

# Natur als Vorbild für ökologische Technik?!

Dipl-**Inform.** Frank Kursawe

Universität Dortmund  
Fachbereich Informatik  
Lehrstuhl für Systemanalyse  
44221 Dortmund

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Natur als Vorbild für technische Problemlösungen?</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Bionik</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Erfolgreiche Produkte / Beispiele</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Warum nur vereinzelte Bionik-Anwendungen? — Ein Beispiel</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Schlußbemerkungen</b>	<b>10</b>

### Zusammenfassung

Diese Arbeit gibt einen Überblick über die noch junge Disziplin der *Bionik*. Neben Teilgebieten und Anwendungsbeispielen wird ferner versucht, die Frage zu beantworten, welchen Beitrag diese Wissenschaft zu einer ökologischen Technik liefern kann.

# 1 Natur als Vorbild für technische Problemlösungen?

Zunächst stellt sich die Frage, warum man auf der Suche nach der Lösung technischer Probleme überhaupt nach natürlichen Vorbildern Ausschau halten sollte. Viele Menschen sehen in der uns umgebenden Welt eine gigantische Würfelmaschine, die es nur deshalb zu der heute beobachtbaren Vielfalt an Lebewesen gebracht hat, weil sie auf einer riesigen Oberfläche etwa 4 Milliarden Jahre Zeit hatte. Kann dieses „Evolutionsmodell“ stimmen? Menschliche Keimzellen beherbergen etwa 50 000 Gene, von denen jedes im Mittel aus 300 Nukleotidbasentriplets besteht. Unter Berücksichtigung der Redundanz des genetischen Codes, der statt der 64 möglichen nur 20 verschiedene Aminosäuren codiert, verbleiben noch  $20^{300 \cdot 50000} \approx 10^{19500000}$  mögliche Genotyp-Kombinationen. Geht man von einer konstanten Population von 5 Milliarden Menschen aus, so wären  $10^{19499990}$  Generationen nötig, um jede Möglichkeit einmal auszuprobieren. Zur Orientierung: Angenommen, jedes der etwa  $10^{80}$  Elementarteilchen im Universum wäre in der Lage gewesen, seit dem Urknall pro Elementarzeitschritt (z. B. Picosekunden,  $10^{-12} s$ ) einen solchen Genotyp zu erzeugen und zu bewerten, dann hätten erst  $10^{120}$  Möglichkeiten durchgespielt werden können. Die Würfel-„Evolutionstheorie“ kann also die Existenz des Menschen nicht erklären oder auch nur halbwegs wahrscheinlich erscheinen lassen. Also müssen doch die zielgerichteten Ideen eines erfahrenen Ingenieurs schneller zu einer optimalen Lösung führen als zielloses Herumprobieren.

Was aber, wenn die intuitive Idee von Evolution falsch ist, wenn das der Natur inhärente Zufallselement nur als blindes Würfeln *mißverstanden* wird und sie eher einem kumulativen, hochgradig parallelen Siebprozeß ähnelt? Was, wenn Formen, Strukturen und auch die Prozesse selbst, die zu ihrer Entstehung geführt haben, nicht nur eine (halbwegs) gute Anpassung darstellen, sondern sogar *optimal* sind, wie dies in einigen Fällen sogar nachgewiesen werden konnte [13]? So z. B. bei Blutgefäßverzweigungen, in denen das Verhältnis der Gefäßdurchmesser vor ( $D_i$ ) und nach ( $D_{i+1}$ ) einer Verzweigung von der der Aorta über große Arterien, Arterienäste und -zweige bis hin zu den Kapillaren einem Gesetz gehorcht ( $D_{i+1}/D_i = 2^{-1/3}$ ), das den Druckabfall minimiert, wie man auch analytisch nachrechnen kann.

Auf weitere Beispiele sei an dieser Stelle verzichtet. In [5, 8, 13, 18] sowie den dort wiederum aufgeführten Literaturstellen finden sich viele weitere Beispiele.

## 2 Bionik

Der Begriff *bionics* wurde erstmals 1960 von J. E. Steele erwähnt. Er stellte sich sinngemäß darunter die Übernahme von „Erfindungen der Natur“ für die Technik des Menschen vor. Genau diese Idee verfolgte bereits Leonardo da Vinci. Ein vielleicht besserer, weil realitätsnäherer Definitionsversuch stammt von W. Nachtigall: „Im richtigen Sinne Bionik betreiben bedeutet, die Natur zu durchforsten nach Anregungen für ein eigenständig-technologisches Weiterarbeiten“ [9]. Die Natur kann bei gegebenen Problemen also immer nur Anregungen liefern, niemals schon die fertigen Blaupausen!

Nachtigall unterscheidet folgende Teilgebiete der Bionik [9], die in Kapitel 3 dann anhand von Beispielen näher erklärt werden:

- Historische Bionik
- Strukturbionik
- Baubionik
- Klimabionik
- Konstruktionsbionik
- Bewegungsbionik
- Gerätebionik
- Sensorbionik
- Anthropobionik
- Neurobionik
- Verfahrensbionik
- Evolutionsbionik

Trotz dieser Fülle an thematischen Möglichkeiten gibt es in Deutschland nur zwei Bionik-Arbeitsgruppen, die sich auch um die Ausbildung von Studierenden kümmern — eine an der TU Berlin um I. Rechenberg, die andere an der Universität des Saarlandes um W. Nachtigall.

### 3 Erfolgreiche Produkte / Beispiele

Die folgende Unterteilung entspricht weitgehend jener aus [9].

Unter dem Begriff *Historische Bionik* werden alle jene Ideen der Menschen bis zum 19. Jahrhundert zusammengefaßt, die sich als Versuche einer Übertragung Natur – Technik interpretieren lassen, so insbesondere die vielen Nachahmungsversuche des Vogelfluges mittels Schlagflügeln.

Das Teilgebiet der *Strukturbionik* beschäftigt sich mit biologischen Strukturelementen. Die Imitation von Diatomeenschalen (Kieselalgen) führt zu leichten Halbkugelkonstruktionen, die z. B. als Schwimmbadabdeckungen genutzt werden.

In der *Baubionik* kann man sich in vielen Bereichen auf die Natur zurückbesinnen. Angefangen mit traditionellen Baumaterialien (Ton), über Leichtbaukonstruktionen (siehe oben), Seilkonstrukte (Spinnennetze), ideale Flächenbedeckungen (Blattüberlagerungen), bis hin zu einer optimalen Flächennutzung (Wabenprinzip) finden sich hier viele Möglichkeiten.

Die *Klimabionik* beschäftigt sich mit (passiver) Lüftung, Kühlung und Heizung in Bauten und ist daher nicht völlig von der Baubionik zu trennen. Durch geschickte Luftumwälzung (wie z. B. in Präriehund- bzw. Tierbauten), Dachformen und die Ausrichtung zur Sonne

lassen sich bis zu 80% der Energie zur sommerlichen Kühlung und von 40 bis 60% der Energie zur Heizung im Winter sparen.

Die *Konstruktionsbionik* versucht, Elemente und Mechanismen der Natur herauszuarbeiten, die zu integrierten Lösungen geführt haben, bei denen das einzelne Element oft mehr als eine Aufgabe übernimmt. Das bekannteste Beispiel aus diesem Bereich dürften Klettverschlüsse sein, die heute an vielen Produkten zu finden sind. Hat man das Prinzip des Baum- und Knochenwachstums einmal verstanden, so lassen sich dann nach dem gleichen Schema auch optimale technische Bauteile unter Last „züchten“, indem man Material nur dort beläßt oder anlagert, wo die auftretenden Kräfte dies auch wirklich rechtfertigen. Umgekehrt wird dort Material weggenommen, wo es nicht (mehr) benötigt wird [7]. Auf diese Weise ist es gelungen, eine orthopädische Schraube bis zu 105-fach belastbarer zu machen oder die Lebensdauer einer zylindrischen Welle auf das 40-fache zu steigern.

Die *Bewegungsbionik* studiert das Laufen, Schwimmen und Fliegen in der Natur, um aus den Anpassungen der Bewegungsorgane an das jeweilige Medium Fragen der Strömungsanpassung, des Antriebs und der Effizienz von Organen zu beantworten. Klebt man eine künstliche Haifischhaut auf Rumpf und Tragflächen von Flugzeugen, so lassen sich durch die Widerstandsreduktion Kerosineinsparungen von 1 bis 3% (real) erzielen, ohne an der Flugzeugkonstruktion etwas ändern zu müssen. Welche Effizienzsteigerungen wären wohl möglich, wenn man schon bei der Konstruktion in der Natur nach Entwürfen sucht? Wie in Kapitel 4 ausführlicher dargestellt wird, sind entweder große (Wale) oder schnell schwimmende Meereslebewesen (Thunfische, Schwertfische) für Flugzeugkonstrukteure interessant — oder sollten es wenigstens sein.

Einige Fische können einen Schleim ins Wasser abgeben, um kurzfristig ihren Strömungswiderstand um 65% zu vermindern und durch die höhere Geschwindigkeit ihren Freßfeinden entkommen zu können. Werden ähnliche synthetische Schleime dem Löschwasser der Feuerwehr beigemischt, kommt es zu einer Spritzweitenerhöhung bei gleichem Pumpendruck [10].

Die Untersuchung der aufgespreizten Flügelen großer (Raub-) Vögel hat zum Bau des „Windkonzentrators“ BERWIAN (Berliner Windkraft-Anlage) geführt, der eine kleine Turbine in schnelle Rotation versetzt und so die im Wind enthaltene Energie besser nutzen kann als eine Anlage wie der GROWIAN (Große Windenergie-Anlage) mit mehreren Tonnen bewegter Masse, von der böse Zungen behaupten, sie sei nur gebaut worden, um zu demonstrieren, daß die Windenergie keine echte Alternative darstellt [4].

Auch im Bereich der Bootsantriebe gibt es Untersuchungen, ob Schiffe nicht effizienter über eine Art Schwanzflosse angetrieben werden können. Ein Patent auf einen Flossenantrieb wurde bereits 1903 erteilt. Dieser Antrieb wies bereits den vierfachen Schub gegenüber einer konventionellen Schiffsschraube auf, so daß er insbesondere für Schlepper geeignet wäre. Jüngere Arbeiten auf diesem Gebiet legen die Vermutung nahe, daß ein solcher Antrieb für langsame Schiffe erheblich effizienter ist als die heute verwendeten Schraubenantriebe [1]. Zusätzlich könnte ein Flossenantrieb die Wellenenergie zum Vortrieb nutzen, dafür besteht auf der anderen Seite keine Möglichkeit zur Schubumkehr. Ferner darf der Antrieb dann auch nicht mehr unabhängig von der Konstruktion des

Rumpfes betrachtet werden, sondern beide müssen als Einheit betrachtet und konstruiert werden.

Obwohl schon seit über hundert Jahren im Prinzip verstanden, ist es erst kürzlich gelungen, die Flugtechnik des Albatros', mit der er über 5000 km pro Woche durch Ausnutzung des Windgradienten fast ohne einen Flügelschlag zurücklegen kann, per Software nachzubilden und für Segelflugzeuge verfügbar zu machen [2].

Eng verbunden mit der Struktur- und Konstruktionsbionik ist die *Gerätebionik*, die nach verwendbaren Gesamtkonstruktionen in der Natur sucht. So führte die Imitation horizontal schwingender Schwanzflossen zu einer Flossenpumpe, die unempfindlich gegen Luft-einschlüsse oder zähflüssige Stoffe ist.

Die *Sensorbionik* sucht in der Natur nach Möglichkeiten, Umweltreize physikalischer und chemischer Art möglichst in Echtzeit zu messen. So basieren die heute erhältlichen elektronischen Zollstöcke auf der Nachahmung der Ultraschall-Beuteortung von Fledermäusen, die aus der Laufzeitverschiebung ihrer Signal-Echos Beute sowie Hindernisse lokalisieren können.

Das Gebiet der *Anthropobionik* beschäftigt sich mit dem weiten Feld der Mensch-Maschine-Interaktion. Das Ziel besteht darin, die Maschinenschnittstellen den sensorischen Eigenschaften von Menschen anzupassen. In dieses Gebiet fallen ferner einige Aspekte aus der Robotik. So kommt man z. B. zu einer ruckfreien Roboterbewegung, indem man pneumatisch angetriebene Stellglieder verwendet, die der Funktionsweise von Muskeln nachempfunden sind.

Unter *Neurobionik* faßt man diejenige Informationsverarbeitung zusammen, die intelligente Verschaltungen verwendet. In den Gehirnen vieler Lebewesen gibt es einen Mechanismus („laterale Inhibition“), der die Kontraste an Hell-Dunkel-Grenzen verstärkt. Diaprojektoren, die selbständig fokussieren, imitieren z. B. dieses biologische Prinzip [11].

Um die Erforschung chemisch-physikalischer Verfahren kümmert sich die *Verfahrensbionik*. Besonders interessant sind heutzutage die Rezyklierbarkeit aller verwendeten Stoffe sowie zunehmend die Photosynthese als Einstieg in die Wasserstofftechnologie. Warum erst die Energie des Sonnenlichtes in Strom umwandeln, der dann mangels effizienter Speichermöglichkeiten Wasser in seine Bestandteile Sauer- und Wasserstoff zerlegt? Solche Anlagen dürften prinzipiell kaum über einen Wirkungsgrad von 30% hinauskommen. Sinnvoller erscheint auch hier, direkt an der Photosynthese zu orientieren, einem Verfahren, das seit einigen Milliarden Jahren auf der Erde verwendet und optimiert wird. Oder man sucht wie z. B. Rechenberg [12] nach Bakterien, die unter Sonneneinstrahlung direkt Wasserstoff produzieren.

Während bei den bisher erwähnten Teildisziplinen die Erforschung und Übertragung von Verfahren und „Produkten“ aus der Natur im Vordergrund steht, beschäftigt sich die *Evolutionbionik* mit jenen Prinzipien, die zu unserer heutigen Welt geführt haben. Schon die Nachahmung (Modellierung) von einfachen Prinzipien der biologischen Evolution (Genotyp-Phänotyp-Unterscheidung, Mutation, Rekombination, Selektion) hat unabhängig voneinander auf beiden Seiten des Atlantiks zu leistungsfähigen Optimierver-

fahren geführt. Der Mutationsoperator stellt den stochastischen „Motor“ dar, ist allerdings, wie in Kapitel 1 erklärt, kein einfacher Würfel, sondern ein Mechanismus, der sich nach dem Motto „Der Apfel fällt nicht weit vom Stamm“ richtet, also kleine Änderungen wahrscheinlicher eintreten läßt als große Sprünge. Die bekanntesten Vertreter dieser Algorithmen — Genetische Algorithmen (U.S.A.) [6] und Evolutionsstrategien [11, 14] — werden heute unter dem Oberbegriff *Evolutionäre Algorithmen* zusammengefaßt. Natürlich gibt es für spezielle Probleme deterministische, mathematisch abgesicherte Verfahren, die schneller zum Ziel kommen. Die Stärke der naturanalogen Verfahren liegt dagegen in ihrer Universalität und Robustheit, also darin, auch dann noch gute, wenn nicht sogar die global optimale Lösung zu finden, wenn alle anderen Algorithmen schon aufgegeben haben.

Obwohl es Evolutionsstrategien schon seit Beginn der 60er Jahre gibt, haben sie sich erst in jüngerer Zeit durchgesetzt. Neben der höheren Rechnerleistung spielten dabei u.a. folgende Gründe eine Rolle:

- Evolution verläuft für uns nicht direkt beobachtbar. Oft werden zwar die von der Natur hervorgebrachten „Produkte“ bewundert, nicht aber die Mechanismen, die zu ihrer Entstehung geführt haben und die ihrerseits auch der Evolution unterlagen.
- Ein Mutations–Selektions–Schema erscheint verschwenderisch gegenüber einer spezialisierten deterministischen Strategie. Die mathematisch–deduktive Herangehensweise dominiert seit Newton die experimentelle.

Die Leistungsfähigkeit von Evolutionsstrategien als Optimierverfahren kann z. B. in [16] nachgelesen werden. An dieser Stelle soll eine andere Eigenschaft dieser Algorithmen im Vordergrund stehen. Durch ihre Orientierung an Prinzipien der biologischen Evolution kann man sie auch als (einfaches) Modell interpretieren und in der künstlichen Umwelt eines Rechners experimentell untersuchen, unter welchen Bedingungen diese Verfahren funktionieren. Oder anders formuliert: Unter welchen Bedingungen kann ein „internes Modell“ der Umgebung erlernt werden bzw. Selbstadaptation stattfinden? Schwefel [15] gibt dafür folgende Bedingungen an:

- Vergessen–Können ist wichtig für Lernen. Die überall beobachtbare endliche Lebensdauer stellt also kein Versagen der Natur dar, sondern einen notwendigen Mechanismus, der einer Art die kontinuierliche Anpassung an eine sich ihrerseits verändernde Umwelt erst ermöglicht.
- „Sanfte“ Selektion funktioniert besser als „harte“. Denn nur so kann die in einer Population vorhandene Diversität erhalten werden. Nicht ein „Bester“, sofern man das in der Natur überhaupt eindeutig feststellen kann, trägt allein das gesammelte genetische „Wissen“ der Art in sich, sondern eine Gruppe von „guten“ Individuen sorgt für den Erhalt der Anpassungsfähigkeit und somit für den Fortbestand der Art.
- Eine (sexuelle) Rekombination des verteilt gespeicherten Wissens erweist sich als notwendig, um die verteilt gespeicherte Information (Diversität) einer Population

auch zu nutzen. Diese Art lokaler Kooperation — zwei Eltern stellen zur Produktion eines Nachkommen ihr jeweiliges genetisches Wissen zur Verfügung — führt bei einfachen Problemen auf dem Rechner „nur“ zu einer erheblichen Geschwindigkeitssteigerung bis zum Auffinden der Lösung, bei schwierigen Problemen wird durch diesen Operator die Lösung überhaupt erst ermöglicht.

Die natürliche Intelligenz steckt also im *kollektiv* erworbenen und verteilt gespeicherten Wissen. Man könnte auch sagen, daß eine gewisse Anzahl kooperierender „dummer“ Individuen gemeinsam mehr leistet als die gleiche Anzahl allein arbeitender „Spezialisten“.

Auch wenn obige Schlußfolgerungen in einer künstlichen (Rechner-)Welt abgeleitet wurden, sei doch folgender Hinweis erlaubt: Die Idee einer *lean production* sollte zu flacheren Hierarchien sowie der Integration von Aufgaben und Verantwortung führen. Betrachtet man die deutsche Umsetzung dieser Idee, die häufig nur einen Deckmantel für Stellenabbau darstellt, unter diesem Gesichtspunkt, so wird ein „schlankes“ Unternehmen durch eine Reduzierung der Personalkosten kurzfristig seine Effizienz erhöhen, aber andererseits seine langfristige Anpassungsfähigkeit gefährden, die entscheidend von der Verfügbarkeit unspezifischer Ressourcen abhängt. Hinter dem Begriff der *requisite variety* aus der Kybernetik verbirgt sich die Forderung, daß die interne Diversität jedes Systems der Komplexität seiner Umwelt entsprechen muß, um deren Veränderungen adäquat verarbeiten zu können.

## 4 Warum nur vereinzelt Bionik–Anwendungen? — Ein Beispiel

Die detaillierte Unterteilung und die zahlreichen Beispiele in Kapitel 3 können den Eindruck entstehen lassen, die Bionik sei bereits eine etablierte Disziplin. Dies mag auch darin begründet liegen, daß in Veröffentlichungen vorwiegend über Erfolge berichtet wird und nicht von der Mühe, die es gekostet hat, in der Tradition ihrer jeweiligen Disziplin stehende Ingenieure zu überzeugen, einen fremdartig anmutenden Entwurf zumindest einmal durchzurechnen oder durchzumessen, um einen Vergleich anstellen zu können.

Zur Illustration eines gescheiterten Versuchs folgt nun ein Beispiel aus der Flugzeugindustrie [17]. Der Entwurf eines neuen Flugzeugs ist immer mit einem Risiko verbunden, da man einen Prototyp nicht in Originalgröße, d. h. unter realistischen aerodynamischen Bedingungen, im Windkanal testen kann. So gesehen ist es verständlich, daß man sich stets an etablierten Entwürfen orientiert. Genau diese Vorgehensweise wurde auch beim Entwurf der *Fokker 100* gewählt. Allerdings stellte sich nach den ersten Probeflügen heraus, daß dieses neue Flugzeug sich etwa auf dem Niveau einer DC9–10 aus den frühen 60er Jahren bewegt, wenn man den Treibstoffverbrauch als Maßstab heranzieht (genauer: den Treibstoffverbrauch pro Passagierkilometer). Bei Fokker hatte nun jemand die Idee, den Biologen John Videler untersuchen zu lassen, welche Möglichkeiten die Natur anbietet, um ähnliche Mißerfolge zukünftig zu vermeiden. Was lag näher, als den Vogelflug zu untersuchen?

Abbildung 1 vergleicht über das dimensionslose und faire Maß der Transportkosten einige flugfähige Tiere mit technischen Flugmaschinen. Eine Regression über die Tierdaten und Extrapolation dieser Geraden zeigt, daß die Natur etwa sechsmal effizienter fliegt als die Technik. Warum ist das so, und läßt sich die Antwort im Flugzeugbau verwenden?

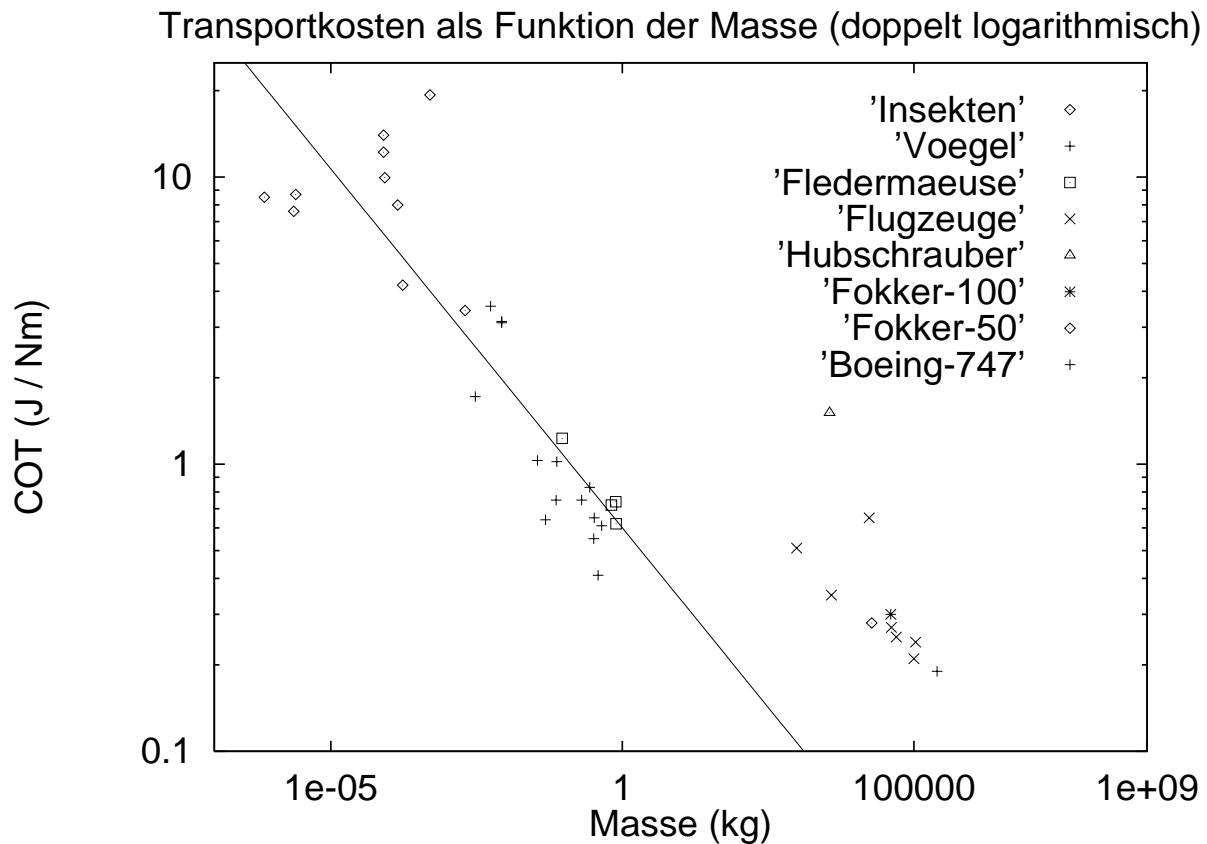
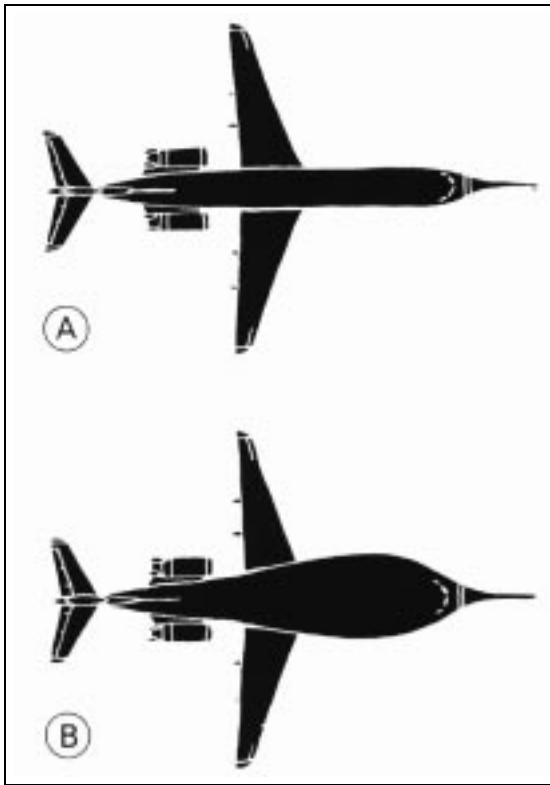


Abbildung 1: Dimensionslose Transportkosten verschiedener Lebewesen sowie technischer Flugobjekte (nach [17])

Kleine Vögel bis zur Größe eines Grünspechtes reduzieren durch eine sinusförmige Wellenbewegung ihren Energieeinsatz beim Fliegen um ein Drittel. Bei ihrem Flug schlagen sie während der Abwärtsbewegung mit den Flügeln, um dann den Schwung mit angelegten Flügeln in eine leichte Aufwärtsbewegung umzusetzen. Andere Vögel verhalten sich umgekehrt: Sie nutzen ihren Flügelschlag zu einer kurzen Aufstiegsphase, der sich dann eine längere Gleitphase mit ausgebreiteten Schwingen anschließt. Viele Raubvögel gewinnen auf der Suche nach Beutetieren in thermischen Luftablösungen ohne eigene Anstrengung so viel an Höhe, daß sie abwärts zur nächsten Thermikblase segeln können. Zur Segeltechnik des Albatros' möge das in Kapitel 3 Gesagte genügen. Eine genauere Erklärung findet man z. B. in [5]. Diese und weitere Energiespar-Strategien aus der Vogelwelt haben eines gemeinsam: Sie sind, wenn überhaupt, nur unter großen Komforteinbußen in der Passagierluftfahrt einsetzbar. Hat also die Biologie den Flugzeugkonstrukteuren nichts zu sagen?



Bei dem Versuch, diese Frage zu beantworten, ist John Videler aufgefallen, daß aufgrund der großen Gewichts- und Geschwindigkeitsunterschiede ein Versuch, Prinzipien des Vogelfluges auf Flugzeuge zu übertragen, in eine Sackgasse führen mußte, weil die Art der Umströmung sich u.a. mit zunehmender Masse und Geschwindigkeit drastisch ändert. Eine andere dimensionslose Größe, die Reynoldszahl, hilft an dieser Stelle aber weiter. Sie bewertet unter Berücksichtigung von Größe und Geschwindigkeit des Objektes die relative Bedeutung von Trägheits- gegenüber Viskositätskräften: Derselbe Lebensraum (Wasser) stellt sich aus der Perspektive eines mikroskopisch kleinen Pantoffeltierchens wie zäher Honig dar, während bei einem Wal die Trägheitskräfte überwiegen. Tiere fliegen im Reynoldszahlbereich zwischen 200 (Insekten) und  $10^6$  (große und schnelle Vögel), Passagierflugzeuge bewegen sich dagegen in Bereichen jenseits von  $10^8$  — ebenso wie schnelle, große Meeresbewohner. Da Fische die meiste Zeit ihres Lebens schwimmen, darf man annehmen, daß sie dies halbwegs effizient tun.



**Abbildung 2:** Herkömmlicher (A) und optimierter (B) Flugzeugrumpf (nach [17])

die Passagierkapazität auf 150% bei gleichen Transportkosten. Greguss prophezeit sogar eine noch stärkere Kapazitätserhöhung, allerdings ohne genauere Begründung [5].

Ein vier Meter langer Schwertfisch bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von mehr als  $100\text{kmh}^{-1}$  in einem Reynoldszahlbereich größer als  $10^8$ . Körper mit einem Verhältnis von  $\text{Durchmesser}_{\text{max}}/\text{Länge}$  im Bereich von 0,18 bis 0,28 liegen innerhalb eines 10%-Bereiches um das theoretisch berechenbare Optimum. Schwertfische weisen hier einen Wert von 0,24 auf, während Flugzeugrumpfe mit einem Wert von 0,1 erheblich zu „schlank“ erscheinen. John Videler's Vorschlag lautete demzufolge, Flugzeugrumpfe in Anlehnung an die Gestalt von Schwertfischen zu konstruieren, d. h. mit einem  $d/l$ -Wert zwischen 0,22 und 0,24, einem aufgerauten, relativ langen Staurohr und einer konkaven Wölbung am Bug, die dann in eine langgestreckte, tropfenförmige Rumpfform mündet, deren größter Durchmesser schon sehr weit vorn angenommen wird (siehe Abb. 2). Diese Gestalt brächte die Passagierkapazität auf 150% bei gleichen Transportkosten. Greguss prophezeit sogar eine noch stärkere Kapazitätserhöhung, allerdings ohne genauere Begründung [5].

Fokker weigerte sich übrigens, den Bau eines entsprechenden maßstabtreuen Modells für Windkanalversuche zu finanzieren und beendete die Kooperation.

## 5 Schlußbemerkungen

Als inhärent interdisziplinäre Wissenschaft hat die Bionik natürlich mit der zunehmenden Spezialisierung in der heutigen Wissenschaft zu kämpfen. Zerbst wirft die Frage auf, „wie eine solche interdisziplinäre Forschung vorstrukturiert und systematisiert werden kann, damit sie noch effektiver zu Ergebnissen kommt, als dies bei zufälligen Interessenverknüpfungen der bislang in diesem Felde tätigen Forscher der Fall ist“ [18]. Biologen sind vorwiegend an Analysen interessiert, Techniker haben die Konstruktion (Synthese) als Ziel.

Natur und Technik sind nur auf den ersten, flüchtigen Blick Gegensätze. Schließlich unterliegen alle Lebewesen und die später dazugekommenen technischen Konstrukte denselben Naturgesetzen. Ferner gibt es nur eine relativ kleine Menge an chemischen Elementen, die in nennenswerter Menge, aber natürlich begrenzt, verfügbar ist. Der Mensch hat die Vielfalt an Substanzen beträchtlich erweitert, ohne dabei allerdings auf kreislauffähige Produkte zu achten, die nach ihrer Verwendung nicht auf Deponien endgelagert und somit dem natürlichen Kreislauf entzogen werden müssen, sondern in Stoffe zerfallen, die unter Zufuhr von Energie erneut verarbeitet werden können. In dieser Hinsicht kann die Bionik sicherlich einen wichtigen Beitrag leisten.

Aber jenseits der Frage, ob und ggf. wie man die gegenwärtigen Wirtschaftsprozesse mit Hilfe der Bionik ressourcenschonender und effizienter noch möglichst lange bei steigendem Wohlstand fortsetzen kann, bleibt natürlich offen, ob der Beitrag der Bionik zu einer ökologischen Technik nicht vielmehr darin bestehen sollte, echte Kreislaufprozesse vorzuschlagen und so dem Ziel eines *sustainable development* näher zu kommen. Auf der Basis von  $C O_2$ -neutralen Werkstoffen wie z. B. Holz kann man nur leider kein (Welt-)Wirtschaftssystem aufbauen, das die heutige Bevölkerungsmenge ernährt. Wie in Kapitel 4 dargelegt, ist schon der bescheidenere Anspruch der effizienteren Ressourcennutzung schwer genug durchzusetzen. Die eigentliche Frage, ob Kurzstreckenflugzeuge überhaupt sinnvoll sind, stellt sich gar nicht erst.

Vielleicht ist die Entwicklung der menschlichen Zivilisation schon so weit auf einer falschen Bahn fortgeschritten, daß die Bionik nur noch den Aufprall auf die Mauer etwas abmildern oder verzögern kann. Vielleicht stellte ein solcher Aufprall auch eine Notbremse der Natur dar, mit der sie ggf. Irrtümer wie die „Erfindung“ des Menschen korrigieren kann.

Vielleicht wird aber auch die Nachhaltigkeitsdiskussion zu sehr auf Ressourcen- und Schadstoffprobleme reduziert und dabei die Rolle des Produktivfaktors Humankapital, d. h. des Wissens vernachlässigt. Denn im *stofflich* geschlossenen System Erde gibt es kein Rohstoffproblem, sondern „nur“ das Problem, verbrauchte Stoffe mit Hilfe von Energie wieder in einen nutzbaren Ordnungszustand zu bringen. Dies geschieht allerdings zu 88% aus dissipierenden fossilen Energieträgern. Die Sonne liefert Tag für Tag etwa 100-mal mehr Energie als auf der Welt verbraucht wird, nutzbar in Form von Wind-, Wellen-, Biomasse- oder direkten Solarkraftwerken. In diesem Sinne sollte das Erbe für die nächsten Generationen einerseits aus möglichst wenigen Irreversibilitäten (ausgestor-

bene Arten, zerstörte Lebensräume, ...) und andererseits aus Wissen bestehen. Ein nur aus Rohstoffen bestehendes Erbe könnte sich dagegen als nutzlos erweisen [3].

## Literatur

- [1] R. BLICKHAN, *Bionische Perspektiven der aquatischen und terrestrischen Lokomotion*, in Nachtigall [8], S. 135–154.
- [2] B. FRAUENDIENST, *Konkurrenz für den Albatros*, Bild der Wissenschaft, Nov. 1994, S. 120.
- [3] B. FRITSCH UND W. SEIFRITZ, *Nachhaltigkeit: Wissenschaftliches Konzept oder Schlagwort?*, Briefwechsel mit B. Fritsch, 1994.
- [4] W. GÖPFERT, *Bionik – Lernen von der Natur*, Bild der Wissenschaft, Apr. 1988, S. 50–58.
- [5] F. GREGUSS, *Patente der Natur*, Quelle & Meyer, Heidelberg, 1988.
- [6] J. H. HOLLAND, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [7] C. MATTHECK, *Baueile wachsen wie Bäume*, in Nachtigall [8], S. 93–100.
- [8] W. NACHTIGALL (Hrsg.), *BIONA-report 8*, Stuttgart, 1992, Gustav Fischer.
- [9] ———, *Technische Biologie und Bionik – was ist das?*, in Technische Biologie und Bionik 1, 1. Bionik-Kongress, Wiesbaden, 11.–13.6.1992 [8], S. 1–12.
- [10] W. NACHTIGALL UND T. DEVENDRAN, *Wo sich Biologie und Physik begegnen*, Bild der Wissenschaft, Okt. 1981, S. 164–173.
- [11] I. RECHENBERG, *Evolutionstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973.
- [12] ———, *Photobiologische Wasserstoffproduktion in der Sahara*, Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1994.
- [13] R. ROSEN, *Optimality Principles in Biology*, Butterworths, London, 1967.
- [14] H.-P. SCHWEFEL, *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionstrategie*, Birkhäuser, Basel, 1977.
- [15] ———, *Collective Phenomena in Evolutionary Systems*, in 31<sup>st</sup> Annual Meeting of the International Society for General System Research, Budapest, 1987, S. 1025–1033.
- [16] ———, *Evolution and Optimum Seeking*, Wiley & Sons, Chichester, 1995.
- [17] J. VIDELER, *Comparing the cost of flight: Aircraft designers can still learn from nature*, in Nachtigall [8], S. 53–72.
- [18] E. W. ZERBST, *Bionik*, Teubner, Stuttgart, 1987.