

# **BIONIK ENGINEERING DESIGN**

Dipl.-Ing. Michael Dienst, Berlin.

Die Natur ist multifunktional und hochoptimiert und jedes Lebewesen birgt eine Vielzahl von Geheimnissen. Bionik ist die Wissenschaft von der Übertragung optimaler Problemlösungen der belebten Natur auf Technik. Der hier vorgelegte Aufsatz behandelt den methodischen Ansatz für diesen komplexen Transfer von der Natur zum Produkt, das

## **BIONIK ENGINEERING DESIGN**

Biologie und Yachtdesign ist ein vergleichsweise junges Aktionsfeld der Bionik. Doch der Kurs ist gesteckt, wenn auch der Weg zur ersten Luvtonne mühsam und zehrend sein mag. Meine Ausführungen sollen ein erster Schritt sein, Biologie, Produktoptimierungsmethodik und Segeln zu verbinden.

## Bionik Engineering Design

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.

Bionik beschäftigt sich mit der Übertragung biologischer Problemlösungen in die technische Anwendung. 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 und der Unterschied zwischen guten und schlechten Konstruktionen war eine Frage von Leben und Tod. Schiffe standen für die Systemgrenze zwischen dem Menschen mit seinen Mobilitätsansprüchen und den Naturgewalten, denen es zu trotzen galt. In allen Kulturen wurden Seefahrzeuge entworfen und die die Menschen schöpften aus dem Ideenvorrat der Natur. Auch und gerade heute kann die Natur Vorbild für Innovationen im Yacht Design sein. Dazu bedarf es der Entschlüsselung relevanter biologischer Systeme. Eine besondere Bedeutung kommt der Optimierung existierender und bei den Kunden etablierten Lösungen zu. Eine Produktoptimierungsmethodik nach dem Vorbild der belebten Natur kann hier Beiträge zu zukunftsweisenden Konstruktionen leisten.

Bionik heißt Übertragung von Erkenntnissen der Analyse natürlicher Systeme in technische Produkte. Bionik macht Technik. Und Bionik braucht Wissenschaft: geschaffenes Wissen, um

Technik zu generieren. Interessanterweise ging – historisch gesehen – die Technik der Wissenschaften voraus. Technik wurde von erfinderischen Menschen betrieben, um Werkzeuge zu erstellen, Kleidung zu produzieren, Gefäße zu töpfen, Farben zu mischen, Waffen, Musikinstrumente, Schiffe zu bauen, ohne zu wissen, wie und warum sie funktionieren. In den meisten Fällen geht auch heute noch das KNOW HOW dem KNOW WHY voraus. Artefakte werden erzeugt, weil der Markt sie nachfragt, weil es einen Bedarf gibt. Die Naturwissenschaft könnte eine Vielzahl von Technologien bereitstellen, eine Breite von Technik generieren, die es heute noch nicht gibt, nur weil sie nicht nachgefragt wird. Hier setzt die Bionik an: ungefragt, fragt sie nach!

Bionik stellt eine Brückenfunktion bereit. Sie verbindet die Naturwissenschaften mit der Welt der Artefakte. Naturwissenschaft und Technik haben verschiedene Ursprünge und sie werden wahrscheinlich auch verschiedene Wege gehen. Folgte früher die Wissenschaft auf die Technik, ist moderne Wissenschaft heute ohne Technik nicht vorstellbar. Naturwissenschaftler müssen Politikern, Managern, Wählern erklären, wie Natur funktioniert, damit man Nutzen aus dem Wissen schöpfen kann. Naturwissenschaftler müssen auch erklären, welche Restriktionen in diesem Wissen stecken, und welche Restriktionen aus dem Wissen erwachsen. Diese Transferfunktion ist eine Aufgabe der Bionik. Der wissenschaftliche Dialog im Sinne der Bionik funktioniert aber nur über fundierte Kenntnisse in Chemie, Physik, Mathematik, in Technologie und Technik gepaart mit einem Gespür für Fragestellungen der Geistes- und Sozialwissenschaften

Seitens der Industrie besteht ein Bedarf an methodischen Instrumenten zur Übertragung natürlicher Wirkprinzipien und Bauweisen auf Produkte. Die Aufgabe der **Technischen Biologie** ist die Analyse biologischer Systeme und zielt auf die Beschreibung der Funktionsstrukturen auf der Ebene elementarer Wirkprinzipien und physikalischer, chemischer Effekte. Die Technische Biologie bedient sich experimenteller, rechnerischer und numerischer Analysemethoden. **Bionik** ist die Entschlüsselung von Ergebnissen der biologischen Evolution und ihre innovative Umsetzung in technische Produkte und Verfahren. Der Begriff „bionics“ wurde offiziell zuerst auf einer NASA-Konferenz in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts genannt. Ein Blick in die Technikgeschichte zeigt, dass die Natur dem Menschen von je her Motivation und Vorbild für technische Dinge war.

## **Bionik und Produktoptimierungsmethodik**

Der Übertragung von Verfahren und Methoden nach dem Vorbild der belebten Natur kommt in einer sich ständig wandelnden Produktions- und Fertigungsumgebung ein hoher Bedeutungswert zu. Sich stetig weiterentwickelnde Technologien, flexible und dynamische Organisationsformen, neue Produkte und Märkte fordern von einem modernen Technologiekonzern ständige Konditionierung auf neue Aufgabenstellungen. In diesem Zusammenhang werden Konzepte gefordert, die eine einbeschriebene systemeigene Verträglichkeit besitzen. Die Hoffnung, die Wissenschaft der angewandten natürlichen Verfahren, die Bionik, könnte hier einen wesentlichen Beitrag leisten, stützt sich auf eine Vielzahl erfolgreicher bionischer Lösungsansätze und Lösungen. Vermisst werden in diesem Zusammenhang die Mechanismen, die zu einem bionischen Produkt führen, insbesondere Methoden und Lösungskonzepte. Bionik rangiert auch heute noch als ein Geschäft mit Intuitionen, vagen Visionen und Zufallstreffern. Ich halte diese Ansicht sogar für begründet. In der Tat wäre es nicht gerade eine triviale Aufgabe, den „bionischen Entwicklungsprozess“ auf ein formales Kalkül herunterzubrechen; auf ein rezeptgleiches Handlungsschema etwa. Dies soll hier auch nicht geschehen. Methodische Bionik bleibt zunächst einmal selbst eine Vision. Wo stecken nun die Chancen und Reibungspunkte für Lösungsansätze nach dem Vorbild der belebten Natur in einen fertigenden Betrieb?

Innovationsbedarf in Industriebetrieben und Chancen bionischer Problemlösungen sehen wir bei Produkten, Produktionssystemen, in der Unternehmensorganisation, der Mitarbeiterqualifikation und bei einer auf die besonderen Anforderungen konditionierten Produktentwicklungsmethodik.

**Vorhandene Produkte.** Optimierung der zur Zeit angebotenen Problemlösung. Optimieren von Produkten, die bereits ein gutes Verhältnis von Kosten/Nutzen besitzen. Neue Produkte. Neuüberdenken der vorhandenen Produkte und Problemlösungen. Infragestellen der bisherigen Grenzen der Bedarfswelder. Möglichkeiten überprüfen, die von dem Unternehmen angebotene Palette von Problemlösungen zu erweitern.

Neue Produkte => neue Produktions-Verfahren => neue Fertigungs-Systeme

**Produktionssysteme** Die Optimierung vorhandener Fertigungs- und Produktionssysteme, sowie der Organisation der Arbeitsabläufe kann eine weitere Automatisierung und Rationalisierung zum Zweck haben. Umorganisationen in der Fertigungsstruktur sind notwendig, wenn beispielsweise – unter Beibehaltung der angebotenen Palette von

industriellen Problemlösungen und Produkten - von einer Einzelfertigung zur Serienfertigung entwickelt wird und es das Spannungsfeld:

Automatisierung Ó Flexibilisierung.

zu mildern gilt. Erfolgreich ist in manchen Fällen der Einsatz von Optimierungsalgorithmen nach dem Vorbild der Evolution für die Maschinenbelegungsplanung, der Materialausnutzung und Zuschnittoptimierung und Optimierungstechniken für computergeführte PPS-Szenarien (Produktions-Planungs-Steuerungs-Systeme). Insbesondere in diesem Bereich gilt, dass die zu optimierenden (Computer-) Systeme auch für eine Weiterentwicklung konditioniert, einer Optimierung zugänglich sind.

**Unternehmensorganisation.** Veränderungen in der Planung und Steuerung des Fertigungsablaufs haben Rückwirkungen auf die Struktur des Unternehmens z.B. verkürzte Durchlaufzeiten vom Kundenauftrag bis zur Auslieferung. Dies führt zu veränderten Wechselwirkungen mit anderen Unternehmensbereichen; insbesondere ist mit Rückwirkungen auf die Informationsbasis für das Management zu rechnen. Neue Produkte generieren auch neue Dienstleistungen im „after-sales-service“ des Unternehmens mit ihren weitreichenden Konsequenzen für Logistik, Verteilsysteme und letztendlich dem Materialrücklauf. Die Veränderbarkeit der Unternehmensstrukturen vorausgesetzt, ergeben sich bezüglich der Organisation eines Unternehmens vielfältige Angriffspunkte für die Anwendung von Methoden und Prinzipien nach dem Vorbild der belebten Natur. Evolütives Management, fraktale Organisationsstrukturen, redundantes Informationsmanagement sind nur einige Schlagworte der in jüngster Zeit auf Unternehmensstrukturen einwirkenden Veränderungen.

**Mitarbeiterqualifizierung.** Die betriebliche Aus- und Weiterbildung nimmt in einer sich ständig wandelnden Produktions- und Fertigungsumgebung einen hohen Stellenwert ein. Sich stetig weiterentwickelnde Technologien, flexible und dynamische Organisationsformen, neue Produkte und Märkte fordern von den Mitarbeitern eines modernen Technologiekonzerns ständige Konditionierung auf neue Aufgabenbereiche. In diesem Zusammenhang werden flexible und anpassungsfähige Lernformen gefordert, die selbstständig die spezifischen Bildungsbedürfnisse der sich in Weiterbildung befindlichen Persönlichkeiten (Klienten genannt) erkennen und sein Bildungspotential optimal ausloten, es gegenüber dem bestehenden Bildungsbedarf aktivieren. Die Schlagworte CBT und WBT (Computer Based Training und Web Based Training) markieren eine effiziente und zeitgemäße Form der innerbetrieblichen Aus- und Weiterbildung.

**Produktentwicklungsmethodik** befasst sich mit dem Entwurf, der Entwicklung und Anwendung von Methoden und Strategien der Produkterstellung. Sie umfasst die Methodik aller Fragestellungen mit denen die Informationen erarbeitet werden, die für das Konzept, den Entwurf und die Nutzung eines Produkts notwendig sind. Technischen Biologie, Bionik und Produktentwicklungsmethodik spannen den Rahmen auf, in dem sich das von uns anvisierte Innovationspotential bewegt.

Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung von Werkzeugen, Methoden und der Entwurf einer Strategie der Übertragung von Erkenntnissen der Analyse biologischer Systeme in Produkte. Die Bionik kann Methoden und strategische Handlungsansätze für die Entwicklung funktional kluger, ökologisch verträglicher und ergänzender Technik liefern. Das enorme Potential optimaler Problemlösungen der Natur wird aber nicht erschöpfend für die Entwicklung innovativer Technik genutzt. Der Erfolg der Übertragung von Erkenntnissen der Technischen Biologie in Technik war in der Vergangenheit bezüglich der Systemauswahl und Übertragungsmethodik weitestgehend von der individuellen Kompetenz und den eingesetzten Mitteln einzelner Forschungseinrichtungen und kooperierender Industriepartner abhängig. Erkenntnisse aus der Analyse biologischer Systeme sind grundsätzlich verfügbar, ihre Verwertbarkeit für ingenieurtechnische Anwendungen ist aber oftmals nur unzureichend gegeben. Die Produkterstellung ist ein zeitkritischer Prozess und die unmittelbare Verfügbarkeit eines präzisen, konditionierten Informationsstroms entscheidet über dessen Integration in den industriellen Produkterstellungsprozess. Wohl aus diesem Grund blieb die quantitative Ausbeute an Übertragungen aus der Biologie in die Technik gegenüber dem existierenden Potential gut erforschter, natürlicher Wirkprinzipien und gegenüber den Erwartungen aller mit Bionik Befassten weit zurück.

Anwender fordern daher die Entwicklung einer spezifischen, auf die informationellen Bedürfnisse des Produkterstellungsprozess abgestimmte **Strategie der Bionik** die sowohl technische Innovationen vom biologischen Vorbild zum Produkt antreibt, als auch dem Produktentwickler ein Instrument ist, gezielte, kompetente und damit rasche Anfragen nach Prinziplösungen, Methoden der Gestaltgenerierung und Optimierung an Naturwissenschaftler zu stellen, nach dem Motto:

**„Wie hat die Natur dieses Problem gelöst?“**

Zu Beginn dieses Aufsatzes habe ich dargelegt, dass die belebte Natur zu jeder Zeit der Techniksozialisation der Kulturen Vorbild war für nützliche Dinge. Es ist davon auszugehen,

dass ein Schaffender im Altertum keineswegs weniger intelligent war, als es sein heutiger Kollege, der moderne Ingenieur es ist. Es existierten nicht die Mittel, biologische Prozesse als optimal zu erkennen und es gab keine Technologie, die Erkenntnisse sicher und präzise umzusetzen. Gleichfalls ist es keine Frage allein der technologischen Entwicklung und der Verfügbarkeit leistungsfähiger Materialien ob Bionik betrieben werden kann, oder nicht. Die Frage lautet eher: „Wie kommt ein als optimal erkannter Effekt in das Produkt?“ Von den sicher bemerkenswerten aber gleichfalls exponierten Einzelleistungen der Übertragung biologischer Optimallösungen auf Technik war die Rede. Nun soll die Frage angegangen werden, ob es eine allgemeingültige Lösungsmethode für den Transferprozess

### Biologie è Technik

geben kann. In der Vergangenheit wurde Konstruktionsmethodik für Neukonstruktion, d.h. das „generierende Konstruieren“ entwickelt. Diese Konstruktionsart ist zwar sehr wichtig, macht jedoch höchstens 10% der in der Praxis zu leistenden Konstruktionsarbeit aus. Ein Großteil der Arbeit wird für die Anpassung und Verbesserung vorhandener Produkte eingesetzt und dabei wieder für die Gestaltung in Entwurf und Ausarbeitung, wobei meist Norm-, Wiederhol- und Gleichteile sowie gekaufte Funktionsträger verwendet werden. Für den kreativen Ingenieur und Bioniker wäre die Neukonstruktion sicherlich ein Glücksfall; in meiner Praxis habe ich sie jedoch in Reinform noch nicht erlebt. Das Domizil der praktischen, (der angewandten) Bionik ist die „korrigierende Lösungssuche“, die zu einer Verbesserung der Systemeigenschaften führt. Für dieses tastende, selbst an evolutive Prozesse erinnernde Verfahren, lassen sich methodische Hilfestellungen für den Schaffenden, den Designer oder Ingenieur angeben. Methoden zu Bionik sollen ihn motivieren, Anregungen aus dem großen Vorrat biologischer Lösungsansätze für einen Transfer in künstliche, technische Systeme aufzunehmen. Wie jede Methodik ist auch diese hier vorgestellte Methodik zunächst einmal neutral gegenüber dem Produkt und – das mag erstaunen – unabhängig von Bionik. Wir nennen sie schlicht: **Produkt Optimierungs-Methodik**.

Unter einer Methodik versteht man eine Ansammlung praktikabler Methoden und Verfahren, die angepasst auf das zu lösende Problem, unterschiedlich akzentuiert wird. Grundsätzlich unterscheidet man problemorientierte und produktorientierte Lösungsansätze. Am **Institut für Bionik & Produkt Design** der TFH Berlin arbeiten wir mit sogenannten „problemorientierten Methoden“. Wir sind Dienstleister auf diesem Gebiet und integrieren unsere Lösungsansätze

in die Struktur der im jeweiligen industriellen Bereich vorherrschenden Produkterstellungsprozesse.

Die produktorientierte Betrachtungsweise ist traditionell im englischsprachigen Raum verbreitet, während das problemorientierte Arbeiten in der Produktentwicklung für den deutschsprachigen Raum typisch ist. Auf die historische Entwicklung dieser beiden Methodik-Schulen möchte ich an dieser Stelle nicht weiter eingehen, und verweise statt dessen auf die einschlägige Literatur im Anhang dieses Aufsatzes.

Problemorientiertes Entwickeln von Produkten ist gekennzeichnet von einer Bewegung aus dem abstrakten Modell heraus, hin zu einem konkreten Produkt. Während die produktorientierte Arbeitsweise getragen ist von der konkreten „Idee“ des Produkts. Dieses Herangehen (produktorientiert) kommt der Vorstellung von einem modernen „Produkt-Management“ und der Betrachtungsweise des „Product-life-cycle“ sehr nahe. Interessanter Weise tritt die Frage nach einer neuen leistungsfähigen Produkt-Entwicklungsmethodik zu einem Zeitpunkt auf, da in den Konstruktionsabteilungen der Hitech-Konzerne eine Kompetenzumverteilung stattfindet. Produktorientiertheit war in den Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg das Kennzeichen des „Design-Prozess“. Designer ihrerseits, waren sie doch in den Entwicklungsabteilungen für die „schöne Form“ zuständig, erlebten den Grenzbereich ihres Schaffens spätestens bei der Konfrontation ihres Design-Objekts mit dem Windkanal oder beim hydraulischen Zugversuch. Das letzte und entscheidende Wort hatte der (in aller Regel problemorientiert arbeitende) Ingenieur. Seine Kompetenz in der Durchdringung des physikalischen Geschehens, seine fundierten Berechnungen und die tiefen Einblicke in die firmenspezifische und technologische Machbarkeit der Produkte bedeutete letztlich auch Macht über Sein und Design. Dem Designer oblag – so hatte es den Anschein - die Auswahl der Farben.

Keineswegs subtil, sondern offensiv vorgetragen, vollzog sich auf dem Gebiet der Fabrikautomatisierung in den späten 80er und 90er Jahren ein grundlegender Wandel. Auf Grund der Fortschritte in der Informationsverarbeitung (hardware- und softwaretechnologisch) zeichnete sich bald immer stärker werdender Trend zur Systemintegration ab. CIM hat sich in diesem Prozess inzwischen als Sammelbegriff für die gesamte produktbezogene, das heißt technische und technisch-administrative Informationsverarbeitung durchgesetzt. Computer Integrated Manufacturing bedeutet, dass ein vollständig und durchgängig rechnerunterstützter Informations- und Verarbeitungsfluss der Entwicklungs-, Planungs- und Fertigungsdaten durch die gesamte Organisation auf der Basis



eines gemeinsamen rechnerinternen Produktmodells aufgebaut wird. Der Produktionsprozess bestand nun aus modularen, aber integrierten Teilsystemen, die von dezentralen Rechnern gesteuert werden und über Netzwerke gekoppelt wurden. CIM bedeutete die Vernetzung der Fabrik, und die Konditionierung des gesamten Material- und Informationsflusses in der industriellen Produkterstellung. Gleichzeitig mit dem Verschwinden der Zeichenmaschinen aus den Konstruktionsabteilungen wurde Oberflächengenerierung mit CAD und komplexe Simulationsprogramme wie etwa die FE-Methode (finite element method) zur Berechnung der Bauteilfestigkeit auf Arbeitsplatz-Computern verfügbar. Heute erleben wir eine lückenlose Vernetzung von CAD-Anwendungen mit FEM-Simulationsmodellen und die integrierte Beschreibung strömungstechnischer Phänomene mit CFD, gefolgt von einer prototypengenerierenden Fertigungseinheit, initiiert und organisiert vom Arbeitsplatzrechner aus, mit einer gut zu handhabenden Benutzeroberfläche und weltweit vernetzt.

Es ist absehbar: Dem Designer wachsen in Zukunft – trotz vermeintlicher Unkenntnis der physikalischen und technologischen Details – enorme Kompetenzen zu, kann er doch seinen ersten flüchtigen CAD-Entwurf bereits auf Festigkeit, strömungsmechanische Wirksamkeit und technologische Machbarkeit hin überprüfen. Ich gehe davon aus, dass in absehbarer Zukunft neben CAD, FEM und CFD auch ein Bionik-Modul am Computer-Arbeitsplatz des Produktentwicklers verfügbar sein wird. Die Forschungsbemühungen am Institut für Bionik & Produkt Design fokussieren auf dieses Ziel. Bevor wir ein typisches Bauteil betrachten, lassen Sie mich nun kurz auf die Grundaussagen einer Produktoptimierungsmethodik eingehen.

## Die Frühe Phase im Produktoptimierungsprozess

Das generelle Vorgehen beim Entwickeln und konstruieren gliedert sich in 7 Teilabschnitte (nach VDI 2221)

Problem-	Analyse
	Formulierung
	Synthese
System-	Analyse
	Beurteilung
	Entscheidung

### Methoden der **frühen Phase:**

Präzisieren der Aufgabenstellung  
Erkennen von Funktionen  
Verknüpfung von Funktionen  
Finden „prinzipieller Lösungen“

Ein Vorgehensplan (Strategie) verknüpft diese Schritte in einer geeigneten Weise. Als **frühe Phase** des Produktentwicklungsprozess können die Abschnitte

- 1 Klären und präzisieren der Aufgabenstellung
- 2 Entwickeln von Funktionen und Funktionsstrukturen
- 3 Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

angesehen werden und mit dem Titel „methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien“ näher beschrieben werden. Folgende Fragen stehen nun im Fordergrund: Wie werden „prinzipielle Lösungen von technischen Produkten methodisch vollzogen und dokumentiert? Ausgangspunkt ist die Entwicklungsaufgabe Ergebnis ist die Prinzipielle Lösung

Entwicklungsaufgabe	è	Methoden	è	Prinzipielle Lösung
---------------------	---	----------	---	---------------------

**Die prinzipielle Lösung** legt erste Parameter zur Erfüllung der gestellten Aufgabe fest. Der Abstraktionsgrad ist noch sehr hoch. Es werden vereinfachte Objekte und Strukturen, Geometrien und Topologien festgelegt. Die Betrachtung erfolgt in symbolhafter Form. Der hohe Abstraktionsgrad ist gewollt und hat seine Vorteile. Die zur Diskussion gestellten Lösungen sind noch sehr einfach und überschaubar. Sie sind variierbar im Sinne einer Optimierung. Es wird noch keine klare und detaillierte Gestaltung vorweggenommen. Die Lösungen sind (größtenteils) neutral gegenüber konkreten Produkten. Es existiert schon ein „beschreibendes Koordinatensystem“ um eine Reihe von Folgeschritten zu formulieren, die das Produkt oder Teile des Produktes konkretisieren. Prinzipielle Lösung bedeutet im Designbereich eine erste grundsätzliche Lösung für eine abgegrenzte Entwurfsaufgabe. (Prinzip, lat. Das Erste, Ausgangspunkt, Grundsatz). Es werden lediglich grundlegende Festlegungen getroffen, ohne sie im Detail zu definieren:

- è physikalische, Chemische Wirkungsweise
- è Art und Anordnung fester Körper, Fluide, Felder
- è Algorithmen
- è Datenstrukturen

Lösungsprinzipien können Teilfunktionen des Artefaktes oder die gesamte Funktionsstruktur betreffen. Lösungsprinzipien sollen „neutral“ gegenüber dem anvisierten Produkt sein. Die Bedeutung der Begriffe „prinzipielle Lösung“ und „Funktion“ ist gleitend und in der Praxis nicht fest umrissen. Deshalb hier eine Umschreibung der Begriffe:

**Funktionen** beschreiben das Verhalten von Produkten oder Teilen des Produkts, vorzugsweise im Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen (systemische Sicht). **Prinzipielle Lösungen** beschreiben unscharfe, bzw. grobe aber funktionsbestimmende Vorstellungen zur Realisierung von Produkten.

Der Begriff der „prinzipiellen Lösung“ wird im Designbereich / Entwurf / Konstruktion synonym benutzt mit: Wirkprinzip, Arbeitsprinzip, Technisches Prinzip, Funktionsschema.

Wo wird die prinzipielle Lösung organisatorisch (im Produkterstellungsprozess) angesiedelt? Prinzipielle Lösungen sind oft ein unverzichtbarer Zwischenschritt zwischen Funktion und Entwurf. Prinzipielle Lösungen sind die Grundlage für Analyse von Lösungsideen, Erfüllen von Aufgaben, Verträglichkeit mit anderen Teilaufgaben (Inkonsistenzen), Erkennen von Störeffekten, zum Generierung von Varianten, Beurteilung von Lösungsvarianten und erste Dimensionsüberlegungen. „Prinzipielle Lösungen“ werden dargestellt mittels

- è Zeichnungen
- è Freihandskizzen
- è modifizierte vorhandene Skizzen
- è symbolhafte Skizzen nach Standards, z.B. Schaltpläne.
- è Oberflächengenerierung mit CAD, ® MultiSurf,
- è Simulation, Multimedia, FEM

Zu einem möglichst frühen Zeitpunkt der Produktentwicklung sollte quantitative Beschreibung des Produktmodells geführt werden. è orientierende Berechnung. Beispiele für frühe orientierende Berechnungen sind: FEM, CFD, Input-Output-Analyse, Kinematiken.

Im Allgemeinen gibt die Aufgabenstellung einen Parameterbestand und eine grundsätzliche Auswahl an Berechnungs- und Simulationsmethoden vor. Das Produktmodell „Lösungsprinzip“ kann produktneutral muss aber anforderungs- und aufgabenabhängig sein.

Deshalb ist eine möglichst frühe quantitative Durchdringung des Lösungsprinzips vorteilhaft. Ziel der frühen orientierenden Berechnung ist die Ermittlung von Größenordnungen von Leistungen, Kräften, Temperaturen, Strömen, Geschwindigkeiten, usw.

**SATZ: Das „Lösungsprinzip“ ist ein (das) Produktmodell.**

Idee einer Methodik der Produktentwicklungsprozesse ist die Unterteilung in Teilprozesse und Phasen. Für den Transformationsprozess der Übertragung erfolgreicher Prinzipien der belebten Natur auf technische Systeme im Sinne von Bionik sind zwei Prozesskomplexe von besonderer Bedeutung: Der erste umfasst die „frühe Phase“ des Produktentwicklungs- und

Konstruktionsprozesses. Andererseits sind die nach dem Vorbild der Natur zu führenden Fertigungsprozesse und Technologien von Interesse. Im Themenschwerpunkt Bionik Engineering Design möchte ich mich auf die Entwicklung von Methoden der frühen Phase der Produktentwicklung beschränken. In der VDI-Richtlinie VDI-R 2222 wird der Konstruktionsprozess in 7 Teile untergliedert.

<b>Die „frühe Phase“ der Produktentwicklung</b>	
VDI 2222 / VDI 2221, Pahl, Beitz	
<b>1</b>	<b>Klären der Aufgabe</b>
<b>2</b>	<b>Ermitteln von Funktionen</b>
<b>3</b>	<b>Suche nach Lösungsprinzipien</b>

Im ersten Arbeitsschritt wird die Funktionsstruktur und die Anforderungsliste analysiert. Das Ergebnis dieser Analyse sind Kenntnisse besonders schwieriger Teilfunktionen und kritischer Anforderungen. Gegebenenfalls stellen sich hier Erfahrungsschatz und Kenntnis des Bearbeiters als unzureichend heraus, beispielsweise wenn chemische oder physikalische Effekte eine eingehende Behandlung und Untersuchung verlangen.

**Die „frühe Phase“ der Produktentwicklung ist der Weg bis zur Ermittlung der „prinzipiellen Lösung“.**

Neuartige Produktideen bedeuten in den meisten Fällen auch neue Konstruktionsaufgaben. Nur in seltenen Fällen lassen sich neue Produkte zu einem überwiegenden Teil aus Vorangegangenen formulieren. Beim Design neuer Produkte ist das Finden geeigneter prinzipieller Lösungen **der** entscheidende Schritt des gesamten Problemlösungsprozesses. Das Finden geeigneter prinzipieller Lösungen ist nicht nur entscheidend für den weiteren Verlauf der Produktentwicklung, sondern auch eine extrem sensible Phase. Der Schwerpunkt beim Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung liegt in der Überführung eines Problems in eine lösbare Aufgabe. Bei Designproblemen kommt (immer) der Berücksichtigung der technologischen Realisierbarkeit eine besondere Rolle zu. Hier setzt die Branche, in der der Entwicklungsprozess angesiedelt ist, die entscheidenden Restriktionen. Insbesondere bei Bionik-Design-Problemen sind die unterschiedlichen Gestaltentstehungsmechanismen in der Natur und in der Technik und der Werkstoffe zu berücksichtigen. Die Grundsätzlichkeit der

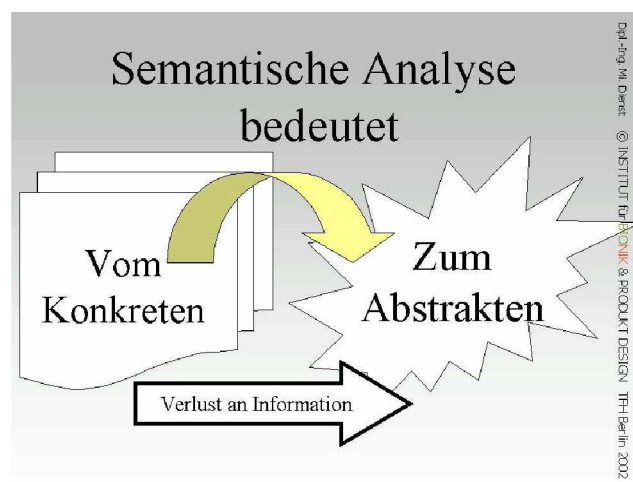
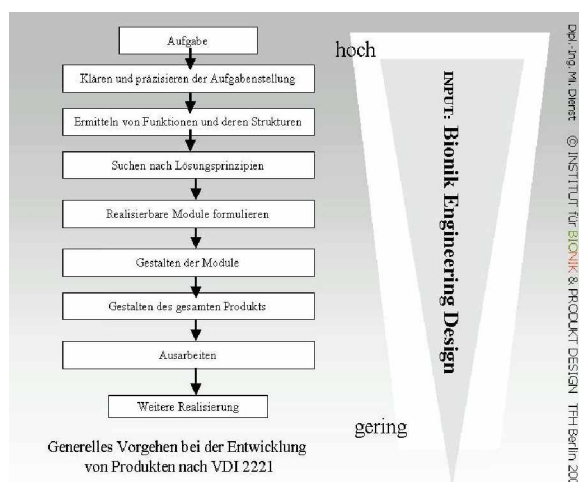
Unterschiede schließt manche noch so wünschenswerte Problemlösungen in vielen Fällen aus. (beispielsweise lassen sich Formen für Umformungsprozesse nach dem Vorbild der Gastrulationsbewegungen entwerfen, aber nicht in Technologie und Werkzeuge umsetzen).

## Problemanalyse

Die Hauptaufgaben des anvisierten Produkts sind auf der „neutralen Ebene“ zu formulieren. Der höchste Grad der Abstraktion ist die „produktneutrale Aufgabenbeschreibung“. Für den klassischen Ingenieur und Konstrukteur ist diese Forderung und die zu ihrer Bewältigung einsetzbaren Mittel gleichermaßen ungewohnt. Die Wurzeln der „semantischen Analyse“ sind eher auf dem Feld der künstlerischen Auseinandersetzung mit Form- und Funktionsfindung zu suchen, also im Produkt Design und der Architektur. Die Auseinandersetzung mit Biologie und Technik, die Transformation der als günstig erkannten Prinzipien und Mechanismen der belebten Natur in Technik fordert vom Bearbeiter eine gewisse Offenheit gegenüber neuer oder ungewohnter Methoden.

Die semantische Analyse von Systemen fördert in einem günstigen Fall zuerst die „integralen Anforderungen und anvisierten Produkteigenschaften“ zu Tage, z.B. bewegen, fixieren, speichern von Stoff, Information und Energie. Zur semantischen Analyse, oder auch semantischen Fokussierung ist es zweckmäßig, das Problem, die gestellte Aufgabe zuerst mit standardisierten Checklisten vorzubereiten (aufzuweichen).

Um die Aufgabenstellung zu präzisieren werden unterschiedliche Medien und unterschiedliche Problem(auf)lösemethoden angewendet. Eine gute Möglichkeit, sich ein Bild oder einen ersten Entwurf einer Anforderungsliste zu machen, sind Produktfragelisten, Checklisten, Suchmatrizen, oder eigene, persönliche Verfahren. Semantische Analysen führen zu einer Abstraktion des Problems und sind mit einem Verlust an Information verbunden.



## Haupt- und Nebenaufgaben

Der Aufgabenstellung kommt eine außerordentliche Bedeutung zu; sie muss sorgfältig durcharbeitet sein. Leider stellt man oftmals eine ganze Reihe von zusätzlichen Anforderungen fest, wenn der Produktentwicklungsprozess schon die ersten Skizzen und Entwürfe liefert.

**Hauptaufgaben.** Alle Anforderungen, die schon zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses bekannt oder zu erkennen sind, sollten festgehalten werden. Die Hauptaufgabe ist die Aufgabe, für das der Artefakt entwickelt und entworfen wird. Hier ist es günstig, einen Titel oder Slogan zu formulieren. Für Design-Slogans können (am besten eigene) Vorlagen verwendet werden. Es existieren auch Listen technischer Verben. Der Design-Slogan soll die Hauptaufgabe des Produkts treffend darstellen und dient im gesamten Problemlösungsprozess als roter (Ariadne-) Faden.

**Anforderungen.** Die Anforderungen an jedes Produkt sind äußerst vielfältig; wir haben es mit dem berühmten „weiten Feld“ zu tun. Niemals sind von Beginn an alle wichtigen Informationen gegenwärtig. Fragelisten oder Assoziationsschemata und semantische Analysen erscheinen uns auf den ersten Blick trivial und naiv, berühren aber die wesentlichen Begebenheiten an und um das anvisierte Produkt. Diese weisen auf die „wesentlichen“ Anforderungen an das Produkt. **Anforderungen** legen Beziehungen des Produktes zu seiner Umgebung und/oder Benutzer fest. Design bedeutet auch immer, dem Benutzer oder Bediener eine Oberfläche anzubieten und den zu entwickelnden Artefakt in Wechselwirkungen mit seiner Umgebung zu versetzen. In bezug auf Bionik ist dies eine essentielle Forderung, weil Wesen mit ihrer Umgebung wechselwirken – und zwar in beide Richtungen. Design handelt immer auf der Systemgrenze zwischen der inneren und der äußeren Umgebung eines Artefakts. Wir fragen nun nach diesen Wechselbeziehungen des Produkts mit seiner Umgebung, um die Koordinaten eines Anforderungsprofils zu ermitteln.

<b>Wechselwirkung &amp; Beziehungen</b>
Beziehungen zu Personen
Beziehungen zu Systemen
Beziehungen Dingen und Stoffen
Zeitliche Beziehungen
Größenordnungen Beziehungen

Es empfiehlt sich eine „offene Liste“, die ergänzt werden kann und soll, anzulegen. Diese Liste kann zu Bildern oder Matritzen ausgestaltet und nach zweckmäßigen Gesichtspunkten geordnet sein.

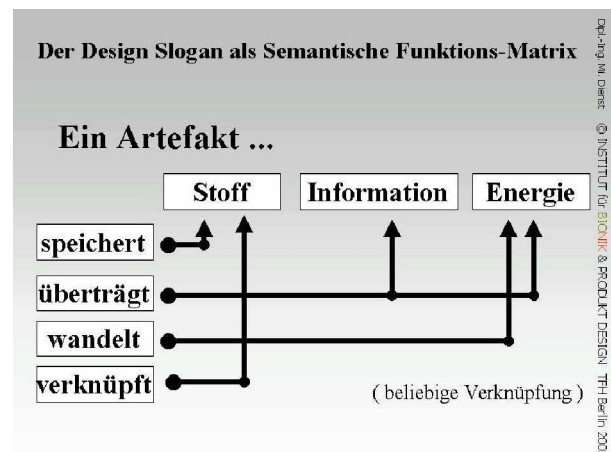
**Anforderungsarten.** Die Anforderungslisten werden zu späteren Zeitpunkten für unterschiedliche Zwecke genutzt, z.B. zum Beurteilen von Lösungsvarianten. Es gibt ein paar Standardregeln, die nützlich sind, um Anforderungslisten auch zum Bewerten zu benutzen (hier nur 2 dargestellt). **Festforderungen...** werden nicht bewertet. Sie sind Ausschlusskriterien: entweder / oder. **Wünsche, Ziele, Mindest- oder Höchstforderungen** sind bewertbar. Sie Stellen Schwellwerte auf, die nicht unter- oder überschritten werden sollen und dürfen.

### Funktionen und Funktionsstrukturen

Das Design neuer Produkte führt über eine Vielzahl potentieller Varianten und damit möglicher Funktionen zu einem System, das möglichst nur wenige, wesentliche Funktionen besitzen sollte. Im nachfolgenden Abschnitt soll also immer eine Reduktion auf das Wesentliche im Vordergrund stehen.

Hilfreich ist, wenn die zu erwartenden physikalischen Effekte als Modelle oder orientierende Berechnungen vorliegen, oder Simulationsverfahren zur Verfügung stehen.

Bei der Formulierung der Hauptanforderungen haben wir den Design-Slogan entworfen.. Dieser Satz bestand aus einem Objekt und einer Satzaussage (Prädikat). Im Grunde genommen ist hier – wenn wir gut waren – schon die Hauptfunktion unseres Produkts enthalten. Wir wollen jetzt die Semantik etwas verfeinern.



Die Funktionen aller künstlichen und biologischen Systeme lassen sich mit Hilfe der drei allgemeinen Größen **Stoff** **Energie** **Information** beschreiben.

**Satz: Ein Artefakt speichert und/oder überträgt und/oder wandelt und/oder verknüpft Stoff und/oder Information und/oder Energie.**

Speichern, übertragen, wandeln und verknüpfen sind Operanden, die **von, an, mit oder durch** ein Produkt (oder ein Wesen) ausgeführt werden. Werden die allgemeinen Operanden an allgemeinen Größen angewendet, dann ergeben sich die allgemeinen Funktionen. Das Aufstellen einer Funktionsstruktur erscheint zunächst als übertrieben und zu abstrakt. Es zeigt sich aber, dass mit diesen formalen Vorgaben Funktionsstrukturen gefunden werden, die für eine ganze Schar von (Haupt-) Aufgaben eine probate Lösung darstellen. Mit Hilfe der Funktionsstrukturen kann eine systematische Entwicklung von Funktionselementen erfolgen. Diese sind dann für gleiche Hauptaufgaben gültig.

Entscheidend für die Realisierung von Funktionen und Funktionsstrukturen sind die wirksamen physikalischen und chemischen Effekte. Die Bezeichnung „Effekt“ ist ein Sammelbegriff für das Vorhandensein physikalischer, chemischer oder biologischer Gesetzmäßigkeit, einer Erscheinung oder eines physikalischen Ablaufs einer Naturerscheinung ( VDI-R 2222). Um neben der physikalischen, chemischen Erscheinung auch physikalische Regeln, und Gesetze, wie etwa das Hebelgesetz, den Keileffekt, den Wirbelspulen-Effekt beschreiben zu können, wird auf eine (saubere) Definition verzichtet. Ein Effekt leistet die Realisierung einer vorgegebenen Funktion. Es kann keine Funktion realisiert werden, für die in der Natur kein Effekt existiert. Die Literatur bietet Tabellenwerke und Sammlungen von physikalischen Effekten. Auch Gleichungen und Ergebnisse von Messungen repräsentieren physikalische Effekte.

**Satz: Effekte sind an stoffliche Ausbildungen gebunden: die Effekträger.**

Die Zuordnung von Effekten zu Funktionen und Funktionsstrukturen führt – über den Effekträger – zu den prinzipiellen Lösungen.  $\Rightarrow$  prinzipielle Phase im Produkt-Entwicklungsprozess. Ziel ist es, für bestimmte Sollfunktionen einen passenden Effekt (Effektkette, Effektnetz) zu finden.

Sollfunktion  $\Rightarrow$  Effekt

Mit dem Effekt ist eine handhabbare physikalische Beschreibung (z.B. Formel) verbunden.

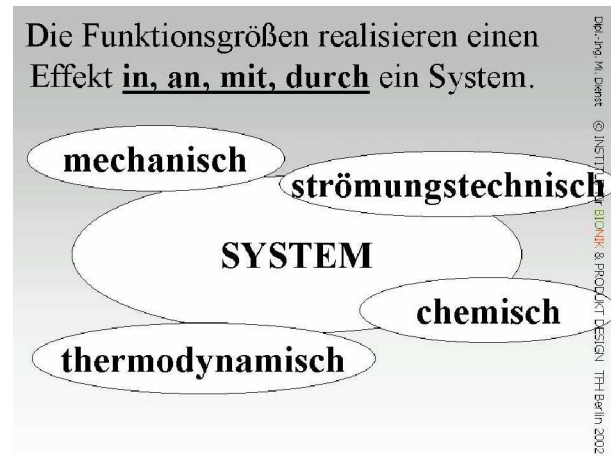
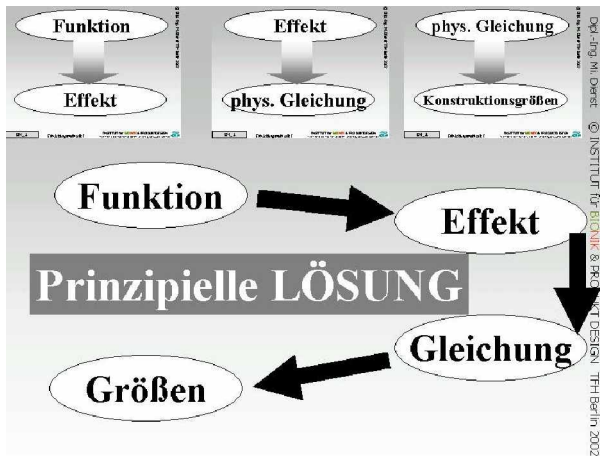
Effekt  $\Rightarrow$  Gleichung

Aus den Gleichungen, die den physikalischen Effekt beschreiben, können die Konstruktionsgrößen gewonnen werden, die die Konstruktion realisieren.



Gleichung  $\hat{=}$  Konstruktionsgrößen

Das Verfahren führt zu einer Schar potentieller (und/oder auch neuer) Lösungen, die allen physikalischen Gebieten angehören können.



**Satz.** Die Funktionsgrößen realisieren einen Effekt in, an, mit, durch ein System.

Für alle physikalischen Systeme können Intensitäts- und Quantitätsgrößen angegeben werden.

<b>Intensitätsgrößen</b>	<b>beschreiben</b>	<b>phys. Leistung</b>
<b>Quantitätsgrößen</b>	<b>beschreiben</b>	<b>Quantität</b>

### Funktionsstrukturen

Die Anforderungen an eine Anlage, Maschine oder Baugruppe bestimmen die Funktion, die den allgemeinen, gewollten Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems darstellt. Die durch Abstraktion gewonnene Problemformulierung enthält auch den funktionalen Zusammenhang des Systems (den gewollten Zweck).

Ist die Gesamtaufgabe im Wesenskern formuliert, so kann die Gesamtfunktion angegeben werden.

**Gesamtaufgabe (= Wesenskern der Aufgabe)  $\hat{=}$  Gesamtfunktion**

Die Gesamtfunktion beschreibt Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen und ist unter Bezug auf den Energie-, Stoff- und/oder Signalumsatz lösungsneutral. Die Aufstellung einer Funktionsstruktur soll die Lösungsfindung erleichtern.

### **Zum Aufstellen von Funktionsstrukturen werden folgende Empfehlungen gegeben:**

1. Es ist zweckmäßig, aus den in der Anforderungsliste erkennbaren funktionalen Zusammenhängen zunächst eine grobe Struktur mit nur wenigen Teilfunktionen zu bilden, um diese dann schrittweise durch Zerlegen komplexer Teilfunktionen weiter aufzugliedern. Dieses ist einfacher, als sofort mit komplizierten Strukturen zu beginnen.
2. Können eindeutige Verknüpfungen zwischen Teilfunktionen noch nicht erkannt werden, ist zur Suche nach einem ersten Lösungsprinzip auch die bloße Aufzählung wichtiger Teilfunktionen sehr hilfreich.
3. Funktionsstrukturen sind grundsätzlich nur bei Angabe des vorliegenden bzw. zu erwartenden Energie-, Stoff- und Signalflusses vollständig.
4. Beim Aufstellen von Funktionsstrukturen ist es hilfreich zu wissen, dass beim Energie-, Stoff- und Signalumsatz einige Teilfunktionen in den meisten Strukturen häufig wiederkehren und deshalb zweckmäßigerweise zunächst angesetzt werden.

#### Energieumsatz:

- Energie wandeln - z. B. elektrische in mechanische Energie wandeln,
- Energiekomponente ändern - z. B. Drehmoment vergrößern,
- Energie mit Signal verknüpfen - z. B. elektrische Energie einschalten,
- Energie leiten - z. B. Kraft übertragen,
- Energie speichern - z. B. kinetische Energie speichern.

#### Stoffumsatz:

- Stoffumsatz wandeln - z. B. Luft verflüssigen,
- Stoffabmessungen ändern - z. B. Blech walzen,
- Stoff mit Energie verknüpfen z. B. Teile bewegen,
- Stoff mit Signal verknüpfen z. B. Dampf absperren,
- Stoffe miteinander verknüpfen - z. B. Stoffe mischen oder trennen,
- Stoff leiten - z. B. Kohle fördern, Stoff speichern z. B. Stoffe lagern.

#### Signalumsatz z. B. mechanisches in elektrisches Signal wandeln oder stetiges in unstetiges Signal umsetzen,

- Signalgröße ändern - z. B. Ausschlag vergrößern,
  - Signal mit Energie verknüpfen - z. B. Meßgröße verstärken,
  - Signal mit Stoff verknüpfen - z. B. Kennzeichnung vornehmen,
  - Signale verknüpfen - z. B. Soll-Ist-Vergleich durchführen,
  - Signal leiten - z. B. Daten übertragen,
  - Signal speichern - z. B. Daten bereithalten.
6. Funktionsstrukturen sollen so einfach wie möglich aufgebaut sein, weil sie dann in der Regel auch zu einfachen und kostengünstigen Systemen führen. Hierzu ist auch das Zusammenlegen von Funktionen anzustreben, die dann Grundlage für integrierte Funktionsträger sind. Es gibt aber auch Aufgabenstellungen, bei denen man bewußt Funktionen verschiedenen Funktionsträgern zuordnen muss.

**Wirkprinzipien.** Zu den Teilfunktionen müssen Wirkprinzipien gefunden werden, die später zu einer Wirkstruktur zusammengefügt werden. Hieraus ergibt sich die prinzipielle Lösung (Lösungsprinzip). Das Wirkprinzip enthält den für die Erfüllung einer Funktion erforderlichen physikalischen Effekt sowie die geometrischen und stofflichen Merkmale.

**Zur Suche von Wirkprinzipien für Teilfunktionen können folgende Empfehlungen gegeben werden:**

- Zur Lösungssuche Hauptfunktionen vorziehen, die für die Gesamtlösung bestimmend sind und für die noch kein Lösungsprinzip vorliegt.
- Ord nende Gesichtspunkte und zugehörige Merkmale aus erkennbaren Zusammenhängen des Energie-, Stoff-, und/oder Signalflusses oder aus anschließenden Systemen ableiten.
- Wenn das Wirkprinzip unbekannt ist, dieses aus physikalischen Effekten, Ord nender Gesichtspunkt z.B. Energiearten, gewinnen. Liegt der physikalische Effekt fest, geometrische und stoffliche Merkmale (Wirkgeometrie, Wirkbewegung, Werkstoff) suchen und variieren.
- Analysieren, welche Ord nenden Gesichtspunkte vor allem die Suche nach Wirkprinzipien bestimmen, diese dann durch weitere Parameter untergliedern, evtl. auch einschränken oder verallgemeinern.
- Zur Vorbereitung von Auswahlentscheidungen wichtige, bereits erkennbare Eigenschaften der Wirkprinzipien notieren.

**Wirkstruktur.**

Das Entwickeln von Wirkstrukturen gilt bei Neukonstruktionen als die wichtigste Phase

Bei Neuentwicklungen ohne Vorbilder sollte immer mit der Lösungssuche für diejenige Hauptfunktion begonnen werden, die offenbar für die Gesamtfunktion lösungsbestimmend ist.

Diese Regel gilt naturgemäß nur dann, wenn Wirkprinzipien zu mehreren Teilfunktionen einer komplexen Gesamtfunktion zu suchen sind. Für die lösungsbestimmende Hauptfunktion wird man dann erste grobe Vorstellungen über in Frage kommende physikalische Effekte oder schon Wirkprinzipien aufbauen. Diese Lösung wird man anschließend hinsichtlich ihres Funktionszusammenhangs analysieren, um auf weitere wichtige Teilfunktionen zu kommen, für die dann auch Effekte oder Wirkprinzipien zu suchen sind. Bei Vorliegen schon konkreter Produktideen mit ersten Lösungsansätzen aus einer Produktplanung oder Ideensammlung wird man diese auf ihre wesentlichen, lösungsbestimmenden Merkmale hin untersuchen, um dann mit deren systematischer Variation und Kombination schnell zu einem Lösungsfeld zu kommen.

Bei Weiterentwicklungen wird man die bereits bekannten Wirkprinzipien und Wirkstrukturen überprüfen, ob sie noch dem technischen Erkenntnisstand oder sich verändernden Zielsetzungen genügen.

**Die erforderlichen Informationen zum Konkretisieren von Wirkstrukturen:**

- Orientierende Berechnungen unter vereinfachten Annahmen,
- skizzenhafte, oft schon grobmaßstäbliche Anordnungs- und Gestaltungsstudien über mögliche Form, Platzbedarf, räumliche Verträglichkeit usw.,
- Vor- oder Modellversuche zur Feststellung prinzipieller Eigenschaften oder angenäherter quantitativer Aussagen über den Optimierungsbereich,
- Bau von Anschauungsmodellen, aus denen der prinzipielle Wirkungsablauf zu ersehen ist, z. B. kinematische Modelle,
- Analogiebetrachtungen mit Hilfe von Simulationsmodellen und Festlegen von Größen, die die wesentlichen Eigenschaften sicherstellen.
- Marktforschung über beabsichtigte Technologien, Werkstoffe, Zulieferteile O. ä.

## **Optimierungsorientierte Funktionsanalyse**

Von künstlichen Systemen, Artefakten und insbesondere von Maschinen erwarten wir, dass sie funktionieren. Jede Funktion eines künstlichen und auch eines natürlichen Systems realisiert physikalische, chemische und informationelle Wirkungen. Das Zusammenspiel dieser Wirkungen ist komplex. Selbst einfache, gut verstandene technische Systeme bergen eine Vielzahl, oft unerwarteter Wechselwirkungen, die in einem netzartigen Zusammenhang stehen. Die Grübchenbildung (Pitting) an Schiffsschrauben ist ein gutes Beispiel. Die Leistung einer Schiffsschraube durch Erhöhung des Energieeintrags zu steigern, lag zunächst auf der Hand. Natürlich wusste man, dass eine Erhöhung des Massendurchsatzes über die Strömungsgeschwindigkeit zu erreichen ist und jede Handrechnung eine Erniedrigung des Druckes auf die (Schrauben-) Oberfläche voraussagt. Das Auftreten von lokalen Druckgradienten, von Kavitationsblasen und deren fatale Wirkung war und ist ein oft unterschätztes Problem. Eine Strömung, die lokal implodiert und als Quelle intensiver Druckwellen fungiert, löst eine ganze Kette von schwingungsmechanischen Wechselwirkungen aus. Obwohl die Physik dieser Vorgänge weitestgehend verstanden ist, bleibt das Kavitationsproblem ungelöst. Nicht immer ist es notwendig und nicht immer ist es überhaupt möglich, die Wirkstruktur einer Funktion oder einer Teilfunktion vollständig zu verstehen. Wir wissen viel über beschleunigte Scherschichten, Kármán'sche Wirbelstraßen und die Viskosität von Fischschleim, aber wie tatsächlich eine Heringsflosse funktioniert, wissen wir nicht. Dennoch können wir von der Heringsflosse beispielsweise enorm viel lernen. Im Gegensatz zu modernen Managern sind Wissenschaftler, Bioniker eingeschlossen, selten Träger schneller Lösungen vom Typ: „quick & dirty“; und das ist sicher auch gut so. Einem „tastenden Umsetzen“ von präsenten Erkenntnissen, von rezentem Wissen, kommt im Zeitalter informationeller Vernetzung eine besondere Bedeutung zu. Letztendlich ist es wieder die Wissenschaft, die von den Erkenntnissen um Machbarkeit und ingenieurmäßiger Übertragung eines als optimal erkannten Effekts der belebten Natur profitiert. In einem rückgekoppelten Prozess, in einer ständigen Abfolge von Variation und Auslese im Sinne einer qualitätsanalytischen Bewertung von Technik liegt das Wesen jeder Innovation verborgen. Selten gelingt der „große Wurf“, das plötzliche Auftreten von Besserem aufgrund einer einzigen wissenschaftlichen Entdeckung. Der tastende Vorgang, der Qualitätsverbesserung nur schrittweise und in einer kausalen Abfolge von Generation zu Generation eines Produktes hervorbringt, ist aus der Sicht der Bionik ein sehr sympathisches Szenario, erinnert dieser Prozess doch frappierend an die natürliche Evolution der Lebewesen auf

unserem Planeten. Technik-Evolution ist, damit sie funktioniert, an eine Reihe von Voraussetzungen gebunden. Ich möchte vier elementare Bedingungen für Technik-Evolution nennen. Diese Bedingungen sind unabhängig davon, ob man sich bei der Optimierung technischer Produkte der als wirkungsvoll und optimal erkannten Effekte und Wirkstrukturen der belebten Natur bedient, oder nicht. Entscheidet man sich jedoch für Bionik, sind sie eine notwendige Voraussetzung.

- I Die technischen Systeme müssen variierbar sein.**
- II Die technischen Systeme müssen der Bewertung ihrer Qualität zugänglich sein.**
- III Die technikgenerierende Instanz (Konstruktionsabteilung, Produktion) muss Willens und in der Lage sein, Konsequenzen der Qualitätsbewertung zu tragen.**
- IV Dem Prozess der Optimierung ( der Technikevolution ) muss eine gewisse Zahl von Iterationszyklen zugestanden werden.**

Gerade der letzte Punkt dürfte in einem modernen, durchgestrafften Unternehmen auf Probleme stoßen. Unter Managern ist der Begriff der „tastenden Technikgenese“ nicht auf der Hitliste aktueller Produktentwicklungskonzepte.

Gestatten Sie mir folgende Anregung: Machen Sie es wie die Natur; die belebte, wie die unbelebte. Sehen Sie in Ihrem Produkt-Konzept einen „Variations-Polder“ vor. Nicht gleich, aber mit der Zeit werden Sie davon profitieren. Ich möchte nun exemplarisch aber skizzenhaft die Vorgehensweise einer von Bionik motivierten Produktoptimierung darlegen.

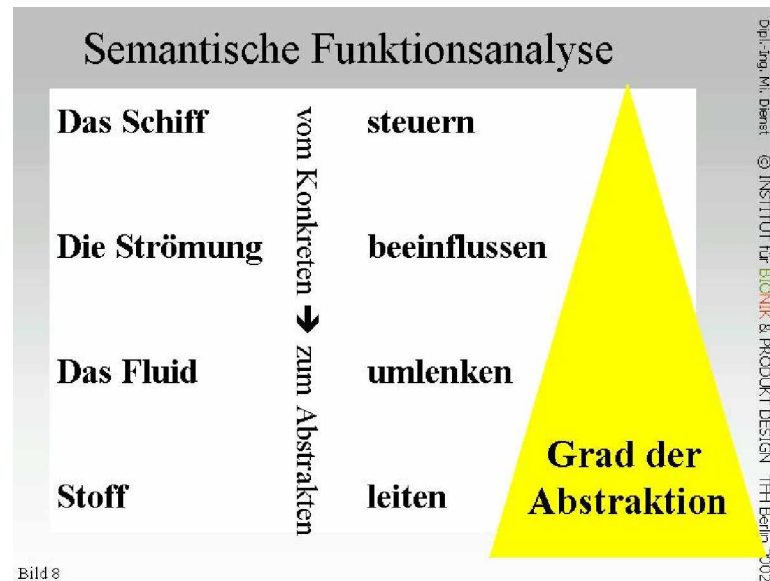
Nehmen wir ein Bauteil, das genügend komplex ist, dessen Funktionsweise und grundsätzlicher Aufbau aber seit Jahrhunderten unverändert blieb und skaleninvariant ist, also vom rahgetakelten Vollschiiff bis zur Optimisten-Jolle in gleicher Weise aussehen, wirken und funktionieren soll: die Ruderanlage.

Ich gehe des weiteren davon aus, dass der Optimierer gute Gründe kennt, auch die folgende Generation von Ruderanlagen in Funktion, Anordnung und struktureller Ausgestaltung an den derzeit existierenden anzulehnen und alle Veränderungen in eine kausale Beziehung zur rezenten Technik zu setzen. Mit anderen Worten: das Erscheinungsbild und das Prinzip einer Ruderanlage der nächsten Generation wird der heutigen (sehr) ähnlich sein.

### **Aufgaben einer Ruderanlage**

Die Ruderanlage überträgt die Lenkbewegungen des Rudergängers eines Schiffes auf das bewegte Umgebungsmedium. Formal gesehen werden Schiffe nicht gesteuert, sondern geregelt. Richtungsänderungen erfolgen durch aktive Beeinflussung der Strömungsvorgänge

um oder an einem Schiff. Eine semantische Analyse mit ansteigendem Abstraktionsgrad ergibt:



**Die Hauptaufgabe** einer Ruderanlage ist das Lenken des Schiffes. Hierfür wurde sie entworfen und gebaut; das Lenken ist der Zweck einer Ruderanlage. In einer Runde von Yachtkonstrukteuren ließen sich nun die Anforderungen an eine moderne Ruderanlage formulieren. In der Phase sind morphologische Methoden ein nützliches Instrument. Professionelle Assoziationsschemata und Fragelisten sind in der Literatur verfügbar []. (auf dem Papier vorgetragen erscheinen Semantische Analysen trivial und naiv. In der Praxis sind sie jedoch sehr effizient, treiben den Problemlösungsprozess voran und transportieren in dieser sensiblen „frühen Phase“ der Produktoptimierung einen gruppendynamischen Prozess, der in seiner Bedeutung nicht unterschätzt werden sollte). Ausformuliert könnte die Aufgabenbeschreibung einer Ruderanlage vielleicht so lauten:

**Ruderanlagen sollen präzise, wirkungsvoll, robust und einfach sein. Von einer Ruderanlage für die Yacht der Zukunft erwarten wir in gewisser Weise Intelligenz.**

Ruderanlagen sind Maschinen oder verallgemeinert technische Systeme, die mit anderen Maschinen und/oder mit Personen in Wechselwirkung stehen. Modern ausgedrückt ist die Ruderanlage einer Yacht eine Benutzeroberfläche, eine Grenzfläche zwischen einem inneren und einem äußeren System mit der ich als Rudergänger physischer in informationeller Wechselwirkung stehe (Krafteinleitung, Lenkbewegung). Aber nicht nur ich als Mensch stehe mit der Grenzfläche dieses Artefakt in Kontakt, herrschen weitere Beziehungen

Wechselwirkungen und Beziehungen	Am Beispiel einer Rudieranlage für Yachten
Beziehungen zu Personen	Zum Rudergänger,
Beziehungen zu Systemen	Zum Schiffskörper, zu Räumen
Beziehungen Dingen und Stoffen	Zum umgebenden Medium, zu Luft, Schnee, Staub, usw.
Zeitliche Beziehungen	Rhythmen, nur während der Fahrt, für einen kurzen Moment, immer wieder, periodisch,...
Größenordnungen Beziehungen	Kleine, große, ganz große Kräfte, Gravitation, Beschleunigung

Zum Schluss. Mein Optimierungsprozess soll nun von einem „Design-Slogan“ begleitet werden. Da wir Bionik betreiben wollen, lautet er kurz:

## Innovative Rudieranlage nach dem Vorbild der Natur

### Funktionen und Funktionsstrukturen

Das Ergebnis einer Analyse der am System wirksamen allgemeinen Funktionsgrößen Stoff, Information und Energie und der Funktionsprädikate speichern, leiten, wandeln und verknüpfen liefert beispielsweise die Funktionsgrößenmatrix wie vorangehend beschrieben. Die nachstehende Skizze zeigt schematisch eine Rudieranlage mit indirekter Kopplung (drive by wire) ohne Berücksichtigung einer informationell rückkoppelnden Komponente (force feedback).

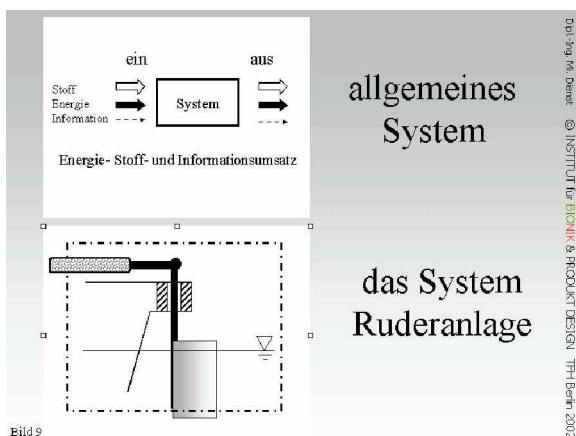


Bild 9

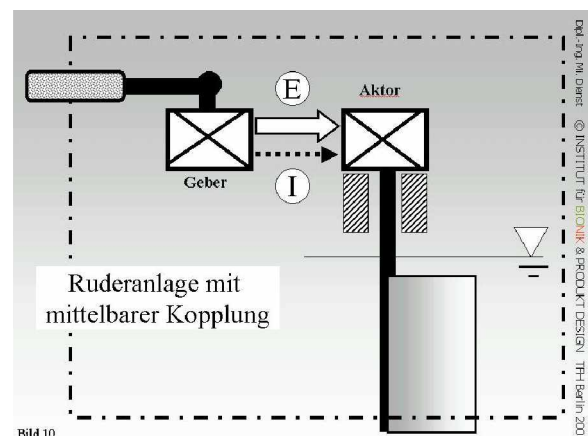
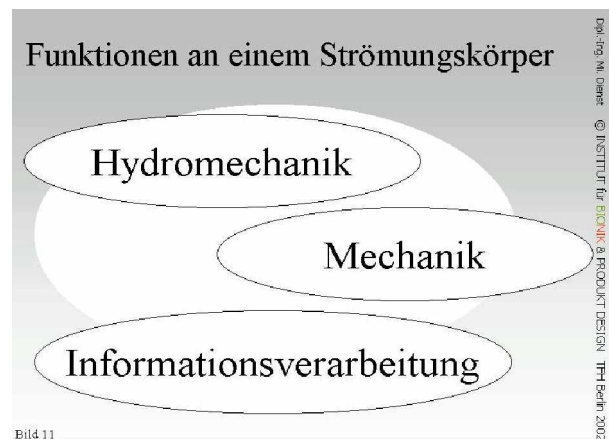


Bild 10

Eine Ruderanlage realisiert an einer Yacht eine ganze Reihe von unterschiedlichen Funktionen. Tasten wir uns sukzessive an eine Funktionsstruktur heran; eine grobe Einteilung liefert folgendes Bild:

	<b>Mechanische Funktionen</b>
	<b>Hydrodynamische Funktionen</b>
	<b>Regelung. Funktionen der Informationsübertragung</b>



Natürlich sind die Übergänge fließend und das physikalische Geschehen vernetzt. So fordern hydrodynamische Funktionen von dem System mechanische Festigkeit und eine Strömungsabriss teilt sich informationell und mechanisch/energetisch, visuell und haptisch dem Rudergänger mit. In der frühen Phase der Produktentwicklung erfolgt nun Beurteilung und Klassifizierung der Funktionen unseres Artefakts. Da wir optimieren wollen, decken wir zugleich die Funktionsfelder auf, bei denen aus unserer momentanen Sicht Handlungsbedarf besteht und das System Modifikationen im Sinne von Variation zugänglich ist.

<b>Mechanische Funktionen</b>	Festigkeit. Querkräfte aufnehmen. Schwingungsverhalten. Elastizität.
<b>Hydrodynamische Funktionen</b>	Oberflächenwiderstand Formwiderstand Auftriebsbedingter induzierter widerstand Strömungsablösung und generierter Widerstand Widerstand der mitgeschleppten Wassermasse
<b>Regelung. Funktionen der Informationsübertragung</b>	Regeln. Präzision, Geschwindigkeit. Informationsrückkopplung Intelligente Regelung, Informationsmanagement



Um den Optimierungsprozess voranzutreiben assoziieren wir nun mit den sich herauskristallisierenden Funktionen die zu erwartenden Probleme und Fragestellungen, auf die unsere Optimierung fokussiert, und die einer Lösung nach dem Vorbild der Natur zugeführt werden sollen. Wir befinden uns nun in der Phase des Optimierungsprozesses, in der die günstigen Falls die Kommunikation zwischen Biologen und Ingenieuren einsetzt, und Bioniker ihre Brückenkopffunktion zwischen Forschung und industriellem Anwender wahrnehmen. Konzentrieren wir uns nun auf die Funktionen der Ruderanlage.

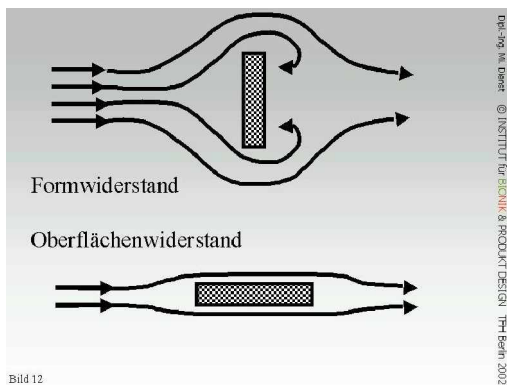
## Hydrodynamische Funktionen

**Umlenken von Strömung, Symmetrie.** Dies kann auf unterschiedliche Weise und mehr oder weniger effektiv geschehen. Eine bedeutende Restriktion in einem Konzept für ein Yachtruder ist es, dass die Strömungsumlenkung in der Regel mit einem symmetrischen Arrangement zu leisten ist, da die Beaufschlagung auf beide Seiten in gleicher Weise erfolgt.

Was ein Ruderblatt in Erfüllung seiner Funktion effizient macht, ist die Abwesenheit von Strömungswiderstand. Betrachten wir nun die Ursachen des Widerstands. Formal ist ein Ruderblatt ein gewöhnlicher, Auftriebskräfte erzeugender Strömungskörper. Wir unterscheiden folgende Widerstandsarten:

**Oberflächenwiderstand.** Immer wenn ein Fluid entlang einer Körperoberfläche strömt, entsteht eine Kraft in Strömungsrichtung: die Oberflächenreibung. Der Reibungswiderstand eines Yachtrumpfes hängt von der benetzten Oberfläche ab und von ihrer Rauigkeit. Die benetzte Oberfläche einer Yacht ist durch den Entwurf festgelegt und generell gilt, dass der Oberflächenwiderstand mit der benetzten Fläche zunimmt.

**Formwiderstand** entsteht aufgrund der geometrischen Gestalt des Strömungskörpers. Die sprichwörtliche Stromlinienform eines Körpers folgt dem „natürlichen Verlauf“ des umströmenden Mediums. Generell gilt: Jede Umlenkung von Strömung infolge der Formgebung des Strömungskörpers kostet Formwiderstand.



**Induzierter Widerstand.** Sobald wir das Ruderblatt aus seiner neutralen Lage herausbewegen, fordern wir dem System seine Hauptfunktion ab: Das Umlenken der Strömung. Eine Verfeinerung dieser „quasistatischen Betrachtungsweise“ ist die hydrodynamische Sicht: Ein angestelltes fluidumströmtes Ruderblatt ist ein Tragflügel, der Auftrieb (Vortrieb, Querkraft) erzeugt. Wie alle Auftriebsflächen bauen angestellte Ruderblätter auf der Luvseite ein Druckgebiet mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten, auf der Leeseite ein Unterdruckgebiet mit erhöhten Geschwindigkeiten gegenüber der unberührten Strömung auf. Wie jeder reale Tragflügel ist das Ruderblatt endlich lang. Am Randbogen des Ruderblattes kommt es zu einer Umströmung von Fluidmasse aus dem Überdruckgebiet der Luvseite in das leewärtige Unterdruckgebiet. Im Nachlauf des Ruderblattes bildet sich ein walzenförmiger Randwirbel aus, der einen erheblichen Widerstand erzeugt. Generell gilt: Der Wirbel im Nachlauf wächst mit der Profiltiefe des Ruderblattes.

**Generierter Widerstand.** Bleiben wir noch einen Moment bei der fluiddynamischen Betrachtungsweise. Dynamische Auftrieberzeugung gelingt nur in einer „intakten“ Umströmung. Wird das Ruder „zu hart gelegt“, kann es zu einem Strömungsabriss auf der Leeseite (Unterdruckgebiet) der auftrieberzeugenden Tragfläche kommen. Das sich nun aufrollende Wirbelgebilde wird von einer Umströmung um die Hinterkante des Ruderblattes genährt. Diese rückströmende Fluidmasse untergräbt quasi das Unterdruckgebiet. In diesem als „Stall“ bezeichneten Strömungszustand kommt die Ruderwirkung schlagartig zum Erliegen, der Widerstand dieses energiereichen Wirbelsystems ist groß.

Jeder reale Strömungskörper nimmt Einfluss auf das umgebende Medium. Das generieren von Wirbeln während eines fluidischen Bewegungsprozesses ist - wertfrei betrachtet - eine elegante und effiziente Methode Energie in die Strömung einzukoppeln. Wirbelstrukturen sind sehr stabil und energiereich. Die Energiespeicherung erfolgt über die Fluidmasse, die im Wirbel gebunden wird. Die Energie, die der Strömungskörper in die Strömung einkoppelt muss zuvor in das Gesamtsystem eingebracht werden (z.B. durch die Segeltragfläche) und schlägt in der Energiebilanz des Systems als Verlust zu Buche.

**Totwasser.** Viele (künstliche) Strömungskörper 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. Die oben angesprochenen Widerstandsarten implizieren den Widerstand infolge Totwassertransport und Entschleunigung. Aus der Sicht der Optimierungsmethodik sollte es dennoch lohnend sein, diesen Effekt als isolierten Aspekt zu behandeln.

## **Mechanische Funktionen**

Ruderblätter sind enormen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Als Teil des Lateralplanes nimmt das Ruder Querkräfte auf und als Funktionselement fordern Auftriebs- und Widerstandskräfte hohe Festigkeit. Für eine Strukturoptimierung steht die Außenhaut des Ruderblattes nicht zur Verfügung, denn Form und Oberfläche sind in erster Linie strömungsmechanischen Restriktionen unterworfen. In diesem Sinne ist in erster Linie die innere Struktur des Ruderblattes einer Festigkeitsoptimierung zugänglich. Materialtechnisch und Seitens der Gestaltung kommt der inneren Struktur moderner Ruderblätter eine besondere Bedeutung zu. Ziel einer Optimierung ist Material- und Gewichtsminimierung bei Einhaltung der Festigkeits- und Elastizitätsanforderungen. Der Energieeintrag im Betrieb ist dynamisch mit periodischen und stochastische Anteilen.

Zur Berechnung der Bauteilfestigkeit kommen Finite Elemente Verfahren FEM zum Einsatz, die auf einem sehr hohen Präzisionsniveau Ruderanlagen und andere dynamisch belastete Maschinenteile auch einer numerischen Optimierung zugänglich machen. Das Problem, das hierbei auftritt, ist die gigantisch hohe Anzahl potenzieller Variationsparameter. Selbst grobmaschige FEM-Modelle wachsen schnell in Größenordnungsbereiche fünfstelliger Variationsfreiheitsgrade. Ziel einer Strukturoptimierung an Ruderanlagen wird in Zukunft nicht die Bereitstellung von Bauteilsteifigkeit um jeden Preis sein, sondern ein adaptives, strukturdynamisches Verhalten der Bauteile. Große Erwartungen werden in Simulationsprogramme gesetzt, die sowohl das strömungsmechanische Geschehen beschreiben (CFD) als auch das gesamte strukturmechanische Szenario erfassen (FEM), eingebettet in Kombination mit leistungsfähigen Optimierungsumgebungen.

Maschinentechnisch handelt es sich bei freistehenden und auf strömungsdynamische Wirksamkeit hin optimierten Rudern um eine fliegende Lagerung. Hier treten im Betrieb

große Biegemomente auf, der Widerstand gegen Formänderung fordert hochfeste Materialien und ausgefeilte Konstruktionen.

### **Informationstechnische Funktionen und Regelung**

Mechanische Ruderanlagen zeichnen sich durch direkte, unmittelbare Kopplung der steuernden (regelnden) Hand des Skippers mit dem hydrodynamischen Geschehen am Unterwasserteil aus. Auch von modernen oder zukünftigen Ruderanlagen mit indirekter mittelbarer Übertragung (z.B. Drive by Wire-Systeme) erwarten wir Präzision und eine unverzögerte Übertragung. „Natürlich“ ist eine direkte mechanische Kopplung – in Verbindung mit einem erfahrenen Skipper ideal, weiß dieser doch jede einzelne Welle mit einer harmonischen Lenkbewegung zu parieren, ihr (der Welle ) im Idealfall Energie zu entziehen. Das Steuern in der Welle ist eine Kunst und als begeisterter Regattasegler würde ich es gerne dabei belassen. Aus der Sicht der Optimierungstechnik jedoch bietet sich hier ein wahres Eldorado wünschbarer innovativer Funktionen: Adaptives Regeln, dynamische Kopplung, lernende Aktoren, Rückkopplung, autonomes Regeln.

Die Liste an anvisierbarer Funktionen ließe sich mühelos fortsetzen; fassen wir an dieser stelle das informationstechnische Potenzial mit dem Begriff des „intelligenten Managements“ von Regelungs- und Steuerungsfunktionen zusammen.

Die ausgeführte Funktionsanalyse ist natürlich unvollständig und stellt nur einen ersten Schritt dar, hin zu einer detaillierten Funktionsstruktur. Hinter jeder Funktion stehen eine Vielzahl physikalischer Wirkungen und Effekte, die sich gegenseitig bedingen und beeinflussen (z.B. Strömungsmechanik und Festigkeit) und in einem vieldimensionalen heterogenen Gefüge miteinander verknüpft sind. Ziel meiner Ausführungen kann im Rahmen dieses Aufsatzes keine vollständige Beschreibung der Funktionsstruktur und des Wirkgefüges sein, sondern nur ein Einblick in eine Produktoptimierungsmethodik, die auf Anregungen und Ideen aus der belebten Natur setzt. In diesem Sinne folgen nun zum Abschluss dieser Ausführungen die (verkürzt wiedergegebenen) Antworten auf die Frage:

**Wie würde die Natur diese oder jene Funktion erfüllen?**

## **Darstellung von Optimallösungen der belebten Natur (Auszüge)**

### **Biosystemanalyse.**

Nie war der Einfluss der Ergebnisse der Wissenschaften größer als heute. Die Naturwissenschaften und die Technik sind auf vielfältige Weise mit einander verkoppelt. Der Erkenntnisgewinn in den Naturwissenschaften ist ohne moderne Apparatur nicht möglich. Technische Produkte und Verfahren ermöglichen dem neugierigen Naturwissenschaftler Hypothesen zu bestätigen, Erkenntnisse zu gewinnen und zu kommunizieren. Die wichtigste forschende Tätigkeit in den Naturwissenschaften, ist das Beobachten von Naturvorgängen. Mit moderner Technik – z.B. den Mikroskopen, wird dieses Beobachten der Natur erleichtert, ja in den allermeisten Fällen überhaupt erst ermöglicht. Die beschreibende Biologie benötigt technische Verfahren, und bedient sich physikalischer und chemischer Effekte um Erkenntnisse über die belebte Natur zu gewinnen. Die Bionik baut auf die Erkenntnisse der beschreibenden Biologie um ihrerseits Technik zu generieren. Auf der Seite der Biologie wurde und wird enorm viel Wissen produziert. Bionik Engineering Design möchte von diesem Wissen über biologische Systeme profitieren, es einsetzen um künstliche Systeme effizienter, verträglicher, friedlicher zu machen. Die Natur soll verstanden werden, mit dem Ziel, künstliche Systeme, Produkte und Prozesse zu verbessern, im Sinn einer Zunahme an Verträglichkeit gegenüber der Biosphäre. Die Vielfalt der Natur ist ein aufregendes aber auch forderndes Potenzial.

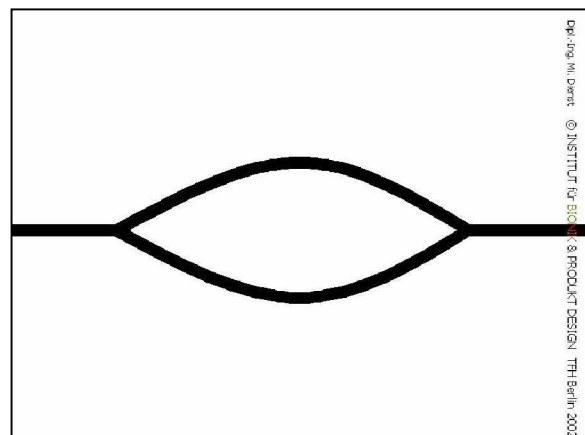
**Leben ist auf unterschiedlichen Strukturebenen organisiert.** Der biologische Struktur- und Gestaltaufbau ist dadurch gekennzeichnet, dass er auf hierarchisch angeordneten Struktur-Stufen gründet. Auf jeder Ebene existiert ein hoher Ordnungsgrad. Die Strukturebenen bauen aufeinander auf. Atome bilden komplexe Biomoleküle, wie etwa die Proteine, die ihrerseits zu Organellen organisiert sind. Viele dieser Struktureinheiten ergeben zusammen Zellen, die für eine große Klasse von Organismen, Pflanzen, Tiere, dem Menschen in spezifische Zelltypen differenziert Gewebe bilden. In bestimmten, wohlstrukturierten Anordnungen bilden die Gewebe, Organe, die zu Körpern „organisiert“ sind. Einige Stufen in der biologischen Hierarchie gehen über den einzelnen Organismus hinaus: eine Population ist eine örtlich begrenzte Gruppe von Organismen einer Art. Organismen verschiedener Arten bilden Lebensgemeinschaften in ökologischen Gefügen, den Ökosystemen. Hier treten Organismen in Wechselbeziehungen mit ihrer biologischen und abiotischen Umwelt.

**Emergenz.** Mit jeder Stufe in der Hierarchie biologischer Ordnung treten neue Eigenschaften auf, die auf den einfacheren Organisationsebenen noch nicht vorhanden waren: Emergenz. (

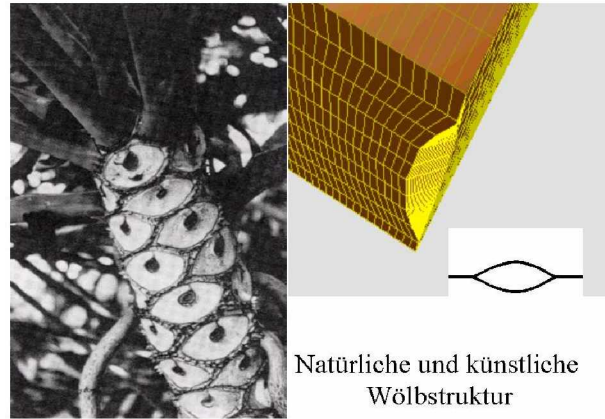
*Emergenz: emergere = auftauchen, aufsteigen*) Die hierarchische Anordnung von Organisationsebenen erzeugt eine neu auftauchende Qualität. Emergenz ist offenbar ein Phänomen des Übergangs. Neue Qualitäten resultieren aus den Wechselwirkungen zwischen den Komponenten. Aufgabe der Biosystemanalyse ist die Untersuchung von „Wesen“ in ihrem Habitat, im Kontext räumlich- zeitlicher Entwicklung. Biosystemanalyse schafft den Stoff aus dem Bionik Lösungen generiert. Der Transfer von Wissen, von den Naturwissenschaften hinüber in die Welt der künstlichen Systeme, erfolgt mit Verlusten an Information. Es ist für einen Ingenieur nicht unmittelbar einzusehen, welche Rolle die Entwicklungsgeschichte eines biologischen Systems, beispielsweise die Evolution der Meeressäuger bis hin zum rezenten Delfin, auf die begehrten strömungsmechanischen Effekte seiner Oberflächengestalt hat. Die Erfahrung zeigt: es ist gerade die Abwesenheit des umfassenden Wissens über die (Lebens-) Umstände der biologischen Systeme, die in der Vergangenheit die Übertragung von als optimal erkannten Effekten und Wirkprinzipien der belebten Natur in innovative Technik verhindert hat. Biologische Effekte existieren nicht losgelöst von ihren räumlich-zeitlichen Kontext; ebenso wenig, wie ein technischer Entwurf nur so viel taugt, wie seine technologische Realisierbarkeit. Das Aufzeigen biologischer Effekte erfolgt – aus der Sichtweise der Bionik – in „integralen Szenarien“ und in einer Sprache, die uns, den Bionikern, verwertbar erscheint im industriellen Prozess der Produktentwicklung und Produkterstellung. Bionik Engineering Design leistet den Brückenschlag vom analytisch arbeitenden Biologen zum methodisch arbeitenden Ingenieur, vom biologischen Effekt zur technischen Wirkstruktur, vom Wesen zum Produkt. Betrachten wir nun eine Auswahl „integraler Szenarien“ biologischer Systeme, die sich an den Funktionsstrukturen des anvisierten Produkts orientieren.

## **Strukturfestigkeit**

*Vielleicht haben Sie ein Blatt Papier zur Hand, oder ein Stück Pappe (Visitenkarten sind hier dankbare Objekte). Zeichnen Sie mit einem Kugelschreiber folgende Figur und drücken Sie ordentlich auf. Falten Sie nun bitte eine 90° Kante. Eine sehr effiziente räumliche Figur entsteht.*



Jedes Kind kennt diese Kantenversteifung. Palmen kennen diesen Trick ebenfalls. Jeder Wachstumszyklus hinterlässt ein abgeworfenes Blatt und ein verfestigtes Strukturelement an Stamm oder Ast. Wölbstrukturen eignen sich hervorragend zum Verfestigen von technischen Bauteilen. Sie sind leicht, und leicht herzustellen. Als Kernstrukturen lassen sie sich mit Formstoffen umkleiden, für Verbundkonstruktionen einsetzen.



Natürliche und künstliche Wölbstruktur

**Bäume und Gestaltfestigkeit.** Bionik heißt von der Natur lernen; von den Bäumen, ihren Formen, ihren Strategien gegen Spannungskonzentration, von ihrem ausgleichenden, wachsenden, sich optimierendem Selbstgestalten. In einem Bericht über Haitabu in der Zeitschrift „der Spiegel“ war zu lesen > Die Wikinger schlugen ihre Schiffsplanken mit dem Beil, weil sie keine Säge kannten <. Das ist lächerlich. Natürlich wussten die Wikinger zu sägen. Und sie wussten, was ein Baum ist. Sie wussten, und das ist das Entscheidende, was einen Baum krumm macht: Ein kleines Pflänzchen wächst so vor sich her, reift zu einem Baum und alles ist gut. Plötzlich ändert sich die Umgebung. Nachbarbäume fallen um; ein, zwei, viele Äste brechen im Sturm. Die Belastungssituation ist sofort eine andere. Der Baum, sein Leben lang auf optimales Wachsen konditioniert, sieht sich einer vollkommen neuen - meist intensiveren - Strömungsbelastung ausgesetzt. Was macht der Baum? Dort, wo Grenzspannungen auftreten, wird das Baumgewebe „veranlasst“ beizupacken, Struktur aufzubauen und zu verfestigen. Verfestigung und Wachstum wandeln die Gestalt; ein lokaler Prozess. Stützkonstruktionen entstehen, die Kräfte werden in harmonischen Bahnen geleitet

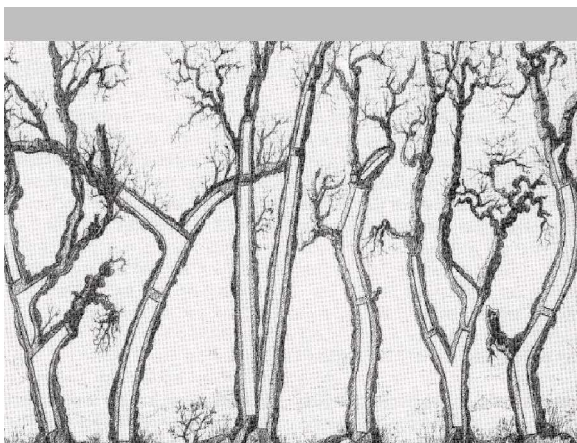


Bild 14

Dipl.-Ing. M. Dierke © INSTITUT FÜR BIONIK & PRODUKT DESIGN TH-Berlin 2002

und Spannungen verkontinuierlicht. Fasern entwickeln sich genau dort, wo kluge Ingenieure heutzutage die anisotrope Materialverteilung in ihren Maschinenbauteilen errechnet hätten, nämlich gemäß den stetigen Krafteinleitungslinien, den Trajektorien, wie wir das nennen. Nicht explizit, aber intuitiv wussten das die alten Handwerkskünstler,

weshalb sie Bretter schlugen und nicht sägten. Nur so bleibt die Faser erhalten, das sollten wir lernen. Die Bäume im Wald zu „erwählen“, das ist sehr bionisch.

Von der Vielfalt der äußeren Belastungen, denen eine Struktur ausgesetzt ist, werden hier Kräfte, Biegemomente, Torsionsmomente genannt. Wenn das Bauteil sich nicht fortbewegen soll, müssen diese Belastungen von einem Auflager aufgefangen werden, indem dieses gleich große aber entgegengerichtete Reaktionslasten aufbringt. Weiter unten sehen Sie die Formeln für Biegemoment, Flächenträgheitsmoment des Kreisquerschnittes und der maximalen Biegespannung, die immer in der Außenfaser des Querschnittes auftritt. Das Flächenträgheitsmoment charakterisiert die Querschnittsform,  $r$  sei der Radius des jeweiligen Biegebalkens. Die Spannungen nehmen bei Belastung linear von der Stammmitte zur Stammoberfläche zu und sind in positiver Richtung Zugspannungen und in negativer Richtung Druckspannungen.

**Biegemoment**

$M_b = F \cdot L$  [Nm]

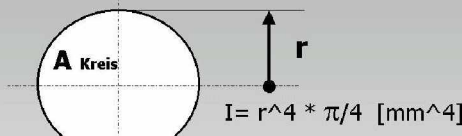
**Flächenträgheitsmoment des Kreisquerschnitts**

$I = r^4 \cdot \pi/4$  [mm<sup>4</sup>]

**Maximale Biegespannung in der Randfaser**

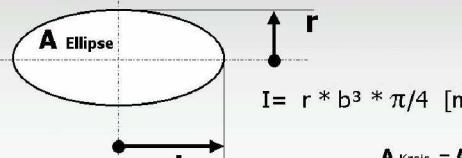
$\sigma_B = 4 M_b / \pi \cdot r^3$  [N/mm<sup>2</sup>]

**Flächenträgheitsmomente für Kreisquerschnitt und Ellipse**



**A Kreis**

$I = r^4 \cdot \pi/4$  [mm<sup>4</sup>]



**A Ellipse**

$I = r \cdot b^3 \cdot \pi/4$  [mm<sup>4</sup>]

$A_{\text{Kreis}} = A_{\text{Ellipse}}$

Aus der Gleichung für die Biegespannungen wird ein mit der Biegespannungsverteilung verbundenes Problem deutlich. In der Balkenmitte ( $r = 0$ ) sind die Spannungen gleich Null, nämlich weder Zug- noch Druckspannungen. Beim Baum befindet sich in diesem nicht ausgelasteten Bereich durchaus auch tragfähiges Holz, das bezüglich der Biegung völlig nutzlos und damit Materialverschwendung ist. Offensichtlich toleriert die Natur diesen Mangel beim bewegungslos in der Erde verankerten Baum, während beim mobilen Säugetier viele Knochen im Bereich der neutralen Faser der Biegung ( $r = 0$ ) hohl sind. Knochen sind dann Röhren. Es wird also bei letzteren kein Material aufgebaut, wo es nichts zu tragen gibt. Aber auch ein Baum setzt sein Material in den engeren Grenzen seiner Möglichkeiten sinnvoll ein: Einseitig windbelastete Bäume ovalisieren in Windrichtung. Ein elliptischer Querschnitt hat aber ein anderes Flächenträgheitsmoment als der Kreisquerschnitt, wobei ( $r$ ,  $b$ ) die



Ellipsenhalbachsen sind. Der Unterschied in den beiden dargestellten Gleichungen für das Flächenträgheitsmoment ist für das beanspruchungsgerechte, für das optimierte Design, von besonderer Bedeutung. Wir wissen nun, dass die größten Biegespannungen in der Außenfaser des Querschnittes auftreten. Wenn der Baum alle seine Baumaterialien im Bereich höchster Biegespannung (zug- und druckseitig) anlagert, indem er dort besonders dicke Jahresringe ausbildet, so geht dieser Anbau in die dritte Potenz der größeren Halbachse  $b$  ein, während eine Verbreiterung in Richtung der kleinen Halbachse nur linear einginge. Der Baum geht also zu einem unrunder Querschnitt über, der sich gegenüber der Vorzugsbiegebelastung am steifsten erweist und durch geringere Spannungen gekennzeichnet ist, als ein flächengleicher Kreisquerschnitt bei gleichem äußeren Biegemoment. Reine axiale Zug-Druck-Belastung und reine Biegung kommen in der Praxis nur selten vor. Realistischer sind kombinierte Belastungen. Neben den Zug- und Druckspannungen infolge axialen Zuges oder Druckes und den Biegespannungen (Übergang von Zug- nach Druckspannungen mit einer bestimmten räumlichen, meist linearen Verteilung) gibt es noch die Schubspannungen. Sie sind gleichsam tangential in der schubbelasteten Fläche wirkende Spannungen und verhindern ein Abgleiten der durch die schubbelastete Fläche  $A$  getrennten Teilkörper aufeinander.

Von Bäumen kann man unendlich viel über Bauteilfestigkeit und adaptives wachsen lernen. Das Problem dabei ist, dass die Erkenntnisse nicht unmittelbar umsetzbar sind. Wir benötigen eine praktikable Strategie, die optimales Wachsen auf künstliche Strukturen überträgt. Am Institut für Bionik & Produkt Design haben wir sogenannte **Phylogenetische Algorithmen** entwickelt, mit denen wir Strukturoptimierungsprobleme lösen.

## **Strukturoptimierung und Phylogenetische Algorithmen**

Phylogenetische Algorithmen sind Optimierungsstrategien nach dem Vorbild der belebten Natur. Aus der Sichtweise der Bionik steht nun folgende Frage im Vordergrund: Wie funktioniert biologischer Strukturaufbau und Gestaltwandel zu optimalen, an unterschiedliche Umgebungen angepasste Systeme und auf welche Weise gelingt eine Übertragung der Erkenntnisse auf Optimierungsfragen einer künstlichen, technischen Welt?

Die Betrachtung phylogenetischer Gestaltentstehung in der belebten Natur erfolgt von zwei komplementären und in einander verschachtelten Ebenen aus: der Ontogenese und der Evolution.

**Ontogenese.** Gegenstand der Betrachtungen ist der Phänotyp eines und seine Entwicklung von der befruchteten Eizelle bis zum adulten Organismus. Des Weiteren interessieren hier

Mechanismen der Selbstmontage (autoassembly) und der Selbstorganisation organischer Materie, biologische Informationsverarbeitung und genetische Expression.

**Ontogenese-Simulation** beschreibt in mathematischen Modellen die Phasen des individuellen Gestaltwandels einschließlich der Grundprinzipien biologischer Muster- und Strukturentstehung. Es existieren Computermodelle zellulärer Informationsverarbeitung auf der Basis von Diffusions-Gleichungen von intrazellulären Signalstoffen (Morphogenetische Gradienten [WOL], [MHT]).

**Übertragung auf künstliche Systeme.** Wachstumsgesetze, und Modellbildungen biologischen Strukturwandels dienen als Vorbild für den Entwurf technische Verzweigungssysteme. Grundlegende Arbeiten von Aristid Lindenmayer, Saube und Peitgen. [LIN][PEI][DAT], sowie zu Affiner Abbildung und Koordinatentransformation nach D'Arcy Thompson.

**Evolution.** Betrachten wir den Prozess der Evolution als die „Entwicklung biologischer Systeme von Generation zu Generation“ so setzt diese Sichtweise die Entstehung „neuer“ Individuen voraus. Evolution impliziert Ontogenese; Die Ontogenese ihrerseits ist ein „Optimierungsprodukt“ der biologischen Evolution.

Wie wir weiter unten sehen werden, ist das „Neusein“ eines Individuums von dem Begriff der Emergenz zu unterscheiden.

Viele Systeme in der belebten Natur sind bis an die Grenze des physikalisch Möglichen entwickelt. Die Riechrezeptoren des Seidenspinnermännchens antworten in Anwesenheit eines einzigen Moleküls des Sexuallockstoffes Bombykol mit einem Nervenimpuls. Ein Lichtquant führt in den Sehzellen höherer Lebewesen zu einer Reaktion. Das Gefäß-System der Wirbeltiere entspricht in der Kaskade seiner Vernetzung einem optimalen Rohrsystem mit immer gleicher Verzweigungs-Regel. Knochen und Pflanzenstrukturen sind aus statischer Sicht und nach technischen Maßstäben optimal. Aus der analytischen Biologie sind eine Reihe von sehr illustrativen Beispielen bekannt, mit denen sich zeigen lässt, dass es offen bar bevorzugte Formen, Maße, Winkel und allometrische Beziehungen bei der Muster- und Gestaltentstehung in der belebten Natur gibt. Diese bevorzugten Relationen sind offenbar optimal. Wenn wir nur intensiv genug und interessiert hinschauen, können wir bei jedem beliebigen Lebewesen das Wirken effizienter Prozesse, absolute Anpassung und in der Regel optimale Gestalt beobachten. Gehen wir noch einen Schritt weiter: Die relativ kurze Entwicklungszeit (3 bis 4 Milliarden Jahre) von der Urzelle bis zum modernen Wirbeltier setzt ein Entwicklungsverfahren voraus, das seinerseits ein hocheffizientes Instrument sein

muss, also selbst eine Optimallösung der Natur darstellt. Zu den charakteristischen Merkmalen der Lebewesen gehört, dass sie Informationen weitergeben, dass sie sich fortpflanzen, sich vermehren. Da die Ressourcen der Biosphäre beschränkt sind, geraten alle Organismen in Wettbewerb um Nahrung, Lebensraum, sie treten in zwischenartliche oder innerartliche Konkurrenz. Es existiert eine Botschaft mit der Information zur (Über-) Lebensfähigkeit. Das Medium dieser Informationsverarbeitung und Informationsverbreitung ist das biologische Erbgut. Gene und Genkombinationen, die ihre Träger am wirksamsten dazu bringen, sich zu vermehren, werden auch in der nächsten Generation am stärksten vertreten sein. Treibende Kraft der Erzeugung stabiler Zustände in der belebten Natur ist ein komplexes Optimierungsverfahren, das wir unter dem Begriff Evolution zusammenfassen.

**Evolution.** Die biologische Evolution ist der Vorgang, der zur Entstehung der Organismenvielfalt geführt hat. Es gilt heute als unbestritten, dass sich jede Art aus primitiven Vorfahren entwickelt hat, komplexe Systeme aus einfachen hervorgegangen sind und sich die Anpassung (Adaptation) von Organismen zunehmend verbessert hat. Da die biologische Evolution ein Verfahren zur (mittelbaren) Veränderung und Einstellung von System-Zustandsgrößen ist, erfüllt sie die Anforderungen, die wir auch an ein technisches Instrument, an ein mathematisches Kalkül zur Anpassung und Optimierung stellen würden; oder um es auf den Punkt zu bringen: **Die biologische Evolution ist eine Optimierungs-Strategie.**

Sie ist Vorbild für ein Instrument zur Optimierung und Anpassung von Technik und Technologie an die jeweiligen herrschenden Umstände und so hoffen wir jedenfalls, an die Biosphäre selbst. Verstehen wir nun Bionik als ein Verfahren, das die Phänomene der belebten Natur entschlüsselt, die Effekte isoliert und das Gefundene in einem technischen System abbildet, so sollte eine Optimierungsstrategie nach dem Vorbild der belebten Natur die elementaren und grundlegenden Aussagen der Theorie der biologischen Evolution enthalten.

**Evolutionsstrategie und Phylogenetische Algorithmen.** Ein von dem Berliner Forscher Ingo Rechenberg in der Mitte der siebziger Jahre entworfenes und seither immer weiter verfeinert und entwickeltes Verfahren greift markante Merkmale einer modernen Evolutionstheorie in darwinschen Sinne auf und gießt sie in eine für technische Optimierungsaufgaben verwertbare Form: Eine Optimierungs-Strategie nach dem Vorbild der belebten Natur, die Evolutionsstrategie. In den USA gab es ähnliche Entwicklungen von Lawrence Fogel (1966) und John Holland (1992). Die unter der Bezeichnung „Genetische Algorithmen“ entwickelten Verfahren, deren Anwendung sich schnell verbreitete, und die

sich für die Behandlung einer begrenzten Klasse von Optimierungsproblemen bewährt. Nicht zuletzt dieser Umstand führt derzeit zu einem Aufschwung der Evolutionsstrategien in Anwendung und Theorienbildung. In Deutschland erarbeiteten Ingo Rechenberg (1973, 1994) und Hans-Paul Schwefel (1977, 1995) die theoretischen Grundlagen, die heute das Kalkül jeder modernen Evolutionsstrategie bilden. **Evolutionstrategien und Phylogenetische Algorithmen** unterscheiden sich von anderen technischen und naturanalogen Optimierungsstrategien dadurch, dass sie beim Fortschreiten über ein Qualitätsgebirge des behandelten Optimierungsproblems die Intensität und Richtung eines einzigen Gradienten (des steilsten Anstiegs im Gebirge) nicht exakt ermittelt, sondern ein Set aus vagen aber kompetenten Lösungsvorschlägen des Fortschreitens lokal untersucht. Die Verfahren diffundieren auf dem Gradientenweg zum Optimum. Phylogenetische Algorithmen tolerieren das Auftreten von Selbstorganisation und weitreichenden ontogenetischen Effekten. Phylogenetische Algorithmen lassen sich für Optimierungsaufgaben einsetzen, in denen das physikalische Modell von Feldern autonomer Zellulärer Automaten ZA repräsentiert wird. Sie sind als hocheffizientes Instrument für zukünftigen Strukturoptimierungen FEM, Strömungssimulationen CFD und den zu erwartenden Kombinationen beider Simulationsverfahren von uns entworfen worden. Die besondere Stärke der Phylogenetische Algorithmen besteht darin, dass eine funktionale mathematische Beschreibung der zu lösenden Optimierungsaufgabe nicht existieren muss, oder anders gesagt, die Ableitungen einer Funktion zum Zwecke der Nullstellenermittlung nicht ermittelt werden müssen. Dieser Umstand ist ein Grund für die Universalität von Strategien nach dem Vorbild der Evolution. Sie lassen sich für Aufgaben einsetzen, bei denen einer mathematischen Behandlung auf Grund der Komplexität des Problems der Zugang versperrt ist und/oder ein genaues Wissen über die speziellen Eigenschaften nicht existiert.

***biologisches Vorbild***

**nachahmendes Modell**

*Individuum*

Objekt / System / Modellvorstellung / usw.

*Merkmale eines Individuums*

Objektvariablenvektor des künstlichen Systems

*Mutation des genet. Materials*

Variation der Objektvariablen mit Zufallszahlen

*Überproduktion*

Erzeugung von Systemvarianten

*Tauglichkeit des Individuums*

Evaluierung / Qualitätsermittlung

*Selektion*

Selektion/Elektion

*Reproduktion*

Deklaration eines neuen Elters

*Vererbung von Mermalen*

Vererbung des Objektvariablenvektors

Für viele technische Oproblestellungen existieren heute gut abgesicherte Computermodelle und Simulationsszenarien.

**Implementierung.** Computerprogramme und deren Quellcodes gehören in den Anhang eines Aufsatzes. Das nachfolgende Listing soll lediglich darstellen, wie **kompakt die vollständige** Formulierung eines Phylogenetischen Algorithmus (PA, geschrieben Pascal) sein kann. Der PA ist in diesem Fall eine Optimierungsumgebung für die FEM-Berechnung einer Fachwerk-Struktur mit maximal 6000 Knotenpunkten.

```

function evo(Generationen,mutationen:integer):integer;
var gen,genmax, mu,mumax :integer;
var i,j,k,dim : integer;
var d,de,db,dm,dd: real;
var q,qb,qe,qm: real;
var v,vb,ve,vm: vectortyp;
begin randomize;
  for i := 1 to dim do v[i] := 0; v[0] := dim; vb:=v; ve:=v; vm:=v;
  q := -10000; qe:=q; qb:=q; qm:=q;
  d := 5; dd:=1; de:=d; db:=d; dm:=d;
  genMax :=Generationen; muMax :=Mutationen;
begin
  for gen := 1 to genmax do
  begin
    w(10,10,' '); w(10,10,(gen));
    qb := q;
    getFEMvector(ve);
    for mu := 1 to muMax do
    begin
      for i := 1 to dim do vm[i] := 0; vm[0] := dim;
      dm := abs(de + vorz*dd);
      for i := 1 to dim do vm[i] := ve[i]+vorz*dm; vm[0] := dim;
      modifyFEMvector(vm);
      q:= 1000- feedcalc;
      if qm >= qb then
      begin qb := qm; vB := vM; db := dm; end;
      end;
      qe := qb; vE := vB; de := db;
      modifyFEMvector(vb);
    end;
  end;
end;
(##### evo ends #####)
  
```

Für Probleme, die sich auf eine „Koordinatentranslokation“ zurückführen lassen ist die beschriebene Evolutionsstrategie selbst in ihrer einfachsten Formulierung ein äusserst effizientes Instrument. Hier ist die Forderung nach starker Kausalität im allgemeinen erfüllt.

## Hydrodynamik

Wie gesagt, viele Organismen sind bis an den Rand des physikalisch Möglichen an ihre Umgebung angepasst. Millionen von Jahren Evolution haben optimale Konstruktionen und Problemlösungen hervorgebracht. Fliegende und schwimmende Tiere zu beobachten ist für den Bioniker besonders lohnenswert. Hier, in der Fluidodynamik herrschen die dynamischen Kräfte, hier ist extremer Leichtbau gefragt. Die extrem ausgefeilten Konstruktionen der Wasserwelt arbeiten mit der Strömung und nicht gegen sie, spielen mit den physikalischen

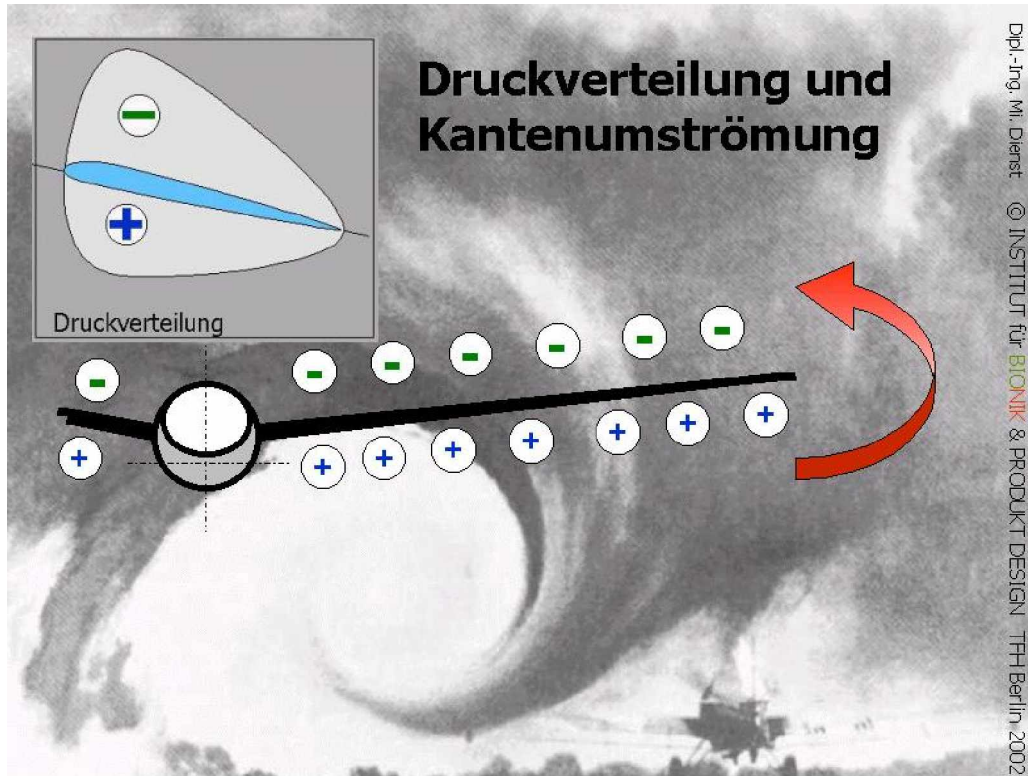
Effekten und erleiden nicht Schicksal an ihnen. Ihre Körperform, ihre Oberfläche, ihre gesamten Gestalt mit all ihren Funktionen weichen kleinsten Widerstandsquellen aus und spannen sie ein für ihr Dasein und nutzen die Energiequellen ihrer unmittelbaren und direkten Umgebung aus für ihre Mobilität. Die Natur ist raffiniert und genial und diese Optimalität ist nicht das Ergebnis eines Denkprozesses - es ist nach unserer menschlichen Auffassung nicht Intelligenz, die hier ordnet und optimiert. Warum ist es für Konstrukteure so nützlich, das biologische Strömungssystem zu schauen? Das Gütekriterium der Organismen ist der Reproduktionserfolg. Die Ausbreitung einer Art und auch einer guten Idee erfordert Mobilität. Es ist für ein junges Pflänzchen viel günstiger, nicht im Schatten des Mutterbaumes aufzuwachsen, sondern zuvor – als Flugsamen – weite Strecken zu segeln und neues Terrain zu besiedeln. In die strömungsmechanischen Eigenschaften der Organismen hat die biologische Evolution viel Optimierungsaufwand investiert. Hier wirken die dynamischen Kräfte auf das System, hier ist extremer Leichtbau gefordert. Eine Ursache von extremer Effizienz bei künstlichen und biologischen Systemen ist die Häufigkeit ihres Auftretens. Das gilt von Generation zu Generation, also relativ, als auch absolut 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 ihrer ständigen Suche nach Innovationen, sich dem biologischen Hitec-Produkt Vogel besonders intensiv zu widmen.

### **Induzierter Widerstand.**

Der Storch war das Lieblingstier des Otto Lilienthal. Dieser hatte sich Ende des Neunzehnten Jahrhunderts für den biologischen Gleitflug als Vorbild für seine Flugmaschinen entschieden. Von Störchen kann man viel über das Fliegen lernen. Dass Flugapparate starre Tragflächen haben sollten, war zu Lilienthals Zeiten keineswegs selbstverständlich. Aus der Zeit um die Jahrhundertwende existieren einige Filmdokumente über Flugversuche mit Schlagflugapparaten. Wenn wir heute über solche „Fluttermänner“ lachen, sollten wir uns vergegenwärtigen, dass in den meisten Regattaklassen das Wriggen und Pumpen am Segel zur Disqualifikation führt (WR 42), ... weil es so effizient ist.

Das Über- und das Unterdruckgebiet um ein umströmtes Profil erzeugt den Vortrieb beim Segeln. Den gibt es aber nicht umsonst – no free lunch. Biologische Flügel und technische Tragflächen sind endlich lang. Betrachten wir einen Flügel von vorn. Die dreidimensionale Strömung entspannt sich aus dem luvseitigen Überdruckgebiet des Flügels in das

Unterdruckgebiet auf der Flügeloberseite. Diese Strömungsbewegung rollt im Nachlauf der Tragfläche einen intensiven Randwirbel auf und dieser wiederum erzeugt einen intensiven Strömungs-Widerstand. Der Anteil dieses sogenannten „induzierten“, weil auftriebsbedingten Widerstands, beträgt bis zu 30 % am Gesamtwiderstand eines Flugsystems.



Schauen wir uns nun einen schnellen Segler an. Die Flügelform von Möwen erinnert an Tragflächen moderner Hochleistungssegelflugzeuge. Bei diesen schlanken, konisch zulaufenden Flügeln wird die Kantenströmung nahezu auf die gesamte Tragflächentiefe verteilt, die Flügelspitze leistet nur noch einen geringen Anteil zum Widerstandsaufkommen. Das ist perfekt für sehr hohe Anströmgeschwindigkeiten und spezielle Strömungsbedingungen. Stellen Sie sich nun eine Möwe oder einen Albatros als Landsegler vor. Letzterer würde seinen Landeanflug auf einen Baumwipfel wohl mit einer Schneise im Unterholz beenden. Zu schwer, zu schnell, angepasst an die Strömungsverhältnisse, wie sie in einer rauen Strömung im Bereich Null bis dreißig Meter über der Wasseroberfläche herrschen. Energie gibt es im Überfluss. Anders über Land. Hier wollen die Aufwinde über den Hangkanten erspürt und erfüllt werden, der Thermikschlauch erwittert. Die Fluggeschwindigkeiten sind kleiner, die spezifische Tragflächenbelastung auch. Das macht das Fliegen aber nicht einfacher, denn das Energieangebot ist geringer und Verluste schlagen heftiger zu Buche. Hier sind Spezialisten im Energiehaushalten gefordert. Kleine und kleinste

Energiemengen gilt es zu verwalten, auf kleine und kleinste Änderungen im Widerstandaufkommen hat das Flugsystem zu antworten. Landsegler brauchen also eine andere Tragflächenkonstruktion: geringe Streckung und damit größere Profiltiefe. Aber was ist dann mit dem intensiven Randwirbel dieses Kastenflügels? Der ist ja gerade so intensiv, wegen der großen Profiltiefe am Randbogen. Blicken wir noch einmal hinauf zu den kreisenden Störchen. Die Tragflächen der Landsegler sind aufgefingert.



Intuitiv wittern wir Widerspruch. Eine zerklüftete Form soll weniger Widerstand leisten als eine kompakte? Es lässt sich zeigen, dass der induzierte Widerstand einer kompakten Tragfläche größer sein muss als jener, den 5, 6 oder mehr Gefiederfinger durch ihre mehreren im Nachlauf der Tragfläche mitgeschleppten Randwirbelfäden erzeugen.

Am Windkanal fand man heraus, dass es keineswegs ausreicht, den Flügel an seinem Randbogen zu „splitten“, sondern dass die von den Gefiederfingern generierten Wirbelkeime eine geometrische Figur, eine geschlossene dreidimensionale Konfiguration ausbilden müssen. Wirbel haben nämlich eine interessante Eigenschaft: Befinden sich zwei oder mehrere Wirbel mit dem gleichen Drehsinn in unmittelbarer Nachbarschaft, fangen sie an umeinander zu rotieren. Sie tanzen förmlich um ein gemeinsames Zentrum. [Wirbelkeime] Ein aufgefingertes Vogelflügel erzeugt eine – geometrisch geordnete – Schar von gleichsinnig drehenden Wirbeln. Folglich spulen sich die Wirbelfäden im Nachlauf des Tragflügels zu einem – innen hohlen – Wirbelmantel auf. In Analogie zu Feldlinien um eine elektrische Spule, werden auch aeromechanische Stromlinien in einer aeromechanischen Wirbelspule konzentriert. Dieser walzenförmige Wirbelmantel konzentriert die Strömung: er beschleunigt sie. Das ist – ohne übertreiben zu wollen – genial. Die Geschwindigkeit der (rotorfreien)

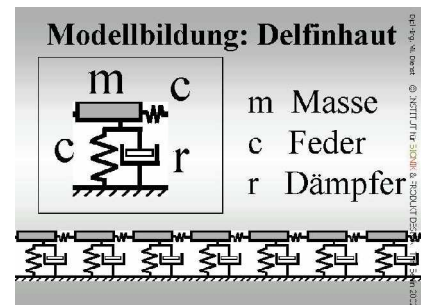


Strömung in solch einer Wirbelspule kann das doppelte bis dreifache der Umgebungsgeschwindigkeit ausmachen. Was dies bedeutet, wird klar, wenn man bedenkt, dass die Geschwindigkeit in die Leistungsbilanz quadratisch eingeht. Fassen wir also zusammen: Auftriebsbedingt herrscht eine Umströmung am Fügelende. Aufgrund der Auffingerung des Gefieders des Landseglers erhalten wir eine Wirbelspule, durch die die Strömung beschleunigt wird. Es handelt sich hier also um einen „biologischen Jetantrieb“, der einen großen Teil der zum Auftrieb benötigten Energie wieder zurückgewinnt.

Es spricht nichts dagegen, eine konstruktive Lösung für „Auffingerung und Wirbelspuleneffekt“ an Ruderblättern zu suchen.

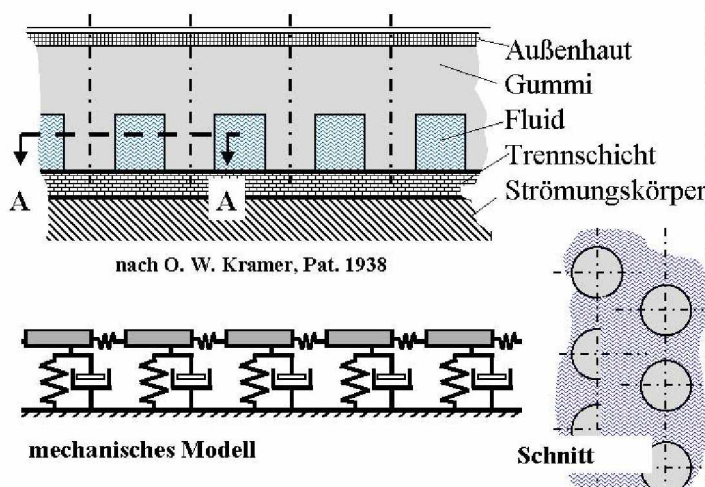
## Formwiderstand und Oberflächenwiderstand

Die hydrodynamische Formgebung ist in erster Linie an die Funktion eines Ruderblattes gebunden. Die Konditionierung von Auftriebskörpern erfolgt heute mit CFD Methoden. Hier sehen wir große Chancen für den Einsatz von Optimierungsstrategien nach dem Vorbild der Natur, z.B. den Phylogenetischen Algorithmen.



Bioniker interessieren sich nicht nur für die Formen und Strategien der belebten Natur wenn es um den auftriebsbedingten, induzierten Widerstand und den Form-Widerstand von Strömungskörpern geht, sondern auch um Fragen der Oberflächenreibung. Hier gibt es Bemerkenswertes an der Delfinhaut zu erforschen. Die gummiartige Struktur mit ihren komplexen Schwingungs- und Dämpfungseigenschaften mindert die Wirbelbildung in der

### Technische Oberfläche nach dem Vorbild der Delfinhaut

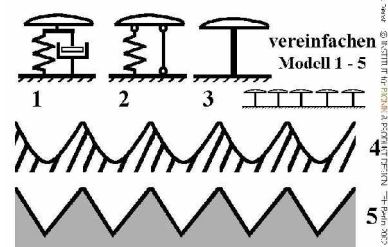


Dipl.-Ing. M. Dierck © INSTITUT für FLOW & PROZESS DESIGN TH Berlin 2002

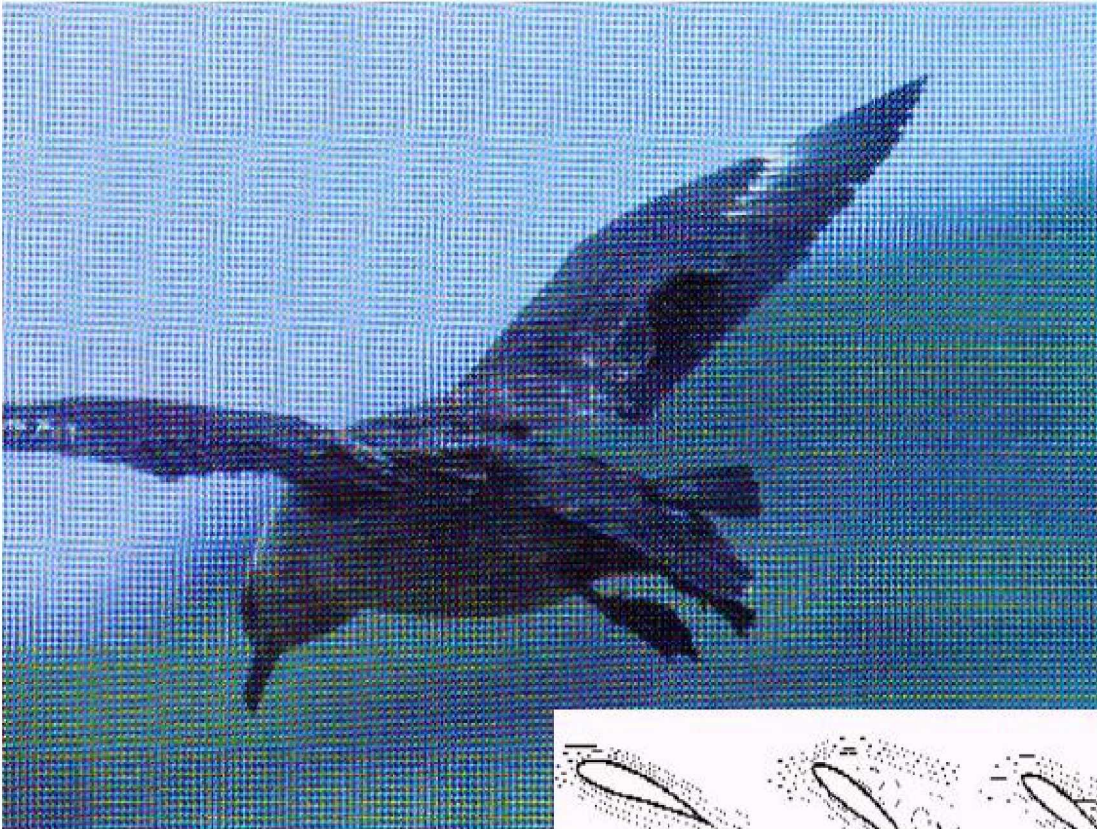
mittleren Grenzschicht. Als mechanisches Modell lässt sich die Delfinhaut als eine Aneinanderreihung von Feder-Dämpfer- und Masselementen beschreiben. Ein Lösungsprinzip für eine technische Oberfläche stellt ein Feder- Dämpfer- und Masse-System (mit geschlossener innerer Hydraulik) dar.

Mit seinen bis zu 40 Knoten schwimmt ein Hai in der Geschwindigkeitsklasse der Delfine. Der Hai hat eine extrem raue Oberfläche: sie fühlt sich an wie Schmirgelpapier. Dennoch sind Haie extrem widerstandsarme Schwimmer. Unter dem Mikroskop stellt sich die Haischuppe als ein Panel von wohldefinierter geometrischer Gestalt dar. Die Geometrie der Schuppe und die strömungsmechanischen Vorgänge wurden von Prof. Bechert an der TU Berlin eingehend untersucht. Die erste Modellvorstellung lehnte an ein schwingungsfähiges Feder-Masse-System an, das dem der Delfinhaut ähnelt.

Mechanisches Modell: Haihaut



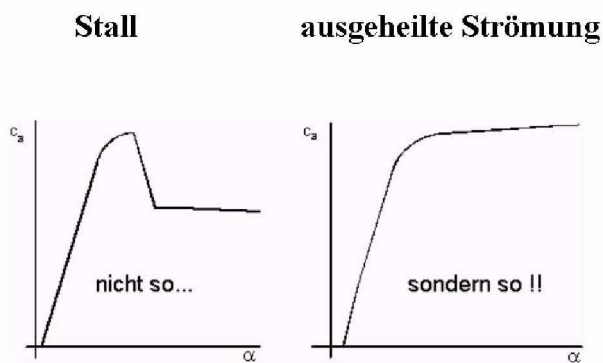
Das physikalische Wirkprinzip – die Umwandlung einer Transversalströmung in mikrofeine Wirbelzöpfe – lässt sich etwa derart beschreiben: Jede reale Strömung um einen vollgetauchten Körper enthält Fluidkompartimente mit Geschwindigkeitsanteilen quer zur Bewegungsrichtung, die zur Erhöhung des Oberflächenwiderstands beitragen. Trifft nun ein Fluidelement auf eine (Haischuppen-) Rillenstruktur, wird es alleine durch die Geometrie der Rille in Rotation versetzt und quasi aufgerollt. Das zu einem Wirbelzopf aufgespulte Fluidelement verlässt nun entschärft das Schuppenpanel stromabwärts. Es bildet sich eine turbulente, geordnete, Grenzschicht aus, die den Strömungskörper „hautnah“ umgibt. Durch diese Hülle lässt sich wunderbar, reibungsarm und vor allem pfeilschnell schlüpfen.



## Generierter Widerstand und Gefieder

Viele biologische Systeme sind bis an den Rand des physikalisch Möglichen optimiert. Ein gutes Beispiel: Vögel und Gefieder. Gefieder birgt eine Vielzahl unterschiedlichster Geheimnisse. Gefieder bzw. die 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. 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

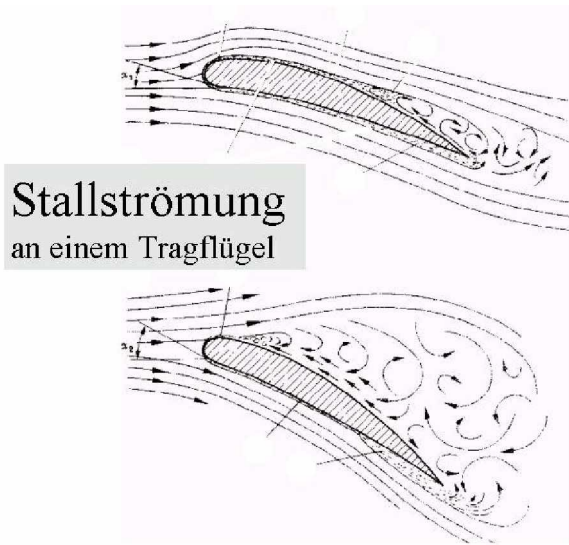


Zielvorgabe: Auftrieb über Anstellwinkel

Nach Patone und Müller

dient, wissen wir noch nicht! Genauso wenig weiß man darüber, welchen Nutzen die Gasdurchlässigkeit von Federn verbirgt. Vogelfedern sind genial. Gefieder (jedes) funktioniert nach dem Prinzip des Klettverschlusses. Strukturmechanisch ist das Vogelfieder, 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 extrem leicht und bildet räumliche Tragflächenprofile aus. Zukünftige künstliche, flexible Segeltragflächen kommen an dem System Gefieder nicht vorbei. Der Effekt jedoch, der die Ingenieure derzeit am meisten interessiert, ist die Fähigkeit von Gefieder, den plötzlichen Strömungsabriss zu unterbinden. In extremen Strömungssituationen beobachtete man das Aufstellen des Deckgefieders. Eingehende Untersuchungen von Müller und Patone von der TU in Berlin zeigten, dass das Deckgefieder ein passives Sicherheitssystem ausbildet. Werden Tragflügel in einem Winkel von etwa  $5^\circ$  Grad angeströmt, so 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 (Stall) kommt es an der Tragflächenhinterkante 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. Wenn das Unterdruckgebiet oberhalb der Tragfläche zusammenbricht, fällt auch die Auftriebsleistung des Flügels schlagartig ab. Die „aufgequollene“ Strömung generiert darüber hinaus einen deutlichen Zuwachs an Strömungswiderstand. Da dieser komplexe Effekt selten an beiden Tragflächen eines Flugzeugs 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. Wenn es zu der gefürchteten Rückströmung kommt, bricht das Unterdruckgebiet auf der Tragflächenoberseite nicht ein, denn im Stallzustand steilen sich die Federn auf und das rückströmende Fluid kriecht 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. Gefieder funktioniert auch unter Wasser. Unabhängig vom Medium, dem Umgebenden Fluid, funktionieren die artifiziellen Gefiedertaschen in Luft und im Wasser. Das verallgemeinerte

Phänomen „Ausheilen einer Strömung“ wird zu einer universalen Strategie zur Verminderung oder Vermeidung des Auftriebseinbruchs bei einer Stallströmung. In einer ersten



Dipl.-Ing. M. Dierker © INSTITUT für BIONIK & PRODUKT DESIGN THH Berlin 2002

Machbarkeitsstudie haben wir nun begonnen, künstliches Gefieder für das Ruderblatt einer Jolle zu entwerfen: Gefiederfolien.

### Totwasser-Reintegration

Die mitgeschleppte Wassermasse ist für viele technische Strömungskörper ein Problem. Fische, Meeressäuger aber auch schwimmende Otter bewegen sich mit dem ganzen Körper im Wasser fort. Voranschwimmen bedeutet Energie in die Strömung einkoppeln. Fische tun dies in sehr effizienter Weise. Der Propulsionsprozess der Fischflosse besitzt einen von Schiffspropellern unerreichten Wirkungsgrad. Für Ingenieure lag es daher nahe, künstliche Flossenantriebe für Wasserfahrzeuge zu entwerfen; bislang mit mäßigem Erfolg. Künstliche Flossenantriebe wurden und werden als Substitut einer Schiffsschraube verstanden; also als letztes Glied eines ansonsten technisch, konservativ arrangierten Antriebszenarios.

Die Sicht der modernen Bionik ist fundamentaler. Kein Betrachter bleibt von der Eleganz eines schwimmenden Hais oder dem kraftvollen, harmonischen Schwimmstil eines Delfins unberührt. Es ist eine „Ganzkörpermechanik“, der wir uns gegenübersehen und die Bewegung des Meerestieres bedient eine Schar von Funktionen. Einerseits wird mit der Propulsionsbewegung Energie in die Strömung eingekoppelt, andererseits löst das Lebewesen mit dieser integralen Ganzkörperbewegung noch ein weiteres Problem: „Wassermasse wird in die Strömung re-integriert“. Fische besitzen (fast) kein Totwasser. Ursache ist die Reduktion der turbulenten Grenzschicht und strömungsgünstige Effekte, die mit der Körperform im Zusammenhang stehen. Ursache ist aber auch der harmonische Bewegungsprozess, mit dem es dem Fisch gelingt, sich des Totwassers zu entledigen.

In der näheren Zukunft sind nun aber keine künstlichen, ganzkörperbewegten Strömungskörper zu erwarten; Segelboote werden auf absehbare Zeit starre Rümpfe haben.

**Ähnlichkeitsbetrachtungen.** 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 so absurd, wie die Frage, was Hammerhaie mit Jumbojets gemein haben könnten.

Gesamtwiderstand eines Körpers in einem Fluid (total drag)	Gleichung von Sommerfeld (zu Ehren Reynolds)																								
$D = C_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A$ <p>mit <math>q = \frac{\rho}{2} \cdot v^2</math></p> $D = C_D \cdot q \cdot A$	$\frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}} = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad [-]$																								
<table border="0"> <tr><td>D</td><td>Widerstand</td></tr> <tr><td>q</td><td>Staudruck</td></tr> <tr><td>V</td><td>Geschw.</td></tr> <tr><td>A</td><td>Fläche ...</td></tr> <tr><td colspan="2">des umströmten Körpers.</td></tr> <tr><td colspan="2">Stirnfläche bei</td></tr> <tr><td colspan="2">Widerstandskörpern,</td></tr> <tr><td colspan="2">Grundfläche bei</td></tr> <tr><td colspan="2">Auftriebskörpern</td></tr> </table>	D	Widerstand	q	Staudruck	V	Geschw.	A	Fläche ...	des umströmten Körpers.		Stirnfläche bei		Widerstandskörpern,		Grundfläche bei		Auftriebskörpern		<table border="0"> <tr><td>V [m/s]</td><td>Anströmgeschwindigkeit</td></tr> <tr><td>L [m]</td><td>charakteristische Länge</td></tr> <tr><td><math>\nu</math> [m<sup>2</sup>/s]</td><td>kinematische Zähigkeit</td></tr> </table>	V [m/s]	Anströmgeschwindigkeit	L [m]	charakteristische Länge	$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	kinematische Zähigkeit
D	Widerstand																								
q	Staudruck																								
V	Geschw.																								
A	Fläche ...																								
des umströmten Körpers.																									
Stirnfläche bei																									
Widerstandskörpern,																									
Grundfläche bei																									
Auftriebskörpern																									
V [m/s]	Anströmgeschwindigkeit																								
L [m]	charakteristische Länge																								
$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	kinematische Zähigkeit																								

© INSTITUT FÜR BIONIK & PROJEKT DESIGN | FH Berlin 2012

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

$C_D$  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 heraus, 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.

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.

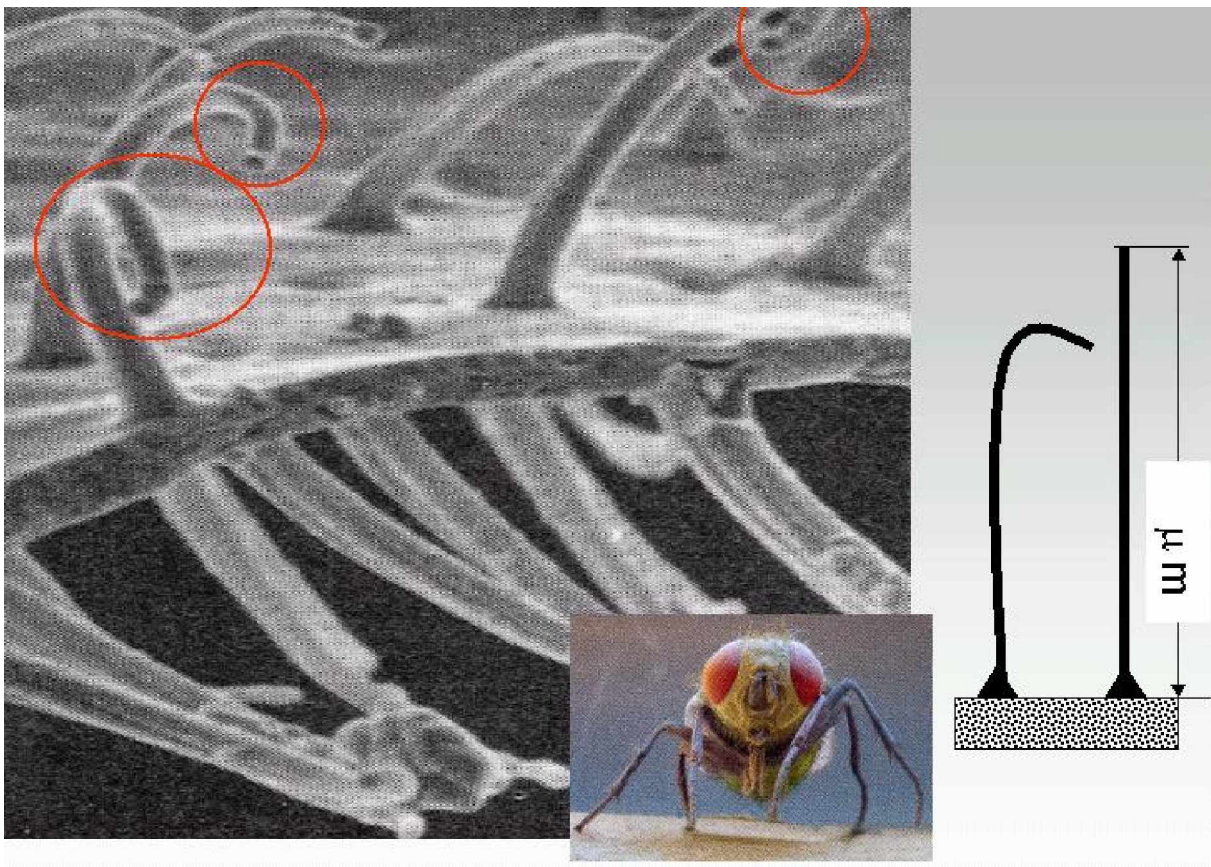
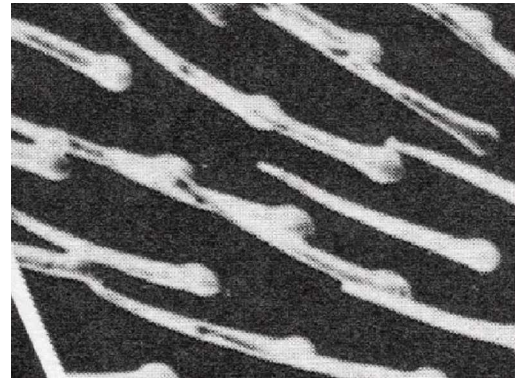
Reynoldszahl für Luft und Wasser	
Kinematische Zähigkeit der Luft bei $T = 15 [^{\circ}C]$	
$\nu_{\text{Luft}} = 1.46 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$	
Reynoldszahl $R_{\text{Luft}} = V L / \nu_{\text{Luft}} = \frac{V L}{1.46 \cdot 10^{-5}} = 68500 V L$	
Kinematische Zähigkeit des Wassers	
$\nu_{\text{Wasser}} = 1.14 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$	
Reynoldszahl $R_{\text{Wasser}} = V L / \nu_{\text{Wasser}} = \frac{V L}{1.14 \cdot 10^{-6}} = 877200 V L$	

DOI-10.1007/978-3-642-00000-0\_10  
© INSTITUT FÜR ERGONOMIE & PRODUKTDESIGN, FH Bielefeld, 2002

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  $C_D$  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.

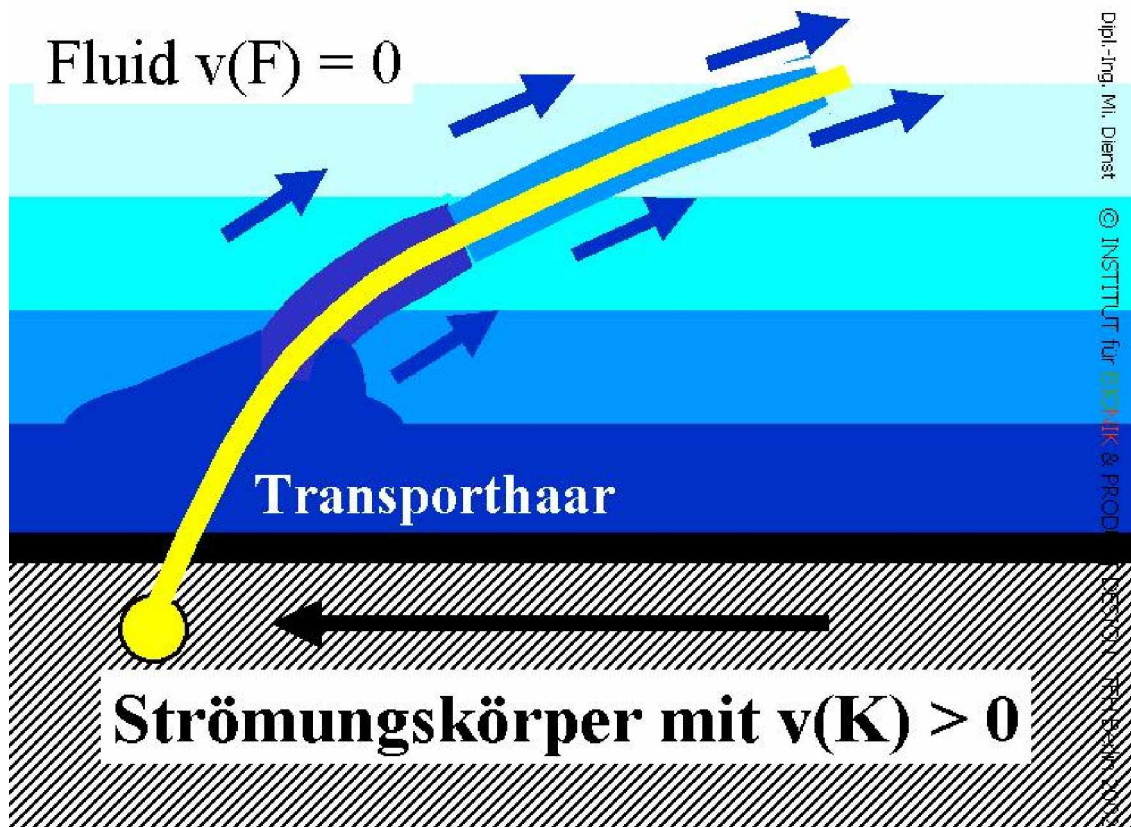


Lassen Sie mich Ihnen zum Abschluss meiner Ausführungen noch einen kurzen Einblick in die aktuelle Bionik-Forschung am Institut für Bionik & Produkt Design geben. Bei der Suche nach einem Lösungsansatz für unser Totwasser-Problem lieferte die Betrachtung von Reynolds-Zahlen für Wasser und Luft nun das interessante Resultat, dass (technische) Unterwasserteile, die in einem Geschwindigkeitsbereich von 1-10 [Kn] umströmt werden, reynoldsche Ähnlichkeit mit in Luft fliegenden Insekten haben. Für eine Stubenfliege ist das



umgebende Medium Luft so zäh wie Sirup und – was von Bedeutung ist – Insekten haben starre Körper, was sie interessant macht für den Yachtkonstrukteur.

In einem aktuellen Forschungsvorhaben untersuchen wir die Fragestellung, wie Insekten das Totwasser-Problem lösen. Von der Idee, Insekten schütteln sich frei, sind wir inzwischen abgerückt, obwohl die dominierende Frequenz - Stubenfliegen summen in einer Frequenz von etwa 200 [Hz] - strömungsakustisch interessant ist.



Nicht dynamisch, sondern statisch: **die Coanda-Vermutung**. Die Analyse biologischer Systeme ist das Kompetenzfeld der Technischen Biologie. Das Institut für Zoologie in Saarbrücken veröffentlichte vor einigen Jahren sehr interessante rastermikroskopische Aufnahmen von Schmeißfliegen. Bis heute tut man sich mit der funktionalen Interpretation der „Körperbehaarung der Insekten“ sehr schwer. Schon 1986 äußerte Nachtigall in [NTG] die Vermutung, dass die Körperhaare einen strömungsmechanischen Zweck erfüllen.

Wir gehen heute davon aus, dass die Natur einfach „denkt“. Ein sehr einfacher physikalischer Effekt ist der nach einem tschechischen Physiker (und Zeitgenosse von Ludwig Prandtl) benannte Coanda-Effekt. Dieser beschreibt die Haftfähigkeit einer Strömung an festen

Wänden. (Sie kennen diesen Effekt. Halten Sie bitte einen Bleistift in den fließenden Strahl eines Wasserhahns; die Strömung wird entlang des Bleistiftes abgelenkt, sie haftet an. In der Klimatechnik wird dieser Effekt gerne genutzt). Wir vermuten nun diesen Transportvorgang als Wirkmechanismus am Insektenkörper. Unserer Vorstellung nach könnte es sich bei den Körperhaaren der Schmeißfliege um Transporthaare handeln, die körpernahe Fluidmasse (Totwasser) der Geschwindigkeit  $v = v(\text{Fliegenkörper})$  auf die Geschwindigkeit des umgebenden, körperfernen Mediums  $v = v(\text{Fluid})$  beschleunigen; mit negativen Vorzeichen – wohlgemerkt. Dazu nutzt der Strömungskörper den Coanda-Effekt, so unsere Hypothese. Diesen Massen-Entschleunigungs-Prozess versuchen wir derzeit an einem geschlossenen Flachbettkanal zu simulieren und sichtbar zu machen.

Natürlich spekulieren wir auf eine technische Anwendung der Erkenntnisse. Vielleicht in der Verfahrenstechnik, im Apparatebau, oder im Yachtbau. Die Frage allerdings, ob sich der Skipper mit einem schlecht rasiertem Ruderblatt, oder einem behaarten Heckspiegel anfreunden wird, wage ich heute nicht zu beantworten.

Zum Schluss

Mit meinem Aufsatz habe ich den Versuch unternommen, eine erste Brücke zu schlagen von den Wesen zu den Produkten, von der Biologie zum Yachtdesign.

Die Natur ist ein pralles Füllhorn von Problemlösungen und bin davon überzeugt, dass einige dieser wunderbaren Effekte dem Yachtkonstrukteur nützlich sein können. Vieles (das Meiste) blieb ungesagt und ungefragt. In Zukunft wird es auf die Kommunikation zwischen Konstrukteuren und Naturwissenschaftlern ankommen, und es gilt Instrumente und Methoden zu entwickeln um das Wissen und das Anfragen zu transportieren. Gestatten Sie mir, in diesem Sinne zum Abschluss die Frage: wo befinden wir im Dialog?

I. Den Wissensvorrat für Bionik bilden die **natürlichen Systeme**. Wir wollen wissen, was geschieht. Gemeinsam mit Spezialisten entschlüsseln Bioniker natürliche Systeme und legen die physikalischen Effekte frei. Die Analyse ist nicht auf rezente Organismen beschränkt.

II Auf der anderen Seite sehen wir den Artefakt, das künstliche System, **das Produkt**. Hier gilt es alle Register einer modernen, integrierten Produkterstellung zu ziehen. Die Entwicklung verläuft rasant. Aber, insbesondere der „produktneutrale Ansatz“ liefert den von den Bionikern geforderten Valenzpunkt (quasi das interface) für die Transformation entschlüsselter Effekte natürlicher Systeme auf das Produkt. Das macht uns zuversichtlich.

III. Der **schöpferische Mensch**. Die Anforderungen, die u.A. der Markt an ein modernes Produkt stellt, werden sich in Zukunft verkomplizieren und quantitativ und qualitativ erhöhen. Neben der Leistung und Effizienz eines Produktes, wird zunehmend seine Verträglichkeit mit der Biosphäre nachgefragt: vor, während und nach dem Gebrauch. Handelte es sich früher bei „Funktionen“ um reine Produkteigenschaften, die man vernünftigerweise „hineinkonstruiert“, so sehen wir uns heute in der Situation des Anwalts von Qualitäten über den gesamten Lebenszyklus des Produkts. In diesem Zusammenhang wird eine starke Komponente im Profil zukünftiger Manager und Ingenieure, Rohstoffeinkäufer und Entsorger, Fertiger und Entwickler, kurz, entlang der gesamten Linie der Produkterstellung, gefordert: Neues und vielfach ungewohntes Wissen über das Wesen ökologischer Zusammenhänge und die Lösungs-Prinzipien der belebten Natur soll präsent sein und innigst verwoben mit traditionellen Ingenieurstugenden; sowohl in der Industrie als auch an den Hochschulen. Mein Fazit lautet: wir brauchen eine der Natur zugewandte **Ingenieurskunst**. Wir brauchen den poetischen, den **schöpferischen Produktentwickler**. Auch und gerade im Yachtbau. Hier sehe ich die Zukunft von

### **BIONIK ENGINEERING DESIGN.**

#### **Bibliographie**

- [AIAA] Bechert, D.W. (1997) Biological Surfaces and their Technological Application. 28<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conference
- [ALT] Altschuller, G.S., 1984, Erfinden: Wege zur Lösung technischer Probleme, Berlin: VEB Verlag Technik
- [BAP] Bappert, R. u.A. (1999) Bionik, Zukunftstechnik lernt von der Natur. SiemensForum München/Berlin und Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim
- [BEI] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen. Springer Verlag, Heidelberg, New York, 1997
- [CRO] Cross, N., 1989, Engineering Design Methods, Chichester: Wiley
- [EHR] Ehrlenspiel, K., Integrierte Produktentwicklung - Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. Hanser Verlag München, 1995, 686 S. [Signatur 8 D 1584]
- [EIG] Eigen, M. (1987). Stufen zum Leben, Pieper München, Zürich

- [FRE] French, M. J., 1971, Engineering Design: the conceptual stage, London: Heinemann Educational.
- [GEC] Gerock, W. (1988). Ordnung und Chaos, S. Hirzel, Stuttgart
- [GRE] Greguss, F. (1985) Patente der Natur, Verlag Neues Leben, Berlin.
- [HEY] Heynert, H. (1976) Grundlagen der Bionik, VEB Verlag, Berlin.
- [HUB] Hubka, V., 1984, Theorie Technischer Systeme, Berlin: Springer Verlag.
- [KIN] Kinnebrock, W. (1992). Neuronale Netze, Oldenbourg Verlag München, Wien
- [KOL] Koller, R., 1976, Konstruktionslehre für die Maschinenbau, Berlin: Springer Verlag.
- [KRA] Kratzer, K. (1990). Neuronale Netze, Carl Hanser Verlag München
- [KRE] Coineau, Y., Kresling, B. (1987) Erfindungen der Natur, Tessloff Verlag
- [KUL] Kull, U. (1977). Evolution, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- [KÜP] Küppers, B.O. (1987). Ordnung aus dem Chaos, Pieper München, Zürich
- [MAZ] Mazetti, A. (1992). Praktische Einführung in Neuronale Netzwerke, Heise, Hannover
- [NTG] Nachtigall, W
- [PEN] Penrose, R. (1991). Computerdenken, Spektrum der Wiss. Verlagsges. Heidelberg
- [PÖP] Pöppe, Ch. (1998) Das Überschallschiff. in Spektrum der Wissenschaft 08.98
- [RE] Rechenberg, I. (1973). Evolutionsstrategie, Frommann Verlag, Stuttgart
- [ROD] Rodenacker, W.G.: Methodisches Konstruieren - Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele.3.Aufl., Springer Verlag Heidelberg, New York, 1981
- [SÖB] Schöneburg, E., (1990). Neuronale Netzwerke, Markt & Technik Verlag München
- [VDI2221] Verein Deutscher Ingenieure, 1985, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-Richtlinie 2221, Düsseldorf: VDI Verlag.
- [VDI2222] Verein Deutscher Ingenieure, 1977, Konstruktionsmethodik: Konzipieren technischer Produkte (Blatt 1), Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen (Blatt 2), VDI-Richtlinie 2222, Düsseldorf: VDI Verlag.
- [WUN] Wunderlich, K, Gloede, W (1977) Natur als Konstrukteur. Edition Leipzig