

5 Zu Lande, zu Wasser und in der Luft	61
5.1 Der molekulare Motor	62
5.2 Terrestrische Lokomotion	64
5.3 Aquatische Lokomotion	66
5.4 Der richtige Schwanzschlag	68
5.5 Highspeed unter Wasser	70
5.6 In der Luft	74
6 Das sensitive Fenster zur Welt	78
6.1 Mechanische Sensoren	81
6.2 Ferntastsinne unter Wasser	82
6.3 Orientierung im Raum	83
6.4 Töne, Klänge und Geräusche	86
6.5 Echopeilung und Sonar	88
6.6 Mikro-Ohren an den Beinen	90
6.7 Mit Infrarot zu Beute, Brand und Brut	92
6.8 Von bitter bis umami	96
6.9 Perfekte Nasen	97
6.10 Augentiere	98
6.11 Das Gefühlsleben der Pflanzen	101

VERTIEFUNGEN

Giftfreies Antifouling nach biologischem Vorbild	103
Faser-Verbund-Werkstoffe	104
Kleben, Haften und Verbinden	105
Die Grenzschicht	109
Der Auftrieb	113

ANHANG

Glossar	116
Literaturverzeichnis	127

1 DER ANALYTISCHE BLICK IN DIE NATUR

Die Idee ist nicht neu. Bereits zu Beginn des 16. Jahrhunderts versuchte Leonardo da Vinci von der belebten Natur zu lernen, um den alten Menschheitstraum vom Fliegen zu verwirklichen. Es sollte jedoch noch einige Jahrhunderte dauern, bis die ersten, ebenfalls naturinspirierten Gleitflieger ihren Konstrukteur Otto Lilienthal (zumindest zunächst) erfolgreich vom Erdboden abheben ließen. Ebenfalls Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte der Norweger Cornelius Lie seinen »Mechanischen Lotsenfisch«, dessen Antrieb in Form und Bewegung nach Vorbild der Fischflosse konstruiert war. Auch hier war es zunächst die scheinbar mühelose Fortbewegung der Tiere, die zur Nachahmung anregte. Mit zunehmend verbesserten Analyseverfahren und -möglichkeiten offerierten biologische Systeme und Strukturen zunehmend detaillierte Einsichten in ihre Konstruktionsprinzipien. Diese reichen heute bis in den nanoskopischen Bereich, so etwa bis in die molekulare Struktur membranöser Oberflächen hinein. Molekulare Schalter, DNA-Computer, artifizielle Tunnelproteine nach dem Vorbild der Natur, um nur einige Beispiele zu nennen, scheinen in greifbare Nähe zu rücken.

Dieses Lernen von der belebten Natur ist Gegenstand der relativ jungen Wissenschaftsdisziplin Bionik, im internationalen Sprachgebrauch »Biomimetics«. Ursprünglich zwischen Bio- und Ingenieurwissenschaften angesiedelt, umfasst diese vom interdisziplinären Charakter geprägte anwendungsorientierte Disziplin heute Physik, Mathematik, Informatik, Chemie, Pharmazie, Medizin, Materialwissenschaften, Elektrotechnik, Maschinenbau, Architektur bis hin zu Design und Psychologie. Allen Ausrichtungen gemeinsam ist dabei die Bemühung, die Ergebnisse der biologischen Evolution zu erfor-

schen und die gewonnenen Erkenntnisse in innovative Produkte, Systeme oder Prinzipien zu übertragen.

Ermöglichen neuerdings modernste Messverfahren eine zunehmend detaillierte Charakterisierung natürlicher Materialien bis hin zur Molekularstruktur, so standen am Anfang bionischer Forschungen Struktur- und Konstruktionsanalysen im Vordergrund. Tatsächlich scheinen Gegenüberstellungen aus dem Bereich der Technik und der Biologie neben formalen auch konzeptionelle Analogien aufzuzeigen.

Daraus mag sich der oft geäußerte Wunsch der Ingenieure, natürliche Konstruktionen und Strukturen mögen katalogisiert und nach Funktionen systematisiert werden, erklären. Das hieße jedoch das immense Innovationspotenzial, das die Analyse der belebten Natur offeriert, lediglich zu streifen. Die Kreativität natürlicher Konstruktionen erschöpft sich bei weitem nicht in der Genese der n-fachen Ausführung des gleichen Motivs. »Lernen von der Natur« bedeutet vielmehr die Auseinandersetzung mit den dort realisierten alternativen Lösungskonzepten – auch wenn die zugrunde liegende Frage bzw. Anforderung an das zu analysierende System oder Objekt zunächst meist nicht bekannt ist.

Die Analyse natürlicher Strukturen und Systeme macht deutlich, dass sie, ganz im Gegensatz zu deren technischen Pendanten, ausnahmslos multifunktional konstruiert sind. Aufzeigbar an jedem nahezu beliebigen Organismus oder dessen Teilen, imponieren insbesondere diese mehrdimensionalen Funktionsoptionen. Sie ergeben sich aus der Interaktion der Materialien und des daraus realisierten Designs.

Demnach kommt dem verwendeten Werkstoff herausragende Bedeutung zu. Biologische Werkstoffe bestehen aus relativ einfachen Grundsubstanzen. Sie repräsentieren chemisch gesehen eine vergleichsweise geringe Anzahl an Polymeren und keramischen Komponenten. Durch veränderte Synthesebedingungen im Fertigungsprozess bzw. durch Variation singularer Bestandteile werden variable

Materialcharakteristika generiert. Damit werden hinsichtlich Energie- und Materialaufwand hocheffiziente, funktionsoptimierte Bauteile bzw. Strukturen gebildet.

Auf höher skalierten Ebenen zeigen die Analysen, dass sich die physikalische Charakteristik biologischer Organismen meist an der Schnittstelle zwischen Außen- und Innenmedium, an der Oberfläche entscheidet. Hier finden nicht nur Materialtransporte und Informationsaustausch statt: Physikalische Effekte wie Selbstreinigung, Reduktion des Reibungswiderstandes, Minimierung des Brechungsindex, um nur einige zu nennen, werden durch die Mikrokonfiguration der Oberfläche dominiert. Und in der Tat ist hier der Erkenntnistransfer in den Anwendungsbereichen am weitesten fortgeschritten: Tatsächlich reduzieren haifischschuppen-analoge Strukturen bereits den Treibstoffverbrauch von Verkehrsflugzeugen, wird Oberflächenverunreinigung durch Anwendung des »Lotus-Effektes« reduziert und nutzen solare Energiesysteme Breitband-Entspiegelungen nach dem Prinzip des Mottenauges.

Aber die Analysen zeigen ebenso deutlich auf, dass die Natur keine einfachen Kopiervorlagen bietet. Ganz im Gegenteil, in vielen Fällen sind die realisierten Konzepte wenig überzeugend und lassen sich lediglich aus ihrer Historie, dem Evolutionsprozess, erklären. Dennoch lernen wir, dass es möglich ist, selbst unter Einbeziehung multipler Optimierungskriterien, funktionstüchtige Lösungen zu realisieren. Interpretiert man Innovation als »Lösung sich gegenseitig scheinbar ausschließender Anforderungsprofile«, so ist die Beschäftigung mit den Vorlagen der Natur gleichermaßen Herausforderung wie Schulung unserer Kreativität.

Und darüber hinaus erzwingen die hochkomplexen Systeme und Strukturen den interdisziplinären Dialog. Neue Kommunikationsmodelle sind ebenso gefordert wie die Anwendung des Methodenrepertoires aller uns heute und in Zukunft zur Verfügung stehenden Wissenschaftsdisziplinen.

logische Strukturbausteine und Speicherstoffe, die Polysaccharide (Kohlenhydrate) und Lipide (Fette).

Während Letztere etwa die Langzeit-Energiespeicher des Körpers bilden und essenzielle Funktionsbestandteile der Zellmembranen darstellen, liefern die Kohlenhydrate Energie wie Strukturbausteine gleichermaßen. Tatsächlich finden sich hier die zahlenmäßig häufigsten Bio-Moleküle: Cellulose und Chitin. Beides Polysaccharide (langkettige Zuckermoleküle), die die Strukturstabilität und mechanische Belastbarkeit der Organismen gewährleisten, Cellulose bei den Pflanzen, Chitin bei den Arthropoda (Spinnen, Insekten und Krebse) und Pilzen. Hier ist insbesondere die Biosyntheseleistung der Pflanzen beeindruckend: 50 % der Masse eines Baumes bestehen aus Cellulose und jährlich werden nicht weniger als ca. 10 Billionen Tonnen davon durch die Syntheseleistungen der Pflanzen weltweit gebildet. Allerdings belegt Chitin, zusammen mit der pflanzlichen Hemicellulose, in der Rangliste der häufigsten Moleküle bereits Platz 2, auch hier werden jährlich unvorstellbare Mengen an Biomasse produziert.

Cellulose und Chitin sind sich in ihrem strukturellen Aufbau sehr ähnlich und unterscheiden sich lediglich durch eine stickstoffhaltige Seitenkette beim Chitin. Gleiches gilt für die Speicherstoffe Stärke und Glykogen. Auch hierbei handelt es sich um Polysaccharide, bei Stärke um pflanzliche, bei Glykogen um tierische, die sich in ihrem Aufbau nur marginal unterscheiden und die Energie für alle Lebensprozesse des Organismus liefern. Einmal mehr lässt sich hier sehen, dass neue Funktionen durch eine leichte Modifikation vorhandener Bausteine erreicht werden.

Zu den angesprochenen Elementen und Bausteinen kommt noch ein ganzer Cocktail an Ionen, Salzen und Spurenelementen hinzu, die jeweils essenziell und spezifisch für die Organismen, deren Organe sowie deren jeweilige Funktion sind – und nicht zu vergessen: Wasser.

Das Leben auf diesem Planeten ist auf dem Trägermolekül Wasser aufgebaut, was eine einfache Übertragung biologischer Prozesse und Strukturen in vielen Bereichen der Technik oftmals kaum oder nur sehr schwer realisierbar macht. War und ist der Dipol Wasser zwar das ideale Medium, um die Vorgänge der belebten Natur zu befördern, so haben sich viele technische Entwicklungen just von diesem Medium entfernt, wird Wasser in vielen Prozessen bewusst vermieden. Wasser ist zu wenig thermoresistent, um den Hochtemperaturprozessen vieler technischer Vorgänge standhalten zu können. So werden z.B. temperaturresistentere Öle zur Schmierung der beweglichen Teile von Motoren eingesetzt, wohingegen Organismen wasserbasierte Gele zur Schmierung in den Gelenken verwenden. Wasser ist unter Umgebungsbedingungen flüchtig, daher bleibt sein Volumen nicht konstant. Und das in ihm entstandene Leben bzw. dessen organismische Repräsentanten finden nahezu immer eine Möglichkeit, sich dieses Wasser zugänglich zu machen, sei es vermeintlich auch noch so hermetisch verschlossen. Mit anderen Worten, das Wasser wird kontaminiert, im ersten Besiedlungsschritt durch einzellige Organismen, z.B. Algen, denen bald Vielzeller folgen.

2.5 Spinnenseide

Biologische Organismen sind durchaus in der Lage, unter geeigneter Auswahl einzelner Substanzen und Kombination Hochleistungsmaterialien zu generieren. Zu den besonders beeindruckenden gehören wohl zweifelsohne die Fäden der Spinnen. Sie bestehen im Wesentlichen aus dem Protein Fibroin und unterschiedlichen Mucopolysacchariden (Zuckerverbindungen). Zu einem Faden versponnen, sind dessen Kenndaten so beeindruckend, dass immense Versuche unternommen werden, um analoge technische Fäden herstellen zu können. Und die Untersuchungen zeigen, dass dieses Unterfangen alles



Elektronenmikroskopische Aufnahme der Spinndrüsen am Opistosoma (Hinterleib) einer Spinne. Im Opistosoma befinden sich die Drüsen, die das jeweilige Sekret bilden. Dieses gelangt über die Spinndrüsen nach außen und wird im Moment des Austritts versponnen.

andere als einfach zu werden verspricht. Spinnen sind wahre Hochleistungs-Bioreaktoren wie High-Tech-Produktionsanlagen gleichermaßen. Bis zu einigen Dutzend Drüsen verspinnen das, was von den Tieren in bis zu 7 unterschiedlichen Drüsen an verschiedenartigen Sekreten gebildet worden ist. Noch in den Ausführungsgängen zu den Spinnrüsen werden dem Flüssigsekret entscheidende Substanzen beigemischt. Im Kontakt mit der Luft erhärtet das Fluid und bildet besagten Faden. Da sich die gesponnenen Fäden je nach Anforderung in ihren mechanischen Eigenschaften unterscheiden müssen, wird bei deren Herstellung jeweils eine unterschiedliche Anzahl an Düsen aktiviert. Das Produkt ist dann belastbarer als Stahl, dehnbarer als Nylon und wasserfest; und auch im versponnenen Zustand energetisch hochwertig, was die Besitzerin des Netzes veranlasst, alte Fäden wieder aufzufressen.

Das Einsatzspektrum scheint enorm, Halte- und Zurrseile wie -bänder, flächige Belastungs- und Funktionstextilien unterschiedlichster Art und Verwendung, natürlich auch Netze für jegliche Einsatzart und von besonderem Interesse: hauchdünnes, hochbelastbares und biokompatibles Nahtmaterial, das im Medizinbereich ein großes Anwendungspotenzial hat.

Im Gegensatz zur Seide der Seidenspinner kann dieses beeindruckende Material nicht auf natürlichem Wege gewonnen werden. Spinnen sind Raubtiere, die die Verwandtschaft nicht unbedingt als solche erkennen und müssten daher getrennt voneinander gehalten werden, was wiederum die Zucht enorm aufwendig gestaltet. Daher wird seit geraumer Zeit versucht, das Seidenprotein Fibroin biotechnologisch zu gewinnen. Neben den üblichen Versuchen, Mikroorganismen entsprechend genetisch zu manipulieren, wurden auch Ziegen entsprechend behandelt. Deren Milch enthält nun das begehrte Protein. Allerdings liegt das Geheimnis des Spinnfadens in der Kombination aus Werkstoff und Anordnungsgeometrie und noch lässt sich aus der Milch kein Faden herausziehen, der dem der Spinne ähnlich wäre.

Und noch ein Geheimnis gilt es zu lüften. Jede unverschlossen vergessene Klebstofftube macht es deutlich: wie gelingt es der Spinne, ihre Düsen funktionstüchtig zu halten?

2.6 Bio-Kleber

Zu den nachahmenswerten Hochleistungsmaterialien der Organismen gehören sicherlich nicht zuletzt die von ihnen in vielfältiger Weise erzeugten Klebstoffe. Auch sie bestehen aus Proteinen, Polysacchariden und Wasser.

In der Tat existiert hier bereits eine Vielzahl von technischen Produkten, die ein sehr weites Anwendungsspektrum abdecken. Daher erstaunt es kaum, dass der Pro-Kopf-Verbrauch an Klebstoffen in Deutschland aktuell über 6 kg pro Jahr beträgt und der dabei erzielte Umsatz sich auf mehrere Milliarden Euro beläuft. Klebstoffe überzeugen durch ihre leichte Handhabbarkeit und ihr geringes Gewicht. **(Kleben, Haften und Verbinden)** So werden Klebstoffe unterschiedlichster Charakteristika aufgrund ihres geringeren Gewichtes gegenüber anderen Verbindungsverfahren (z.B. Vernieten oder Schweißen)