

Baumeister Natur: Bionik – Ingenieurleistungen gratis

Bionik – was ist das?

„Die Biosphäre hält noch viele bislang unbekannte Stoffe und Baupläne für den Menschen bereit, deren Optionswerte im Hinblick auf eine künftige Nutzung gesichert werden müssen. Besonders große Chancen bestehen in Gebieten, in denen sich die biologische Vielfalt in natürlichen Ökosystemen konzentriert (z. B. tropische Wälder, Korallenriffe) und daher vergleichsweise viele interessante „Lösungen“ biochemischer oder struktureller Art zu finden sind. Diese Brennpunkte der biologischen Vielfalt sind besonders schützenswert.“ (WBGU 1999: 4)

Ein eigener ‚Rohstoff‘ der Natur sind Lösungsideen und -strategien. „Bionik ist eine Strategie zur Entwicklung technischer Neuerungen nach dem Vorbild der belebten Natur.“ In der biologischen Vielfalt finden sich Lösungsstrategien für alle denkbaren Probleme. Sie wurden von der Evolution über Jahrtausende optimiert. Schon Leonardo da Vinci übertrug natürliche Bewegungsprinzipien auf Flugapparate. Durch die Beobachtung des Libellenflugs und bestimmter Pflanzensamen erfand er das Grundprinzip des Hubschraubers. Inzwischen hat sich die Bionik, eine Synthese aus Biologie und Technik, als eigene Disziplin etabliert. Auch wenn in diesem Gebiet kaum quantifizierte Studien vorliegen, so zeigen doch die Anwendungsbeispiele, welchen ökonomischen Nutzen die Natur für den Menschen bereit hält. Es geht nicht nur um das „Kofferrisch“-Auto von Daimler-Benz oder den vielzitierten Lotuseffekt. Ingenieure lernen von der Natur auf vielen Gebieten (WWF 1991; WBGU 1999: 78):

- Fortbewegung: Vögel, Gleittiere, Pflanzensamen und Insekten für das Fliegen, für Windräder, Schiffsschrauben..., Delfinnasen für die Bugform von Öltankern (vgl. schon Leonardo da Vincis Erfindung des Hubschraubers nach dem Vorbild der Libelle),
- Sinne: Jalousien, Infrarot- und Ultraschall-Ortung, Restlicht-Verstärker, Tarnung, Hörgeräte und Riech-Detektive,
- Materialkunde: Schaumstoff, Zellstoff, Netze, Fließe, Fäden, Federn, Haken und Ösen, Oberflächen und Hautbeschaffenheit, Lotoseffekt,
- Architektur: Klimaanlage in Termitenbauten, tragende Prinzipien des Kuppelbaus und der Skelette, Schuppen auf der Oberfläche, Isolierung (Stuttgarter Flughafen),
- Energie: Photosynthese, Frostschutz,
- Gifte und Lockstoffe,
- Verfahrenskunde: Energieumwandlung, Recyclingmethoden und viele Entwicklungen im Bereich der Nanotechnik sowie die Informationsbionik, z. B. evolutionäre Prinzipien in der Technikentwicklung.

Werner Nachtigall, der Begründer der Bionik in Deutschland, unterscheidet zwischen ‚Low-Tech-Bionik‘ in einer Zeit, als der Mensch fast alle Erfindungen aus der Natur abschaute und

weiterentwickelte, und der ‚High-Tech-Bionik‘ unserer Zeit, die tief in die industrielle Innovation hineinwirkt (zit. n. Euler et al. 2004): „Eigenschaften natürlicher Materialien – wie adaptive Fähigkeiten, Multifunktionalität und ressourceneffizienter Aufbau – sind gleichzeitig auch Eigenschaften, die Ziele aktueller Werkstoffentwicklungen darstellen. Voraussetzung ist jedoch ein tieferes Verständnis für das Zusammenwirken von Funktion und Aufbau natürlicher Materialien sowie der Mechanismen zur Entstehung, Umformung und Selbstheilung.“ (Oertel & Grunwald 2006: 8) „Bionik führt zu einer erheblichen Ausweitung der ‚Toolbox‘ im Innovationssystem, indem aus der ungeheuren Vielfalt der ‚technischen‘ Problemlösungen in der Natur für technische Problemlösungen in der Welt des Menschen gelernt wird.“ (Oertel & Grunwald 2006: 10)

Nachtigall schlug 1992 eine Gliederung der Bionik in folgende Themengebiete vor (die folgende Aufzählung wurde von Euler et al. 2004: 3 übernommen):

1. Historische Bionik: Geschichte und Entwicklung bionischer Forschung aus verschiedenen Teilgebieten der Technik und der Biologie.
2. Strukturbionik: Untersuchung biologischer Materialien, Strukturen und Formbildungsprozesse (z. B. komplexe, hierarchisch aufgebaute Verbundmaterialien, pneumatische Strukturen, Membranstrukturen) auf Anwendungsmöglichkeiten in der Technik.
3. Baubionik: Nutzung natürlicher, gut recyclebarer auch in der Biologie verwendeter Baumaterialien (z. B. Tonbacksteine mit Stroh als Armierung, Wärme- und Schalldämmung); Konstruktion temporärer technischer Leichtbauwerke (z. B. Seil-, Membranen- und Schalenkonstruktionen), basierend auf Anregungen von natürlichen Leichtbaukonstruktionen.
4. Klima- und Energiebionik: Energieeinsparung und höherer Wohnkomfort durch passive Lüftung, Kühlung und Heizung in Anlehnung an die bei Tierbauten verwirklichten Prinzipien.
5. Konstruktionsbionik: Analyse der Konstruktionselemente und Funktionsmechanismen der meist integrativen und multifunktionellen natürlichen Konstruktionen; Vergleich mit analogen technischen Konstruktionen und Untersuchung von Anwendungsmöglichkeiten in der Technik.
6. Bewegungsbionik: Untersuchung der Strömungsanpassungen von schwimmenden und fliegenden Tieren, ihrer Antriebsmechanismen und deren mechanischen Wirkungsgrade mit dem Ziel der Verbesserung technischer Konstruktionen (z. B. Funktionsmorphologie und Wirkungsgrade von Flügeln und Flossen, Strömungswiderstand der Rumpfe schwimmender Tiere); Bewegungsanalyse des Laufens von Tieren mit unterschiedlicher Beinanzahl als Grundlage für den Bau „laufender Roboter“.
7. Gerätebionik: Entwicklung technisch einsetzbarer Maschinen, d. h. von Gesamtkonstruktionen, basierend auf Vorbildern aus der Natur (z. B. von Pumpen, Bohrern, hydraulischen oder pneumatischen Maschinen, Förder- und Abbausystemen).

8. Anthropobionik: Optimierung von Mensch-Maschine-Interaktionen, z. B. durch ergonomische Gestaltung von Bedienungsflächen entsprechend der sensorischen und motorischen Gewohnheiten der Menschen; Erhöhung der Effizienz muskelbetriebener Fortbewegungsmittel (z. B. Fahrräder, Inline Skater oder Langlaufski), Verbesserungen in der Robotik.
9. Sensorbionik: Entwicklung hochsensibler Sensor-, Ortungs- und Orientierungssysteme durch Umsetzung von Konstruktionsprinzipien biologischer Sensoren, die für eine Vielzahl chemischer und physikalischer Reize bekannt sind.
10. Neurobionik: Weiterentwicklung von Informationsverarbeitung und Steuerung (z. B. durch intelligente Schaltungen, die Verschaltung von Parallelrechnern und Neuronale Schaltkreise), ausgehend von Anregungen aus dem Bereich der Neurobiologie und biologischen Kybernetik.
11. Verfahrensbionik: Analyse von Steuerung und Ablauf komplexer biologischer Prozesse und Untersuchung der Übertragungsmöglichkeit in die Technik; Beispiele sind: die Entwicklung einer Wasserstofftechnologie nach dem Vorbild der Photosynthese (dieses Beispiel lässt sich auch der Biotechnologie zuordnen), die Übertragung des (fast) vollständigen Recyclings in die industrielle Produktion, sowie ökologische Umsatzforschung und kybernetische Prozesssteuerung bei komplexen industriellen Vorhaben.
12. Evolutionsbionik: Nutzung biologischer Evolutionsstrategien in der Technik für die Optimierung komplexer technischer Systeme und Verfahren (vor allem solcher, die rechnerisch [noch] nicht simulierbar sind).

Die Geschichte der Bionik

(Zusammenfassung nach Braun 2002, Akgül 2002, Rechenberg 2008, ergänzt)

„Bionik“ oder „bionics“ sind Kunstwörter, geprägt auf einem Militärkongress in Dayton von einem Luftwaffenmajor namens Steel und zwar im Jahre 1960. Ziel dieses Kongresses war es, vom „Biologischen Sonar“ der Fledermäuse etwas zur Verbesserung des technischen Radars zu lernen.

Die Geschichte der Bionik ist untrennbar verbunden mit dem Wunsch des Menschen zu fliegen.

- Leonardo da Vinci (1505) verfasste „sul volo degli uccelli“ über den Vogelflug und konstruierte die ersten Flugmaschinen.
- Der osmanische Universalgelehrte Hezarfen Ahmed Celebi (1609-1649) entwickelte ein Fluggerät nach dem Vorbild des Vogelfluges und flog damit 3 km weit vom Galata Turm in Istanbul über den Bosphorus nach Uskudar.
- Matthew Baker (1590): Praktische Naturbeobachtungen bewogen ihn zur Konstruktion von Schiffsrümpfen nach dem Vorbild von Dorschkopf und Makrelenschwanz. Dies brachte der nach ihm benannten Baker-Galeone eine Verbesserung der Manövrierfähigkeit und eine Reduktion des Wasserwiderstandes.

- Sir George Cayley (1773-1857): Auf ihn gehen der Bau des ersten autostabilen Flugmodells und die Entwicklung des ersten praktikablen Fallschirms zurück. Vorbild für sein Fallschirmmodell war der Samen des Wiesenbocksbarts. Sein Schwerpunkt liegt sehr tief und die Flächen sind an den Aussenkanten nach oben gewölbt, daher rührt sein autostabiler Fall.
- Der französische Seemann und Kapitän Jean-Marie Le Bris (1817-1872) studierte den Flug des Albatros und konstruierte eine Flugmaschine nach seinem Vorbild.
- Der Erfinder Clément Ader (1841-1925) orientierte sich am Flugverhalten von Fledermäusen und flog mit seiner motorgetriebenen Flugmaschine, „Eole“ am 9. Oktober 1890 erfolgreich über eine Strecke von mehr als 50 m. Augenzeugen berichteten damals, dass lediglich Bäume am Ende des Flugfeldes verhinderten, dass er noch weiter flog. Ader prägte auch den Begriff „avion“ (Appareil Volant Imitant les Oiseaux Naturels).
- Otto Lilienthal studierte den Flug von Störchen und war Hersteller der ersten erfolgreichen Flugapparate mit denen er bereits in den Jahren 1891-1896 erfolgreich Gleitflüge durchführte. 1889 veröffentlichte der deutsche Luftfahrtpionier Otto Lilienthal (1848-1896) sein Buch „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ - ein Klassiker bionischer Literatur. Die Gebrüder Lilienthal erkannten die Bedeutung der gewölbten Flügelform und erstellten anhand exakter Messungen Tabellen. Mit ihrer Hilfe gelang den Gebrüder Wright der Durchbruch beim Flugzeugbau.
- Der österreichische Ingenieur Igo Etrich (1879-1967) konstruierte 1904 einen Nurflügelgleiter, dessen Vorbild der Samen von *Zanonia metacarpa* - ein Kürbisgewächs aus Südostasien - war. Aus diesem Gleiter entwickelte er zusammen mit einem deutschen Ingenieur mit Namen Rumpler die Rumpler-Etrich-Taube, die ab 1910 als Kriegsflugzeug der deutschen Luftwaffe eingesetzt wurde.
- In den 1970er-Jahren untersuchte der Tübinger Paläontologe Reif die Schuppen von Haien. Er stellte dabei fest, dass schnell schwimmende Haie (z. B. Seidenhaie und Mako's) eine besondere Strukturierung auf der Schuppenoberfläche besitzen. Da sich keiner seiner Kollegen dafür interessierte, wandte er sich an den Strömungsmechaniker Bechert (DLR, Berlin). Bechert baute diese Hautstrukturen künstlich nach und untersuchte sie zunächst im Wind- und Wasserkanal, später dann in einem mit Babyöl gefüllten Wasserkanal. Das Ergebnis dieser Forschung ist heute als Ribletfolie, hergestellt von der Firma 3M zur Verminderung des cw-Wertes auf Flugzeugen im Einsatz. Die Spritersparnis bei Langstreckenflügen wird auf etwa 4 % geschätzt. Nachgewiesen wurde eine Ersparnis von 1 % bei einem Airbus A 340, der zu einem Drittel mit einer Ribletfolie beklebt wurde. Das Material ist inzwischen verfügbar, wird aber aufgrund tiefer Kerosinpreise bisher noch nicht nachgefragt. Weitere potenzielle Einsatzgebiete von Ribletfolien sind z. B. die Beschichtung von Schnellzügen oder der Innenseiten von Pipelines (Oertel et al. 2006: 143). Eine Beschichtung der Rotorblätter von Windkraftanlagen zu einem geräuschärmeren Betrieb ist in der Diskussion (Fa. 3M zur Messe ‚WindEnergy 2002‘; vgl. <http://www.windmesse.de/messen/windenergy2002.html>). Auch die Yacht ‚Stars & Stripes‘,

mit der Dennis Connor und seine Crew 1987 den Admirals Cup gewann, hatte einen Rumpf, der mit Ribletfolien der Firma 3M beklebt war (Rechenberg 2000).

Es gibt viele weitere Beispiele aus der Geschichte der Bionik. Oft geht es dabei ums ‚Kopieren statt Kopieren‘ (Rechenberg 2008), d. h. nicht die Imitation der Natur ist gefragt, sondern das Erkennen der Bau- und Wirkprinzipien, die hinter den natürlichen Phänomenen stecken. So entstanden Erfindungen, die jeder kennt. Braun (2002) nennt folgende Beispiele für die ‚Bionik im Alltag‘: „Im Jahre 1868 reichte der Viehzüchter Michael Kelly in Texas eine Idee zum Patent ein, die er beim Viehtreiben dem Milchorangenbaums (*Maclura pomifera*) abgeschaut hatte. Dieser mit Dornen versehene Strauch hält das Vieh ab und Kelly formte nach diesem Prinzip einen „stacheligen Draht“. Die zu teure Herstellung führte dazu, dass Glidden und Haish im Jahre 1874 eine billigere Variante von Kelly’s Draht patentieren ließen, deshalb gelten sie auch als die Erfinder des Stacheldrahtes.

Der Naturwissenschaftler Raoul Francé experimentierte mit verschiedenen Streuern und Zerstäubern, um Boden gleichmäßig mit Kleinstlebewesen zu impfen. Schließlich nahm er die Mohnkapsel als Vorbild und ließ sich 1920 einen „Neuen Streuer“ patentieren (Deutsches Patentamt, Nr. 723730). Er war ein früher Verfechter der Bionik, von ihm ist der Ausspruch aus dem Jahr 1920 überliefert: „Die Biotechnik ist der Gipfel der Technik überhaupt!“ (zit. nach Akgül 2002)

Der Schweizer Ingenieur Georges de Mestral erfand 1948 den Klettverschluss, als er das Fell seines Hundes von Kletten befreite, und ließ ihn unter dem Namen VELCRO - abgeleitet von den Anfangsilben der französischen Wörter Velours (Schlaufe) und Crochet (Haken) - patentieren. Daraus entstand die Velcro Unternehmensgruppe mit über 3.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in zehn internationalen Fertigungs- und Vertriebszentralen (http://www.velcro.de/cms/UEber_uns.3.0.html?&L=1).

Bionik im Auto

Zahlreiche automobiler Errungenschaften wurden in den vergangenen Jahren bei Tieren und Pflanzen abgeschaut. Heute sind die Lehren von einst wichtiger denn je. Autos werden insbesondere durch Komfort- und Sicherheits-Features immer komplexer und schwerer. Durch die Verwendung von ungewöhnlichen Werkstoffen lässt sich u. a. das Fahrzeuggewicht begrenzen. Das sorgt für mehr Fahrdynamik, geringeren Verbrauch und entsprechend weniger Abgase. Tagungen zum Thema ‚Bionik im Automobil‘ gab es bereits 2003 und 2005.

Längst findet man hochfeste Hohlstrukturen dort, wo vor Jahren noch massive Bauteile eingesetzt wurden. Hierbei fungieren nicht zuletzt der Aufbau und die Konstruktion von Knochen als Vorbild (Grundhoff 2005). Opel z. B. optimiert Motoraufhängungen nach bionischen Prinzipien (Braun 2002). Autoproduzenten wie BMW, Opel oder DaimlerChrysler, aber auch der Luft- und Raumfahrtkonzern EADS nutzen bereits seit Jahren Programme, die Bauteile wie Bäume und Knochen wachsen lassen.

Das Polykarbonat-Chassis des Honda Extreme basiert auf einer Bienenwabenstruktur. Darüber kommen verschiedene Karosserie-Komponenten, welche sich je nach Bedarf austauschen lassen.

Kleinere Änderungen kann der Fahrer selbst vornehmen, große Eingriffe werden im Honda-Nachhaltigkeitscenter durchgeführt. Somit kann das Fahrzeug quasi mit seinem Besitzer wachsen. Nach einer Zeitdauer von fünf Jahren sind alle Komponenten bereit, im Recycling-Center zu landen (Quelle: auto-news, zit. nach <http://www.automobile.de/cgi-bin/deeplink.pl/news/honda/sonstige/Honda-Extreme-Das-Massauto-fuer-jedermann-ist-aus-Waben-Karbon-18237.html>).

Auch die Bionik aus dem Meer kann im Automobilbau wertvolle Beiträge zu neuen Technologien leisten, wie z. B. Leichtbaukonstruktionen, strömungstechnische Optimierung von Fahrzeugen, die Entwicklung spezieller Felgen und Reifenprofile und am Kraftfluss orientierte Tragstrukturen (Oertel & Grunwald 2006). So ist es z. B. gelungen, die Skelette von Kieselalgen zu vermessen und mittels der so entdeckten Bauprinzipien rotierende Leichtbauelemente konstruktiv zu optimieren (BMBF 2005). Die Natur bietet mit den Kalkschalen von Diatomeen und Foraminiferen eine sehr große Auswahl an stabilen und ausgefeilten Formen. Die feinen, aber sehr stabilen Strukturen der Diatomeen dienen den Wissenschaftlern um Christian Hamm als Grundlage für das Produktdesign. So entwarf die Arbeitsgruppe bereits Alufelgen, die gegenüber ihren herkömmlichen Verwandten sehr leicht, aber trotzdem sehr stabil sind. Der Formenreichtum der Kieselalgen inspiriert nicht nur die Hersteller von Autofelgen, sondern wurde auch beim Design von Lampenschirmen und Computergehäusen eingesetzt, die gegenüber ihren herkömmlichen Verwandten sehr leicht, aber trotzdem sehr stabil sind (Kesel o. J.).

Im Juni 2005 präsentierte Daimler-Chrysler auf einem Innovations-Symposium in Washington ein Bionic Car. Vorbild für die A-Klasse der Zukunft ist der tropische Kofferfisch. Der Fisch, der in tropischen Gewässern lebt, besitzt hervorragende Strömungseigenschaften und durch die Anordnung von Knochenplatten eine besonders feste und gleichzeitig leichte Außenhaut. Die Karosserie ist besonders steif, was der Sicherheit dient. Die Form reduziert den Luftwiderstand um 65 % auf einen cW-Wert von 0,19 und sorgt für einen niedrigeren Spritverbrauch. Doch sind die schwäbischen Autobauer noch weit von der perfekten Aerodynamik des Originals entfernt. Trotz seines kantigen Rumpfes weist der in den Korallenriffen des Indopazifiks heimische Kofferfisch nämlich nur einen cW-Wert von 0,06 auf (www.daimlerchrysler.de).

Ein ebenso erfolgversprechendes leichtes Material, wenn richtig geformt und genutzt, ist Magnesium. Es ist im Grunde bis zu 33 % leichter als Aluminium und bis zu 77 % leichter als Stahl. Die BMW Spezialisten haben den Werkstoff weiterentwickelt und bisher gültige Einsatzgrenzen im Fahrzeugbau neu definiert. Mit einer speziellen Legierung und ausgefeilter Prozesstechnik wird seit kurzem ein Verbundkurbelgehäuse aus Magnesium und Aluminium für den BMW 6-Zylinder-Motor in Serie eingesetzt. Dieser Materialmix schafft rund 10 kg an Gewichtsvorteil. Bei der Verbindung von Magnesium und Aluminium wurden Verrippungsmuster gewählt, die im Grundprinzip den Ankerstrukturen der Nesselkapseln von Anemonen oder Quallen ähneln (BMW AG 2005).

Derzeit arbeitet u. a. der Lackhersteller BASF Coatings in Münster nach eigenen Angaben am Auto, das nie mehr durch die Waschstraße muss (<http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,141145,00.html>).

Die Reifenhersteller Dunlop und Continental AG arbeiten an „bionischen“ Autoreifen in ihrem Programm. Dunlop nahm die Fußsohlen von Baumfröschen zum Vorbild, die sich an glatten Wänden halten aber auch davon abspringen können. Dazu verhilft ihnen der Aufbau ihrer Fußsohlen mit einem komplizierten Muster von Hügeln und Rillen, deren Zwischenräume mit einem Sekret gefüllt sind. Die Firma Continental hat bereits drei Reifen auf dem Markt, den ContiPremiumContact und den ContiSportcontact 2 nach dem Vorbild der Katzenpfote sowie den ContiWinterContact TS 780 nach dem Bienenwabenprinzip. Dieser hat ein sog. hochlamelliertes Profil und die Gummiblöcke zwischen den Profilirillen weisen ein feines, sechseckiges Muster auf. Feine Lamellen im Gummi sind seit langem typisch für Winterreifen, weil sich beim Beschleunigen oder Bremsen ihre Kanten aufstellen und etwa auf Schnee einen gewissen Widerstand bieten. Das hier angewendete Bienenwaben-Prinzip ermöglicht erstmals auch Kanten, die quer zur Laufrichtung verlaufen, was die Kurvenfahrt deutlich sicherer macht (Braun 2002; Akgül 2002; <http://www.tuilmenau.de/fakmb/Wabenstruktur.4017.0.html>).

„Seit Jahrzehnten befassen sich die Entwickler aus den unterschiedlichsten Industriesparten mit dem Lotuseffekt: Von Dachpfannen, Häuserwänden oder Lackierungen sollen Tropfen und Schmutz derart spurlos abperlen wie von den legendären Lotusblättern. Der schwedische Autohersteller Volvo beschichtet die Seitenscheiben und die Spiegelgläser mit einem speziellen Fluid. Die Folge: Verschmutzungen perlen tatsächlich nahezu vollständig ab. Doch die Natur ist uns immer noch mindestens einen Schritt voraus: Das Fluid-Mittel muss alle Monate erneuert werden - die Lotusblüte behält ihren einzigartigen Effekt dagegen ihr Leben lang.“ (Grundhoff 2005)

Das Fledermaus-Prinzip der Sonar-Ortung, nach dem mithilfe von Laufzeitdifferenzen und der Dopplerverschiebung bei Ultraschallsignalen Entfernungen gemessen werden können, werden im Automobilbau für die automatische Abstandmessung zwischen Fahrzeug und Hindernis genutzt (Akgül 2002).

„Natürliche“ Roboter

Wissenschaftler der Technischen Universität Delft haben das kleinste fliegende Überwachungsgerät der Welt entwickelt, einen Flugroboter nach dem Vorbild der Libellen. Das „DeFly Micro“ wiegt etwa 3 g und ist 10 cm lang. Als Nutzlast trägt es eine kleine Kamera zur selbständigen Steuerung (MayLab o. J.).

Barthaare und Brauen sind für Seehunde sehr wichtige Sinnesorgane, die zur Orientierung und bei der Jagd eingesetzt werden. So vermögen sie mit ihren Vibrissen Nachlaufspuren von Tiere noch in 120 m Entfernung aufzunehmen. Dieses System könnte in der Robotik neue Impulse in der Steuerung der Roboter unter Wasser geben (Guido Dehnhardt, Universität Bochum; Hochschule Bremen/[Kesel o. J.](#)). Sonden, die mit Sensoren nach Art der Seehund-Barthaare ausgestattet sind, können dafür verwendet werden, Lecks in Wasserleitungen aufzuspüren (DBU/Biokon 2006).

Die Navigation von Hummer führte zur Entwicklung eines ‚Robolobsters‘, der unter Wasser Minen oder Lecks in Pipelines aufspüren soll. Der Unterwasserflug und die flexible Körperform des Mantarochens führte zu einem vielversprechenden Konzept eines intelligenten autonomen Unterwassergleiters (TU Berlin, Evologics 2000-2007; vgl.

http://www.evologics.de/projects/finray_effect).

Wissenschaftler, die sich mit Bewegungsabläufen befassen, nehmen besonders gerne Spinnen und Heuschrecken unter die Lupe. Nach deren Vorbild sind inzwischen selbst laufende Roboter entstanden, die sich nach dem Prinzip der ‚adaptiven Einzelbeinsteuerung‘ fortbewegen. Stoßen einzelne Beine an ein Hindernis, so kommen Rückkoppelungsmechanismen ins Spiel, die es dem Roboter erlauben, seine Gesamtbewegung dem Hindernis anzupassen, ohne dass der ganze Roboter zum Stillstand kommt (DBU/Biokon 2006).

Für die Bekämpfung von Waldbränden wurde ein Robotermodell entwickelt, das sich an einem Käfer orientiert, dem sog. Saftkugler. Dieser kann sich vollständig zusammenrollen, um sich vor äußeren Einflüssen zu schützen. Ein so konstruierter Roboter könnte in Gefahrengebieten ausgesetzt werden. Dort gibt er Alarm, wenn er einen Brandherd aufspürt, und rollt sich dann ein, um das Feuer unbeschadet zu überstehen (DBU/Biokon 2006).

Der Lotuseffekt

Das wohl bekannteste Produkt bionischer Forschung ist der „Lotuseffekt“, den Wilhelm Barthlott, Professor an der Universität Bonn, entdeckte. Die Oberflächen von Lotuspflanzen bleiben immer sauber und die Untersuchungen unter dem Rasterelektronenmikroskop zeigen eine fein genoppte Oberfläche auf der sogar Klebstofftropfen einfach abperlen. Zusammen mit der Firma ispo entwickelte und patentierte Barthlott einen Fassadenlack, der unter dem Namen ispoLotusan seit April 1999 auf dem Markt ist. Weitere geplante Anwendungsbereiche sind selbstreinigende Dachziegel und beschichtetes Geschirr (Braun 2002). Es gab ziemliche Kontroversen um die tatsächliche Leistung der Farbe, ein Gutachten des Fraunhofer Instituts für Bauphysik (1999) bestätigte jedoch im direkten Vergleich zu anderen Farben die beschriebene Wirkung.

Mehr als 10 Mio. € werden mittlerweile jährlich mit selbstreinigenden Technologien umgesetzt, die der Lotusblume abgeschaut sind (Andres 2005; vgl. www.lotus-effect.com). Gleichzeitig können auf diese Weise großen Mengen an Reinigungsmitteln eingespart werden. Mittlerweile werden beispielsweise Duschkabinen oder Autoscheiben angeboten, die entsprechend beschichtet sind und weniger häufig oder gar nicht mehr gereinigt werden müssen, so lange die künstliche Beschichtung hält (<http://www.tu-ilmeneau.de/fakmb/Der-Lotuseffekt.4018.0.html>). Weitere Produkte sind beispielsweise mit Aeroxide® LE 1 oder Aeroxide® LE 2 beschichtete Textilien (Evonik/Degussa), das Spray Tegotop® 210 zur Beschichtung von Oberflächen, anorganische Beschichtungen der Fa. Ferro Corporation oder der Erlus Tondachziegel (Erlus AG) mit eingebrannter Oberflächenveredelung (<http://www.lotus-effect.com/partner/index.php>).

Bionik in der Architektur

Auch in der Architektur ist die Bionik ein großes Thema. Die Klimaanlage in Termitenbauten, die tragenden Prinzipien des Kuppelbaus und der Skelette, Schuppen auf der Oberfläche, Isolierungsmaterialien wie sie beim Stuttgarter Flughafen Verwendung finden oder die neu entwickelten Hybridschäume sind nur einige Beispiele. Es gibt eine ganze Reihe weiterer bionischer Entwicklungen.

Einer viel zitierten Geschichte nach ist das Vorbild für das Dach der Sydney Opera die Abalone-Muschel. Der dänische Architekt Jorn Utzon hatte jedoch Palmwedel als Inspirationsquelle genommen, wie er 1996 in einem Interview der Zeitschrift Specifier über das wahre Vorbild für die Dachkonstruktion verriet (Braun 2002). Ebenso häufig wird der Kristallpalast von der Weltausstellung 1851 in London als Beispiel angeführt. Seine Stahlskelettkonstruktion nimmt verschiedene Blattstruktur als Vorbild für die Hierarchie der Träger (Euler et. al. 2004).

Rosettenpflanzen ordnen ihre Blätter so an, dass ihre Blattfläche optimal zur Sonne ausgerichtet ist. Die italienischen Architekten Portoghesi und Gigliotti entwickelten nach diesem Vorbild eine 13-stöckige Hauskonstruktion. Die Wohneinheiten sind so ineinander verschachtelt, dass sich die einzelnen Einheiten im Sommer gegenseitig beschatten und im Winter möglichst wenig Sonne wegnehmen. Ein Prototyp steht im Wohngebiet Santa Marinallea in Rom (Akgül 2002).

„Der Glasschwamm Euplectella zeigt, welche außergewöhnlichen Materialien die Natur aus einfachsten Rohstoffen herstellen kann. Der in Meerestiefen von 40 m bis zu 5.000 m lebende Gießkannenschwamm besitzt ein käfigartiges gläsernes Skelett. Wissenschaftler der Bell Labs (USA), der Universität Kalifornien und des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam haben jetzt herausgefunden, warum diese Konstruktion aus Bio-Glasfasern praktisch unzerbrechlich ist: Die Fasern sind über viele Größenordnungen und insgesamt sieben hierarchische Ebenen optimal miteinander verknüpft - ein Bauprinzip der Natur, das für die heutige Technik von großem Interesse ist. ... Diese natürliche Konstruktion ist ein Lehrbuchbeispiel, wie sich mit spröden Materialien wie Glas bruchfeste Strukturen erzeugen lassen. Einzelne dieser Prinzipien sind in der Werkstoffwissenschaft, in der Mechanik und in der Architektur längst bekannt und werden auch eingesetzt. Die Faseranordnung von Euplectella ist sogar schon als Vorbild für architektonische Bauten verwendet worden. Wirklich erstaunlich ist jedoch der Umstand, dass es dem Schwamm gelingt, eine ganze Reihe von mechanischen Konstruktionsprinzipien auf vielen Größenskalen vom Nanometer bis zum Zentimeter zu kombinieren und gleichzeitig einzusetzen. Ähnliches ist aus dem Bereich der Technik noch nicht bekannt und bedeutet einen neuen Impuls für die biomimetische Materialforschung.“ (Max-Planck-Gesellschaft 2005)

Viele Hausbesitzer erwärmen ihr Wasser mit Sonnenkollektoren auf dem Dach. Herzstück ist der Solarabsorber - eine dunkle Fläche, die Sonnenstrahlung aufnimmt und Energie an ein Trägermedium abgibt. Die Energieeffizienz eines solchen Wärmetauschers hängt davon ab, wie das Medium seine Kanäle durchströmt und wie hoch der Druckverlust ist. Der Wirkungsgrad bisheriger Kollektoren ist aber gering. Michael Hermann vom Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (ISE) nahm sich daher die Natur zum Vorbild, um Solarabsorber und andere Wärmetauscher leistungsfähiger zu machen. „Ich stellte mir die Frage: Wie würde es die Natur machen?“, sagt der Wissenschaftler. Die Antwort fand er bei Arterien, Blattstrukturen und Lungen. Auch dort müssen oft Netzwerke von Strömungskanälen für eine energieeffiziente Wärme- und Stoffübertragung sorgen. Statt auf gleichmäßige und geometrische Anordnungen - wie bei heutigen Wärmetauschern - setzt die Natur auf verzweigte Strukturen. Hermanns Forschungen sorgten für Aufsehen: Anfang April 2008 bekam er den mit 10.000 € dotierten Bionic Award verliehen. Mit der Erkenntnis der verzweigten Kanäle hat er ein Programm entwickelt, das die Fläche eines Wärmetauschers mit

ähnlichen Strukturen überzieht. Dafür benötigt es nur einen Ein- und Austrittspunkt sowie die Kontur der Fläche. Erste Messungen geben Hermann und der Natur Recht: Sie zeigen geringere Druckverluste und eine gleichmäßigere Durchströmung als bei den bisherigen Konstruktionen. (Buck 2008 – (Originalquellen?) <http://www.vdi.de/8319.0.html>)

Die stabile und leichte Struktur von Bienenwaben findet in der Bautechnik Verwendung. Hier hat die Firma „Freiburg und Lausanne AG“ das Prinzip genutzt, um Backsteine mit einer Wabenstruktur zu versehen. Diese haben bei geringerem Gewicht die gleiche Stabilität wie nicht strukturierte Steine. Auch die Forschung für erdbebensichere Gebäude orientiert sich am Prinzip der Bienenwaben (vgl. <http://www.tu-ilmenau.de/fakmb/Wabenstruktur.4017.0.html>; <http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/root,did=67228.html>). Die Firma Rimmele KG orientiert sich bei ihren Wabenziegeln dagegen an den Bauprinzipien der Kiesalgen (DBU/Biokon 2006)

Der Präriehund durchlüftet seinen Bau nach dem Bernouilli-Prinzip, nach dem eine gerichtete Luftströmung erzeugt wird. Egal aus welcher Richtung der Wind weht, im Bau herrscht eine konstante Ventilation. Das gleiche Prinzip findet sich auch in der alten iranischen Wüsten-Architektur mit ihren Kuppelbauten (Akgül 2002).

Beispiele aus der maritimen Bionik

Aus verschiedenen Gründen ist die maritime Ökologie und Biodiversität sehr hilfreich für bionische Entwicklungen. Eigenschaften der maritimen Ökologie wie Druck, Wasserwiderstand, Dunkelheit, Temperatur, chemische Zusammensetzung usw. haben evolutionäre Prozesse inspiriert, die ausgesprochen wertvolle Problemlösungen anbieten. Viele dieser Beispiele führen zur Entwicklung neuer Materialien, oft kombiniert mit nanotechnologischer Fertigung. Andere Innovationen beruhen auf Formen, die an die Lebensbedingungen unter Wasser angepasst sind: Die Knollennase eines Öltankers ist der Schnauze von Walen und Delfinen nachgebaut. Sie senkt den Energieverbrauch des Schiffs um bis zu 10 %. Ein Ozeanriese mit 250.000 Bruttoregistertonnen spart damit auf der dreiwöchigen Reise vom Arabischen Golf nach Rotterdam 210.000 l Diesel (WWF 1991).

Das Vorbild der Haihaut hilft nicht nur in der Luft beim Spritsparen. Bremer Forscher sind derzeit dabei, eine künstliche Haifisch-Haut als umweltverträglichen Bewuchsschutz für Schiffsrümpfe zu entwickeln. Das neue Bio-Antifouling der Bremer Entwickler baut den natürlichen Bewuchsschutz der Haut von Haifischen nach. Diese ist mit vielen kleinen Zähnen besetzt, welche es Seepocken und Muscheln schwer machen, Halt zu finden. Bis vor kurzem wurden meist giftige Schutzanstriche auf Basis von TBT (Tributylzinn) verwendet, um den Bewuchs von Schiffsrümpfen mit Seepocken und Muscheln zu verhindern. Der Anwuchs gefährdet nicht nur die Schiffsrümpfe, sondern macht die Schiffe auch langsamer, weil die Reibung im Wasser um 15 % steigt. Entsprechend höher ist der Treibstoffverbrauch (Homepage der Hochschule Bremen, www.hs-bremen.de, Kesel o.J.).

Die walzenförmige Körperform des Pinguins ist eine Herausforderung für die Konstrukteure von Unterseebooten (Kesel o.J.). In ihrer Form sind Pinguine selbst U-Booten und Torpedos überlegen. Eselspinguine sind als Energiesparer unter Wasser unübertroffen. Bei einer ruhigen Schwimmgeschwindigkeit von 3 m/s verbrauchen sie nur 60 Joule Energie in der Sekunde. Das

entspricht der Energiemenge, die eine 60 Watt Glühlampe in der gleichen Zeit abstrahlt. Anders als Fische oder Delphine bleibt der Rumpf der Pinguine bei der Fortbewegung unter Wasser fast starr. Das macht die Tiere für die Bioniker besonders interessant, da Transportmittel wie U-Boote oder Flugzeuge ebenfalls mit starrem Rumpf gebaut werden. Entgegen der heutigen U-Boot-Bauweise eines langgestreckten Zylinders mit abgerundeten Enden, weist der Pinguinkörper eine wellige Spindelform auf. Auf einen dünnen Schnabel, der sich zum Kopf verdickt, folgt der dickere Kopf, dann der schlankere Hals und zum Schluss der massigere Körper, der sich zum Becken hin wieder verdünnt. Diese Form verhindert beim schwimmenden Pinguin, dass die Strömung abreißt, sich Verwirbelungen ausbilden oder sich Wasser staut. So vermeidet der Pinguin durch seine Körperform eine große Reibung im Wasser. Misst man den Strömungswiderstand eines schwimmenden Adéliepinguins, so erreicht dieser den unglaublichen c_w -Wert von 0,05. Das ist nur ein Bruchteil dessen, was selbst ein Sportwagen erreicht. Dabei ist der wulstige Gefiederansatz über dem Schnabel sehr wichtig. Ohne diese ‚dreistufige Spitze‘ steigt der c_w -Wert des Pinguins stark an und seine Form verliert an Nutzen. Erste konkrete Entwürfe zu zivilen U-Booten für Touristen, Forscher oder zur Seenotrettung liegen jedenfalls schon vor. Ein Liegerad mit aerodynamischer Außenverkleidung in Pinguin-Form ist an der TU Berlin entwickelt worden (Hochschule Bremen/Kesel o. J.; Ebeling 1997; Rodewald/Schlichting 1988).

Das extrem harte und bruchsichere Perlmutter, aber auch die Zähne von Seeigeln, geben Anstöße für einen innovativen Weg zur Entwicklung zäher keramischer Materialien, die auch als Folie, Membran oder zur Textilbeschichtung eingesetzt werden können (Oertel & Grunwald 2006). „Perlmutter – also die innere Schicht von Molluskenschalen (z. B. Seeohrschnecken) – ist ein Verbundwerkstoff (bzw. Kompositwerkstoff), der durch Biomineralisation entstanden ist. Er besteht aus einer regelmäßigen Anordnung von etwa 500 nm dünnen Plättchen aus Aragonit (Kristallform von Calciumcarbonat). Zwischen den Plättchen befindet sich eine etwa 40 nm dicke organische Schicht (organisches Biopolymer), die die Plättchen quasi miteinander verkittet. Obwohl diese organische Schicht nur etwa einen Anteil von 3 % am Gesamtgewicht hat, ist sie entscheidend für die Materialeigenschaften des Perlmutter“ (Universität Bremen 2006a). „Denn dieser Verbundwerkstoff besitzt mechanische Eigenschaften, die die Eigenschaften der einzelnen Komponenten weit übertreffen. Zudem ist das Material korrosionsresistent gegenüber Seewasser. ... Die aus dem Verständnis dieses Prozesses der Biomineralisation abgeleiteten Strukturregeln werden für die Entwicklung hochzäher Keramiken in Form von Folien, Membranen, Gerüststrukturen und hochtexturierten Beschichtungen genutzt.“ (Oertel & Grundwald 2006: 70). Die Muschelschale und ihr schillerndes Inneres bestehen aus demselben Stoff: Kalziumkarbonat. Es wird in zwei unterschiedlichen Kristallformen zusammengefügt – dieser Prozess der Selbstorganisation wird durch Eiweißstoffe als ‚Montagetruppe‘ dirigiert. In der Nanochemie werden diese Verfahren genutzt, um bestimmte Oberflächenstrukturen zu erzeugen. (natur Kosmos Februar 2001). Perlmutter steht im Fokus des Forschungsinteresses, weil es sich durch eine hohe Härte und gleichzeitig hohe Bruchfestigkeit auszeichnet. Perlmutter ist u. a. zäher als heutige Industriekeramik (Nachtigall 2002). So hat Perlmutter, obwohl zu 97 % aus Kalk bestehend, eine tausendfach höhere Bruchfestigkeit als dieser (MPG 2005).

Strömungssensoren von Fischen können als Vorbild für Unterwasserfahrzeuge dienen: Fische und viele Amphibien besitzen ein Seitenlinienorgan, das selbst feinste Strömungsveränderungen und

Vibrationen registriert. Dank dieses aus feinen Kanälen und Haarsinneszellen bestehenden Systems finden sie sich auch nachts und in trübem Wasser zurecht, können Fressfeinde rechtzeitig erkennen oder aber in reißenden Wildbächen navigieren. Dieser Mechanismus wurde von US-Forschern mit Hilfe von Silizium-Haaren nachempfunden und gebaut. Diese sind über winzige Gelenke mit einem elektronischen Sensor verbunden. Sobald eine Strömung die Haare bewegt oder verbiegt, wird der Vorgang vom Sensor registriert und an einen Computer zur Auswertung weitergeleitet. Als Ergebnis erhält man eine Antwort auf das Strömungsverhalten des umgebenden Fluids. U-Boote und Unterwasserfahrzeuge sollen für eine bessere und genauere Navigation in Zukunft mit einem Strömungssensor ausgestattet werden. Außerdem sollen Unterwasserroboter in optimierter Art und Weise operieren können. Nach Berichten des „Journal of Micromechanics and Microengineering“ wurde ein solcher Sensor bereits von Chang Liu und seinen Kollegen von der University of Illinois in Urbana-Champaign gebaut und mit Erfolg betrieben (BMBF 2007).

Delfine haben über Jahrmillionen hinweg eine Strategie entwickelt, Ultraschallsignale unter Wasser einwandfrei zu kommunizieren - sie verwenden dabei keine starren Frequenzen, sondern variieren die Höhe der Töne in einem sehr breiten Frequenzspektrum. Die Wissenschaftler um Rudolf Bannisch von EvoLogics, einem Spin-off der Technischen Universität Berlin, haben aufbauend auf der Delfin-Strategie ein Modem entwickelt, das die zu übertragenden Informationen nicht nur einem Trägersignal durch Phasen- oder Frequenzmodulationen aufprägt, sondern dessen Frequenz gleichmäßig verändert. Müssen Objekte im Meer geortet und vermessen werden, etwa im Rahmen der Überwachung von Pipelines, der Inspektion havariierter Tanker oder auch bei der Erforschung des Meeresbodens, so werden bisher ultraschallbasierte Sonden benutzt, die Signale senden und empfangen können. Diese Daten wiederum müssen per Kabel zum Schiff übertragen werden. Angesichts von Korrosion sowie Hindernissen im Meer sind Wissenschaftler auf der Suche nach einer drahtlosen Kommunikation. Herkömmliche Funk- und Lichtsignale werden im Meerwasser allerdings stark absorbiert und kommen deshalb nicht weit. Wale und Delfine haben dieses Problem bekanntlich gelöst: Sie singen. Denn mit Schallwellen lassen sich größere Distanzen überbrücken. Diese akustischen Signale sind allerdings nicht homogen, Tiere und Schiffe steuern ebenfalls Geräusche bei. Darüber hinaus gibt es Echos, Verzerrungen und komplizierte Nachhalleffekte. Die Strategie der Delfine: sie verwenden keine starren Frequenzen, sondern variieren die Höhe der Töne in einem sehr breiten Frequenzspektrum. Der Delfin kommuniziert trotz Signalverzerrungen und Signalrauschen deshalb so effektiv unter Wasser, weil er Obertöne zu seinem Grundton ein- und ausblendet und damit eine Art Morsecode ergänzt (Akgül 2002; BMBF 2007).

Bei einem Krebs (Molukkenkreb *Limulus*) wurde in den 1960er-Jahren ein Mechanismus entdeckt, wie seine Augen an der Grenze von Licht und Schatten die Lichtkontraste verstärken. Das Prinzip der ‘lateralen Inhibition’ wurde erfolgreich auf optische Geräte übertragen, ob es sich dabei um die automatische Scharfeinstellung beim Diaprojektor oder um Geräte zur Messung der Windabdrift von Flugzeugen handelt (Akgül 2002).

Der horizontale Flossenschlag der Fische führt auch zu einer neuen Form von Propellern, die im Flachwasser möglichst wenig Untergrund aufwühlen. Auch eine ‚Flossenpumpe‘ wurde 1973 zum Patent angemeldet, mit der auch schwer bewegliche halbflüssige Gemische durch Leitungen transportiert werden können. Die Firma Festo AG & Co aus Esslingen erfand nach dem Vorbild der

Natur den Fluidic Muscle einen Schlauch, der aus verschiedenen elastischen und festeren Schichten besteht. Trotz seinem geringen Eigengewicht hält er einem sehr hohen Anfangsdruck stand und lässt sich flexibel in Position bringen (Akgül 2002).

Noch eine andere Eigenschaft der Fischflossen führte zu einer neuen Entwicklung: Presst man die Schwanzflosse einer Scholle in eine Richtung, wölbt sich die ganze Flosse aufgrund ihrer Strahlenstruktur der Kraft entgegen. Dieses Konstruktionsprinzip soll jetzt auf Traggestelle von Rucksäcken und auf Rückenlehnen von Bürostühlen übertragen werden, die sich aktiv unterstützend gegen den Körper pressen können (TU Berlin, (wissenschaftl. Quelle?) <http://www.ausbauguide.info/ausbauguide/prodinfos/274742.html>).

Die Jetconcept Schwimmanzüge von adidas oder Speedo reduzieren den Reibungsverlust durch mikroskopische Oberflächenstrukturen, die der Haihaut abgeschaut sind. Ian Thorpe trug diese Art von Anzug erstmals bei den Weltmeisterschaften in Barcelona und gewann zwei Goldmedaillen, eine Silber- und eine Bronzemedaille. Es ist allerdings unklar, welchen Anteil der Anzug daran hatte.

Haftung an glatten Flächen

Wenn es um Klettern und Haften an glatten Oberflächen geht, sind Untersuchungen an Gekko's von großem Interesse für die Bionik. Es gibt bereits den Prototyp eines sog. „Gekkomat“ (+), der es einem Menschen ermöglichen wird, wie der Gekko an Wänden hochzuklettern. US-Forscher haben im Auftrag der NASA im Frühjahr 2002 synthetische Hafthaare hergestellt. Diese Haare eignen sich z. B. für Roboter, als Torwarthandschuhe oder als Klebstoffe in der Chirurgie (Braun 2002). Für das Haften verantwortlich sind die sog. Van-der-Waals-Kräfte, die molekulare Kraft zwischen Härchen und Oberfläche. Ein ausgewachsener Gecko kann sich aufgrund dieser Kräfte mit einem einzigen Zeh an der Decke festhalten und könnte dabei theoretisch noch einen Eimer Wasser tragen (DBU, Biokon 2006).

Der mit 50.000 € dotierte Wissenschaftspreis des Stifterverbandes ging 2002 an den Direktor des Stuttgarter Max-Planck-Instituts für Metallforschung, Eduard Arzt sowie an seine Mitarbeiter Huajian Gao, Stanislav Gorb und Ralf Spolenak von der Eidgenössisch Technischen Hochschule Zürich für ihre Arbeiten auf dem Gebiet der klebstofffreien Verbindung von Werkstoffen. Die Forschergruppe fand heraus, warum Fliegen, Spinnen und Geckos selbst auf Glas sicheren Halt finden und entwickelte daraus technisch einsetzbare Haftsysteme. Verbindungstechniken wie Schweißen oder Kleben haben verschiedene Nachteile. Sie kosten Geld und lassen sich nur schwer wieder lösen. Klettverschlüsse verfilzen mit der Zeit und benötigen ein Gegenüber. Die Wissenschaftler untersuchten, wie verschiedene Tiere an der Decke haften können. „Der Vergleich verschiedener Tiere von Fliegen bis hin zu Geckos zeigt, dass die Härchen an den Laufflächen um so feiner und zahlreicher sind, je schwerer das Tier ist. ... Kleineren Fliegen und Käfer reichen einfache, sphärische Härchen mit Durchmessern von ein paar Mikrometern, während die sehr viel schwereren Geckos fein verzweigte Härchen mit Enddurchmessern von 200 Nanometern (millionstel Millimeter) ausbilden. Auch die Form der Härchen spielt eine wichtige Rolle. In der

Natur haben sich vor allem kugelförmige, kegelförmige und haarartige Endstrukturen bewährt. Für technische Systeme sind hierbei der Fantasie kaum Grenzen gesetzt.“ (vgl.

<http://www.leichtbau.karosserie-netzwerk.info/0202.htm>;

<http://www.heute.de/ZDFheute/inhalt/11/0,3672,2326155,00.html>)

Die Bauchschuppen der amerikanischen Schlange Leimadrophys dienten als Vorbild für die Entwicklung und Patentierung einer technischen Folie für Langlaufskier (WWF 1991; WBGU 1999).

Neues aus der Materialforschung

Spinnennetze haben nicht nur atemberaubende Konstruktionsprinzipien aufzuweisen, ihr Material, die Spinnenseide ist auch das bisher unerreichte Vorbild beispielsweise für Fallschirme und schusssichere Westen (WWF 1991; WBGU 1999): Wissenschaftlern der TU München ist es erstmals gelungen, künstliche Spinnenseide herzustellen. Der Biophysiker Sebastian Rammensee baute den Herstellungsprozess von Spinnenseide-Fäden im Labor nach. Damit können erstmals die genauen physikalischen und chemischen Bedingungen erforscht werden, unter denen sich aus den Spinnenseide-Proteinen ein Faden bildet. Fäden aus Spinnenseide sind extremen mechanischen Belastungen gewachsen und zudem außerordentlich elastisch (vgl. <http://www.organische-chemie.ch/chemie/2008mai/spinnenseide.shtm>;

http://portal.mytum.de/pressestelle/pressemitteilungen/news_article.2008-04-28.4300700703;

<http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/root.did=67210.html>).

Die extrem belastbare und zugleich Material sparende Struktur von Knochen und Bienenwaben entsteht nach speziellen Wachstumsprinzipien. Ähnliche Prozesse lassen sich auch dazu nutzen, um Metalle, Kunststoffe und Keramik zu schäumen. Derartige Schäume weisen ganz spezielle Eigenschaften auf: Kunststoffschäume etwa sind leicht und flexibel halten aber keinen hohen Temperaturen stand. Metallschäume sind sehr widerstandsfähig aber nur wenig flexibel, und sie sind vergleichsweise schwer. Keramikschäume sind ziemlich starr und halten auch hohen Temperaturen stand, lassen sich aber nur schwer formen. Die Verbindung dieser Eigenschaften in neuartigen Hybridschäumen schafft völlig neue Eigenschaften, die besonders im Automobilbau und in der Luft- und Raumfahrt wichtig sind. So ließe sich beispielsweise der Schallschutz in einem Verbrennungsmotor erhöhen, in einer Crashbox die Energieabsorption steigern oder leichte und hochsteife Bauteile fertigen, wie ein Forschungsverbund der Fraunhofer-Institute mitteilt. Dem Verbund gehören die Fraunhofer-Institute für Chemische Technologien ICT, Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Keramische Technologien und Systeme IKTS, Silicatforschung ISC und Werkstoffmechanik IWM an (vgl. http://www.innovations-report.de/html/berichte/messenachrichten/hybridschaume_verbessern_leichtbau_121731.html).

Die Zähne von Mäusen und Ratten sind immer scharf, obwohl sie sich durch alle möglichen Materialien nagen. Vergleichbare technische Erfindungen, z. B. die Messer einer Müllzerkleinerung, müssen oft schon nach wenigen Betriebsstunden ausgewechselt werden. Forscher vom Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) haben zusammen mit der Firma Kennametal Widia permanent scharfe Messer für Schneidmühlen entwickelt. Sie nutzen den Aufbau der Nagetierzähne, die nur an ihrer Vorderseite eine harte

Schicht haben. Der dahinter liegende weiche, nachwachsende und den gesamten Zahn stabilisierende Zahnkörper wird kontinuierlich abgerieben, so dass die harte Kante des vorderen Materials immer scharf bleibt. Für die Schneidmesser wurde eine Legierung aus Wolframcarbid und Kobalt mit einer glatten, etwa doppelt so harten mehrlagigen Keramikschicht bedeckt, die durch Nanowerkstoffe verstärkt wird. Das hat mehrere Vorteile: Die scharfen Messer müssen nicht mehr so oft ausgewechselt werden, was die Betriebszeiten verlängert, das Material kann feiner zerstückelt werden und der Energieaufwand sinkt durch die Schärfe der Messer (vgl. <http://www.leichtbau.karosserie-netzwerk.info/0086.htm>).

Die Welt unter Wasser ist zu großen Teilen sehr dunkel und vor allem Tintenfische und Oktopusse haben interessante Methoden entwickelt, mit diesem Lichtmangel zu Recht zu kommen: Reflektor-Proteine reflektieren bioluminiszierendes Licht, das Tintenfische als Scheinwerfer benutzen. Das sind die ersten entdeckten optischen nano-Strukturen, und Forscher hoffen, so evtl. mit optischen Fasern die Photosynthese imitieren zu können (Crookes et al. 2004; Hanlon 2005). „Tintenfische nutzen ein ausgeklügeltes Reflektorsystem, um sich ihrer Umgebung perfekt anzupassen: Die unterste Schicht ihrer Haut besteht aus bislang unbekanntem Eiweißverbindungen, die das gesamte auftreffende Licht vollständig zurückwerfen. ... Mithilfe dieser Superreflektoren gelingt es den Tieren, in weißem Licht weiß zu erscheinen und im bläulichen Licht der Ozeane eine blaue Farbe anzunehmen, was sie für Feinde nahezu unsichtbar macht. Spezialisierte Zellen in der untersten Schicht der Tintenfischhaut, die Leucophoren genannt werden, sind für die Anpassung an unterschiedliche Lichtverhältnisse zuständig. Sie sind von farblosen, durchscheinenden und reflektierenden Proteinen bedeckt, die Licht vollständig zurückwerfen – unabhängig davon, welche Wellenlänge es hat oder in welchem Winkel es auftrifft. Sogar die Intensität der vorherrschenden Wellenlängen wird originalgetreu wiedergespiegelt. ... So könnten nicht nur Tarnsysteme nach dem Vorbild der Tintenfischhaut entwickelt werden, sondern etwa auch verbesserte optische Fasern.“ (Fedoriw et al. 2004, zit. nach <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/news/234382.html>)

Die sechseckige Form der Bienenwaben ist Vorbild für viele Produkte und Strukturen. Lange war nicht klar, wie Bienen diese regelmäßige Form überhaupt herstellen können. Auch die künstliche Herstellung war für bestimmte Funktionen und Stoffe kaum möglich, weil immer wieder Mikrorisse im Material auftreten. Der Bienenforscher Jürgen Tautz und die Würzburger BEEgroup konnten nachweisen, dass die Kombination aus dem ‚intelligenten Werkstoff‘ Wachs und dem Verhalten der Biene erst diese Struktur ermöglicht. Die Bienen bauen ihre Zellen erst rund und dann erwärmt ein darauf spezialisiertes Tier das Wachs auf 45 °C. So nimmt der Bau von allein die regelmäßig sechseckige Struktur an. Physiker und Ingenieure am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik in Braunschweig, die Leichtbau-Konstruktionen in der Luft- und Raumfahrt entwickeln, werten diese Entdeckung als Durchbruch. Aber auch andere Einsatzgebiete sind denkbar, z. B. bei Handyherstellen, die einen möglichst sparsamen Vibrationsalarm in ihre Geräte installieren wollen (vgl. <http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/root.did=67228.html>).

Interessant ist auch die sog. ‚Wölbstrukturierung‘, die sich beispielsweise im Panzer von Schildkröten wiederfindet. Dabei entstehen Strukturen durch das Falten des Stoffes, der seine ursprünglichen Eigenschaften dabei bewahrt. So kann eine hohe Biegesteifigkeit bei geringer Wanddicke und geringem Gewicht erzeugt werden. Die Firma Miele setzt dieses Prinzip bei ihren

‚Softtronic‘-Wäschetrommeln ein, die sparsamer sind und mit der Wäsche sanfter umgehen (Akgül 2002).

Ameisen-Logistik

Nach dem Organisationsvorbild von Ameisenstaaten entwickelte Siemens eine Software, mit der Waren effektiver zum Kunden kommen können. Durch die Übernahme naturnaher Algorithmen ist es in einem Pilotprojekt gelungen, die Anzahl pünktlicher Lieferungen zu verdoppeln und Lieferverzögerungen um bis zu 44 % zu reduzieren (Andres 2005; WBGU 1999; vgl. <http://www.elektrojournal.at/ireds-23192.html>).

Das ‚Insektenprogramm‘ ordnet die einzelnen Aufträge zu und schlägt vor, welche Pakete wann auf die Reise geschickt werden sollen. Wenn man annimmt, dass das Versandlager der Bau und die Kunden die Futterquellen sind, dann startet das Programm, indem es die Pakete rein zufällig loslaufen und miteinander kommunizieren lässt. So tun das auch die Ameisen und finden sehr schnell den kürzesten und einfachsten Weg. Als Ergänzung dient ein Programm, das den Wespen abgeschaut wurde. Je wichtiger die Tätigkeit einer Wespe für den Stock ist, desto eher setzt sie sich gegen andere Wespen durch. Diese Art der Hierarchisierung wird in die mathematischen Logistik-Modelle eingebaut. Verknüpft man nun die Ameisen- und Wespenmodelle in Programmen, die mit Fuzzy-Logik arbeiten, dann arbeitet das so entstehende Logistikprogramm ausgesprochen effizient. In Experimenten wurde sogar eine Liefertreue von 97 % erreicht (vgl. <http://www.elektrojournal.at/ireds-23192.html>).

Auch die Verschaltung von Parallelrechnern und die Entwicklung neuronaler Schaltkreise übernahmen entscheidende Anregungen aus dem Bereich der Neurobiologie und der Biokybernetik (Akgül 2002).

Abläufe in der Natur lassen sich auch grundsätzlicher nachahmen. Die Evolution selbst arbeitet höchst effizient nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum. Heraus kommen Lösungen, die durch Berechnungen gar nicht zu entdecken sind. Das wohl bekannteste Beispiel für die technische Nutzung von Evolutionsprinzipien stammt aus der Entwicklung von Düsen. Für die Stromerzeugung von Satelliten sind Überschalldüsen notwendig, bei denen jede Verengung und Erweiterung bestimmte Effekte mit sich bringt, wobei fast unendlich viele Varianten bei Anzahl und Winkel solcher Verengungen denkbar sind. Nun wurden zufällige Änderungen der Düsenform in verschiedenen Kombinationen im Labor getestet und die Formen mit dem besten Wirkungsgrad für die Weiterentwicklung herangezogen. Dies entspricht in der Evolution den Prinzipien der Mutation, Rekombination und Selektion. Auf diese Art wurde in einer überschaubaren Zeit der Wirkungsgrad der herkömmlichen Düse um 40 % erhöht (Akgül 2002).

Ähnliche Optimierungsprozesse verlaufen nach dem Muster von Bäumen, deren Äste je nach Belastung durch Wind, Schnee und Nachbarbäume an verschiedenen Stellen an Wachstum zulegen. Der Karlsruher Materialforscher Claus Mattheck entdeckte die Gesetzmässigkeit, dass bei optimalen Strukturen (so leicht wie möglich und so stabil wie nötig) an der Oberfläche überall die gleiche Spannung herrscht. Aus seinen Erkenntnissen entwickelte er zwei computergestützte Verfahren. Das CAO-Verfahren (Computer Aided Optimisation) simuliert das Dickenwachstum der

Bäume, wonach an belastete Aussenbereiche von Werkstücken so lange Material angelagert wird, bis überall eine gleiche Oberflächenspannung herrscht. Das andere Programm nimmt das Wachstum von Knochen zum Vorbild: Beim SKO-Verfahren (Soft Kill Option) wird das Material von unterbelasteten Stellen im Innen- und Aussenbereich eines Werkstücks so lange entfernt, bis auch hier überall wieder die gleichen Belastungen herrschen. Die Kombination beider Verfahren führt zu optimierten Bauteilen wie z. B. Leichtmetall-Alufelgen mit 26 % Gewichtersparnis oder orthopädische Schrauben mit 20fach höherer Lebensdauer und minimierter Bruchgefahr (Euler et al. 2004).

Bionik in der Medizin

Auch in die Medizintechnik hält die Bionik Einzug: Innenohrprothesen der Firmen Advanced Bionics, Cochlear und MED-EL sind als „bionische Prothesen“ weit entwickelt. Schall wird im Ohr über das Trommelfell und die Gehörknöchel auf winzige Haare im Ohr übertragen, die die Schallwellen in elektrische Impulse verwandeln, die das Gehirn verarbeiten kann. Bei den Implantaten wird ein Empfänger in den Schädelknochen implantiert, der über Kabel mit Elektroden im Innenohr verbunden ist. Die Elektroden reizen wiederum an Stelle der Haarsinneszellen den Hörnerv. Auch die Endoprothesen der Firmen Chendo, Össur Europe oder Otto Bock HealthCare GmbH sind Produkte der bionischen Forschung (Oertel & Grundwald 2006).

Für das schon erwähnte Perlmutter werden mögliche Einsatzgebiete in der Medizintechnik (Implantatwerkstoffe) gesehen, da heute verwendete nicht keramische Werkstoffe oft problematisch bezüglich ihrer Biokompatibilität sind. Aus dem gleichen Grund werden auch die Strukturen der Lotosblüte als Beschichtung auf Stents eingesetzt. Nach Untersuchungen von Forschern der Universität Würzburg bewirken sie, dass sich weniger Blutzellen an den Implantaten festsetzen können (Braun 2002).

Die Byssusfäden der Miesmuscheln dienen als Vorbild für einen Dreikomponenten-Unterwasserkleber: Von einem Strandspaziergang brachte er lebende Muscheln mit und setzte sie in einen Eimer. Dann startete der Forscher eine kleine Versuchsreihe. „Es gab am Ende des Urlaubs in diesem Ferienhaus kein Gerät mehr, das ich nicht ausprobiert hatte“, erinnert sich Grundwald. Fazit: Auf alles krochen die Muscheln und klebten sich fest. „Das ist erstaunlich“, so Grundwald, „sogar an einer nagelneuen Teflon-Pfanne blieben die Muscheln hängen. Es gibt zur Zeit keinen Klebstoff, der das kann: unter Salzwasser an Teflon zu haften.“ Forscher am IFAM wollen den Muschelklebstoff für medizinische Anwendungen zugänglich machen. Eine gerissene Milz könnten Chirurgen vielleicht bald mit einem neuartigen Bionik-Kleber zusammenfügen. Die stärksten bisher entdeckten Kleber produziert allerdings ein Süßwasserbakterium. Eine beklebte Fläche von der Größe eines Centstücks kann eine Last von 1,3 t halten. Und da er biologisch abbaubar ist und auf nassen Oberflächen haftet, wäre er für medizinische Zwecke sehr geeignet (DBU/Biokon 2006).

Das peristaltisch-suchende Bewegungsprinzip des Regenwurms inspiriert die medizinische Forschung bei der Suche nach sanfteren Methoden der Darmspiegelung (DBU/Biokon 2006).

Das Auge des Oktopus kann das Licht fünfmal besser bündeln als das menschliche Auge. Der Aufbau lässt sich aus tausenden synthetischen superdünnen Folien nachahmen und führt zu

künstlichen Linsen mit hoher Schärfe, die zugleich leicht und schwer zu zerstören sind - ein ideales Material für die Brille von morgen (Baer et al. 2004; Jin et al. 2007). Die Natur hat es vorgemacht, die Nanotechnologie erlaubt die Nachahmung: Materialforscher aus den USA haben eine extrem scharfsichtige Linse geschaffen, die dem Auge von Kraken nachempfunden ist. Sie ist nicht nur deutlich leichter als eine vergleichbar starke Glaslinse, sondern auch weniger empfindlich und aus billigen Materialien herstellbar. Herkömmliche Linsen bestehen aus gewölbtem Glas oder Kunststoff, um einfallendes Licht in einem Punkt zu bündeln. Ein durchsichtiges Objekt, das an den Rändern einen stärkeren Brechungsindex besitzt als im Zentrum, bündelt das Licht genauso wie eine gewölbte Linse - obwohl es vollkommen flach ist. Viele biologische Linsen bestehen aus Tausenden feinsten Schichten, jede mit einem geringfügig anderen Brechungsindex. Das menschliche Auge etwa besitzt rund 22.000 dieser Schichten. Das Auge der Krake kann das Licht fünfmal stärker bündeln als ein menschliches Auge. Eric Baer von der Case Western University in Cleveland (US-Staat Ohio) und seine Kollegen vom Naval Research Laboratory in Washington haben das Krakenauge nun mit Hilfe der Nanotechnologie kopiert. Die Forscher stellten Kunststoff-Filme her, die aus rund 6.000 winzigen Schichten zweier verschiedener Polymere bestehen und dennoch nur 50 Mikrometer dünn sind. Die Polymerlinse besitzt nur ein Viertel des Gewichts einer vergleichbar starken Glaslinse und soll zudem flexibler sein. Die Veränderung weniger Nanoschichten reichte bereits aus, um den Brechungsindex zu verändern (vgl. Spiegel online 2004, <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,331550,00.html>).

Frostschutz, Hautcreme & Co.

Forscher aus Israel haben nach dem Vorbild der Clownfische, die inmitten der Nesselzellen von Seeanemonen leben, eine Hautcreme erfunden, die Schwimmer vor Hautkontakt mit Quallen schützt. Der Verkaufspreis einer Tube liegt bei 12.95 US-\$.

„Auch in der kosmetischen Industrie hat die Bionik Einzug gehalten. So produziert und vertreibt die Bayersdorf AG bionische Produkte, die die menschliche Haut bis zu zehnmals langsamer altern lassen. Inspiriert wurden die Forscher dabei von dem japanischen Pagoda-Baum (*Sophora japonica* L. - Leguminose), der seine Blätter mittels Alpha-Flavon - einem natürlichen Flavonoid - vor dem Austrocknen schützt“ (Braun 2002) und genauso werden sie – äußerlich aufgetragen – von der menschlichen Haut verwendet. Flavonoide sind aus Pflanzen gewonnene Farbstoffe, die in Produkte eingearbeitet werden können und nach dem Auftragen als Antioxidans in der Haut wirken können. Sie werden in der medizinischen Sonnenschutzserie ‚Eucerin sun‘ und in Produkten für empfindliche Haut der Reihe ‚Nivea sun‘ sowie in der Feuchtigkeitspflege ‚Nivea Visage‘ eingesetzt“ (vgl. <http://www.beiersdorf.de/Controller.aspx?&n=23&l=1&id=628>). Der Beiersdorf-Konzern ist einer der führenden Anbieter von Körperpflegemitteln in Europa.

Braun (2002) nennt einen Forschungsversuch in Australien, bei dem die natürlichen Abwehrstoffe von Korallen gegen UV-Strahlung kopiert und modifiziert werden konnten, um damit eine ‚Korallen-Sonnencreme‘ zu schaffen, die geruchlos, wasserfest und lichtunempfindlich ist. Geschätzter Marktwert: mehrere hundert Mio. US-\$.

In Polarregionen gibt es Fische und Insekten, denen auch extrem niedrige Temperaturen nichts anhaben können. Manche Insekten überleben sogar -60 °C. Besondere Eiweiße verhindern das

Wachstum von Eiskristallen. Diese Proteine sollen nun als Frostschutzmechanismus in verschiedene Materialien und Lacke eingebaut werden. Derartige Materialien wären nicht nur für die Raumfahrt wichtig, denn im Weltraum sind Temperaturen am absoluten Nullpunkt vorherrschend. Aber auch der Erde werden technische Infrastrukturen wie Strommasten und -kabel, Flugzeugtragflächen, Windräder oder Rollläden oft durch Eisbildung blockiert oder beschädigt (Rüter 2008; vgl. <http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/root,did=67220.html>).

Bionik – Literatur

- Akgül G (2002): *Bionik – Trends in Industrie und Gesellschaft und Anwendungen bei der Continental AG*, http://www.biokon.net/bionik/download/Conti_bionic_studie_de.pdf
- Alfred Wegener Institute (n.d.): *The "Friedrich Hustedt Study Centre for Diatoms"*. <http://www.awi.de/>, Recherche vom 5. Feb. 2009
- Andres M-S. (2005): *Technik aus der Natur*. In: Brandeins, Nr. 3/2005, www.brandeins.de
- Baer E, Hiltner A, Shirk J S (2004): *Multilayer Polymer Gradient Index (GRIN) Lenses*, U.S. Allowed Patent Application 10/941,986, siehe auch <http://www.patentstorm.us/patents/7002754-claims.html> und http://www.businessweek.com/technology/content/jan2005/tc2005014_4937.htm
- Bappert R, Häcker B (1999): *Bauen*. In: *Biologie, Technik, Zukunfts -Technik lernt von der Natur*. SiemensForum und Landesmuseum für Technik und Arbeit (Hrsg.), Mannheim
- Barthlott W, Schulte A J (2007). *Wege in den Nanokosmos: Die Welt des Mikrokosmos als Vorbild für Innovationen*. In: *Politik und Kultur, Zeitung des Deutschen Kulturrates*, Vol. 10, Mai-Juni 2007, pp. 7-8
- Beiersdorf AG (2000): *Der Natur abgeschaut: Mit Flavonoiden gegen Freie Radikale*. <http://www.beiersdorf.de/Controller.aspx?&n=23&l=1&id=628>
- BfN Bundesamt für Naturschutz (2001): *Biologische Vielfalt – Das Netz des Lebens*. Bonn, http://bfu.eu/0508_informationsmaterial+M5054de7a952.html
- BMBF (2005): *Innovationen aus der Natur. Förderkonzept Bionik*. Bonn, Berlin
- BMBF (2007): *Entwicklung eines Farbsonars nach dem Vorbild von Delfinen und Fledermäusen*. In: *Von der Natur abgeschaut: Bionik-Projekte vom BMBF prämiert*, vom 27.06.2007, <http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/Foerderung/foerderbeispiele,did=67216.html?view=renderPrint>
- BMW AG (2005): *BMW nutzt Prinzipien der Bionik zur Entwicklung von Fahrzeugen*, am 17. Mai 2005 für Motor-Talk zur Verfügung gestellt, <http://www.motor-talk.de>
- Braun (2002): *Die Geschichte der Bionik*. In: *BdD-Verbandszeitschrift "Grün ist Leben"* Vol. 7-8/2002, <http://www.bund-deutscher-baumschulen.de/>
- Buck Christian (2008): *Naturburschen erobern die Wissenschaft*. In: *Handelsblatt* vom 20. April 2008, <http://www.handelsblatt.com/technologie/forschung/naturburschen-erobern-die-wissenschaft;1419101>
- Crookes W J, Ding LL, Huang Q L, Kimbell J R, Horwitz J, McFall-Ngai1 M J (2004): *Reflectins: The Unusual Proteins of Squid Reflective Tissues*. In: *Science*, Vol. 303, Issue 5655, pp. 235 – 238, DOI: 10.1126/science.1091288, zitiert nach <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/news/234382.html>
- Daimler AG (2005): *The Mercedes-Benz Bionic Car as a Concept Vehicle*. <http://www.daimler.com>,

Washington, 7. Juni 2005

DBU, Biokon (2006): *Inspiration Natur – Patentwerkstatt Bionik*. Begleitheft zur Wanderausstellung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und des Bionik-Netzwerks Biokon, www.inspiration-natur.net

Ebeling B (1997): *U-Boote nach dem Vorbild der Pinguine*. Berlin online ‚Wissenschaft‘ vom 22.07.1997, Recherche vom 20. Jan. 2008

Euler L, Sonali R, de Padova M (2004): *Bionik*. Fachbereich Architektur der TU Darmstadt, www4.architektur.tu-darmstadt.de/powerhouse/db/248,id_37,s_Papers.fb15

Foster J (2001): *Beiersdorf: Die Schönheit starker Marken*. Marktbericht, Skin Care Forum, http://www.scf-online.com/german/25_d/branding_25_d.htm

Fraunhofer Instituts für Bauphysik (1999): *Optische Beurteilung unterschiedlicher, frei bewitterter Fassadenbeschichtungen*. IBP-Bericht FEB-7/1999, http://www.bybest.de/shop/Anleitungen/Lotusan_Test-1.pdf

Grasso F W, Consi T R, Mountain D C, Atema J (2000): *Biomimetic robot lobster performs chemo-orientation in turbulence using a pair of spatially separated sensors: Progress and challenges*. In: *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 30, No. 1-2, pp. 115-131

Grundhoff Stefan (2005): *Bionik im Auto. Von der Natur lernen*. In: *Süddeutsche Zeitung* vom 11. Juli 2005, <http://www.sueddeutsche.de/automobil/79/329939/text/>

Hanlon R (2005): *Adaptive Coloration / camouflage*. <http://www.mbl.edu/mrc/hanlon/coloration.html>

Horst E, Friedrich H E, Treffinger P, Kopp G, Knäbel H (2008): *Forschung für das Auto von Morgen*. Springer Berlin Heidelberg, DOI 10.1007/978-3-540-74151-0

IFAM (2007): *Medizintechnik: Miesmuscheln liefern den Bioklebstoff der Zukunft*. Presseinformation des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen, vom 10. Jan. 2007, http://www.ifam.fraunhofer.de/2804/technologietransfer/ktzentrum/presse/pm_20070710_1_en.pdf

Jin Y, Tai H, Hiltner A, Baer E, Shirk J S (2007): *New class of bioinspired lenses with a gradient refractive index*. In: *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 103, No. 3, pp. 1834-1841

Kesel A B (n.d.): *Marine Bionik: Patente aus der Natur*. Berichte und Forschungsprojekte aus dem Bereich der marinen Bionik-Forschung sowie aus F&E Projekten und Institutionen. http://bionik.fbsm.hs-bremen.de/pages/MB_projekte.html/, Recherche vom 10. März 2008

Max-Planck-Gesellschaft (2005): *Biologischer Glaskäfig aus der Tiefsee*. Presseinformation C 20 / B 48 / 2005 (100) vom 7. Juli 2005, <http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/2005/pressemitteilung200507071/index.html>

MavLab (o.J.): *DelFly Micro*. A project of the Technical University of Delft and other institutions,

<http://www.delfly.nl/?site=DIII&menu=&lang=en>, Recherche vom 22. Jan. 2009. Siehe auch Handelsblatt vom 27.7.08, <http://www.handelsblatt.com/technologie/forschung/robo-ter-libelle-fuer-den-katastropheneinsatz;2015409>.

Nature online (2006): *Was Tintenfische unsichtbar macht.*

<http://www.wissenschaft.de/sixcms/detail.php?id=272792>

Nachtigall W (1983): *Biostrategie. Eine Überlebenschance für unsere Zivilisation.* Hamburg: Hoffmann und Campe

Nachtigall W (2002): *Bionik - Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler.* Springer

Oertel D, Grunwald A (2006): *Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik.* Vorstudie.

Arbeitsbericht Nr. 108 des TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, April 2006

Rechenberg I (2000): *Reibungsminderung im Spiegel der Evolution.* Vorlesungsmanuskript TU Berlin, Wintersemester 2000/2001, www.bionik.tu-berlin.de/institut/skript/bibu8.pdf

Rechenberg I (2008): Wundersame Technologien in der Natur. Geschichte der Bionik und die Leistung der Evolution. Vorlesung „Bionik I“ an der TU Berlin, www.bionik.tu-berlin.de/institut/skript/B1-08Fo2.ppt

Rodewald B, Schlichting H J (1988): *Wenn Wasser schlüpfrig und Luft klebrig wird. Zum Einfluß der Größe auf Form und Fortbewegungsart schwimmender und fliegender Tiere.* In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik Vol. 37 (5/1988), pp. 22-31

Rüter M (2008): *Proteine schützen vor Frost. Natürliche Frostschutzmechanismen technisch nutzen.*

http://biologie.suite101.de/article.cfm/proteine_schuetzen_vor_frost

Szentpétery V (2006): *Werkzeuge aus der Natur.* In: Technology Review 11/2006,

<http://www.heise.de/tr/Werkzeuge-aus-der-Natur--/artikel/79944>

TU Berlin (1998): *Haihaut hilft Sprit sparen..* Medieninformation Nr. 54 - 18. März 1998, <http://www2.tu-berlin.de/presse/pi/1998/pi54.htm>

Vogt R (2008): *Ingo Grunwald: Muschelklebstoff und Frostschutz-Lack.* In: BMBF (Hrsg.): Forscherporträt aus dem BMBF-Ideenwettbewerb „Bionik – Innovationen aus der Natur 2007, 22. Jan. 2008,

<http://www.biotechnologie.de/bio/generator/Navigation/Deutsch/forschung.did=71098.html>

WBGU (1999): *Welt im Wandel. Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Biosphäre.* Jahresgutachten 1999 des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Berlin u.a.: Springer

WWF Deutschland (1991): *Bionik. Patente der Natur.* München: Pro Futura

(alle Internet-Recherchen, soweit nicht anders angegeben, vom Jan./Feb. 2009)

Anhang: Firmen und Produkte aus der Bionik

Firma	Produkt	Vorbild in der Natur
3M	Ribletfolie	Haihaut
Velcro Unternehmensgruppe	VELCRO Klettverschluss	Klette
?	Alufelgen	Kieselalge
?	Lampenschirm	Kieselalge
?	Computergehäuse	Kieselalge
Continental, Dunlop	Autoreifen	Katzenpfote, Bienenwabe
Volvo	Glasbeschichtungen	Lotos
BMW	Magnesium- Aluminium- Materialmix	Anemonen, Quallen
ispo	ispoLotusan	Lotos
Evonik / Degussa	Beschichtete Textilien Aeroxide® LE 1 und 2 Tegotop® 210 (Spray zur Beschichtung von Oberflächen)	Lotos
Erlus AG	Erlus Tondachziegel	Lotos
Ferro Corporation	anorganische Beschichtungen	Lotos
adidas, speedo	Jetconcept Schwimmanzüge	Haihaut
Chendo	Cochlear-Implantate, bionische Endoprothesen	
	Hautcreme	Clownfisch
Beiersdorf AG	Alpha-Flavon in Eucerin sun, Nivea sun, Nivea Visage	Pagoda-Baum
	Technische Folie für Langlaufskier	Bauchschuppen der Schlange Leimadrophys
Siemens	Logistik- Software	Ameisenvolk
Kennametal Widia	Selbstschärfende Messer für	Rattenzähne

	Schneidmühlen	
Freiburg und Lausanne AG	ThermoCellit Backstein	Bienenwaben
Fa. Rimmele KG	Backsteine mit Wabenstruktur	Kieselalgen?
Festo AG & Co.	Fluidic Muscle	
Miele	„Softtronic“-Waschtrommel	Wölbstrukturen, z. B. Rückenschild der Seeschildkröte