch verträgliche Entwicklung von Technik und Technologie wird gefordert.

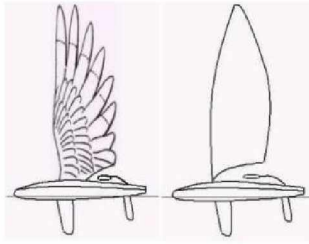
in den Jahrmillionen der Evolution werden Lebewesen teilweise bis an den Rand des physikalisch Möglichen optimiert

Natur als Vorbild: struktur- und gestaltbildenden Verfahren

Vorbild für: innovative und integrative Technik

Ziel: Produkte effizient, ressourcenschonend und leistungsfähig

Biologie und Technik. Der Entwicklung technischer Produkte und Verfahren verdanken wir Fortschritt und Zivilisation. Doch der Preis ist hoch. Auf vielen Gebieten hat sich in den vergangenen zwei, drei Jahrhunderten der Lebensstandard erhöht aber gleichzeitig die Weltbevölkerung verzehnfacht, ein Triumph der Technologien der Verbesserung der Gesundheit. Man erkennt heute, dass der Planet auf die Entwicklung von heißer Technologie, der Kohlenwasserstoffoxidation bei hohen Temperaturen nicht gewachsen ist. Saurer Regen, Entwaldung, Ozonloch, giftiger Müll. Technik belastet natürliche Lebensräume, bedroht die Vielfalt der Arten und verbraucht Ressourcen unwiederbringlich. Als Ausweg wird auf politischer Ebene eine nachhaltige, das heißt wirtschaftlich leistungsfähige, sozial gerechte und ökologisch verträgliche Entwicklung von Technik und Technologie gefordert. Beobachten wir die belebte Natur, erkennen wir, dass Lebewesen in den Jahrmillionen der Evolution teilweise bis an den Rand des physikalisch Möglichen optimiert wurden. Es liegt daher nahe, die Natur selbst und ihre struktur- und gestaltbildenden Verfahren als Vorbild für eine innovative und integrative Technik zu nehmen mit dem Ziel, Produkte und Verfahrensprozesse ökologisch verträglich und ergänzend zu formulieren. Einzelbeispiele zeigen, dass Produkte nach dem Vorbild der belebten Natur effizient, ressourcenschonend und leistungsfähig sein können.



Biologie und Segeln

Thema: **Biologie und Segeln**

Schlüsselworte: Seit über 5000 Jahren wird gesegelt
das Schiff als die größte technische Herausforderung
Schiffe sind kompliziert in Funktion und Herstellung
Der Unterschied zwischen guten und schlechten Konstruktionen war
eine Frage von Leben und Tod
gerade heute kann die belebte Natur Vorbild für Innovationen im Yacht
Design sein.

Biologie und Segeln. Seit über 5000 Jahren wird gesegelt. Für viele Jahrhunderte, bis hinein in das achtzehnte Jahrhundert, galt das Schiff als die größte technische Herausforderung der Menschen. Anders als Gebäude beispielsweise, waren Schiffe kompliziert in Funktion und Herstellung. Der Unterschied zwischen guten und schlechten Konstruktionen war eine Frage von Leben und Tod. Schiffe standen für die Grenze zwischen dem Menschen mit seinen Mobilitätsansprüchen und den Naturgewalten, denen es zu trotzen galt. In allen Kulturen wurden Seefahrzeuge entworfen und die frühen Konstrukteure schöpften ihren Ideenvorrat aus Erfahrungen, die sie in der Natur machten. Auch und gerade heute kann die belebte Natur Vorbild für Innovationen im Yacht Design sein.

Biosystemanalyse schafft den Stoff, aus dem Bionik Lösungen generiert. Die Erfahrung zeigt, dass gerade das Wechselwirken der biologischen Systeme mit ihrer Umwelt die signifikanten Effekte hervorbringt, die den Bioniker interessieren und die er zur Quelle seiner Konzepte, vielleicht seiner Visionen macht. Biologische Effekte existieren nicht losgelöst von ihrem räumlich-zeitlichen Kontext, sie bilden sich aus in den Evolutions- und Adaptionsszenarien, in denen Lebewesen als „Systemgrenze zwischen einer äußeren Welt und ihrem eigenen inneren Milieu“ agieren.

In meinen Betrachtungen zu biologischen Systemen als Vorbild für innovative Technik und in besonderem Maße bei der Beschreibung fluidischer Systeme taucht eine Art Wesen (Klasse von Biosystemen) und biologische Gestaltungselemente (in der Technik würden wir vielleicht „Bauteile oder Bauweisen“ sagen) besonders häufig auf: Vögel und Gefieder. In Vögel hat die biologische Evolution enorm viel Entwicklungsarbeit investiert, sie sind hochoptimiert. Oft ist die Ursache von Effizienz und Leistungsfähigkeit bei und biologischen aber auch bei künstlichen Systemen die Häufigkeit ihres Auftretens. Das gilt innerhalb einer Generation, also relativ und horizontal (Individualentwicklungen), es gilt aber auch absolut und vertikal über weite Optimierungszeiträume (Evolution) hinweg. In der Zeit, während der ein gewichtsgleiches Säugetier erwachsen wird, hat das System Vogel schon 4 oder 5 Generationenfolgen hinter sich. Rein statistisch ist dies ein guter Grund, sich dem biologischen Hitec-Produkt Vogel besonders intensiv zu widmen. Es gibt noch ein weiteres Motiv, fluidische (fliegende, schwimmende, gleitende, tauchende) Biosysteme, Vögel,

Säugetiere, ja nicht zuletzt sogar Flugsaurier, zu untersuchen: Die energetischen Kosten für das Fliegen sind hoch. Hier in der Fluidmechanik wirken die dynamischen Kräfte. Da, wo es auf optimale Wirkungsgrade ankommt, hat die biologische Evolution tief in die Trickkiste der physikalischen Effekte und Wirkmechanismen gegriffen.

Adaption, die Anpassung an Umweltbedingungen, hängt maßgeblich von der Schärfe der Überlebenskriterien ab. Die evolutive Selektion setzt bei der Frage nach dem sogenannten „Reproduktionserfolg“ an. Die Kriterien für Selektion sollte man sich dabei genauestens ansehen. Wenn beispielsweise ein Aerodynamiker nach biologischen Vorbildern für leistungsfähige Tragflächen sucht, sollte er nicht den prachtvoll gefiederten Paradiesvogel, dem quasi die Früchte in den Schnabel wachsen, in den Mittelpunkt seiner Betrachtungen stellen, sondern seine Suche unter den „Extremisten“ unter den Landseglern oder Seevögeln beginnen. Die Strömungsmechanik der Lebewesen hält einen riesigen Vorrat an Optimallösungen für den Bioniker bereit, sind hier doch die natürlichen Systeme oftmals bis an das physikalisch Mögliche optimiert.

Es reicht allerdings nicht aus, ein (noch so leistungsfähiges) Biosystem exakt zu untersuchen und gegebenenfalls den seiner Effizienz zugrundeliegenden physikalischen Effekt aufzuspüren. Wesen – und im übrigen auch Artefakte – funktionieren nur in ihrem zeitlichen-räumlichen und organisatorischen „Wechselwirkungs-Umfeld“.

Thema: **Ähnlichkeitsbetrachtungen in der Fluidmechanik**

Schlüsselworte: Ähnlichkeit der Probleme, Aufgaben und Anforderungen führt auf gleiche physikalische Phänomene

Wichtige Kennzahlen

Widerstandsbeiwert C_a , Reynold-Zahl R , Froude-Zahl F_n

Im Zentrum der Betrachtungen der Übertragung von Phänomenen der belebten Natur auf das Segeln steht die Tatsache der „Ähnlichkeit“ der auftretenden Probleme. Ein Segler findet sich von den gleichen Medien umgeben wie fliegende und schwimmende Tiere und Pflanzen, er teilt die gleiche Sorge um Reibungswiderstände, Gewichtsoptimierung und Funktionalität der Technik und der Techniken die mit dem (seinem) Segeln im Zusammenhang stehen. Für den Gestalter von „Segeltechnik“ bekommt dieser Aspekt der „Ähnlichkeit“ eine besondere Bedeutung. Ähnlichkeit der Probleme, Ähnlichkeit der Aufgaben und Anforderungen an ein zu entwickelndes technisches System mit dem beobachteten biologischen System (Wesen) führt nämlich auf die gleiche Physik, das (exakt) gleiche physikalische Phänomen. Deshalb möchte meinen Ausführungen einen Hinweis auf die „Ähnlichkeitsbetrachtungen in der Fluidmechanik“ voranstellen.

Reynold-Zahl und Widerstandsbeiwert. In der Strömungs- und Fluidmechanik herrscht extremer Leichbau vor, hier werden Widerstände auf Minimum reduziert und Mechanismen der Vortrieb- und Auftrieberzeugung arbeiten im energetischen Grenzbereich. Es ist daher sehr erfolgversprechend, gerade bei den Phänomenen der Strömungsmechanik nach Vorbildern aus der belebten Natur für Artefakte zu recherchieren.

Viele künstliche Strömungsobjekte, wie etwa Flugzeuge oder Schiffe, unterscheiden sich geometrisch um Größenordnungen von potentiellen biologischen Übertragungssystemen. Ein Luftschiff nach dem Vorbild der Stubenfliege erscheint zunächst einmal genauso absurd, wie die Frage, was Hammerhaie mit Jumbojets gemein haben könnten.

Aus der Sicht der Strömungsmechanik geht man von einem abstrakten Fluid aus. Die Physik behandelt flüssige und gasförmige Phase mit den gleichen Lösungsansätzen. In der Bionik

nutzt man diesen Umstand und arbeitet mit sogenannten Ähnlichkeitsbeziehungen für ein abstraktes Fluid. Von zentraler Bedeutung in diesem Zusammenhang ist die Reynolds-Zahl. Für den Gesamtwiderstand eines Körpers in einem sich bewegenden Fluid gilt folgende Beziehung: $D = C_D \rho / 2 v^2 A$

Diese Gleichung besagt, dass der Widerstand D sowohl proportional zum Staudruck $q = \rho / 2 v^2$ der Strömung sowie der Fläche A des umströmten Körpers (Stirnfläche bei Widerstandskörpern, Grundfläche bei Auftriebskörpern) als auch proportional zu dem Gesamtwiderstandsbeiwert C_D ist.

Gesamtwiderstand eines Körpers
in einem Fluid (total drag)

$$D = C_D \rho / 2 v^2 A$$

mit $q = \rho / 2 v^2$

$$D = C_D q A$$

D	Widerstand
q	Staudruck
v	Geschwindigkeit
A	Fläche ... des umströmten Körpers. Stirnfläche bei Widerstandskörpern, Grundfläche bei Auftriebskörpern

© Dipl.-Ing. Mi. Dienst/TH Berlin 2003

Gleichung von Sommerfeld
(zu Ehren Reynolds)

$$\frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}} = \frac{V L}{\nu} [-]$$

V [m/s]	Anströmgeschwindigkeit
L [m]	charakteristische Länge
ν [m ² /s]	kinematische Zähigkeit

GB_1 Grundlagen der Bionik

INSTITUT für BIONIK & PRODUKTDESIGN
Technische Fachhochschule Berlin, University of Applied Sciences

C_D wiederum ist abhängig von der Körperform und dem Strömungsbild. Man könnte vermuten, dass beispielsweise die Strömung um einen runden Stab stets gleich verläuft, und somit der Widerstandsbeiwert C_D des Stabes einen in etwa konstanten Wert aufweist. Dies ist jedoch keineswegs der Fall.

Ende des 19. Jahrhunderts fand Osborne Reynolds bei der Untersuchung des Übergangs von der laminaren zur turbulenten Strömungsform, dass die kritische Geschwindigkeit, bei der eine zunächst laminare Strömung in den turbulenten Zustand umzuschlagen beginnt, vom Verhältnis zwischen den beteiligten Trägheits- und Reibungskräften abhängt.

Dazu muss man noch folgendes wissen:

I. Trägheitskräfte können definiert werden als Widerstand des strömenden Mediums (Luft, Wasser) gegenüber einer Bewegungsänderung. Die Strömungsteilchen müssen dem umströmten Körper ausweichen und auf seiner Rückseite wieder zusammenfließen.

II. Reibungskräfte sind die Folge tangential zur Körperoberfläche wirkender und der Bewegung entgegengerichteter Schubspannungen aufgrund der Zähigkeit der Strömung. Man kann beweisen, dass in mathematischer Form das Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften dimensionsfrei ausgedrückt werden kann.

Reynoldszahl für Luft und Wasser

Kinematische Zähigkeit der Luft bei $T = 15 [^{\circ}C]$

$$\nu_{\text{Luft}} = 1.46 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\text{Reynoldszahl } R_{\text{Luft}} = \frac{V L}{\nu_{\text{Luft}}} = \frac{V L}{1.46 \cdot 10^{-5}} = 68500 \frac{V L}{\nu_{\text{Luft}}}$$

Kinematische Zähigkeit des Wassers

$$\nu_{\text{Wasser}} = 1.14 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\text{Reynoldszahl } R_{\text{Wasser}} = \frac{V L}{\nu_{\text{Wasser}}} = \frac{V L}{1.14 \cdot 10^{-6}} = 877200 \frac{V L}{\nu_{\text{Wasser}}}$$

© Dipl.-Ing. Mi. Dienst/TH Berlin 2003

GB_1 Grundlagen der Bionik

INSTITUT für BIONIK & PRODUKTDESIGN
Technische Fachhochschule Berlin, University of Applied Sciences

Nicht Reynolds selbst, sondern der Physiker Arnold Sommerfeld, der sich mit Problemen der Quantenmechanik befasste, gab 1908 dieser wichtigen Kennzahl zu Ehren Reynolds ihren Namen.

Was die Reynolds-Zahl so wichtig macht, das ist ihre ganz entscheidende Bedeutung für das Problem der dynamischen Ähnlichkeit oder des Maßstabeffektes, ein Problem von enormer praktischer Bedeutung für den Vergleich der Strömungsbilder und der damit verbundenen Kräfte, die geometrisch ähnliche Körper unterschiedlicher Größe bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten entwickeln. Strömungen sind geometrisch ähnlich, wenn ihre Reynolds-Zahlen gleich sind. Bei ähnlicher Strömung um zwei Körper unterschiedlicher Größe, zum Beispiel zwei Tragflügel oder Bootsrümpfe, ist dann auch der Verlauf der Stromlinien geometrisch ähnlich. Die entsprechenden Druckverteilungen sind mithin ebenfalls ähnlich und folglich sind auch die Kraftbeiwerte gleich. Verschiedene Kombinationen aus Körpergröße, Geschwindigkeit und Dichte der strömenden Flüssigkeit ergeben stets die gleichen Beiwerte, vorausgesetzt, die Reynolds-Zahl ist konstant. Eine kleinere Körperabmessung lässt sich dabei zum Beispiel durch eine größere Anströmgeschwindigkeit ausgleichen. Wird der Durchmesser eines Stabes um die Hälfte verkleinert, müsste die Anströmgeschwindigkeit verdoppelt werden, damit in beiden Fällen der gleiche Widerstandsbeiwert C_o angewendet werden kann.

Da die kinematische Zähigkeit von Wasser etwa achtmal kleiner ist als die der Luft, muss die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers auch achtmal kleiner sein als die der Luft, damit das von zwei gleichen Tragflügeln - der eine im Wasser, der andere in der Luft - erzeugte Strömungsbild ähnlich ist.

Froude-Zahl.

Der Begriff des Wellenwiderstands bezieht sich auf das komplexe Wellensystem, das der bewegte Rumpf selbst erzeugt. Gegenstand der folgenden Betrachtungen ist nicht der "Widerstand als Folge von Wellen" wenn ein Schiff im Seegang segelt.

Intro. Diese Beobachtung haben wir irgendwie alle schon einmal gemacht: Ein kurzes, schweres Boot das mit zunehmender Geschwindigkeit geschleppt wird, erreicht irgendwann einen Geschwindigkeitsbereich, in welchem es größere Wellen bildet und gleichzeitig sein Widerstand stark ansteigt. Wenn ein längerer Rumpf mit derselben Geschwindigkeit geschleppt wird, wird sein Widerstand geringer sein, und er wird kleinere Wellen bilden. Der Unterschied ist eine Folge des unterschiedlichen Wellenwiderstandes von Rümpfen verschiedener Länge.

Rumpfgeschwindigkeit. Bewegen sich Strömungskörper als Halbttaucher durch Wasser, so stößt die erreichbare Geschwindigkeit an eine Grenze, deren Überwindung unmöglich erscheint: Auch wenn wir den Energieeintrag erhöhen (Motorleistung, Segelfläche, Kursänderung) das Schiff klebt förmlich an seiner Heckwelle. Schlanke Strömungskörper schwimmen immer nur in als Verdränger. Segelboote mit geringem Gewicht und günstiger Formgebung, wie leichte Motorboote, leichte Segeljollen und alle Surfbretter, segeln in einem von drei Betriebszuständen Verdrängerfahrt, "Aufschieben" (Angleiten) und Gleiten.

<p>Rumpfgeschwindigkeit</p> $V_{\text{Rumpf}} [\text{m/s}] = 4.72 (L[\text{m}])^{1/2}$
--

Verdrängerfahrt. Ein aufschwimmender Strömungskörper in Ruhe trägt sein Gewicht; dabei verdrängt er das diesem Gewicht entsprechende Wasser. Wenn ein Segelboot sich bewegt, muss es jedes mal, wenn es eine Bootslänge zurücklegt, zuerst die seines eigenen Gewichtes entsprechende Menge Wasser weit genug zur Seite drängen, damit der Rumpf "hindurchpasst". Anschließend muss der Rumpf das Wasser ungefähr in die ursprüngliche Lage zurückkehren lassen. Wenn sich das Boot sehr langsam bewegt, fließt das Wasser so behutsam um den Rumpf, dass die Bildung von Wellen vernachlässigt werden kann. Bei Geschwindigkeiten von zwei Knoten und mehr werden alle Jollen und kleinen Yachtrümpfe ein Wellensystem ausbilden, das aus den beidseitig vom Bug weglauenden Bugwellen, den dicht dahinter liegenden und parallel laufenden Wellen des Achterschiffsystems und der zwischen letzteren liegenden Heckwelle besteht. Schlanke Strömungskörper verursachen nur unbedeutende Störungen - je fülliger die Rümpfe, desto größer werden die Wellen. Beim Fahren im Verdrängungszustand nimmt der Widerstand ungefähr mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu.

Das Wellensystem um einen bewegten Strömungskörper. Die Bugwelle wird durch die Keilwirkung des Bugs verursacht. Er drückt das Wasser zur Seite und nach vorn. Die damit verbundene Druckerhöhung presst das Wasser auf jeder Seite zu der üblichen Bugwelle hoch. Von hier aus fließt das Wasser "bergab" auf jeder Seite vom Bug weg und formt das Bugwellensystem, welches sich, mit kleinen querlaufenden Wellen darin, relativ zu dem sich bewegenden Rumpf ständig nach außen und hinten bewegt.

Unter der Oberfläche und weiter achtern wird das im Weg liegende Wasser gezwungen, dahin zu fließen, wo Platz ist, wenn sich der Hauptteil des Rumpfes nach vorn bewegt - nämlich nach hinten zum Heck, wo der Rumpf durch seine Vorwärtsbewegung einen ständigen Wassermangel schafft. Mit der Beschleunigung des Wassers nach hinten fällt sein Druck ab, wodurch der Wasserspiegel an der Seite des Bootes sinkt. Wenn das Wasser sich der Zone mit Wassermangel nähert, wird es abgebremst. Dadurch steigt sein Druck und hebt die Wasseroberfläche wieder an. Dieses hochgedrückte Wasser in der Nähe des Spiegels strömt in Form der beiden Heckwellen nach außen und hinten. Sie liegen in der Nähe der Bugwellen und parallel zu ihnen. Dabei bleiben sie stets eine oder zwei Wellenlängen weiter innen und hinter den Bugwellen. [Bath]

Es war der Engländer William Froude, der ab 1868 den Widerstand von Schiffen untersuchte. Er stellte als erster fest, dass zumindest drei Widerstandsanteile vorhanden sind. Froude unterteilte den Gesamtwiderstand in Reibungswiderstand, Formwiderstand, Luftwiderstand. Zur Untersuchung der Widerstände griff er auf Modelle zurück, mit denen er 1870 Schleppversuche unternahm. Froude bildete aufgrund seiner Forschungen ein Gesetz für den Formwiderstand. Er fand die nach ihm benannte Froude-Zahl FN . manchmal auch Geschwindigkeitsgrad R genannt.

Die Formel besagt: „Die an der Wasseroberfläche unter der Wirkung der Schwere und des statischen Druckes zustande kommenden Wellensysteme von Modellen und Schiffen sind dann vollkommen dynamisch ähnlich, wenn für beide Vorgänge die Froude-Zahl denselben Wert hat.“[Scha]

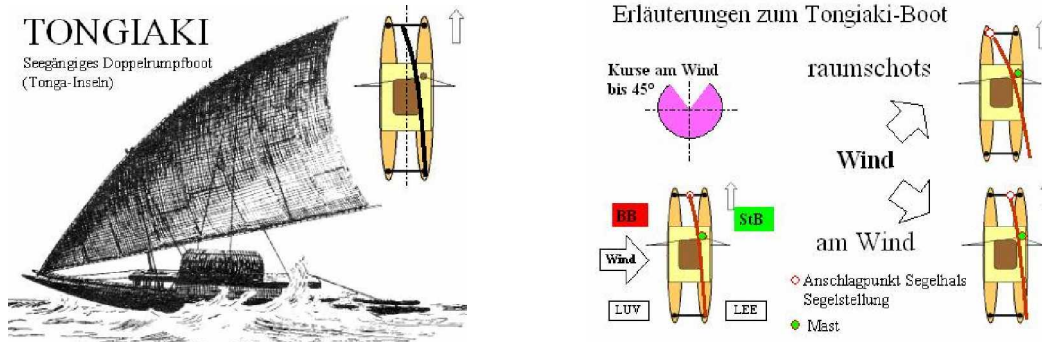
Bei der Übertragung von Phänomenen aus der belebten Natur waren biologische Halbttaucher bislang noch kein Vorbild für künstliche Strömungssysteme, beispielsweise Schiffsrümpfe. Einige Phänomene sind bis heute nicht eingehend untersucht, Beobachtungen nicht wissenschaftlich begründet worden. Das Wellensystem im Flachwasser jagender Delfine z.B. ist derart gering ausgeprägt, dass Beobachter von wellenloser Fahrt sprechen.

$$F_N [-] = V_{\text{Rumpf}} [\text{m/s}] (g [\text{m/s}^2] L [\text{m}])^{-1/2}$$

mit $g = 9.81 [\text{m/s}^2]$

Thema: **Tongiaki**
 Schlüsselworte: Navigation und Naturerfahrung
 vollendeten Segelkunst / ausgereifter Schiffbau
 Hochentwickelte Segelboote / Rumpf und Rigg
 Migration von Wissen über Technik und deren Handhabung

Frühe Konstruktionen. Als die ersten Europäer den Pazifik erreichten, hatten die Polynesier längst alle bewohnbaren Inseln ihres "Siedlungsraumes" von 50 000 000 km², dieses gewaltigen Dreiecks von Hawaii im Norden bis Neuseeland im Südwesten und bis zur Osterinsel im Südosten, erkundet. Sie besaßen keines der Navigationsmittel, mit deren Hilfe die Weißen ihre großen Fahrten begonnen hatten. Ohne Kompass, ohne Sextant und Chronometer segelten die Polynesier auf dem größten Ozean unserer Erde über Tausende von Seemeilen. Sie waren die besten Seefahrer der Geschichte.



Neben den Navigationstechniken sind es natürlich die hochentwickelten Konstruktionen der polynesischen Seefahrzeuge, die uns an dieser Stelle interessieren. Als ein entscheidender Faktor für die ausgeprägte Mobilität der Südseebewohner dürfen die regulären Windsysteme angesehen werden. Diese stehen in unmittelbarer Wechselbeziehungen zu den Segelformen, dem Auslegersystem und der Bauart der in diesen Regionen anzutreffenden der Doppelrumpfsegelboote. Die polynesische Schifffahrt hatte ihre Grundlage in einem ausgereiften Schiffbau und in einer vollendeten Segelkunst. Das Geheimnis dieser Segelkunst aber lag in der dreieckigen und fächerförmig gespreizten Längsschiffbesegelung (Rigg) der polynesischen Fahrzeuge. Entgegen unseren modernen (slupgetakelten) Segeln strebt hier die größte Breite der Segelfläche von Deck weg und ist in eine obere Region verlegt. Bedenkt man, dass die Windgeschwindigkeit mit der Höhe über dem Wasserspiegel rasch wächst, so darf diese Segelform als äußerst effizient gelten. Entscheidend ist dabei, dass man mit dem

Längsschiffsegel hart an den Wind gehen kann, bis zu 45 Grad. Die polynesischen Konstruktionen stehen einer modernen Yacht also keineswegs nach und dieser Umstand erklärt letztlich, wie es den Polynesiern gelang, ihre Seefahrten von West nach Ost zwischen den Wendekreisen durchzuführen.

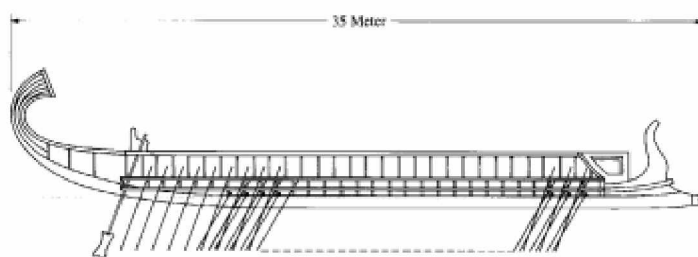
Die Besegelung des TONGIAKI stellt eine urtümliche, aber wohldurchdachte Form dieser Längsschiffsegel dar, wie sie sicherlich während der großen Entdeckerfahrten seit 2000 Jahren in Gebrauch waren. Die Hauptsegelfläche liegt hinter dem Mast, welcher seinerseits auf dem Steuerbordrumpf steht. Man musste das Segel jeweils auf dem Leeboot setzen, damit das als Begleitfläche agierende Luvboot die wichtige Aufgabe eines verstärkten Widerstandes beim Anliegen am Wind erfüllen konnte. Gleichzeitig fungierte das Luvboot als Gegengewicht beim Krängen des Fahrzeuges unter Segeldruck.

Gemäß der Stellung des Mastes auf dem Steuerbordrumpf, wurde wohl nach Möglichkeit mit einem Windeinfall von Backbord gesegelt. Jedoch war man anscheinend auch in der Lage, bei einem Windeinfall über Steuerbord das Boot voll auszusegeln. Die Vorschotleinen führten jeweils durch Löcher in den Vorsteven zum Segelhals. Diese Leinen wurden nach der Einstellung fest belegt, während die Großschot am unteren Segelbaum möglichst mit der Hand geführt wurde, um jede Bewegung im Segel und im Schiff erfühlen zu können.

Bei einem unverhofft auftretenden Sturm sah man sich in der Lage, das Segel zu verkürzen (es konnte bei den Mattensegeln kein Reff eingeschlagen werden), indem dieses mit dem Falltau, das über den oberen Segelbaum zum unteren Segelbaum führt, in eine Bucht (Halbkegel) geholt wurde. Das Segel bot dadurch dem Wind nur noch eine geringe Angriffsfläche, gab auf der anderen Seite aber noch genügend Widerstand, um dem Boot Fahrt zu verleihen.

Die Kursbeständigkeit des Bootes wurde durch die beiden Steuerpaddel gewährleistet. Durch die auf scharfem Kiel gebauten Rümpfe und das zwischen diesen hindurchfließende Wasser, in dem die Paddel voll zur Wirkung kamen, wurde die Kursbeständigkeit beträchtlich erhöht.

Die Reisen der Polynesier führten zum Austausch von Waren und Informationen in einem riesigen Inselreich und zu Verschlagungen tausende Seemeilen darüber hinaus. Die Geschichte der Seefahrt ist zugleich die Geschichte der Ausbreitung von Wissen. Mit den Seefahrern verbreiteten sich das Wissen über Technik, deren Herstellung und Handhabung.



Thema: **Galeeren**

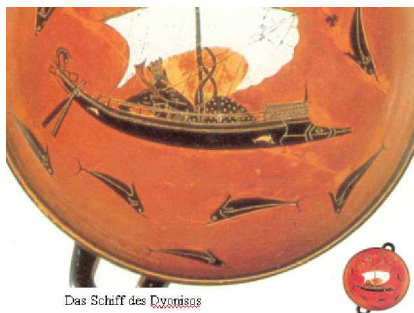
Schlüsselworte: **Trireme um 600 v.Chr. / Rammdorn / Wulstbug / Tümmeler und Delfine**

Der Wulstbug. Eine moderne und offenbar bionische Erfindung ist der Wulstbug, erinnert er doch an den Schädel der Delfine und dient dem Zweck der Widerstandsminderung von Schiffsrümpfen. Moderne Ingenieure sind stolz auf diese Erfindung nach dem Vorbild der

Delfinnase; kein Bionik-Buch kommt heute ohne einen Verweis auf diese geniale Erfindung aus.

Aber erzählen wir die Geschichte doch mal etwas anders. Wir befinden uns im Zeitalter der punischen und anderer Kriege im antiken Mittelmeerraum. Ach ja, die Griechen. Delfine waren verzauberte Jungfrauen und den alten Helenen heilig. Sirenen sangen schräge Lieder und waren heimtückisch und gefährlich. Seefahrer waren Helden und sklavenbetriebene Galeeren geniale Konstruktionen, aber böse. Das kam daher, dass der Rammhorn am Bug der Galeeren eine grausame Waffe darstellte, geschaffen, andere Schiffe zu zerstören und den Feind zu zerschmettern. Und dann die antiken Laster. Zum Beispiel Dionysos, Gott des Weines und vielbesungener Frauenheld, ließ sich offenbar gerne auf antiken Amphoren und anderem Geschirr abbilden. So war das also damals im Land der Helenen.

Falsch. Die Arbeitsplätze auf einer Galeere waren gut bezahlt und sehr begehrt. Die Galeerenruderer genossen hohes gesellschaftliches Ansehen. Also nichts für Sklaven. Aber aus der Sicht des Bionikers ist Folgendes noch interessanter: Betrachten wir die Traubenschale aus einer Zeit um etwa 600 v. Chr. Etwas genauer. Das Boot des Dionysos ist keine Galeere und kein Kriegsschiff, sondern ein Segelboot zum Gütertransport. Der Gute sitzt auf einem Berg von Weintrauben und offenbar seinen Spaß. Das Schiff hatte dennoch einen „Rammhorn“. Das ist seltsam. Niemand baut sich etwas an sein Schiff, was er gar nicht braucht. Achten Sie nun bitte auf die Delfine, die das Schiff umspielen. Die Ähnlichkeit der Delfinnasen mit der Rumpfform des Segelbootes des Dionysos ist kein Zufall. Der antike Künstler hatte offenbar die Absicht, genau diese Verknüpfung darzustellen. Könnte es sein, dass eine Bootsform die einen Wulst im Vorschiff ausbildet einfach nur sehr effizient war? Wahrscheinlich handelt es sich beim Schiff des Dionysos um eine recht schnelle Fahrzeug, mit dem man verderbliche Waren rasch über See transportieren konnte. Die Wahrscheinlichkeit, dass wir mit unserem bionischen Wulstbug mal gerade um 2600 Jahre zu spät kommen, ist doch recht hoch.



Das Schiff des Dionysos



Thema:

Kajaks der Alaskaeskimos

Schlüsselworte:

Innuit / Küstennähe /

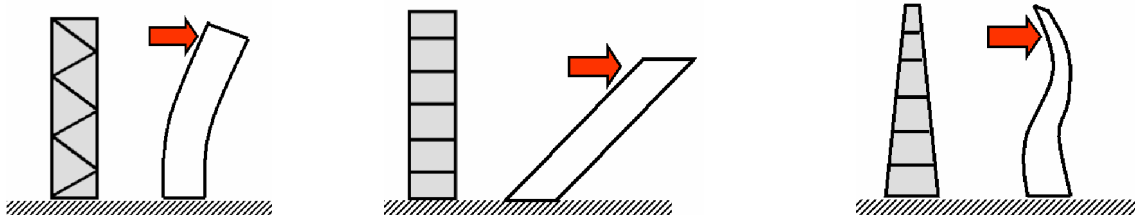
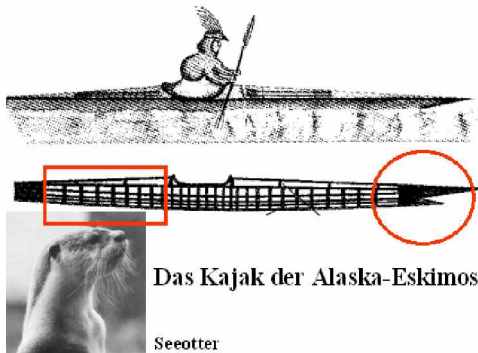
Formwiderstand / Bugkonstruktion nach dem Vorbild der Seotter

Wellenwiderstand / flexibler Rumpf / Skelett / Fachwerk / Antwort auf Beaufschlagung

Totwasser / harmonische Ganzkörperbewegung / Entschleunigung

Die alten Griechen waren dabei keineswegs die Einzigen und vielleicht nicht mal die ersten „Erfinder“ des Wulstbuges. Als man im 18ten Jahrhundert begann, die Bodenschätze Alaskas kommerziell abzuschöpfen, leisteten die Ureinwohner den Eindringlingen nur wenig Widerstand. In einem heute längst vergessenen Völkermord entledigte man sich der

Alaskaeskimos und mit ihnen der zahlreichen, hochentwickelten Strategien, die in diesen unwirtlichen Breiten das Überleben über fünf Jahrtausende gesichert hatten. Schiffsberichterstatter erwähnen die kleinen einsitzigen Kajaks, mit denen die Alaskaeskimos (Innuit) mühelos die großen russischen Segelschiffe, selbst wenn diese unter Vollzeug segelten, überholen konnten. Einerseits waren die Innuit erfahrene und durchtrainierte Jäger, andererseits wiesen die Kajaks einige, auch für den modernen Schiffkonstrukteur bemerkenswerte Details auf. Die Rümpfe der Seekajaks bestanden aus einem dreidimensionalem Fachwerk aus (vornehmlich) Walknochen, das mit Tierhaut überzogen war. Der Bug besaß einen eigenartigen Vorbau, dessen Form nach dem Vorbild der Schnauze des Seeotters gestaltet war, den die Alaskaeskimos als Heiligtum verehrten. Seeotter schwimmen häufig mit geöffneten Maul – man weiß auch heute noch nicht wozu das dient (sicherlich nicht der Nahrungsaufnahme nach dem Schlaraffenland-Prinzip). Seit einigen Jahren versuchen Wissenschaftler in den USA die wenigen übrig gebliebenen Zeichnungen, Gemälde und Aufzeichnungen über die Innuit und ihre Bootskonstruktionen zu ordnen und auszuwerten, um letztlich die Kajaks mit modernen Materialien nachzubauen. Neben der Seeotterschnauze, die einerseits im Sinne eines Wulstbuges eine Wellenfraktion generiert, die sich mit der vom Rumpf erzeugten Bugwelle überlagert und sich vorteilhaft auf den gesamten Wellenwiderstand des Bootes auswirkt, ist für Ingenieure der flexible Kajakrumpf sehr interessant. Man vermutet heute, dass die Idee, die dieser Skelettkonstruktion zu Grunde liegt, die eines die Oberflächenwellen adaptierenden halbtauchenden Strömungskörpers ist.



Dazu muss man folgendes wissen. Querverstrebte Fachwerke verhalten sich unter Belastung ähnlich wie Biegebalken. Je feiner sie vermascht sind, um so deutlicher folgt die verformte Struktur der sogenannten elastischen Linie ($s(x) \sim y^{(4)}$). Prismatische parallelverstrebt Fachwerke sind statisch unterbestimmt – sie klappen zusammen wie ein Kartenhaus. Dies ändert sich auch nicht, wenn man die Außenstäbe, die Gurte, als biegeelastische Balken ausführt. Erst wenn sich in einem parallelverstrebt Fachwerk die Etagen verjüngen oder erweitern und somit Trapezgeometrien entstehen, geschieht etwas Neues. Fährt man die Belastung sukzessive hoch, so weicht die Struktur der äußeren Kraft zunächst aus. Die Verschiebungen der Trapeze führt jedoch dazu, dass sich die vormals parallelen Streben neigen. Das interessante daran: die „Körperbewegung“ des Fachwerkes ist der Richtung der

Beaufschlagung zugewandt. Man kann sich das mit einem kleinen Pappmodell leicht anschaulich machen.

Das dreidimensionale Skelett der Seekajaks der Inuit ist genau solch eine Trapezfachwerkstruktur. Da wir bis zum heutigen Tag nicht im Besitz eines gleichartigen Strömungskörpers sind, können moderne Ingenieure über die Funktionsweise dieser Rumpfe nur Mutmaßungen anstellen. Der hydroflexible Halbtaucher passt sich der Form einer Oberflächenwelle an. Statt an der Dünung Schaden zu erleiden, tritt ihr der Strömungskörper mit einer harmonischen Bewegung entgegen. Auf einen lokalen Energieeintrag antwortet der Rumpf mit einer integralen Bewegung – transportiert die Energie quasi durch den Körper hindurch, statt sie an irgend einer Stelle zu verdissipieren. Das ist sicher ein kluges Konzept.

Flexible Strömungskörper besitzen aber noch andere beachtenswerte Eigenschaften. Von vielen schwimmenden Säugetieren wissen wir, dass sie vornehmlich und ausschließlich mit den Pfoten schwimmen. Die gesamte Energieeinkopplung erfolgt mit den Gliedmaßen. Warum bewegt sich der Körper mit einer Art schlängelnden Form durch das Wasser, als wolle das Tier etwas von sich streifen? Einen ersten Lösungsansatz zu dieser Frage erhalten wir bei der Betrachtung des sogenannten Totwassers hinter und um einen Strömungskörper.

Totwasser. Viele umströmte (künstliche) Körper haben nun die unangenehme Eigenschaft, sich einer gebundenen Fluidmasse nicht entledigen zu können. Das mitgeschleppte Wasservolumen kann das Verdrängervolumen des Strömungskörpers deutlich übersteigen. Es kostet Energie, diese Wassermasse auf Schiffgeschwindigkeit zu beschleunigen, es kostet Energie sie mit Schiffgeschwindigkeit zu transportieren. Es ist unmittelbar einzusehen, dass es klug ist, sich rasch von dieser Wassermasse zu lösen. In einem (strömungs-) körperfesten Koordinatensystem betrachtet gilt es nun, die mit Rumpfgeschwindigkeit transportierte Wassermasse gegenüber einem als ruhend angenommenen See hin abzubremesen. Ich möchte die hierzu notwendige Energie die „Entscheunigungsarbeit“ nennen. Sie muss von einem Strömungskörper aufgebracht werden, um sich vom Totwassers zu trennen. Form- und Oberflächenwiderstand implizieren den Widerstand infolge Totwassertransport. Aus der Sicht der Bionik sollte es lohnend sein, diesen Effekt zu behandeln.

Thema: **Formwiderstand / Volltaucher**

Schlüsselworte: Pinguin / starrer Körper /cw-Wert / Messungen von R. Bannasch

Story: Wasserbau-Versuchsanstalt

Pinguine im Kraftflug: Wirbelringe

Pinguine. Sprechen wir über Rumpfe. Für einen Sportwagen mit einem Widerstands-Beiwert $c_w < 0.3$ legt man ganz schön viele Euros auf die Theke. Schnittigsein kostet. Im Vergleich zu einem Pinguin ist der cw-Wert eines Sportwagens oder gar eines Formel-Eins-Boliden schlicht lächerlich. Als die ersten Messungen an Pinguin-Abgüssen in der Wasserbau-Versuchsanstalt in Berlin gefahren wurden, dachten die Ingenieure dort zuerst an einen Fehler ihrer Messanlage. Einen gemessenen cw-Wert von weniger als 0.025! hatten sie noch nie auf ihrer Skala. Man traut es diesem Wesen mit einem Längen/Breiten-Verhältnis von lediglich 4 rein äußerlich gar nicht zu, erinnert seine Form doch eher an einen schwimmenden Kartoffelsack. Dennoch, Pinguine sind perfekte Schwimmer. Mit dem Energieinhalt eines

Liters Benzin könnte ein Pinguin umgerechnet über 1500 km weit schwimmen. In der gnadenlosen antarktischen Umwelt zählt jedes zehntel Prozent Wirkungsgrad des biologischen Systems. Ein guter Grund, die Pinguinform zu erforschen. Und noch ein Aspekt ist für Bioniker, deren Betrachtungen ja immer auf das Produkt, die technische Lösung zielen, hochinteressant: Anders als Meeressäuger oder Fische setzen Pinguine ihren Körper nicht für die Schuberzeugung ein. Sie bewegen sich – wie Vögel es eben tun – mittels ihrer Flügel fort. Unter Wasser bleibt der Pinguinkörper nahezu starr. Das macht ihn als Vorbild für technische Konstruktionen interessant. Flugzeugrumpfe, Luftschiffkörper und im maritimen Bereich vielleicht zukünftige U-Bootgeometrien. Das Problem des Formwiderstands eines Volltauchers tritt auch im Yachtbau auf, z.B. bei Kielbomben und anderen vollgetauchten Unterwasserteilen. Das Geheimnis des geringen Strömungswiderstandes steckt offenbar in der eigenartigen Rumpfform dieser unterwasserfliegenden Vögel. Der berliner Biologe und Polarbioniker Dr. Bannasch untersuchte in zahllosen Versuchen Strömungsphänomene an und um lebende Pinguine in einer Forschungsstation am Südpol. Offenbar haben akustische Effekte, wie etwa über die Körperform induzierte Druckwellen, einen entscheidenden Einfluss auf die Kontrolle des Widerstandsaufkommens. Obwohl man sich schon lange mit der Pinguinform beschäftigt, weiß man immer noch sehr wenig über die Physik dieser Tiere. Natürlich träumen Bioniker, in Anbetracht der enormen Effizienz dieser Lebewesen, auch von einer Optimierung von Halbtauchern, wie etwa den Bootsrümpfen. Versuchsreihen im Wasserkanal und zunehmend Computersimulationen gehören zum Standard in der frühen Phase der Entwicklung moderner Schiffsrümpfe und der Optimierung von Oberflächendetails. Der Beitrag, den biologische Systeme als Vorbild für widerstandsarme Schiffsrümpfe bisher leisten konnten, ist eher gering und ein Rumpf, etwa nach dem Vorbild des Pinguins bleibt zunächst reines Wunschdenken.

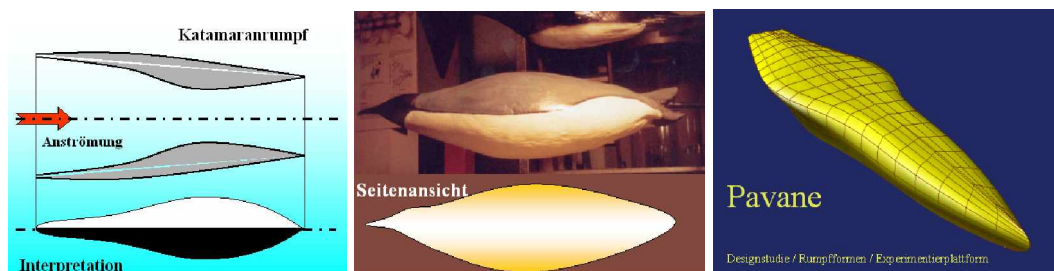
Wie sieht der optimale Rumpf aus? Welchen Effekt haben wir bislang übersehen? Und führt der Weg vielleicht doch über das biologische Vorbild? Im Bootsbau stecken die Weisheiten manchmal in ganz einfachen Bildern. „Länge läuft“ ist solch eine Formel. Diese Regel galt, lange bevor sie durch Wissenschaft und Forschung bestätigt werden konnte, das bezeugen die wunderbaren Langschiffe der Wikinger aufs trefflichste. Das Wissen eilt meistens der physikalischen Begründung voraus. In diesem Sinne erscheint es zulässig, quasi in der vorwissenschaftlichen Phase, eine bislang unbewiesene Regel zu benennen, die schon geraume Zeit in den Köpfen der Bioniker herumgeistert: „Die Welle bleibt im Schiff“. Bleibt noch die Frage zu klären, welches Design – gerne auch nach dem Vorbild der Natur – hier eine problemlösende Antwort liefert?

Binnenschiffer kennen sich mit künstlichen Schifffahrtstrassen aus und haben einen guten Riecher für widerstandsarmes Kanalfahren. Nicht nur wegen des Gegenverkehrs liegt die Ideallinie eines langen Schiffes nicht in der Mitte, sondern irgendwo seitlich in einem „günstigen“ Abstand zur Kanalwand. Das verdrängte Wasser wird von dem Schiff zur Bugwelle angehoben. Die durch den Antriebsmotor aufgebrauchte potentielle Energie läuft als Welle nach schräg hinten davon. Das gleiche gilt für das Wellental, das vom Heck ausgeht. Nun haben Wasserwellen die bekannte Eigenschaft, an geraden Wänden positiv reflektiert zu werden und im speziellen Fall des zum Schiff parallelen Kanals, wieder auf die Bordwand zuzulaufen. Während die Bugwelle dem Schiff Energie entzieht, würde eine reflektierte Welle (rein theoretisch) die Energie wieder in das Schiff einkoppeln und den Rumpf mit einer gleich großen Kraft antreiben. Der Wellenwiderstand wäre dann gleich Null. Eine ideale Rumpfform ließe die Bugwelle der Heckwelle bis auf das Vorzeichen gleichen, so dass es bei der Überlagerung der beiden Wellenformationen (Interferenz) zu einer vollständigen Auslöschung käme. Soweit die Theorie. In der Praxis gelingt dieser Energierückgewinn

natürlich nur zu einem geringen Teil, doch selbst wenn der Effekt nur wenigstens auf einer Bordseite genutzt wird, ist er für den Skipper spürbar.

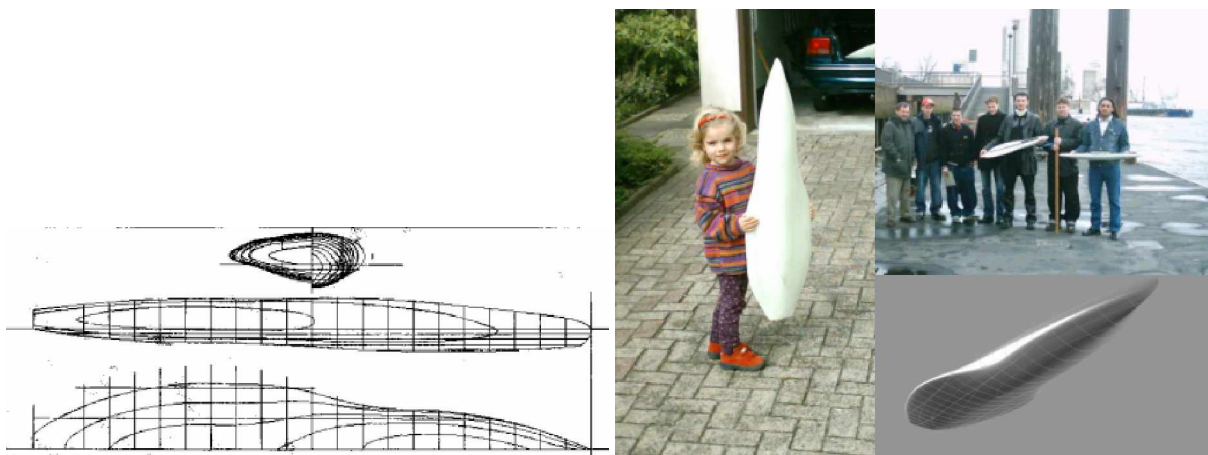
In der Evolutionsentwicklung der Lebewesen kommen Kanalwände nicht vor; eine direkte Analogie scheidet zunächst einmal aus. Aber den Bionikern geht es nicht um eine Kopie der Natur, sondern um die Übertragung physikalischer Effekte und Wirkprinzipien auf Artefakte. Forscher der Universität in Duisburg untersuchten die Bugwellen, die von den beiden Rümpfen eines Katamaran abfließen. Wenn bestimmte Geometrieparameter zusammenpassen, kommt es im Bereich zwischen den Teilrümpfen zu einer „günstigen“ Überlagerung der beiden (inneren) Bugwellen. Stromabwärts verlässt das Wellensystem „neutralisiert“ den inneren Bereich zwischen den Katamaranrümpfen. Entwurfsziel war nun, eine Rumpfform zu finden, die möglichst viel Welle in den inneren Bereich abgibt, und möglichst wenig Welle nach außen, also zum See hin entlässt. Ein solcher Rumpf verhielte sich dann neutral gegenüber seiner Umgebung. Diese Form lässt sich mit Computerprogrammen zur Strömungssimulation CFD finden. Das Ergebnis ist ein optimierter Katamaran, gefunden mit numerischen und mathematischen Methoden, ganz ohne Biologie und Evolution, natürlichem Vorbild, usw.

Und dennoch; als ich das Bildchen sah, schnippelte ich sofort die beiden Bootshälften mit einer Schere aus und legte sie an den äußeren Bordwänden wieder an einander. Da hatte ich sie: die Pinguinform!



Von Delfinen kann man unendlich viel lernen. Die Sonarorientierung und die Unterwasserkommunikation der Meeressäuger ist hochperfektioniert. Was wenig bekannt ist: Delfine jagen auch als Halbtaucher. Ohne nennenswerte Wellenbildung bewegen sie sich mit beindruckender Geschwindigkeit durch Flachwasser. Dabei gleitet die Bugwelle in einem hauchdünnen Film von der Delfinhaut ab. Ein bislang wenig untersuchtes Phänomen; hier herrscht noch Forschungsbedarf. Für Manfred Curry war der zu mindernde Luftwiderstand des Bootkörpers der entscheidende Anlass, die Oberwasserform seiner Jollen stromlinienförmig zu gestalten. Aber die bewundernswerten Rumpfformen der berühmten „Aera“ oder der „Hex“ hatten noch einen weiteren Vorteil; Curry schreibt dazu: „Die Bootform ist weitgehend stromlinisiert und zeigt einen sehr tief gehaltenen Bug. Hierdurch unterschneidet das Boot die Wellen, was den Vorteil mit sich bringt, dass es bei Seegang ruhiger liegt und nicht wie alle anderen leichten Fahrzeuge durch Stampfen an Fahrt verliert.“ Curry war Naturwissenschaftler und beschäftigte sich intensiv mit dem biologischen System. Nicht wenige Details seiner Konstruktionen weisen Merkmale nach dem Vorbild der belebten Natur auf. An den alten Meister hätten wir heute eine Menge Fragen.

Biologie und Segeln



Gefieder. Bionik befasst sich mit der Untersuchung und Übertragung optimaler Lösungsprinzipien der belebten Natur auf technische Systeme. Viele biologische Systeme sind bis an den Rand des physikalisch Möglichen optimiert. Ein gutes Beispiel: Vögel und Gefieder. Vögel sind hervorragende Flieger, können große Geschwindigkeiten erreichen und enorme Strecken zurücklegen. Der schnellste Vogel ist, mit über 170 Stundenkilometern Fluggeschwindigkeit, der Mauersegler. Die Küstenseeschwalbe ist der Vogel, der bei seinen jährlichen Wanderungen am weitesten fliegt: Sie unternimmt alljährlich einen Rundflug zwischen Nordpol und Südpol.

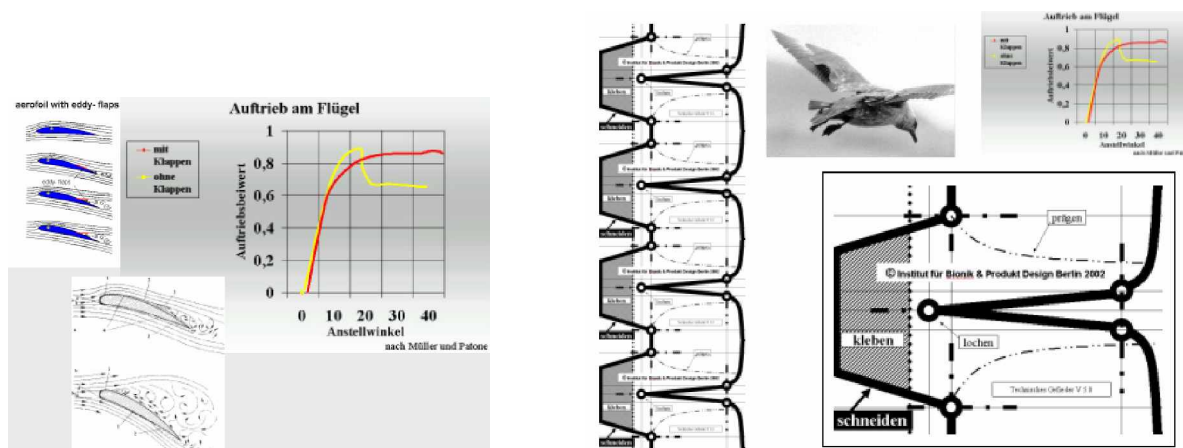
In Vögel hat die biologische Evolution enorm viel Entwicklungsarbeit investiert, sie sind hochoptimiert. Eine Ursache von Effizienz bei künstlichen und biologischen Systemen ist die Häufigkeit des Auftretens. Das gilt von Generation zu Generation, also relativ und zeitlich horizontal, als auch absolut und vertikal über weite Optimierungszeiträume hinweg. In der Zeit, während der ein gewichtsgleiches Säugetier erwachsen wird, hat das System Vogel schon 4 oder 5 Generationenfolgen hinter sich. Rein statistisch ein guter Grund für Bioniker, auf der ständigen Suche nach Innovationen, sich dem biologischen Hightech-Produkt Vogel und seiner einzigartigen Verpackung besonders intensiv zu widmen. Fassen wir Segeln als ebenes, zweidimensionales Fliegen auf, sollte es gelingen, bei der Entschlüsselung der physikalischen Effekte fliegender, biologischer Systeme auf die Lösungsprinzipien zu stoßen, die auf die Probleme passen, deren wir uns beim Yachtdesign gegenübersehen. Die Übertragung raffinierter Wirkmechanismen auf künstliche Systeme erfordert Detailkenntnisse über die Naturvorgänge die sie realisieren, über natürliche Konstruktionen und den äußeren Kontext der Wesen. Dieser stimmt ja mit der Lebenswelt des Seglers überein.

Was ist nun das typische an einem Vogel? Fragen wir nach den Merkmalen. Jedes Fliegende System sollte ein Mindestprofil besonderer Eigenschaften besitzen: hohes Leistungsvermögen, niedriges Gewicht und aerodynamische Form. Für einen sicheren Flug müssen die Sinne, insbesondere das Sehvermögen, scharf sein. Vögel besitzen ausgezeichnete Augen, vielleicht die leistungsfähigsten aller Wirbeltiere. Das Sehzentrum des Gehirns ist ebenso wie die motorischen Zentren gut entwickelt, denn Fliegen als Bewegungsablauf erfordert eine hervorragende Koordination. Der gesamte Körperbau eines Vogels ist an die fliegende Lebensweise angepasst. Sein Knochensystem ist ein Lehrstück in Leichtbau. Waben-, und räumliche Wölbstrukturen sind die „Konstruktionsmerkmale“ dieser Tragwerke,

die jedes System, das natürliche und das künstliche fest und zugleich auch leicht machen. An der Kunst der räumlichen Konstruktion waren die Ingenieure von je her besonders interessiert, aber erst mit der Verfügbarkeit komplexer Berechnungsverfahren, wie beispielsweise der Finite Elemente Methode FEM gelingt es allmählich, das Geheimnis natürlicher Beul- und Wölbstrukturen zu entschlüsseln. Und dennoch, das Leistungsgewicht biologischer Flieger bleibt eine Herausforderung moderner Ingenieurskunst. Ein Fregattvogel zum Beispiel, hat eine Flügelspannweite von mehr als zwei Metern, sein Skelett wiegt aber lediglich etwa 115 g. Eine weitere Anpassung, die das Gewicht reduziert, ist das Fehlen einiger Organe. Die heutigen Vögel sind im Zuge der evolutiven Optimierung zahnlos und ohne muskulösen Kieferapparat ausgestattet. Der Vogelschnabel ist eine Anpassung, die das Gewicht des Kopfes erheblich verringert. Fliegen erfordert einen hohen Energieaufwand und einen intensiven, aktiven Stoffwechsel. Betrachtet man den Energieverbrauch beim Fliegen pro Zeiteinheit, dann zeigt sich, dass fliegende Tiere in der gleichen Zeit mehr Energie verbrauchen als rennende oder schwimmende Tiere. Vögel halten mittels ihrer eigenen Stoffwechselwärme eine warme, konstante Körpertemperatur aufrecht.

Gefieder birgt eine Vielzahl unterschiedlichster Geheimnisse. Federn sind mikrostrukturiert und sie sind hydrophob. Das sind gute Voraussetzungen für Selbstreinigungseffekte, wie wir sie von zahlreichen Pflanzen kennen. Das Gefieder speichert Luftmasse, wirkt also als Barriere gegen Wärmeaustausch und ermöglicht dem Vogel die vom Stoffwechsel erzeugte Wärme zu behalten. Als Tragfläche bildet Gefieder einen Universalflügel aus, mit dem extrem unterschiedliche Manöver geflogen werden können: Kraftflug, Gleiten und Bodeneffekt-Segeln! Wie manche Kunststoffgewebe, neigt Gefieder dazu, sich im Fluge elektrostatisch aufzuladen. Wozu das dient, wissen wir noch nicht! Genauso wenig weiß man darüber, welchen Nutzen die Gasdurchlässigkeit von Federn birgt. Eine einzelne Feder ist gasdurchlässig. Werden viele dieser Elemente dachziegelartig angeordnet, tritt eine neue Qualität auf. Der Widerstand gegen Massendurchfluss in einem Gefieder ist variant, vielleicht ist er regelbar. Vogelfedern sind genial. In romantischen Worten sprechen wir gerne über das Federkleid, aber Gefieder ist weit mehr als nur eine farbenprächtige Verpackung. Gefieder (jedes) funktioniert nach dem Prinzip des Klettverschlusses. Der wurde ja in der Natur mehrfach erfunden. Bei Insekten und vor allem bei Pflanzen ist dieses Prinzip bekannt. Hier dient es der Mobilität. Da Pflanzen nicht laufen können, haben sie im Laufe der Evolution raffinierte Transportsysteme entwickelt, sozusagen Mobilität in Fremdvergabe. Klettverschlüsse im Pflanzenreich funktionieren nach einer einfachen Formel: Klette in Verbindung mit Wildschweinfell = Mobilität und Verbreitung der Pflanze. Strukturmechanisch ist das Vogelgefieder, dank des Klettenverfahrens, ein „selbstaushilfendes“ Gefüge. Geraten Vögel miteinander in Konflikt, oder zerzaust sich ihr Gefieder auf andere Weise, genügt eine rasche kämmende Bewegung (putzen) um den Auftriebsapparat zu reformieren. Gefieder ist sowohl extrem leicht als auch äußerst fest und gehört zu den bemerkenswertesten aller Anpassungen von Wirbeltieren. Federn bestehen aus β -Keratin - demselben Protein, das auch die Schuppen der Reptilien bildet. (Dagegen bestehen Haare, Hufe und Nägel aus dem andersartigen α -Keratin.).

Die Geschichte, wie das Gefieder in die Welt kam, ist spannend wie ein Krimi; Sie jetzt zu erzählen, würde diesen Aufsatz sprengen – kommen wir zum Segeln.



Gefiedertaschen. Gefieder bildet, im Gegensatz zum Segeltuch, das im umströmten Zustand eher dem physikalischen Modell einer gewölbten Platte entspricht, räumliche Tragflächenprofile aus. Zukünftige künstliche, flexible Segeltragflächen kommen an dem System Gefieder nicht vorbei. Der Effekt jedoch, der die Aerodynamiker derzeit am meisten interessiert, ist die Fähigkeit von Gefieder, den plötzlichen Strömungsabriss an einer Tragfläche zu unterbinden. In extremen Strömungssituationen des Vogelfluges beobachtete man das Aufstellen des Deckgefieders. Anfangs sprach man von den „Landeklappen“ der Vögel, doch dann beobachtete man diesen seltsamen Effekt auch in großen Höhen und damit unabhängig von Landemanövern. Ein Erklärungsmodell der Wissenschaftler hatte eine Art Indikatorfunktion des Gefieders im Visier: das plötzliche Aufreißen des Deckgefieders soll dem Vogel einen ungünstigen, ja fatalen Strömungszustand signalisieren. Eingehende Untersuchungen von Müller und Patone von der TU in Berlin aber zeigten, dass das Deckgefieder ein passives Sicherheitssystem ausbildet und weniger als Signalfunktion dient. Es verhält sich etwa so: Werden Tragflügel in einem Winkel von etwa 5° Grad angeströmt, bilden sie auf der Flügelunterseite ein Überdruckgebiet aus. Was den Tragflügel fliegend macht ist aber das intensive Unterdruckgebiet oberhalb der Auftriebsfläche. Dieses Unterdruckgebiet ist extrem anfällig gegenüber Störungen. In einem kritischen Betriebszustand, der Segler kennt diesen Zustand als Stall, kommt es an der Tragflächenhinterkante, bzw. dem Achterliek der Segeltragfläche zu einer schädlichen Umströmung. Direkt auf der Tragflächenoberseite zeigt sich nun eine lokale Fluidbewegung entgegen der Hauptströmungsrichtung. Diese Fluidbewegung breitet sich an kompakten (technischen) Tragflächen rasant aus und führt im Regelfall zum Zusammenbruch des Unterdruckgebietes auf der Tragflächenoberseite. Die Auftriebsleistung des Flügels fällt schlagartig ab. Diese „aufgequollene“ Strömung generiert darüber hinaus einen deutlichen Zuwachs an Strömungswiderstand. Bleiben wir noch einen Moment beim Flugzeug. Da dieser komplexe Effekt selten an beiden Tragflächen gleichzeitig auftritt, führt der Überschuss an Auftrieb der „intakten“ Flügelseite zu einem Rollmoment um die Längsachse, das künstliche Flugsystem sackt trudelnd ab. Nicht so der Vogel, obwohl es offenbar gar nicht so selten ist, dass Vögel in oder nahe an den Stall-Zustand geraten. Vielleicht ist das ja ein Trick, der zu hohen Flugleistungen führt. Wie etwa beim Segeln: Willi Kuhweide („Mein Großsegel sah von hinten wie ein Strich aus,...“) fuhr sein Segel auf Amwindkursen immer extrem dicht. Er versteht die hohe Kunst, das notwendige $\frac{1}{4}$ Grad unterhalb des Stallbereichs zu segeln. Wenn es nun bei einem Vogelflügel zu der gefürchteten Rückströmung kommt, bricht das Unterdruckgebiet auf der Tragflächenoberseite nicht ein, denn im Stallzustand steilen sich die Federn auf. Das rückströmende Fluid kriecht quasi unter das Gefieder. Der Rückfluss kommt,

lokal wie es auftritt, auch lokal zum Stillstand, die Grenzschicht quillt nicht auf. Stattdessen heilt die Strömung aus und das Profil leistet kontinuierlichen Auftrieb; die Gefahr ist gebannt. Müller und Patone untersuchten das biologische Vorbild und entwarfen Rückströmklappen für technische Tragflächen. An Modellflügeln konnten sie den Effekt des Ausheilens der Strömung nachstellen, und lieferten für das Auftriebsverhalten künstlicher, „gefiederter“ Tragflächen eindrucksvolle Messergebnisse bis in den Bereich 30° bis 40° Anstellwinkel der Tragfläche. Das Diagramm zeigt schematisch Verlauf des Auftriebsbeiwertes über den Anstellwinkel aufgetragen für eine profilierte Tragfläche mit Rückström Taschen aus Segeltuch. Während der Auftrieb bei einem Tragflügel ohne künstlichem Gefieder bei etwa 20° Anstellwinkel zusammenbricht, legt die Auftriebsfläche nach dem Vorbild der Natur sogar noch zu! Die Luftfahrtindustrie arbeitet an künstlichem Deckgefieder und auch der Riggkonstrukteur kann von biologischen Tragflächen enorm viel lernen. Die Erfahrung, dass Rückströmklappen an flexiblen Segeltragflächen nicht ohne weiteres realisierbar sind, machten wir vor sechs, sieben Jahren bei Surf-Riggs. Frustriert gingen wir zurück zum „Lernen“ an den Windkanal.

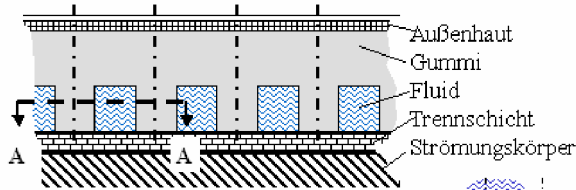
Künstliche Gefieder / Ruderblatt einer Jolle. Sprechen wir über Fluide im Allgemeinen. Luft besitzt sogenannte reynold'sche Ähnlichkeit mit Wasser, wenn Strömungsgeschwindigkeiten und geometrische Parameter stimmig sind. Das Phänomen „Ausheilen einer Strömung durch Begrenzung der Rückströmung“ wird dann zu einer universalen Strategie der Verminderung oder Vermeidung des Auftriebseinbruchs bei einer Stallströmung in beliebigen Fluiden. In einer ersten Machbarkeitsstudie haben wir nun begonnen, künstliches Gefieder in Gestalt von Gefiederfolien für das Ruderblatt einer Jolle zu entwerfen.

Das Motiv ist klar: Das Ruderblatt gehört zum Lateralplan. Fährt eine Jolle auf geradem Kurs, verzeichnen wir Form- und Oberflächenwiderstand; hinzu kommt der sogenannte induzierte Widerstand, der auftriebsbedingt ist und auftritt, weil – ebenso wie das Schwert einer Jolle – das Ruderblatt ein Flügel ist, der im Medium Wasser arbeitet. Der Widerstand des neutralen Ruders ist nicht unerheblich und wie bereits an dieser Stelle beschrieben wurde, bietet die belebte Natur so einiges an „Ideen“ auf, einen Strömungskörper und somit auch eine Ruderanlage bezüglich des Strömungswiderstandes durchzuoptimieren.

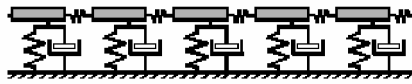
Nehmen wir nun das Ruder in Funktion. Wenn ein Ruderblatt das tut, wozu es am Heck montiert ist, werden die Energieeinträge in die Strömung kolossal. Jeder Regattasegler weiß, dass mit Lenkbewegungen auf jeden Fall zu geizen ist und erfahrene Trainer lassen die Kids mit abmontierter Ruderanlage üben, denn lenken lässt sich ein Boot auch mit dem Rigg und durch Gewichtsverlagerung. Das gelegte Ruder produziert schon bei geringen Anstellwinkeln einen enormen Widerstand, ein „hart“ gelegtes Ruder quirlt das Kielwasser förmlich auf. Halten wir nun dieses Bild einen Moment fest: Die Wirbelbewegung im Nachlauf der Strömung um das Ruderblatt stammt von einer Fluidbewegung entgegen der Fahrriechung des Bootes. Es ist eine Analogie der beschriebenen Strömungsbewegung um die Hinerkante einer Auftriebsfläche, nur handelt es sich hier eben um den „Flügel Ruderblatt“ im Stallzustand.

Wie sich die Dinge doch ähneln: Großer Anstellwinkel - Stallzustand – Rückfluss von Fluid – Aufquellen der Strömung – Anwachsen des Widerstands, ... Soweit das Problem. Kommen wir zur Lösung: technisches Gefieder!

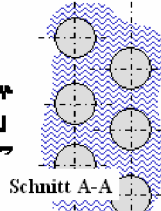
Technische Oberfläche nach dem Vorbild der Delfinhaut



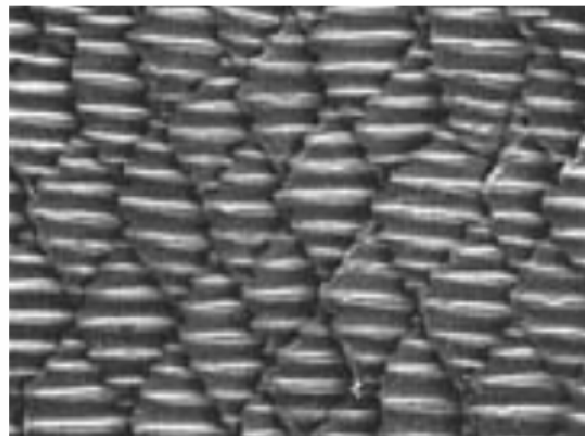
nach O. W. Kramer, Pat. 1938



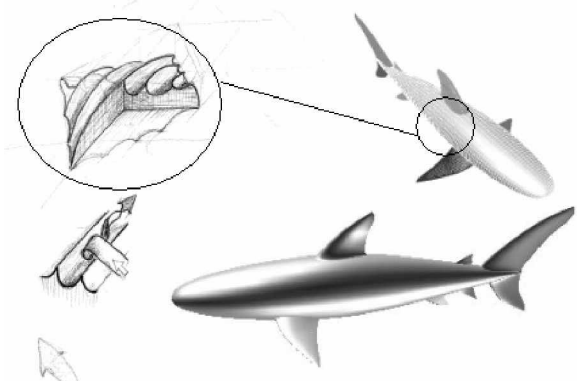
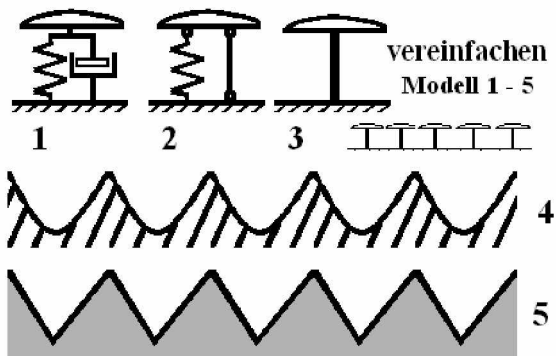
mechanisches Modell



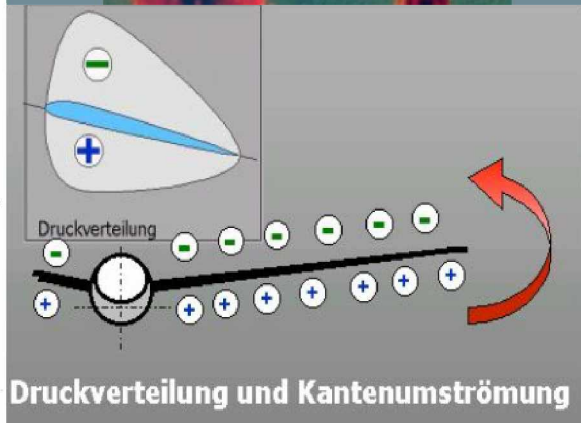
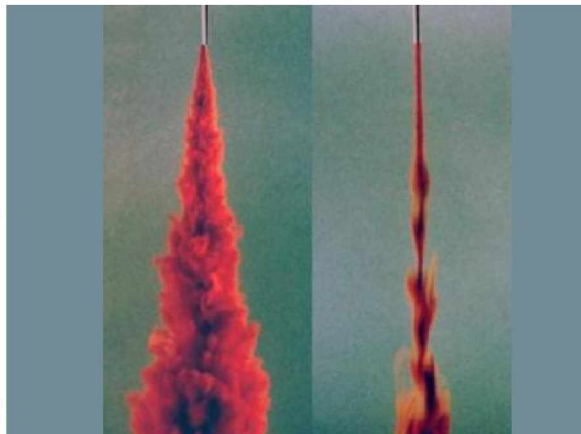
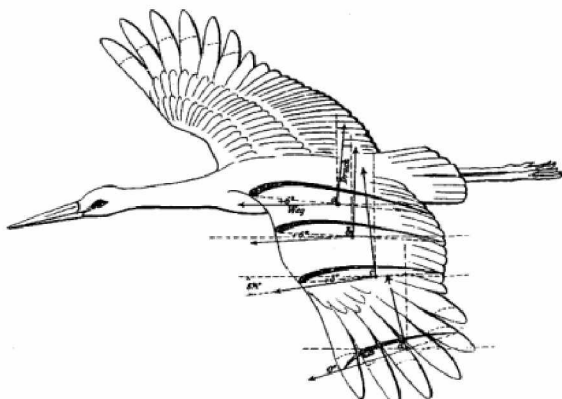
Schnitt A-A



Mechanisches Modell: Haihaut



Wirbelbildung an der Haihaut



Druckverteilung und Kantenumströmung

Biologie und Segeln

