



Bionik

BAND 122





Bionik – das ist Lernen von der Natur für eine verbesserte Technik. Für viele Probleme, die uns heute noch unlösbar scheinen, sind in der Natur längst Lösungen verwirklicht. Bioniker suchen nach natürlichen Vorbildern für technische Neuerungen. Was kann der Mensch vom Gecko lernen? Wie fliegt ein Vogel? Kann man die Haut



eines Hais nachbauen? Wie laufen Roboter? Der Biologe **Martin Zeuch** nimmt dich in diesem WAS IST WAS-Band mit in eine faszinierende Welt großer Entdeckungen und neuester Forschung. Er beschreibt die Anfänge der Bionik und erklärt bionische Entwicklungen der Gegenwart wie z. B. Katzenpfotenreifen, Kofferrisch-Autos und bionische Roboter. Staune über eine Zukunftswissenschaft, die den ungeheuren Ideenreichtum der Natur für uns nutzbar machen kann.

In dieser Reihe sind bisher erschienen:

- | | | | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|---|---|--|
| Band 1 Unsere Erde | Band 26 Wildblumen | Band 51 Muscheln, Schnecken, Tintenfische | Band 76 Die Sonne | Band 300 Multimedia und virtuelle Welten |
| Band 2 Der Mensch | Band 27 Pferde | Band 52 Briefmarken | Band 77 Tierwanderungen | Band 301 Geklüfte und ungeklärte Phänomene |
| Band 3 Energie | Band 28 Akustik | Band 53 Das Auto | Band 78 Gold | Band 302 Unser Kosmos |
| Band 4 Chemie | Band 29 Wissenschaften | Band 54 Die Eisenbahn | Band 79 Moderne Physik | Band 303 Demokratie |
| Band 5 Entdecker und ihre Reisen | Band 30 Insekten | Band 55 Das alte Rom | Band 80 Tiere – wie sie sehen, hören und fühlen | Band 304 Wölfe |
| Band 6 Die Sterne | Band 31 Bäume | Band 56 Ausgestorbene und bedrohte Tiere | Band 81 Die sieben Weltwunder | Band 305 Weltreligionen |
| Band 7 Das Wetter | Band 32 Meereskunde | Band 57 Vulkane | Band 82 Gladiatoren | Band 306 Burgen |
| Band 8 Das Mikroskop | Band 33 Pilze | Band 58 Die Wikinger | Band 83 Höhlen | Band 307 Piratengaleen |
| Band 9 Der Urmensch | Band 34 Wästen | Band 59 Katzen | Band 84 Mummien aus aller Welt | Band 308 Das Gehirn |
| Band 10 Hängebrücken und Luftfahrt | Band 35 Erfindungen | Band 60 Die Kreuzritzer | Band 85 Wale und Delfine | Band 309 Das alte China |
| Band 11 Hunde | Band 36 Polargebiete | Band 61 Pyramiden | Band 86 Elefanten | Band 310 Tiere im Zoo |
| Band 12 Mathematik | Band 37 Computer und Roboter | Band 62 Die Germanen | Band 87 Römische und Wollentkratzer | Band 311 Die Gene |
| Band 13 Wilde Tiere | Band 38 Südpole und der Vorzeil | Band 63 Prophetie | Band 88 Ritter | Band 312 Fernsehen |
| Band 14 Versunkene Städte | Band 39 Magnetismus | Band 64 Die alten Griechen | Band 89 Menschenaffen | Band 313 Europa |
| Band 15 Dinosaurier | Band 40 Vögel | Band 65 Eiszeiten | Band 90 Der Regenwald | Band 314 Feuerwehr |
| Band 16 Planeten und Raumfahrt | Band 41 Fische | Band 66 Geschichte der Medizin | Band 91 Brücken und Tunnel | Band 315 Bären |
| Band 17 Licht und Farbe | Band 42 Indianer | Band 67 Die Völkerwanderung | Band 92 Papageien und Sittiche | Band 316 Musikinstrumente |
| Band 18 Der Wilde Westen | Band 43 Schmetterlinge | Band 68 Natur | Band 93 Die Olympischen Spiele | Band 317 Bauernhof |
| Band 19 Bienen, Wespen und Ameisen | Band 44 Die Bibel, das Alte Testament | Band 69 Fossilien | Band 94 Samurai | Band 318 Mittelalter |
| Band 20 Reptilien und Amphibien | Band 45 Mineralien und Gesteine | Band 70 Das alte Ägypten | Band 95 Hais und Rochen | Band 319 Geologie |
| Band 21 Der Mond | Band 46 Mechanik | Band 71 Piraten | Band 96 Schatzsuche | Band 320 Polizei |
| Band 22 Die Zeit | Band 47 Elektronik | Band 72 Meistere | Band 97 Zauberer, Hexen und Magie | Band 321 Schlangen |
| Band 23 Architektur | Band 48 Luft und Wasser | Band 73 Spinnen | Band 98 Kriminalistik | Band 322 Bionik |
| Band 24 Elektrizität | Band 49 Sport | Band 74 Naturkatastrophen | Band 99 Sternbilder und Sternzeichen | |
| Band 25 Schiffe | Band 50 Der menschliche Körper | Band 75 Fahren und Fliegen | | |

Ein  Buch

Bionik

Von Martin Zeuch

Illustrationen von Eberhard Reimann



Großer Taggecko

TESSLOFF

Vorwort

Im Laufe von Millionen Jahren haben Lebewesen unzählige Fähigkeiten und Strukturen entwickelt, die ihnen das Überleben sichern. Ihre Leistungen setzen uns immer wieder in Erstaunen. Diese Ideen aus der Natur als Vorbild für neue Technologien zu nutzen, ist ein faszinierender Gedanke. Bionik ist eine Wissenschaft, die sich mit diesem Thema beschäftigt. Der Begriff setzt sich zusammen aus „Biologie“ und „Technik“.

Die Bionik ist in den letzten Jahren zunehmend in den Medien vertreten. Mit ihr verbinden sich Hoffnungen und Erwartungen. Denn unsere Lebensgrundlage, die Natur, ist oft von den Folgen technischer Entwicklungen bedroht. Kann sie Vorbild für eine naturverträgliche Technik sein? Die Natur lässt sich nicht

einfach nachbauen. Der Weg vom natürlichen Vorbild zum neuen technischen Produkt ist oft lang und schwierig.

Die Bionik wird nicht alle technischen Probleme lösen, sie kann aber dazu beitragen. Denn in der Bionik wird auf „Erfindungen“ zurückgegriffen, die unabhängig vom menschlichen Denken entstanden sind. Die Chance, auf ganz neue Ideen zu treffen, ist also hoch.

Dieser WAS IST WAS-Band lädt zu einem Streifzug durch die faszinierende Welt der Bionik

ein. Das Buch schlägt einen Bogen von den ersten Entwürfen Leonardo da Vincis über die Gleiter Otto Lilienthals bis hin zu den bionischen Entwicklungen der Gegenwart wie Haihautfolien und Katzenpfotenreifen.

DANKSAGUNG:

Mein Dank gilt den Mitarbeitern des BitZ (Biotechnik-Zentrum der TU Darmstadt) und für die Unterstützung und kritische Durchsicht: Dr. Torsten Rossmann, Prof. Cameron Tropea, Dr. Hendrik Bargel, Tatjana Hubel und Sigridd Belzer. Weiterhin danke ich folgenden Kollegen für die fachliche Beratung: Prof. Bernd Hill, Dr. Cornelius Schilling, Dr. Deane Harder, Manuel Späth, Zdenek Cerman, Dr. Iwiza Tesari, Roland Kappel, Prof. Claus Mattheck, Ivo Boblan, Prof. Antonia Kesel und Doris Zehren. Dorothee Kremer danke ich für ihre engagierte didaktische Beratung. Schließlich möchte ich dem Tessloff-Verlag für die hervorragende Zusammenarbeit danken.

Martin Zeuch



BAND 122

Dieses Buch ist auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

BILDQUELLENACHWEIS:

FOTOS: Archiv Tessloff Verlag, Nürnberg: S. 41, 4m (Draht), 4mr (Salz), 6ul, 8ul, 8/90, 9ur, 24m, 26ul, 27ul; Prof. W. Barthlott, Nees-Institut, Bonn: S. 100l, 100r, 12/13u, 13m, 140r; Continental AG, Hannover: S. 5um; Corbis, Düsseldorf: S. 40r, 5mc, 220l, 240r, 26/27, 28u (2), 360; DaimlerChrysler, Stuttgart: S. 38r (4); Festo AG, Esslingen: S. 44ur, 47m; Focus, Hamburg: S. 30r, 5ml, 15mr, 16u, 180r, 230, 32/330, 330r, 370r, 36/37u, 400l (Blüten), 41l (3), 42mr, 470l, 47mr, 47ul; FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe: S. 43ul; FZK Forschungszentrum, Karlsruhe: S. 47ur, 48m, 48mr; Honda Motor Europe (North) GmbH, Offenbach: S. 44ul; IAS EcoBot Team: S. 450l; Dr. Armin Jagel, Bochum: S. 4ur (Mohnkapsel); Robert Kratz, TU Darmstadt: S. 470r; Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim: S. 370l; NASA: S. 19ml; NHPA, Sussex: S. 210; Adam Opel GmbH (Lothar Harzheim), Rüsselsheim: S. 30 (3); Pepps Library, Magdalene College, Cambridge: S. 6mr; Photocase: 29 (Hintergrund); Picture-Alliance, Frankfurt: S. 1, 4/5u, 60r, 110r, 12um, 130l, 14ul, 14ur, 160l, 160r, 170r, 200l, 24mu, 290l, 29m, 310l, 31/32u, 34/35, 350r, 38ul, 41r, 42u, 45r, 480l; Prospective Concepts AG, CH-Glatbrugg: S. 35ur; Dr. Helmut Schmitz, Bonn: S. 39ul; Speedo: S. 37ur; Sto AG, Stühlingen: S. 10/11u, 13mr; TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau: S. 460r; Universität des Saarlandes, Dr. Alfred Wisser, Saarbrücken: S. 80 (6); Wildlife, Hamburg: S. 3ul, 7ul, 8um, 15ul, 150r, 20ul, 320l, 380m, 400r, 43m, 48u; <http://members.aol.com/woinem1/index/zanonia.htm> / Uli Wahl, Weinheim: S. 250r; <http://www.ornithopter.ca/> James Delaurier: S. 23ml; www.zar-x.de: S. 46ul; Martin Zeuch, TU Darmstadt: S. 22m, 22u;

UMSCHLAGEFOTOS: Honda Motor Europe (North) GmbH, Offenbach (Roboter); Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim (Flugzeug); Corbis, Düsseldorf (Pinguin); Focus, Hamburg (Lotusblüte)

ILLUSTRATIONEN: Eberhard Reimann

Copyright © 2006 Tessloff Verlag, Burgschmietstraße 2-4, 90419 Nürnberg

www.tessloff.com • www.wasistwas.de

Die Verbreitung dieses Buches oder von Teilen daraus durch Film, Funk oder Fernsehen, der Nachdruck, die fotomechanische Wiedergabe sowie die Einspeicherung in elektronische Systeme sind nur mit Genehmigung des Tessloff Verlages gestattet.

ISBN-10: 3-7886-1509-5

ISBN-13: 978-3-7886-1509-3

Inhalt

Bionik im Alltag

Vorbild Natur

| | |
|---|---|
| Was ist Bionik? | 4 |
| Seit wann gibt es Bioniker? | 6 |
| Was ist eine Analogie? | 6 |
| Welche Lebewesen sind als Vorbilder geeignet? | 7 |
| Was ist „Technische Biologie“? | 8 |

Oberflächeneffekte – Trickkiste der Natur

| | |
|---|----|
| Können sich Pflanzen selbst reinigen? | 10 |
| Gibt es Selbstreinigung nur bei der Lotuspflanze? | 10 |
| Wer entdeckte die Selbstreinigung? | 11 |
| Wie funktioniert die Selbstreinigung? | 12 |
| Was ist der Lotus-Effekt®? | 13 |
| Warum muss man immer noch putzen? | 14 |

Oberflächenspannung

| | |
|--|----|
| Warum können manche Tiere an der Decke laufen? | 15 |
| Was kann der Mensch vom Gecko lernen? | 16 |

Fliegen wie die Vögel

| | |
|-------------------------------------|----|
| Wer war der erste fliegende Mensch? | 17 |
| Wer war Otto Lilienthal? | 18 |

Der Bernoulli-Effekt

| | |
|-----------------------------------|----|
| Wie funktioniert das Fliegen? | 18 |
| Wann erzeugt ein Flügel Auftrieb? | 19 |

Unterwasserflieger

| | |
|---|----|
| Wie fliegt ein Vogel? | 20 |
| Warum schlagen Flugzeuge nicht mit den Flügeln? | 21 |

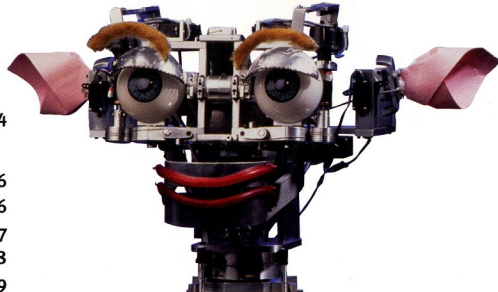
Von Randwirbeln und Schlaufenpropellern

Was können Flugzeugbauer von den Vögeln lernen?

Experimente

Leichtbau – was Ingenieure von Bäumen und Knochen lernen können

Wie wächst ein Baum?



Spannungen

| | |
|---|----|
| Was ist das „Gesetz der konstanten Spannung“? | 27 |
| Wie passen sich Knochen Belastungen an? | 28 |
| Kann man Maschinenbauteile wachsen lassen? | 29 |
| Was ist die „Soft Kill Option“? | 30 |
| Wo findet man Anwendungen? | 31 |
| Was ist das Geheimnis des Perlboots? | 32 |
| Was sind Verbundmaterialien? | 33 |
| Welche Verbundmaterialien gibt es in Natur und Technik? | 34 |
| Kann sich Kunststoff selbst reparieren? | 35 |

Schnelle Schwimmer – die Tricks von Haien, Delfinen und Pinguinen

| | |
|--|----|
| Warum haben Haie eine raue Haut? | 36 |
| Strömungswiderstand | 36 |
| Kann man die Haihaut nachbauen? | 37 |
| Warum können Delfine so schnell schwimmen? | 38 |

Sinnesorgane

| | |
|--|----|
| Was ist ein Sinnesorgan? | 39 |
| Warum sieht die Welt für Tiere anders aus? | 40 |
| Kann man die Sinne der Tiere nachahmen? | 41 |

Wie Roboter das Laufen lernen

| | |
|--|----|
| Wie laufen Tiere? | 42 |
| Wie laufen Roboter? | 43 |
| Warum bewegen sich Roboter so eckig? | 44 |
| Sind Roboter eine Gefahr für Menschen? | 45 |

Bionische Roboter

| | |
|---------------------|----|
| Die Karlsruher Hand | 46 |
|---------------------|----|

| | |
|-------|----|
| Index | 48 |
|-------|----|



Bionik im Alltag

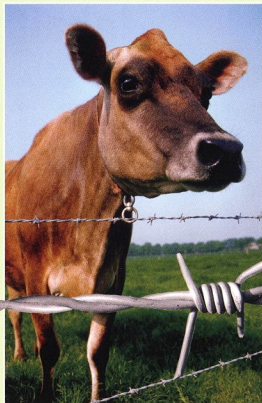
In unserem Alltag gibt es eine ganze Reihe von Gegenständen, die nach Vorbildern aus der Natur entwickelt wurden. Das ist den meisten Menschen aber gar nicht bewusst. Denn wer weiß schon, dass zum Beispiel der Salzstreuer oder der Stacheldraht pflanzliche Vorbilder haben?

Der Stacheldraht wurde 1868 in

STACHELDRAHT

Texas von Michael

Kelly zum Patent eingereicht. Ein Patent ist ein Dokument, das einem Erfinder das alleinige Recht gibt, seine Erfindung zu nutzen. So wird verhindert, dass ein anderer einfach die Erfindung nachbaut und damit Geld verdient. Kelly stellte fest, dass man das Vieh auf den



Stacheldraht umzäunt häufig Viehweiden.

Weiden gut mit dem Osagedorn,

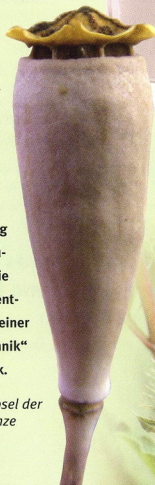
einem dornigen Strauch, einzäunen konnte. Eine Dornenhecke, die man transportieren könnte, wäre für die weiter nach Westen vordringenden Siedler ideal – der vom Osagedorn abgeleitete Stacheldraht war die Lösung für dieses Problem.

Die erste bionische Erfindung, die in Deutschland

SALZSTREUER

patentiert wurde, war ein Salzstreuer. 1919 wollte der

Botaniker Raoul Francé Kleinstlebewesen gleichmäßig auf dem Boden verteilen. Er nahm sich die Samenkapsel des Mohns zum Vorbild. Ist der Mohn verblüht, so reifen in der Kapsel die Samen. Diese müssen weit verstreut werden. Würden die Samen einfach direkt bei der Mutterpflanze zu Boden fallen und dort keimen, würden sich die Jungpflanzen gegenseitig das Licht wegnehmen und sich in ihrem Wachstum behindern. Deshalb besitzt die Mohnkapsel rundum kleine Löcher. Wenn der Wind die Kapsel in Schwingung versetzt, werden die Samen durch die Löcher gleichmäßig verteilt. Die Erfindung des Salzstreuers war nur eine von vielen Ideen, die Francé nach dem Vorbild der Natur entwickelte. Er sah sich als Begründer einer neuen Wissenschaft, die er „Biotechnik“ nannte – heute nennt man sie Bionik.

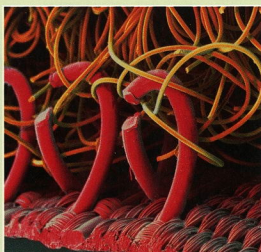


Samenkapsel der Mohnpflanze

KLETTVERSCHLUSS

Von welcher Pflanze der Klettverschluss abgeschaut wurde, ist leicht zu erraten

– es ist natürlich die Klette. Der Schweizer Ingenieur George de Mestral musste nach Jagdausflügen immer wieder seinen Hund von anhaftenden Klettfrüchten säubern. Das Haftprinzip interessierte ihn, und er sah sich die Klettfrüchte unter dem Mikroskop genauer an. Dabei stellte er fest, dass sie biegsame Widerhaken tragen. Geraten diese mit dem Fell von umherstreifenden Tieren oder mit Kleidung in Kontakt, verhaken sie sich und bleiben haften. So werden die Früchte über weite Strecken transportiert und lassen weit entfernt neue Klettplanzen entstehen. Die Widerhaken der Klette sind so biegsam, dass sie sich vom Fell lösen lassen, ohne abzureißen. 1951 vergab das Schweizer Patentamt ein Patent auf den Klettverschluss, der damals noch Widerhaken und schlaufenförmige Ösen auf beiden Teilen des Verschlusses trug. Bei heutigen Klettverschlüssen befinden sich die Haken auf einem Band und die Ösen auf dem anderen.



Eine Seite des Klettverschlusses besteht aus kräftigen Haken, die andere aus feinen Ösen; unten: Klettplanzen in der Natur.



Die Klettfrüchte im Fell seines Hundes regten George de Mestral zur Erfindung des Klettverschlusses an.

Autoreifen müssen zwei Aufgaben leisten, die sich

KATZENPOTENREIFEN

widersprechen: Bei normaler Fahrt soll der Reifen möglichst wenig Widerstand erzeugen, damit der Kraftstoffverbrauch des Autos möglichst gering ist. Beim Bremsen muss aber viel Kraft auf den Boden übertragen werden. Um diesen Widerspruch zu lösen, nahmen sich Ingenieure die Katzenpfote zum Vorbild.

Die Ballen der Katzenpfote sind beim Laufen schmal. Wenn die Katze jedoch einen Sprung aufhängt, dann verbreitern sich die Ballen.

Nach dem gleichen Prinzip funktioniert auch der „Katzenpfotenreifen“ (ContiPremiumContact®), ein Sommerreifen der Firma Continental: Beim Bremsen verbreitert er sich stärker als übliche Sommerreifen. Dadurch erzeugt er mehr Widerstand und das Auto kommt früher zum Stehen. Auf diese Weise können Unfälle vermieden werden.

Bei der Landung verbreitern sich die Pfoten von Katzen. Diese Tatsache war Vorbild für die Entwicklung des „Katzenpfotenreifens“.



Vorbild Natur

Der Begriff „Bionik“ setzt sich

Was ist Bionik?

zusammen aus den Worten Biologie und Technik. Biologie ist die Lehre vom Leben. In der Bio-

nik werden die belebte Natur und die Technik vereint. Man kann Bionik auch so beschreiben: Bionik ist das Lernen von der Natur für eine verbesserte Technik.

Wer sich mit der Natur beschäftigt, kennt Tiere und Pflanzen der unterschiedlichsten Formen und Farben. Er weiß, dass der Körperbau von Säugetieren, Vögeln und Insekten ganz unterschiedlich ist. Die Entwicklung verschiedener Körperformen bei Tieren ist allerdings kein Zufall. Die Natur hat im Laufe langer Zeiträume verschiedene Tier- und Pflanzenformen hervorgebracht, die in der Regel gut an ihre Umgebung angepasst sind. Den Vorgang, der dabei die treibende Kraft ist, nennt man Evolution.

Hier haben die Tiere und Pflanzen mit technischen Produkten etwas gemeinsam. Diese müssen nämlich auch an die Umgebung angepasst werden, in der sie benutzt werden sollen. Mit dünnen Sandalen



Chamäleons können ihre Hautfarbe verändern.

etwa kann man keine Bergwanderungen machen.

Für viele Probleme in unserem Alltag wurden bereits kluge Lösungen gefunden. Aber viele technische Probleme müssen noch gelöst werden. Dabei können wir durch die Beobachtung von Tieren und Pflanzen gute Ideen entwickeln. Wenn sich bei einer Tier- oder Pflanzenart für eine bestimmte Aufgabe eine Lösung entwickelt hat, könnte man doch versuchen, diese Lösung auf die Technik zu übertragen. Das geschieht in der Bionik.

Der Italiener Leonardo da Vinci

(1452–1519)

war nicht nur ein berühmter Erfinder, sondern auch ein bedeutender

Seit wann gibt es Bioniker?

Maler und Bildhauer. Er zeichnete

Entwürfe für Flugapparate, die Vö-

Die Vorderfüße des Maulwurfs sind zu Grab-schaufeln ausgebildet.



„FISCHKÖPFE“

Im 16. Jahrhundert kämpften England und Spanien um die Vorherrschaft auf den Weltmeeren. Matthew Baker aus England verbesserte 1586 die Form englischer Kriegsschiffe nach dem Vorbild zweier



Baker-Galeone

Fischarten: Dorschkopf und Makrelenschwanz finden sich in den so genannten Baker-Galeonen wieder. Diese waren schneller und wendiger als die großen, schwer bewaffneten Schiffe der Spanier. Die Baker-Galeonen trugen 1588 zum Sieg der englischen Flotte über die Spanier bei.

So könnte es ausgesehen haben, als Leonardo da Vinci nach dem Vorbild des Schneckenkrees einen Hubschrauber entwarf.

ANALOGIEFORSCHUNG

Wenn ein Bioniker zur Lösung eines technischen Problems eine Idee aus der Natur sucht, weiß er oft noch gar nicht, nach welcher Idee er suchen soll. Denn natürlich findet er in der Natur keine technischen Lösungen vor, die er einfach nachbauen könnte. Er muss sich also zunächst umschaun, ob das gesuchte technische Problem überhaupt in der Natur vorkommt. Ist das der Fall, dann prüft er, wie eine Tier- oder Pflanzenart dieses Problem löst. Die Suche nach geeigneten Vorbildern in der Natur bezeichnet man als Analogieforschung.

Ein Krokodil schlüpft. Eier sind als Verpackungsmodelle bislang unübertroffen.



geln oder Fledermäusen ähneln. Und die gedrehte Frucht des Schneckenkrees regte ihn zur Konstruktion eines Hubschraubers an.

Vielleicht war Leonardo da Vinci tatsächlich der erste Bioniker. Er selbst und auch seine Nachfolger in den folgenden Jahrhunderten hätten sich aber nicht so bezeichnet. Der Begriff „Bionik“ oder englisch „bionics“ bzw. „biomimetics“ ist nämlich noch recht neu. Er wurde erstmals 1960 von dem amerikanischen Luftwaffenmajor Jack Steele verwendet. Damit bezeichnete er ein „Lernen von der Natur für die Technik“.

In Deutschland wird die Bionik etwa ab den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts betrieben, aber erst etwa seit der Jahrtausendwende ist diese Wissenschaft auch einer breiteren Öffentlichkeit bekannt. In den letzten Jahren interessieren sich auch viele Ingenieure aus der Industrie für das Vorbild Natur. Zu Beginn entstanden die meisten bionischen Erfindungen aus zufälligen Entde-

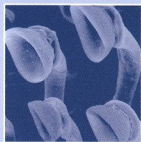
kungen. Heute dagegen wird gezielt in der Natur nach Vorbildern für technische Entwicklungen gesucht.

Der Bioniker sucht in der Natur

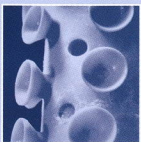
Was ist eine Analogie?

nach Vorbildern, um eine bestehende Technik zu verbessern. Will er ein Werkzeug, zum

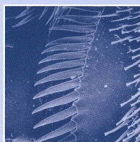
Beispiel eine Zange, verbessern, dann sucht er nach Tieren, die ein ähnliches Werkzeug besitzen. Ein solches Werkzeug aus der Natur könnte die Schere eines Krebses sein oder auch ein Vogelschnabel. Dieses Vorbild wird aber nicht einfach nachgebaut. In der Bionik werden Prinzipien technisch umgesetzt. So gibt es Wissenschaftler, die die Regeln für das Wachstum von Bäumen und Knochen untersucht haben. Dieses Wachstumsprinzip haben sie in Computerprogramme übersetzt, mit denen sie besonders stabile und leichte Bauteile entwerfen können.



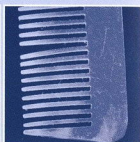
Saugnapfe des Gelbrandkäfers – Badematte



Oberkiefer des Ameisenlöwen – Kombizange



Pollenkamm der Biene – Kamm



Werkzeuge und Prinzipien, die in Natur und Technik in ähnlicher Form vorkommen, bezeichnet man als Analogie (= Ähnlichkeit). Bei der Suche nach Analogien findet man in der Natur oftmals sehr verblüffende Beispiele.

Wenn man ein Loch in ein Stück Holz bohren möchte, macht man dies oft mit einer Bohrmaschine. Oder man nimmt einen Handbohrer. Dabei gibt es einen Unterschied zur Bohrmaschine: Ein Mensch kann den Bohrer nicht beliebig weiterdrehen, er muss die Hand immer wieder neu ansetzen. Das Gleiche gilt, wenn wir eine Schraube eindrehen. Der Grund dafür ist, dass sich unsere Muskeln und Gelenke nur wenig verdrehen lassen. Lebewesen, die in Holz eindringen wollen, haben daher andere Lösungen gefunden: Sie nagen sich mit ihren Kiefern hinein oder besitzen Bohrer, die sich in das Holz hineinraspeln, ohne sich dabei zu drehen.

Solche ungewöhnlichen Lösungen aus der Natur sind es, nach denen die Bioniker suchen.

Um geeignete Lösungsmöglichkeiten zu erkennen, muss ein Bioniker ein Lebewesen mit dem Blick eines Technikers betrachten. Wenn er etwa eine Katze ansieht, stellt er sich bestimmte Fragen: Wie ist der Körper aufgebaut? Warum kann sie aus großen Höhen fallen, ohne sich zu verletzen? Der Bioniker betrachtet das Lebewesen, als sei es eine technische Konstruktion. Er überlegt sich, ob man aus dieser Konstruktion eine interessante Idee ableiten kann.

Tier- und Pflanzenarten stehen mit ihren Artgenossen sowie anderen Arten im Wettbewerb um Nahrung, Partner und Lebensraum. Für

DIE ÄUßERE FORM eines Lebewesens ist kein Zufall. Sie wird stark von der Lebensweise eines Tieres bestimmt. So weisen etwa ausgeprägte Flügel auf die Fähigkeit zum Fliegen hin oder scharfe Zähne auf einen Fleischfresser. An den Beinen eines Tieres kann man erkennen, ob es sich um einen schnellen Läufer handelt. Die Funktion eines Organs bestimmt also auch wesentlich seinen Aufbau. Für die Technik gilt das Gleiche, deshalb können die Konstruktionen aus der Natur auch Ideen für technische Lösungen liefern.



Die Holzwespe besitzt einen Legestachel, mit dem sie ihre Eier in das Holz legt. Dabei dreht sie den Stachel nicht in das Holz – wie der Mensch eine Schraube mit dem Schraubenzieher eindreht – sondern raspelt ihn hinein.



Küstenseeschwalben ziehen jedes Jahr von der Arktis zur Antarktis und zurück. Eine Energie sparende Flugweise ist für sie eine Frage des Überlebens.

PROTOTYPEN

Wenn es Wissenschaftlern gelungen ist, ein Prinzip aus der Natur auf eine technische Konstruktion zu übertragen, bedeutet das nicht, dass es diese dann im Laden zu kaufen gibt. Die Bioniker haben nämlich meistens gar nicht das Geld, ihre Erfindungen selbst in größeren Mengen herzustellen. Dafür brauchen sie die Hilfe von Firmen, die mit ihren Produkten durch den Verkauf Geld verdienen wollen. Eine Firma stellt ein bionisches Produkt erst her, wenn es funktioniert und man erwarten kann, dass es genügend Leute kaufen werden. Die Bioniker stellen daher zuerst ein funktionierendes Modell des bionischen Produktes her. Dieses Versuchsmodell nennt man Prototyp. Nur wenn ein Prototyp eine Firma überzeugt, wird das Produkt hergestellt und verkauft.

sie ist es wichtig, die Anforderungen der Umwelt mit möglichst geringem Energie- und Materialaufwand bewältigen zu können. Die Fähigkeit, Energie und Material zu sparen, ist in der heutigen Zeit mit knappen Energievorräten und steigender Umweltzerstörung für die Menschen sehr interessant. Auch die Ingenieure möchten ihre Technik so verbessern, dass sie Energie und Material einsparen können. Beispiele für das Materialsparen sind die Leichtbau-Prinzipien von Knochen, Bäumen oder Schalen. Nach ihrem Vorbild können Ingenieure Autos leichter bauen, sodass sie weniger Kraftstoff verbrauchen. Auch Energie sparen – des Fliegen und Schwimmen kann man von der Tierwelt lernen.

Ein weiteres Thema für die Bionik sind besondere Oberflächen. Das Mikroskop ermöglicht es, zu verstehen, warum manche Oberflächen immer sauber bleiben oder wie eine Fliege an der Decke laufen kann. Auch die Sinne der Tiere, die unsere Fähigkeiten oft weit übertreffen, können helfen, bestehende Technik zu verbessern. Schließlich könnte die Organisation eines Ameisenstaates oder die Art, wie das Gehirn Sinneseindrücke verarbeitet, Vorbild für die Lösung von Verkehrsproblemen oder die Arbeitsweise von Computern sein.

Will ein Wissenschaftler Prinzi-

Was ist „Technische Biologie“?

pien aus der Biologie auf die Technik übertragen, so muss er erst verstehen, wie der bi-

ologische Vorgang funktioniert. Verstehen heißt in diesem Fall, das biologische Phänomen in mathematischen, physikalischen oder chemischen Formeln beschreiben zu können. Denn hinter dem biologischen Vorgang stecken Naturgesetze, denen man durch Experimente auf die Spur kommen kann. Dazu nutzt der Forscher die Methoden der Physik und die der Ingenieure. Das nennt man „Technische Biologie“. Den Begriff kann man beschreiben als „Natur verstehen mithilfe der Technik“.

In der Bionik arbeiten oft Wissenschaftler unterschiedlicher Fachdisziplinen zusammen. Die Technische Biologie wird in der Regel von Biologen betrieben, während Ingenieure die Übertragung auf die Technik vornehmen.

Die Kokosnuss besitzt eine ideale Verpackung: leicht, stabil und biologisch abbaubar.





Lotusblüte

Können sich Pflanzen selbst reinigen?

Die asiatische Lotusblume besitzt eine erstaunliche Fähigkeit: Fällt Wasser auf ihre Blätter, dann bildet es auf ihrer Oberfläche kugelförmige Tropfen und perlt ab, ohne das Blatt zu benetzen. Die Wassertropfen entfernen zusätzlich noch auf dem Blatt liegende Schmutzpartikel. So ist die Pflanze direkt nach dem Regen wieder sauber und trocken. Nicht nur Schmutz kann von ihren Blättern einfach mit Wasser wieder abgespült werden, sogar manche Klebstoffe und Farben laufen ab, ohne eine Spur zu hinterlassen. Obwohl die Lotusblume in Sümpfen wächst, also einer schlammigen, feuchten Umgebung, bleiben ihre Blätter immer sauber und trocken.

Diese Fähigkeit bezeichnet man als Selbstreinigung. Welchen Vorteil hat nun die Selbstreinigung für die Pflanze?

In den Sümpfen, in denen die Lotuspflanze wächst, herrschen gute Bedingungen für das Wachstum von Pilzen, die die Blätter befallen und die Pflanze schädigen können. Die Pilze vermehren sich über feine Sporen, die auf einem geeigneten Nährboden, zum Beispiel einer feuchten Blattoberfläche, auskeimen können.

Oberflächeneffekte – Trickkiste der Natur

Auf dem Lotusblatt können sich die Pilzsporen jedoch nicht halten, da sie vom Regen schnell wieder abgewaschen werden. Die Lotuspflanze betreibt also Gesundheitsvorsorge.

Die Selbstreinigung der Lotuspflanze ist den Menschen schon lange bekannt. Im asiatischen Raum gilt sie deshalb als Symbol der Reinheit. Bis vor wenigen Jahren war jedoch noch unbekannt, wie die Selbstreinigung funktioniert.

Tatsächlich gibt es auch bei uns eine Vielzahl von Pflanzen, die ähnliche Eigenschaften wie der Lotus haben. Sehr gut ausgeprägt sind diese bei Kohlpflanzen, aber auch bei Maiglöckchen und Kapuzinerkresse. Selbst die Unterseiten von Eichenblättern besitzen die Fähigkeit zur Selbstreinigung. Auch im Tierreich gibt es Oberflächen mit ähnlichen Eigenschaften, insbesondere bei den Insekten.

Gibt es Selbstreinigung nur bei der Lotuspflanze?

Ein besonders schönes Beispiel dafür sind die selbstreinigenden Flügel des Morphofalters. Dieser tropische Schmetterling hat glänzende blaue Flügel. Die blaue Farbe wird nicht durch Farbpigmente erzeugt, wie die blaue Farbe von Tinte oder Textilfarben. Die Flügel des Morphofalters sind wie bei jedem Schmetterling mit feinen Schüppchen bedeckt. Diese

Selbst nach kräftigen Regenschauern bleibt das Lotusblatt trocken und sauber.



Sogar einige Klebstoffe laufen auf den Lotusblättern rückstandsfrei ab.

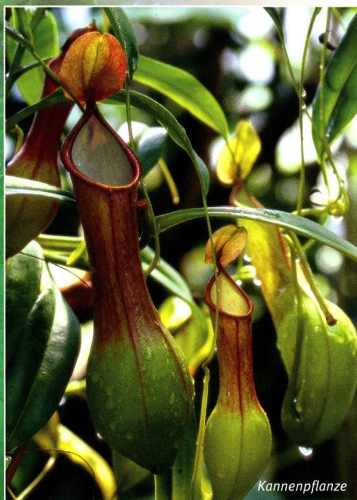
Selbst nach kräftigen Regenschauern bleibt das Lotusblatt trocken und sauber.

INSEKTENRUTSCHBAHN

Kannenpflanzen gehören zu den Fleisch fressenden Pflanzen. Sie produzieren Nektar, mit dem Insekten angelockt werden. Insekten, die auf den kannenförmigen Blättern landen, rutschen aus und fallen auf den Grund der Kanne. Dort befindet sich eine Flüssigkeit, die die Insekten verdaut. Diese Fangmethode ist erstaunlich, wenn man bedenkt, wie gut sich etwa Fliegen normalerweise auf den unterschiedlichsten Oberflächen halten können. Die Kannenpflanze besitzt aber eine besondere Wachsoberfläche, auf der die Fliege dennoch ausrutscht. Wissenschaftler planen, dieses Prinzip auf Folien zu übertragen. In eine solche Folie könnte man zum Beispiel Kuchen einwickeln, ohne dass er daran festklebt.

Schuppen brechen das Licht auf eine bestimmte Weise, sodass die Oberfläche für uns blau erscheint. Gleichzeitig sorgen sie für die Selbstreinigung.

Wer entdeckte die Selbstreinigung?



Kannenpflanze



Der tropische Morphofalter besitzt blau schillernde, selbstreinigende Flügel.

Die Botaniker teilen die Pflanzenarten nach dem Aufbau ihrer Blüten und Blätter in Pflanzenfamilien ein. Bekannte Pflanzenfamilien sind die Korbblütler wie Sonnenblume und Löwenzahn oder Schmetterlingsblütler wie Erbsen, Klee und Ginster. In den achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts wollte

der Botaniker Professor Wilhelm Barthlott an der Universität Bonn mit einer neuen Methode herausfinden, welche Pflanzen näher miteinander verwandt sind. Sein Ziel war es, die Pflanzenarten nach dem Aufbau ihrer Blattoberflächen zu ordnen. Der für das bloße Auge unsichtbare Feinbau der Oberfläche wurde durch ein Rasterelektronenmikroskop sichtbar gemacht. Dieses

liefert stark vergrößerte räumlich wirkende Bilder.

In den mikroskopischen Aufnahmen wurden aber nicht nur die feinen Strukturen der Oberfläche sichtbar, sondern auch jedes Schmutzteilchen, das sich auf der Pflanze abgelagert hatte. Dabei stellte Prof. Barthlott fest, dass bestimmte Blätter kaum verschmutzt waren.

Diese Blätter, wie etwa das Blatt der Lotusblume, hatten alle eine ähnliche Oberfläche. Deshalb vermutete er, dass die speziellen Oberflächenstrukturen dieser Blätter der Grund für ihre Sauberkeit ist. Nun musste er seine Vermutung beweisen und erforschen, wie die Selbstreinigung eigentlich funktioniert.

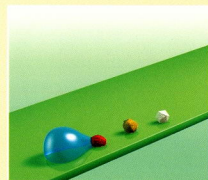
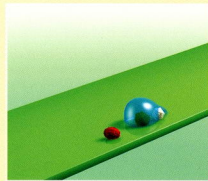
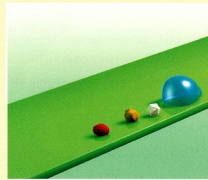
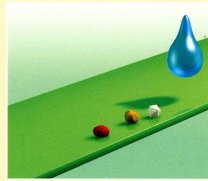
Wie funktioniert die Selbstreinigung?

Alle selbstreinigenden Oberflächen besitzen zwei Eigenschaften: Zum einen bestehen sie aus einem Wasser abstoßenden Material.

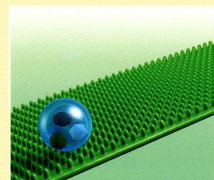
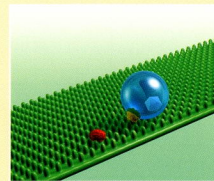
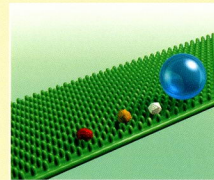
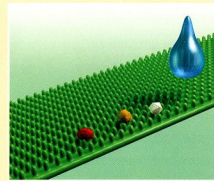
Das bedeutet, dass Wasser daran schlecht haften bleibt. Die Wasser abstoßende Oberfläche von Pflanzen besteht aus Wachsen. Diese Wachse kann man an einigen Pflanzen sogar mit dem bloßen Auge sehen, etwa den bläulichen Reif am Blatt einer Kohlpflanze.

Die zweite Eigenschaft ist eine unebene Oberfläche. Diese Unebenheiten sind jedoch so klein, dass man sie weder sehen noch fühlen kann. Bei der Lotuspflanze findet man auf einer genoppten Oberfläche kleine röhrenförmige Wachskristalle. Das ist eigentlich erstaunlich, denn man könnte vermuten, dass eine Oberfläche, an der kein Schmutz haften bleibt, besonders glatt sein muss, damit der Schmutz leicht abrutscht.

Das Gegenteil ist jedoch der Fall. Das Phänomen der Selbstreinigung war damals noch völlig unbekannt. Der Bonner Forscher Prof. Wilhelm Barthlott und sein Mitarbeiter Christoph Neinhuis führten umfangreiche Untersuchungen durch und konnten schließlich erklären, wie die Selbstreinigung funktioniert. Wassertropfen kommen bei einer genoppten, Wasser abstoßenden Oberfläche nur mit den Spitzen der Noppen in Kontakt und nicht mit der gesamten Oberfläche. Durch ihre Oberflächenspannung (siehe Seite 14) nehmen sie eine kugelige Form an. Unter dem Tropfen befindet sich



Auf glatten Oberflächen haften Schmutzteilchen – hier als farbige Krümel dargestellt – ziemlich fest. Auftreffende Wassertropfen verschieben sie oft nur.



Auf den rauen, selbstreinigenden Oberflächen nehmen Wassertropfen eine Kugelform an. Die Schmutzteilchen bleiben an den Tropfen hängen und werden mit ihnen abtransportiert.

Ein Wassertropfen zieht eine „Reinigungsspur“ über die verschmutzte Blattoberfläche: Der Schmutz haftet am Tropfen.

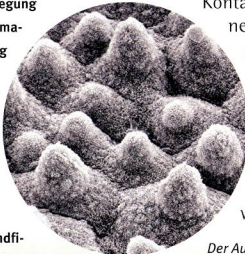




Sandfisch

SANDFISCHE

Dem Berliner Professor Ingo Rechenberg fiel in der Wüste Sahara ein ungewöhnliches Tier auf, der Sandfisch. Anders als der Name sagt, ist der Sandfisch kein Fisch, sondern eine Art Eidechse. Bei Gefahr oder großer Hitze verschwindet er im Sand. Bewegung im Sand erzeugt normalerweise viel Reibung und eine Metalloberfläche etwa wäre nach kurzer Zeit abgenutzt und stumpf. Prof. Rechenberg stellte fest, dass der Sand auf der Haut des Sandfisches leichter abgleitet als auf jeder glatten technischen Oberfläche. Daher kann er sich sehr leicht durch den Sand bewegen. Der Aufbau seiner Haut könnte zum Vorbild für reibungsarme Bohrer werden, die sich kaum abnutzen.



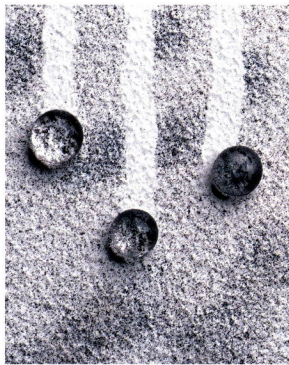
Der Aufbau der Lotusoberfläche im Rasterelektronenmikroskop: Sie besteht aus Noppen, die von weißlichen Wachskristallen überzogen sind.

ein Luftpolster. Schmutzteilen, die auf die Oberfläche geraten, liegen ebenfalls auf den Noppenspitzen.

Oberflächen, die sich sehr nahe kommen, ziehen sich gegenseitig an. Je näher sich die Oberflächen sind und je größer die Fläche ist, an der sie sich berühren, desto fester „kleben“ sie aneinander. Die Fläche, mit der Schmutzteilen auf einer selbstreinigenden Oberfläche aufliegen, ist jedoch durch die Noppen sehr klein. Dadurch haften die Teilchen nur sehr schwach an der Oberfläche. Kommen sie hingegen mit einem Wassertropfen in Berührung, so haben sie mit diesem eine große

Kontaktfläche und eine entsprechende große Haftung. Deshalb können sie vom Wassertropfen leicht aufgenommen und abtransportiert werden.

der Effekt der Wissenschaft völlig unbekannt war, wurde Prof. Barthlott zunächst nicht geglaubt. Schließlich gelang es ihm und seinem Mitarbeiter Christoph Neinhuis, eine künstliche selbstreinigende Oberfläche herzustellen. Solche technischen selbstreinigenden Oberflächen nach dem Vorbild der Lotus-pflanze werden durch die Marke Lotus-Effekt® gekennzeichnet. Erst nach vielen Jahren gab es das erste Produkt mit Lotus-Effekt® zu kaufen, die Fassadenfarbe Lotusan®.



Die Fassadenfarbe Lotusan® besitzt den Lotus-Effekt®. Wie auf dem Lotusblatt wird der Schmutz von den Wassertropfen einfach mitgenommen.

Selbstreinigende Oberflächen sind für uns Menschen sehr interessant. So könnten Autos oder Fahrräder einfach durch den Regen

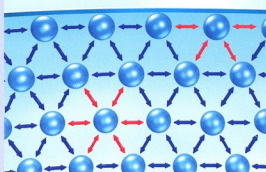
Was ist der Lotus-Effekt®?

sauber werden. Zum Reinigen von Kleidung, Geschirr oder Wänden wäre nur Wasser nötig, Reinigungsmittel wären überflüssig. Jedoch war der Weg von der Entdeckung der Selbstreinigung zu den ersten Produkten sehr lang und schwierig. Da

In der Bionik baut man die Natur nicht nach, sondern überträgt ein Prinzip. Damit die Farbe selbstreinigend ist, muss sie also Wasser abstoßend sein und eine unregelmäßige Oberfläche besitzen. Lotusan® besteht allerdings nicht aus Wachsen wie die Lotusblattoberfläche, sondern aus so genannten Silikonharzen. Wenn die Farbe trocknet, bildet sie eine Oberfläche, die zwar eine ähnliche selbstreinigende Eigenschaft hat wie die Lotuspflanze, aber aus anderem Material aufgebaut ist.

OBERFLÄCHENSpannung

Wenn man sich eine Wasserfläche genauer anschaut, erkennt man eine Art „Haut“ auf der Oberfläche. Der Grund für diese Haut ist die Oberflächenspannung des Wassers. Wasser besteht aus vielen kleinen



Wassermoleküle ziehen sich gegenseitig an.

Teilchen, die man Wassermoleküle nennt. Diese Moleküle ziehen sich gegenseitig an. Man kann sich das vorstellen, als hätten sie kleine Ärmchen, an denen sie sich festhalten. Im Inneren des Wassertropfens kommen von allen Seiten Ärmchen, deshalb

gleichen sich die Kräfte aus. Am Rand des Tropfens treffen die Wassermoleküle auf die Luft. Die Moleküle können hier ihre Ärmchen nur zur Seite oder ins Innere des Tropfens

ausstrecken. So entsteht durch die vielen seitlichen Ärmchen eine dichte Hülle, die Wasseroberfläche. Da auf der gesamten Oberfläche Kräfte nach innen ziehen, wird ein Wassertropfen so klein wie möglich – er nimmt eine Kugelform an.



Bonner Forscher haben einen Honigglöf mit Lotus-Effekt® hergestellt, an dem Honig abläuft, ohne kleben zu bleiben.

UNTERWASSERKLEBER

Normalerweise werden Klebstoffe flüssig aufgetragen. Sie werden dann an der Luft fest. In Schwimmbädern oder Aquarien werden spezielle Unterwasserkleber verwendet, etwa um Folien zu reparieren. Einen hervorragenden Unterwasserkleber besitzt die Miesmuschel, die sich damit an Felsen oder Holz anheftet. Sie verwendet dazu einen Klebstoff aus drei unterschiedlichen Substanzen, der in kürzester Zeit aushärtet. Der Kleber wird dann so fest, dass man Miesmuscheln, die sich an Holzpfehlen angeheftet haben, nicht mehr ablösen kann.

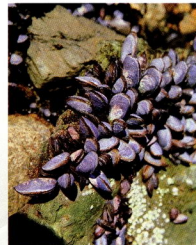
Heute sind schon sehr viele Gebäude mit Lotusan® gestrichen. Die Farbe sorgt dafür, dass die Wände länger sauber und trocken bleiben. Schmutz wird mit dem Regen einfach abgewaschen und auch der Regen läuft schnell ab, sodass die Wände trocken bleiben.

nigende Oberflächen empfindlicher sind als glatte. Reibt man stark über sie, dann werden die kleinen Noppen zerstört. Auf Fußböden oder Geschirr macht der Lotus-Effekt® also wenig Sinn. Nur bei Gegenständen, die selten berührt und gewaschen werden, kann der Effekt verwendet werden. So gibt es etwa eine Krawatte, die sauber bleibt, selbst nachdem sie in Suppe getaucht wurde und einen Honigglöf, an dem der Honig abläuft, ohne kleben zu bleiben.

Übrigens sind nicht nur die künstlichen Oberflächen empfindlich. Reibt man den bläulichen Wachsüberzug am Kohlblatt ab, so tritt an dieser Stelle keine Selbstreinigung mehr auf. Für die Pflanze ist das aber nicht so schlimm, denn in wenigen Tagen hat sie die Wachse nachgebildet. Eine technische Oberfläche wäre aber in diesem Fall zerstört und müsste neu aufgetragen werden. Damit der Lotus-Effekt® in zahlreicheren Bereichen unseres Lebens angewandt werden kann, müssen die Bioniker nicht nur die Erfindung

Warum muss man immer noch putzen?

Obwohl das Prinzip der Selbstreinigung schon länger bekannt ist, müssen wir immer noch das Geschirr spülen und Kleidung in der Waschmaschine waschen. Reinigungsmittel sind auch keineswegs überflüssig geworden. Woran liegt das? Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass selbstrei-



Festklebende Miesmuscheln

Links: Auch Kohlpflanzen besitzen selbstreinigende Blätter.

der Natur nachbauen, sie müssen sogar die Natur übertreffen. Die Wissenschaftler forschen weiter und der Lotus-Effekt® wird uns in Zukunft sicher noch häufiger begegnen.

Warum können manche Tiere an der Decke laufen?

Die Fliege an der Wand und die Spinne an der Decke sind bei den meisten Menschen eher unbeliebt. Sieht man aber genauer hin,

dann kann man eigentlich über die Fähigkeiten dieser Tiere nur staunen. Nicht nur Wände und Glasscheiben können sie hochgehen, sondern sogar kopfüber an der Zimmerdecke entlangspazieren. Wissenschaftler an der Hochschule Bremen haben ausgerechnet, dass man an eine an der Decke hängende Spinnspinne eine Kette von bis zu 173 Spinnen anhängen könnte, ohne dass sie herunterfällt. Nicht nur so leichte Tiere wie Insekten und Spinnen können Wände hochlaufen, sondern auch die viel schwereren Geckos, eine Reptiliengruppe.

Früher vermutete man, dass ihre Füße wie Saugnäpfe funktionieren. Erst das Rasterelektronenmikroskop zeigte, dass Fliegen, Spinnen und Geckos sehr viele feine Haare auf ihren Füßen haben. Je größer das Tier ist, desto feiner sind diese Haare. Wie kann man jedoch mithilfe von Haaren an der Wand kleben?

Jede Art von Materie, also auch der Tierfuß und die Wand, besteht aus winzigen kleinen Teilchen, den Atomen.

Die Füße des Geckos sind von feinen Haaren bedeckt. In starker Vergrößerung werden die Haftlappen am Ende der Haare erkennbar.

Wenn sich Atome sehr nahe kommen, ziehen sie sich gegenseitig an. Je näher sie sich kommen, desto fester „kleben“ sie aneinander. Damit ein Tier an der Decke laufen kann, müssen sich sehr viele Atome sehr nahe kommen. Das wird durch die feinen Haare an den Füßen erreicht. Die Haare besitzen an ihrem Ende noch feine Haftlappen, die sich eng an den Untergrund anschmiegen.

Während Fliegen zusätzlich noch Krallen und Flüssigkeitströpfchen verwenden, haften Geckos nur mit den Härchen an der Zimmerdecke, und zwar so fest, dass man mehrere Tiere aneinander hängen könnte. Geckos kleben aber nicht nur fest, sie können auch schnell an der Decke entlanglaufen. Dabei können sie den Fuß nicht einfach abheben, denn dann müssten sie alle Härchen auf einmal lösen und das wäre zu schwer. Deshalb dreht der Gecko den Fuß, sodass sich nach und nach immer mehr Verbindungen lösen, bis

Geckos können mühelos Glasscheiben hinaufgehen.





Spiderman wird wohl noch lange Zeit Science-Fiction bleiben.

der Fuß frei ist. Das geht so schnell, dass der Gecko an der Decke entlangrennen kann. Das Anheben des Geckofußes ist mit dem Ablösen eines Klebestreifens vergleichbar: Man löst den Streifen zuerst an einer Stelle und kann ihn dann schnell entfernen.

Normalerweise benötigt man Klebstoffe, um zwei Gegenstände ohne Schrauben oder Nägel miteinander zu verbinden. Ver-

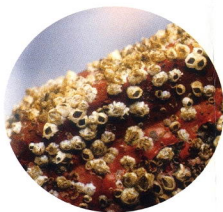
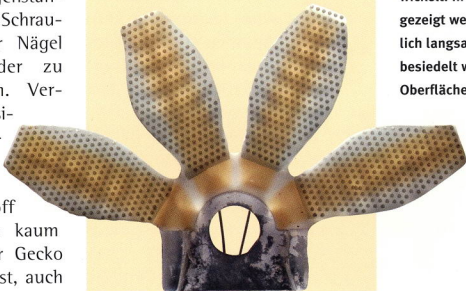
Was kann der Mensch vom Gecko lernen?

wendet man einen zähflüssigen Klebstoff wie Bastelkleber aus der Tube, so kann dieser nur einmal benutzt werden. Denn der Klebstoff wird fest und kann dann kaum noch abgelöst werden. Der Gecko zeigt uns, dass es möglich ist, auch

ohne Klebstoff an Oberflächen zu haften. Wenn man diese Fähigkeit auf die Technik überträgt, könnte man Schränke ohne Schrauben an der Wand befestigen. Ist es vielleicht sogar möglich, mit Geckohandschuhen Hochhäuser hinaufzusteigen, wie die Comic- und Filmfigur Spiderman?

So weit ist die Technik jedoch noch nicht. Immerhin haben Forscher an verschiedenen Instituten Kunststoffplättchen mit feinen Härchen hergestellt, mit denen kleine Glasplatten angehoben werden können. Doch es ist sehr teuer, solche Oberflächen herzustellen. Anders als beim Geckofuß kleben die Härchen nicht nur an fremden Oberflächen, sondern auch aneinander. Das macht sie sehr schnell unbrauchbar. Spiderman wird es wohl auch in Zukunft nur im Comic geben. Denn je schwerer ein Tier ist, desto feiner müssen die Härchen sein, um sein Gewicht zu tragen. Da ein Mensch fast 1000-mal schwerer ist als ein Gecko, müssten die Härchen an einem „Spiderman-Handschuh“ noch sehr viel feiner und dichter sein als beim Gecko, was technisch noch nicht möglich ist.

Zehen eines Roboters, die den Gecko-Fuß nachahmen; damit kann der Roboter senkrechte Wände hochklettern.



Seepocken-Bewuchs an der Unterseite eines Schiffs

ANTIFOULING

An Schiffen bildet sich innerhalb kurzer Zeit ein Bewuchs aus Muscheln, Algen und Seepocken. Dieser vergrößert den Reibungswiderstand im Wasser und somit den Treibstoffverbrauch des Schiffes. Deshalb muss diese Besiedelung verhindert werden, man nennt das Antifouling. Früher wurden Schiffe mit giftigen Antifouling-Farben gestrichen. Diese Farben sind seit 2003 weltweit verboten, weil sie ins Meerwasser gelangen und andere Meerestiere schädigen. Bremer Wissenschaftler stellten fest, dass Haie eine ungiftige Möglichkeit des Antifouling anwenden. Auf ihrer rauen Haut können sich die kleinen Besiedler kaum anhaften. Die Bremer Bioniker haben künstliche Haihautoberflächen entwickelt. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass sie deutlich langsamer von Seepocken besiedelt werden als glatte Oberflächen.

Fliegen wie die Vögel

Eine große Menschenmenge hatte sich in Ulm am Ufer der Donau versammelt: Da wollte doch tatsächlich ein Mensch fliegen

Wer war der erste fliegende Mensch?

Der Schneider von Ulm bei seinem Flugversuch

wie ein Vogel. Seit Jahren hatte der Mann den Flug der Vögel studiert, sein ganzes Vermögen in den Bau eines Flugapparates gesteckt. Sein Name war Albrecht Ludwig Berblinger, bekannt als der Schneider von Ulm. Einen Flugversuch am 30. Mai

1811 musste er abbrechen, weil sein Flugapparat beschädigt war. Tags darauf musste der Flug stattfinden,



Nachbau des Gleiters von George Cayley

die Menge verlangte – es lautstark. Berblinger sprang vom Gerüst – und stürzte in die Donau. Der Flugversuch misslang. Berblinger überlebte den Sturz, war aber gesellschaftlich ruiniert. Erst 1986 konnte mit einem Nachbau nachgewiesen werden, dass sein Flugapparat tatsächlich flugfähig war. Jedoch fehlten über der kalten Donau die zum Gleiten notwendigen warmen Aufwinde.

Somit hatte Berblinger einen flugfähigen Gleitflieger nach dem Vorbild der Natur gebaut.



Bis ins 19. Jahrhundert hinein sind einige Berichte über Flüge überliefert, deren Wahrheitsgehalt heute jedoch nicht mehr überprüft werden kann. Der Türke Celebi soll 1647 bei Istanbul gut einen Kilometer weit geflogen sein. Genaueres ist über den englischen Mathematiker und Physiker Sir George Cayley bekannt, der im 18. und 19. Jahrhundert eine Vielzahl von Fluggeräten konstruierte (Foto Seite 17). Cayley führte auch zahlreiche Experimente zu Strömungen und Kräften am Flügel durch und nutzte dieses Wissen, um seine Gleiter zu verbessern. Einer seiner Gleiter flog mit seinem Kutscher als Passagier gut 500 Meter weit.



Otto Lilienthal kurz vor einem Flugversuch 1896

Wer war Otto Lilienthal?

Otto Lilienthal (1848–1896) und sein Bruder Gustav aus dem Städtchen Anklam schauten schon als Kinder begeistert dem Flug der Störche zu. Den Kindertraum, wie die Störche durch die Luft zu gleiten, konnte sich Otto Li-

lialthal als Erwachsener verwirklichen. Lilienthal, der inzwischen ein Ingenieur-Studium absolviert hatte, führte in seiner Freizeit intensive Untersuchungen durch, um das Geheimnis des Vogelfluges zu lösen. Der Storchflügel war das Modell für die Tragflächen seiner Flugapparate. Er stellte fest, dass die Wölbung des Storchflügels, das so genannte Profil, wichtig für den Auftrieb des Flügels ist. Seine Beobachtungen und Messungen fasste er

DER WATTWURM

Viele Tiere nutzen den Bernoulli-Effekt. Der Wattwurm, ein Wurm, der an der Nordsee im Wattenmeer lebt, legt seine Gänge so an, dass deren Ausgänge unterschiedlich hoch liegen. Wenn dann mit der Flut frisches Wasser ins Wattenmeer strömt, wirkt der höhere Ausgang wie die Verengung des Rohres von Bernoulli. An dieser Stelle ist die Strömung schneller und der Wasserdruck geringer. Somit herrscht an den beiden Ausgängen ein unterschiedlicher Wasserdruck. Das bewirkt eine Durchströmung des Ganges und der Wattwurm wird mit frischem Wasser und Nahrung versorgt.

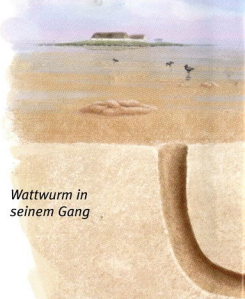
DER BERNOULLI-EFFEKT



An der Engstelle des Rohres fließt das Wasser schneller; gleichzeitig nimmt der Druck ab.

Eine Erklärung für den Auftrieb am Flügel ist der Bernoulli-Effekt, benannt nach dem Schweizer Physiker Daniel Bernoulli (1700–1782). Er beschrieb das Verhalten von Wasser an der Engstelle einer Rohrleitung und stellte fest, dass an der Engstelle das Wasser schneller fließt und gleichzeitig der Wasserdruck auf die Rohrwand abnimmt. Eine schnelle Strömung erzeugt an einer Oberfläche einen Unterdruck, den wir als

Sog wahrnehmen. Das gilt sowohl für Wasser als auch für Luft. Der Druck auf die Oberfläche wird umso kleiner, je schneller sich die Strömung bewegt. Die Auswirkungen des Bernoulli-Effektes erfährt man auch, wenn bei Wind ein Fenster offen steht. Der Wind strömt schnell an der Hauswand entlang und erzeugt einen Unterdruck. Der Druckunterschied zwischen Innenraum und Hauswand sorgt dafür, dass das Fenster zufällt.



Wattwurm in seinem Gang

FLIEGEN MIT MUSKELKRAFT

Menschen sind für den Schlagflug, also für das Fliegen mit Flügeln, einfach zu schwer. Ein Mensch könnte mit seiner Brustmuskulatur niemals die Kraft aufbringen, mit Flügeln zu fliegen. Dennoch gab es tatsächlich Fluggeräte, die mit Muskelkraft angetrieben wurden, allerdings mit der Beinmuskulatur. Mit dem Gossamer Albatross, einem leichten fliegenden Fahrrad mit 30 Metern (!) Spannweite, flog der Radrennfahrer Bryan Allen in zwei Stunden über den Ärmelkanal von England nach Frankreich.



Der Gossamer Albatross



1889 in dem Buch „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ zusammen. Doch die Übertragung der technischen Grundlagen auf ein Gleitflugzeug war schwierig. Sein erster Gleitapparat von 1889 ging zu Bruch. Die größte Schwierigkeit beim Flug war, in der Luft das Gleichgewicht zu halten. Lilienthal wusste, dass Vögel ihren Schwanz zur Steuerung verwenden. Sie können ihn je nach Flugbedingung so verdrehen, dass sie stabil fliegen. Eine solche Steuerung konnte Lilienthal mit seinem einfachen Gleiter aus Weidenruten und Stoff nicht nachbauen. Zusätzlich zu einer waagerechten Schwanzfläche, wie sie die Vögel besitzen, baute er eine senkrechte Fläche ein. Dies brachte den gewünschten Erfolg. In ähnlicher Form findet man eine solche Konstruktion, das Leitwerk, am Heck der heutigen Flugzeuge. Einen Nachteil hatten Lilienthals Gleiter jedoch: Sie hatten keinen eigenen Antrieb, sodass sie dem Wind ziemlich hilflos

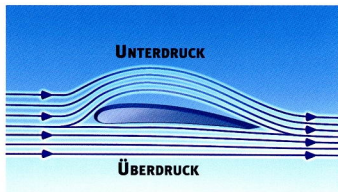
ausgeliefert waren. An einem stürmischen Augusttag im Jahr 1896 wurde dies Lilienthal zum Verhängnis. Er stürzte ab und starb am folgenden Tag.

Jeder Gegenstand auf der Erde wird von der Schwerkraft angezogen, auch Flugzeuge und Vögel. Beim Fliegen muss die

Schwerkraft überwunden werden. Dazu ist eine Kraft nötig, die den Gegenstand nach oben zieht. Diese

Kraft nennt man Auftrieb. Der Auftrieb muss mindestens genauso groß sein wie das eigene Gewicht, damit der Gegenstand in der Luft bleibt. Ist er größer, dann steigt das Objekt.

Der Auftrieb entsteht durch die Luft, die den Flügel umströmt. Sie übt auf alle Gegenstände einen Druck aus, den Luftdruck. Luft-



Das Flügelprofil bewirkt, dass die Luft auf der Oberseite des Flügels schneller strömt. Die schnellere Strömung ist durch die dichtere Anordnung der Stromlinien dargestellt.

druckunterschiede können wir spüren. Wenn man zum Beispiel mit dem Auto schnell bergab fährt, macht sich der Anstieg des Luftdrucks in unseren Ohren bemerkbar.

Luftdruckunterschiede sind es auch, die ein tonnenschweres Flugzeug fliegen lassen. Damit dessen Flügel Auftrieb erzeugen kann, muss die Luft auf der Oberseite des Flügels schneller strömen als auf der Unterseite.

Eine schnellere Luftströmung auf der Flügeloberseite bewirkt, dass der Druck dort geringer wird, man nennt das Unterdruck. Dieser Unterdruck wirkt wie ein Sog, der den Flügel nach oben zieht.

Auf der Unterseite des Flügels dagegen strömt die Luft langsamer, dadurch herrscht dort ein höherer Druck, der den Flügel nach oben hebt. Somit entstehen sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite des Flügels Kräfte, die den Flügel nach oben bewegen.

Wie funktioniert das Fliegen?



Im Flug lässt sich die Wölbung des Storchflügels gut erkennen.

Wann erzeugt ein Flügel Auftrieb?

Damit ein Flügel Auftrieb erzeugen kann, müssen bestimmte Bedingungen herrschen. Zum einen hängt der Auftrieb stark von der Geschwindigkeit der Luftströmung ab. Zum Abheben muss daher eine Mindestgeschwindigkeit erreicht werden, bei der der Auftrieb größer ist als das Gewicht. Während viele Vögel schon bei 20–40 Kilometern pro Stunde fliegen können, benötigt ein modernes Verkehrsflugzeug zum Abheben eine Geschwindigkeit von etwa 300 Kilometern pro Stunde. Neben der Geschwindigkeit

spielt auch die Form des Flügels eine Rolle. Wenn man einen Flügel in Gedanken quer durchschneidet, erhält man das Profil. Schon Lillienthal hat sich mit dem Profil des Storchflügels beschäftigt. Sowohl dieser als auch der Flugzeugflügel sind nach oben gewölbt. Die Wölbung ist im vorderen Flügelbereich am dicksten. Ein Flügel mit diesem Profil teilt die anströmende Luft in eine schnellere Strömung auf der Flügeloberseite und eine langsamere Strömung auf der -unterseite auf. Durch den sich ergebenden Druckunterschied entsteht ein Auftrieb. Dieser ist allerdings nicht sehr groß. Wichtig ist nämlich auch, dass der Flügel zusätzlich gegenüber der Strömung leicht nach oben gedreht ist. Dieses so genannte Anstellen des Flügels verstärkt den Auftrieb erheblich. Stellt man den Flügel gegenüber der Strömung steiler an, so erhöht sich auch der Auftrieb. Dabei ist jedoch Vorsicht geboten, denn wird der Flügel zu steil angestellt, dann kann die Luftströmung dem Flügelprofil nicht mehr folgen und löst sich ab. Dieses so genannte Abreißen der Strömung kann zum Absturz eines Flugzeugs führen.

Der griechischen Sage nach bauten sich Daedalus und Ikarus Flügel aus mit Wachs verklebten Federn. Ikarus flog zu nahe an die Sonne und stürzte ins Meer. In Wirklichkeit sind die Muskeln des Menschen für den Vogelflug zu schwach.

UNTERWASSERFLIEGER



Pinguin beim „Unterwasserfliegen“

Fliegen funktioniert auch unter Wasser. Pinguine etwa bewegen ihre Flügel unter Wasser ähnlich wie fliegende Vögel. Auch Meeresschildkröten sind „Unterwasserflieger“. Diese Tiere können so Energie sparend und elegant schwimmen. Schwimmende Menschen dagegen verdrängen das Wasser mit ihren Armen nach hinten, um vorwärts zu kommen. Verglichen mit dem Unterwasserfliegen ist das Schwerstarbeit.





Beim Abwärtsschlag bewegt der Vogel seine Flügel von hinten oben nach vorne unten.

Wie fliegt ein Vogel?

Zur Erzeugung des Auftriebs ist eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit der Luft erforderlich. Flugzeuge erzeugen diese erforderliche Geschwindigkeit durch Propeller oder Düsentriebwerke, während die Flügel für den Auftrieb sorgen. Der Vogel dagegen bewegt sich mit seinen Flügeln sowohl vorwärts als auch aufwärts. Vögel

schlagen aber nicht einfach mit den Flügeln auf und ab. Lange Zeit war den Menschen unbekannt, wie der Vogel seine Flügel bewegt. Es wurde angenommen, er würde die Flügel gleichzeitig nach unten und nach hinten bewegen, um sich von der Luft abzustößten. Eine solche Bewegung kennst du vielleicht vom Brustschwimmen oder vom Rudern. Dabei wird Wasser nach hinten verdrängt, um den Körper nach vorne zu bewegen.

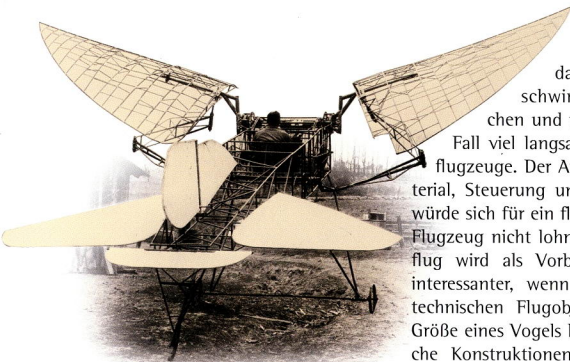
Erst die Erfindung der Fotografie gegen Ende des 19. Jahrhunderts ermöglichte es, den genauen Ablauf des Vogelflugs zu verstehen. Der Vogel bewegt erstaunlicherweise die Flügel beim Abwärtsschlagen nach vorne. Beim Heben, dem so genannten Aufschlag, verdreht der Vogel die Vorderkante der Flügel nach oben. Der Vogelflügel beschreibt somit in der Luft die Form einer Acht. Durch diese Drehung sorgt der Vogel für eine günstige Luftumströmung des Flügels.

Wer schon einmal in einem Flugzeug saß, wird wahrscheinlich froh sein, dass die Flügel sich nicht allzu sehr bewegen. Ein

Warum schlagen Flugzeuge nicht mit den Flügeln?

Flugzeug, das mit den Flügeln schlägt, sähe nicht nur beängstigend aus, es würde auch extrem schwanken. Die Drehbewegung der Flügel,





Flugzeuge mit schlagenden Flügeln erwiesen sich in der Frühzeit der Luftfahrt schnell als Sackgasse; Aufnahme von 1928.

die den Vogel so gleichmäßig fliegen lässt, lässt sich nicht einfach auf ein Flugzeug übertragen. Es gibt bisher keine Materialien, die sich so verformen können wie ein Vogelflügel. Außerdem kann ein Vogel die Flügel durch Veränderung von Form und Schlagbewegung ständig an die Luftströmung anpassen. Das ist technisch auch noch nicht möglich.

Der entscheidende Grund für die starren Flugzeugflügel aber ist, dass ein Flugzeug zum Schlagflug einfach zu schwer ist. Auch bei den Vögeln gibt es offenbar ein Höchstgewicht für die Flugfähigkeit. Unser einheimischer Höckerschwan wiegt etwa 20 Kilogramm und gehört damit zu den schwersten flugfähigen Vögeln. Passagierflugzeuge wiegen aber oft das Tausendfache eines Schwans. Sie müssen sehr schnell sein, um überhaupt abzuheben. Mit schlagenden Flügeln würden sie wahrscheinlich

gar nicht die dazu nötige Geschwindigkeit erreichen und wären auf jeden

Fall viel langsamer als Düsenflugzeuge. Der Aufwand für Material, Steuerung und Flügelantrieb würde sich für ein flügel Schlagendes Flugzeug nicht lohnen. Der Schlagflug wird als Vorbild aber schon interessanter, wenn man sich mit technischen Flugobjekten von der Größe eines Vogels beschäftigt. Solche Konstruktionen bezeichnet man als MAV

(Micro Air Vehicles = Kleine Flugobjekte; englisch).

Ein Vogel braucht keine Start- oder Landebahn. Er kann problemlos durch sehr enge Schluchten fliegen. Das sind Eigenschaften, wie sie auch Hubschrauber aufweisen, nur kann ein Vogel viel schneller und Energie sparer fliegen als ein Hubschraubermodell gleicher Größe.

DIE RINGELGANS IGOR

Ein besonders guter Flieger ist die Ringelgans. Sie diente als Vorbild für ein Vogelmodell namens Igor (siehe Foto). Die Wissenschaftlerin Tatjana Hubel von der Technischen Universität Darmstadt untersuchte, welche Luftbewegungen an den Flügeln auftreten. Igor schlägt mit den Flügeln und erzeugt auch Auftrieb. Er kann allerdings nicht fliegen, dafür

ist er zu schwer. Igor wird auf einer Stange im Windkanal befestigt und von einem großen Propeller angeblasen. Mit einer Messapparatur können die Luftbewegung und der Auftrieb während der Schlagbewegung gemessen werden.

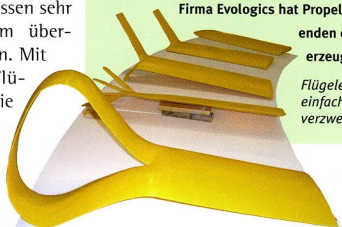


VON RANDWIRBELN UND SCHLAUFENPROPELLERN

Die gespreizten Federn am Ende vieler Vogelflügel bewirken, dass der Luftwiderstand beim Fliegen geringer wird. Der Vogel braucht also weniger Kraft zum Fliegen. Warum aber haben dann Flugzeuge keine aufgespreizten Flügelenden? Die Schwierigkeit liegt darin, dass die Flügelenden (Winglets) nicht immer den gleichen Abstand voneinander haben dürfen, sondern sich auf unterschiedliche Flugbedingungen einstellen müssen. Vogelfedern sind sehr nachgiebig und stellen sich von selbst auf die richtige Luftströmung ein. Technische Materialien können das nicht so einfach nachahmen. Wissenschaftler der TU Berlin kamen jedoch auf eine geniale Lösung: Statt vieler kleiner Winglets statteten sie den Flügel mit einer Schlaufe aus. Solche Schlaufenflügel verkleinern ebenfalls den Widerstand. Man kann solche Schlaufen nicht nur für Tragflächen verwenden, sondern für alles, was Flügel hat. Die

Firma Evologics hat Propeller, Schiffsschrauben und Windräder mit Schlaufenenden entwickelt. Die Schlaufenpropeller sind leiser und erzeugen beim Drehen weniger Luftwiderstand.

Flügelentwicklungsreihe der TU Berlin; vom Flügel mit einfachem Ende (hinten) gelangt man über solche mit verzweigtem Ende zum Schlaufenflügel (vorne).



Modell eines Flugzeugs, dass bis 2030 entwickelt werden soll. Es kann seine Flügel den jeweiligen Flugverhältnissen anpassen; bei der Landung etwa – siehe Foto – teilen sich die Flügelenden, um die Randwirbel zu reduzieren.

Was können Flugzeugbauer von den Vögeln lernen?

Auch Konstrukteure von Passagierflugzeugen können von den Vögeln lernen. Ein großes Problem bei Flugzeugen sind die Luftwirbel an den Flügelenden. Man bezeichnet sie auch als Randwirbel. Normalerweise sind sie unsichtbar, bei starkem Regen aber kann man erkennen, dass an jedem Flügelende ein

steht, nach oben in den Bereich niedrigen Drucks. Am Flügelende entsteht so der Randwirbel.

Aufgrund dieser Randwirbel müssen auf Flughäfen die Flugzeuge beim Start auch eine bestimmte Zeit warten, bevor die Startbahn freigegeben wird. Die unsichtbaren Randwirbel sind nämlich besonders bei Start und Landung eine große Gefahr für nachfolgende Flugzeuge. Randwirbel sind aber nicht nur gefährlich. Sie vergrößern auch den Luftwiderstand und damit den Treibstoffverbrauch des Flugzeugs.

Deshalb versuchen die Ingenieure, die Randwirbel so klein wie möglich zu halten. Ganz vermeiden kann man sie nicht, denn sie sind eine Folge des Auftriebes am Flügel. Auch an Vogelflügeln treten Randwirbel auf. Ei-

kleiner Wirbelsturm entsteht. Auf der Unterseite eines Flügels, der Auftrieb produziert, ist der Druck größer als auf der Oberseite. Unterschiedliche Luftdrücke versuchen, sich auszugleichen. Dabei fließt von der Flügelunterseite Luft, die unter hohem Druck

nige Vögel besitzen aber eine Möglichkeit, die Randwirbel klein zu halten, die auch für die Technik interessant ist: Die Flügel von Adlern, Geiern oder Störchen enden in einzelnen großen Schwungfedern. Das Flügelende wird also in viele kleine Flügelchen unterteilt. Diese bezeichnet man auch als Winglets (Flügelchen; englisch). An den meisten modernen Passagierflugzeugen findet man ein einfaches oder doppeltes Winglet. Man hat aber auch schon Flugzeuge mit mehreren Winglets gebaut.

Adler spreizen im Gleitflug ihre Flügelenden auseinander. Dadurch verkleinern sie die Randwirbel am Flügelende und verringern den Luftwiderstand.



Orniithopter von deLaurier

ORNITHOPTER

Der Kanadier James deLaurier hat ein Flugzeug gebaut, das keinen Propeller benötigt und allein durch Flügelschlagen angetrieben wird. So ein Fluggerät, das wie ein Vogel mit den Flügeln schlägt, bezeichnet man als Orniithopter. Das abgebildete Flugzeug ist jedoch über einige kleine Hüpfen noch nicht hinausgekommen.



EXPERIMENTE



MATERIALIEN: Verschiedene Pflanzen und technischen Oberflächen wie Glas, Kunststoff oder Wachs; Becher, Pipette, Wasser, feiner Schmutz (Mehl, Ruß), abwischbare Unterlage. Mit einer Lupe kannst du dir die Tropfen genauer anschauen, man sieht den Effekt aber auch mit bloßem Auge. Viele Pflanzen in unserer Umgebung besitzen die Fähigkeit zur Selbstreinigung, zum Beispiel: Weihnachtssterne, Kohlpflanzen (auch Zierkohl), Tulpen, Kapuzinerkresse, Frauenmantel, Eichenblätter (Unterseite).

Pflanzen ohne selbstreinigende Oberfläche sind: Buche, Ficus-Arten.

Fülle Wasser in den Becher. Mit der Pipette kannst du gut Wasser aufnehmen und in kleinen Tropfen wieder abgeben. Führe die Versuche a) bis c) durch und notiere die Ergebnisse.

a) Tropfenform:

Tropfe Wasser auf die Pflanzenblätter. Beobachte, wie sich das Wasser

auf den Blättern verhält. Welche Form haben jeweils die Wassertropfen?

b) Ablaufverhalten:

Beobachte, wie das Wasser vom Blatt abläuft. Perlt es komplett ab, ohne dass das Blatt nass wird, oder bleibt das Wasser am Blatt haften?

c) Verhalten gegenüber Schmutz:

Streu den Schmutz auf das Blatt, tropfe anschließend Wasser darauf und versuche so, den Schmutz abzuwaschen. No-

tiere Dir jeweils bei den verschiedenen Oberflächen, wie gut das klappt.

Wiederhole nun die Versuche

a) bis c) auch für die technischen Materialien und notiere Dir auch diese Ergebnisse.

BEOBACHTUNG:

Ein Wassertropfen kann auf einer Oberfläche ganz unterschiedliche Formen annehmen. Auf Glas ist er ziemlich flach. Kippt man das Glas, so verläuft er auf der Oberfläche und hinterlässt eine Wasserspur. Ist das Glas



Tulpen (oben) und Kapuzinerkresse (Foto im Hintergrund) besitzen die Fähigkeit zur Selbstreinigung.

mit feinem Schmutz bedeckt, so bedeckt der Wassertropfen die Schmutzteilechen.

Auch manche Pflanzen wie die Buche haben eine ähnliche Oberfläche. Man spricht hier von wasserliebenden Oberflächen.

Auf Plastikfolien oder Kerzenwachs sind die Tropfen runder, sie nehmen die Form einer Halbkugel an. Die Tropfen laufen schneller ab, jedoch bleiben auch Tropfen auf der Oberfläche zurück. Schmutz wird in den Wassertropfen aufgenommen.



Eichenblatt

Auf selbstreinigenden Oberflächen wie der von Kohlblättern nehmen Wassertropfen eine Kugelform an. Kippt man die Blätter, so laufen die Tropfen vom Blatt herunter, ohne dass Wasser zurückbleibt.

Schmutzteilechen werden von den ablaufenden Wassertropfen aufgenommen. Sie bleiben an der Oberfläche des Tropfens hängen und werden mit diesem abtransportiert. Wo der Tropfen entlangelaufen ist, ist die Oberfläche sauber und trocken.

Wassertropfen auf einem Blatt des Frauenmantels





Nimm einen Papierstreifen und blase darüber. Was geschieht mit dem Papierstreifen? Kannst du dir denken, was der Grund dafür ist?

BERNOULLI-EFFEKT

AUFLÖSUNG: Der Papierstreifen wird nach oben gezogen.
BEGRÜNDUNG: Die Luft strömt schnell auf der Oberseite des Streifens entlang. Dadurch ist der Luftdruck dort geringer, es entsteht ein Unterdruck. Dieser wirkt auf den Papierstreifen wie ein Sog, der ihn nach oben zieht.

Zanonia-Samen

Das Kürbisgewächs *Zanonia macrocarpa* windet sich die Ur-

DER ZANONIA-GLEITER

waldbäume hinauf und entlässt hoch über dem Waldboden die Samen aus seinen Früchten. Diese Samen sind in der Lage, über lange Strecken zu gleiten. Sie dienten dem Flugpionier Igo Etrich 1906 als Vorbild für seinen Gleiter. Beim Bau eines Zanonia-Gleiters muss einiges beachtet werden, damit er gleichmäßig fliegt:

1. Der Gleiter muss vorne ein Gewicht haben – wie die Heftklammern in dieser Bauanleitung. Dieses Gewicht bringt man möglichst weit vorne in der Flugrichtung des Flugzeugs an. Wenn es zu leicht ist, dann fliegt das Flugzeug entweder gar nicht, oder es fliegt wellenförmig hoch und wieder hinunter.

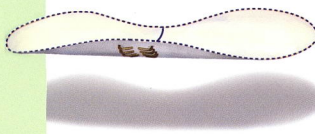
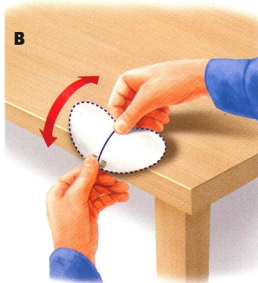
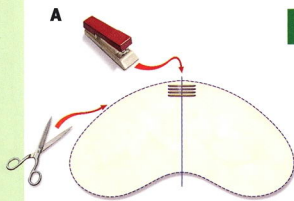
2. Das Flugzeug muss genau symmetrisch gebaut sein. Bei unserem Flugzeug bedeutet das, dass der Umriss der Tragfläche so genau wie möglich ausgeschnitten werden muss. Außerdem muss die Tragfläche vor und nach dem Ausschneiden vorsichtig behandelt werden. Sie darf nicht geknickt, zerknüllt oder beschmutzt werden.

3. Die Tragfläche muss das Gewicht des ganzen Flugzeugs tragen können. Sie muss dafür stabil genug sein.

Kopiere den Umriss des Flugsamens des Flugsamens (Bild A) und vergrößere ihn dabei um den Faktor 2,5. Schneide dann den Umriss des Flugsamens möglichst genau aus der Kopie. Bringe an der mit Querlinien gekennzeichneten Stelle möglichst genau symmetrisch über der Mittellinie vier Heftklammern an. Danach sollte das Modell noch senkrecht zur Mittellinie über eine Tischkante gezogen werden (Bild B), um die natürliche Wölbung des Samens nachzuahmen. Von vorne betrachtet, muss das Modell absolut symmetrisch aussehen.

Fluganleitung:

Nimm das Modell an der Hinterkante zwischen Daumen, Mittelfinger und Zeigefinger und schiebe es leicht und parallel zum Boden an. Sollte das Modell schwanken und unruhig fliegen, dann ist vielleicht die Wölbung zu groß oder die Heftklammern wurden nicht weit genug vorne angebracht. Vielleicht herrschen auch in dem Raum, in dem du den Gleiter fliegen lässt, unruhige Luftströmungen. Fliegt das Modell nicht geradeaus, kannst du als Ausgleich einen Flügel leicht verbiegen.



So sieht der fertige Gleiter aus.

Leichtbau – was Ingenieure von Bäumen und Knochen lernen können

Wie wächst ein Baum?

Die Form eines Baumes ist kein Zufall. Sein Wachstum hängt zunächst einmal von Sonnenlicht, Wasser und Nährstoffen ab. Im Gegensatz zu Sträuchern, bei denen alle Triebe etwa gleichmäßig wachsen, wächst bei Bäumen immer der höchste Ast am stärksten. Der Baum wächst also stärker als andere Wuchsformen wie Sträucher oder Gräser dem Licht entgegen. Geht man in einen sommerlichen Buchenwald, so lässt sich leicht erkennen, welchen Vorteil der Baum dadurch gewinnt: Fast das gesamte Sonnenlicht wird von den Bäumen abgefangen; es kommt kaum Licht auf den Boden. Dort wachsen auch nur wenige Pflanzen, die den Schatten vertragen. Durch sein Höhenwachstum kann sich der Baum gegenüber anderen Pflanzen durchsetzen.

Wenn diese Wuchsform so erfolgreich ist, warum wachsen dann nicht alle Pflanzen wie Bäume? Der Baum nimmt für seinen „Platz an der Sonne“ auch einige Nachteile in Kauf. Er benötigt sehr viel Energie für den Aufbau eines stabilen Stammes und Astwerkes, die den Blättern den Zugang zum Sonnenlicht ermöglichen. Außerdem geht der Baum mit seinem

Der Belastung durch das hohe Gewicht des Stammes und der ausladenden Seitenzweige passt sich der Baum mit seinem Wachstum an.

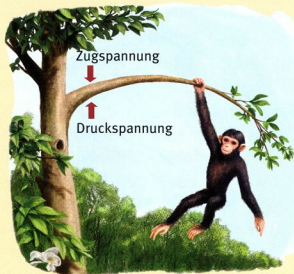
Höhenwachstum auch Risiken ein. Nach einem Sturm wird kaum ein Strauch beschädigt und Grashalme bleiben meistens völlig unversehrt. Dagegen liegen viele Bäume am Boden. Zum Glück sind solche Orkane eher selten und den meisten Wetterereignissen wie starkem Wind, Regen oder Schneefall können Bäume



Am Waldboden wachsen nur Pflanzen, die Schatten gut vertragen können.

SPANNUNGEN

Spannungen treten überall dort auf, wo eine Kraft auf einen Körper einwirkt. Zieht man an einem befestigten Seil, so erzeugt man eine Spannung im Seil, die Zugspannung. Das Gegenteil von Zugspannungen sind Druckspannungen. Hier wird der Gegenstand nicht gezogen, sondern zusammengedrückt. In der Natur tritt aber selten nur eine der beiden Spannungsarten alleine auf. Hängt man sich etwa an einen Ast, dann biegt man ihn nach unten. Die Biegung erzeugt in dem Ast sowohl Zug- als auch Druckspannung: Durch den Zug nach unten entsteht auf der Oberseite des Astes eine Zugspannung. Aber auf der Unterseite wird das Holz gestaucht, dort entsteht eine Druckspannung. Die Spannungen am gebogenen Ast sind nicht gleichmäßig verteilt. Oben ist die Zugspannung am größten und wird zur Mitte hin kleiner. In der Mitte gibt es dann weder Zug- noch Druckspannungen. Nach un-



ten hin nimmt die Druckspannung zu und ist an der Unterseite am größten. Das hat zum Beispiel Einfluss auf den Fahrradbau. Weil beim Biegen die größten Belastungen außen auftreten, können Fahrradrahmen innen hohl sein, ohne deshalb leicht zu brechen. Es genügt, wenn außen ausreichend Material vorhanden ist, um Spannungen aufzufangen.

dann sind die Spannungen in ihm meistens nicht gleichmäßig verteilt. Bestimmte Bereiche werden wenig belastet, an anderen Stellen treten dagegen sehr hohe Spannungen auf. Diese Bereiche brechen dann besonders häufig. Auch bei Bäumen gibt es stark belastete Abschnitte, etwa die Ansatzstelle von großen Ästen. Allerdings können sich Bäume durch Wachstum den Belastungen anpassen. Dies geschieht nach einem ganz einfachen und einleuchtenden Gesetz: „Baue dort viel

problemlos standhalten. Wie passt sich der Baum nun an die Belastungen an? So unterschiedlich Bäume auch aussehen, eine Wachstumsregel kann man an jedem Baum feststellen: Der Stamm wächst unten am breitesten und wird nach oben hin immer schmaler. So ist das Gewicht sinnvoll verteilt. Wäre der Baum überall gleich dick, dann würde er meistens unten abbrechen.

Material an, wo hohe Spannungen herrschen und wenig Material, wo die Spannungen gering sind“. Dass Bäume tatsächlich nach diesem Gesetz wachsen, kann man an der Form von Ästen oder Wurzeln erkennen.

Große Äste haben oft im Querschnitt keine kreisrunde Form, sondern sind oval oder besitzen sogar die Form einer Acht.

Diese Form entsteht aus folgendem Grund: Der Ast wird durch sein eigenes Gewicht besonders stark auf der Ober- und der Unterseite belas-

Eine Maschine, ein Gebäude oder ein Ast brechen meist an einer bestimmten Stelle. Eine Ursache dafür wurde bereits beschrieben: Wenn ein Gegenstand mit einer Kraft belastet wird,

Was ist das „Gesetz der konstanten Spannung“?

Der Ast, der so genannte Doppel-T-Träger, der etwa beim Hausbau verwendet wird, und der Warzenschweinzahn besitzen im Querschnitt alle eine ähnliche Form.



WINDBÄUME

Wie stark die Form eines Baumes durch ständigen Wind aus einer Richtung verändert werden kann, zeigen Windbäume.



Ein aufrecht wachsender Baum würde bei starkem Wind leichter umfallen. Deshalb ist die gebeugte Wuchsform am günstigsten für einen stark dem Wind ausgesetzten Baum.

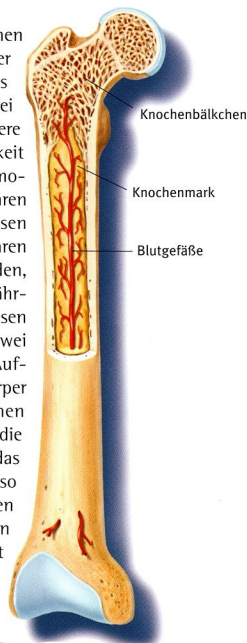
tet. Um die höheren Spannungen auszugleichen, wird dort mehr Holz gebildet. An den weniger belasteten Seiten des Astes wird weniger Holz gebildet. Der Ast versucht also, durch Wachstum die Spannungen an seiner Oberfläche gleichmäßiger zu verteilen. Die Folge ist, dass es nun am Ast keine Schwachstellen mehr gibt und er dadurch viel stabiler wird. Nicht nur Bäume wachsen nach dieser Regel, sondern auch unsere Knochen.

Professor Claus Mattheck vom Forschungszentrum Karlsruhe hat diese Regel nach langer Forschung an Bäumen und Knochen gefunden und nannte sie „Gesetz der konstanten Spannung“. Das bedeutet, dass feste Gewebe wie Holz oder Knochen so wachsen, dass die Spannungen an der Oberfläche gleichmäßig (konstant) verteilt werden. Somit werden also die Form einer Eiche, eines Dinosaurierknochens oder auch unserer eigenen Knochen durch das gleiche Gesetz bestimmt.

Wie passen sich Knochen Belastungen an?

Viele Menschen stellen sich unser Skelett als eine Stütze vor, an der sich kaum jemals etwas verändert. Knochen besteht jedoch aus lebendem Gewebe, das sich ständig verändert. Zum Glück ist das so – sonst würde ein Knochenbruch nie mehr verheilen. Unsere Muskeln werden kräftiger und dicker wenn sie regelmäßig trainiert werden. Ähnliches geschieht auch bei Knochen. Hier nimmt aber zuerst die Festigkeit des Knochengewebes zu, später verändert sich auch Dicke und Form. Um-

gekehrt baut sich der Knochen aber auch schnell ab, wenn er zu wenig belastet wird. Das ist vor allem ein Problem bei Astronauten, die sich längere Zeit in der Schwerelosigkeit aufhalten. Russische Kosmonauten, die oft Monate in ihren Raumstationen sind, müssen nach der Landung aus ihren Raumkapseln getragen werden, weil das Gehen viel zu gefährlich für sie wäre. Für diesen Knochenabbau gibt es zwei Gründe: Erstens kostet der Aufbau von Knochen den Körper Energie. Wird der Knochen nicht gebraucht, so spart er die Energie ein. Zweitens wird das Wachstum von Knochen so gesteuert, dass der Knochen nicht nur stabil ist, sondern gleichzeitig auch möglichst leicht. Zu schwere Knochen würden einen Menschen langsamer werden lassen, das Laufen wäre anstrengender. Deshalb sind Knochen nur so fest, wie es für die Lebensweise eines Menschen oder Tieres notwendig ist. Bei extremen Belastungen wie Stürzen oder Autounfällen kommt es daher oft zu Knochenbrüchen.



Der menschliche Oberschenkelknochen ist ein Beispiel für Leichtbau in der Natur. In der Mitte ähnelt er einer Röhre, die das Knochenmark enthält. Oben am Hüftgelenk besitzt er einen schwammartigen Aufbau aus Knochenbälkchen.

Knochenbälkchen in starker Vergrößerung



Für Gazellen ist der Leichtbau ihrer Knochen wichtig, um schnell vor Raubtieren fliehen zu können.



DER BALZER HERRGOTT

Wenn man sich auf einen steilen Untergrund setzt, ist es sinnvoll, sich ein Kissen unterzulegen, um die entstehenden Spannungen gleichmäßiger zu verteilen. Ähnlich verhält sich auch ein Baum, wenn er bei seinem Wachstum auf ein Hindernis stößt. Er bildet dann eine Art „Kissen“ um das Hindernis herum. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel dafür ist der „Balzer Herrgott“ im Schwarzwald: Eine steinerne Christusfigur wurde an einer Buche befestigt. Wo die Figur den Stamm berührte, waren die Spannungen hoch. Der Baum verteilte die Spannungen gleichmäßig, indem er die Figur umschloss. Nur der Kopf der Figur schaut heute noch heraus.

Bei den Menschen wäre es vielleicht nicht so schlimm, wenn ihre Knochen etwas schwerer wären. Sie müssen heute weder Beute jagen noch vor Raubtieren davonlaufen. Bei einer Gazelle in Afrika, die einem Leopard entkommen muss, sieht das aber schon anders aus. Schnelligkeit entscheidet hier über Leben und Tod. Knochen sind also ein Beispiel für Leichtbau in der Natur: Mit möglichst wenig Material soll eine möglichst hohe Festigkeit erreicht werden.



Astronauten werden nach längerem Aufenthalt im All getragen, da die Knochenmasse abgenommen hat und ihre Knochen leichter brechen.

Leicht und dennoch stabil – die Vorteile einer solchen Konstruktion liegen auf der Hand. Stellen wir uns vor, man würde

Kann man Maschinenbauteile wachsen lassen?

die Gesetze, nach denen Bäume und Knochen wachsen, auf die Technik übertragen: Autos und Flugzeuge könnten leichter gebaut werden und

benötigten durch ihr geringeres Gewicht weniger Treibstoff. Zudem wären die Bauteile viel länger haltbar, sie müssten seltener repariert werden. Dafür müsste nur die Form der Bauteile verändert werden.

Bäume und Knochen wachsen von selbst. Wie aber bringt man Maschinenbauteile zum Wachsen? Professor Mattheck und seine Mitarbeiter entwickelten ein Computerprogramm, mit dem Bauteile ihre Form nach dem natürlichen Vorbild verbessern können. Das Bauteil selbst kann zwar nicht wachsen, aber der Computer kann die Form berechnen, die das Bauteil hätte, wenn es wie ein Baum gewachsen wäre. Nach den Ergebnissen dieser Berechnung kann dann ein Bauteil mit verbesserter Form hergestellt werden. Wie aber funktioniert die Berechnung genau?

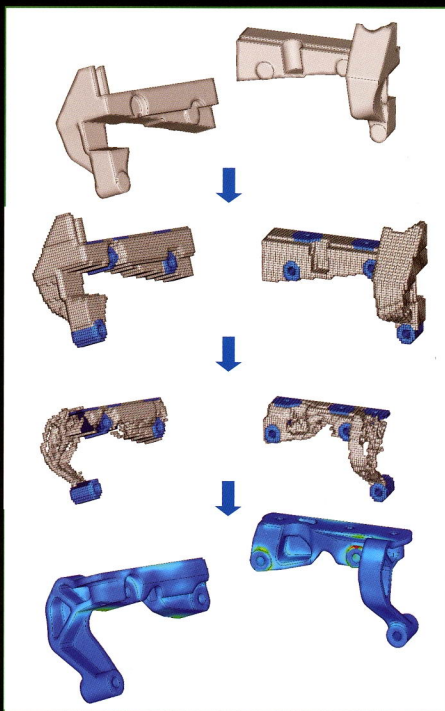
Der Baum lagert dort mehr Material an, wo höhere Spannungen auftreten. Für eine Übertragung dieses Prinzips muss also zunächst ermittelt werden, wie groß die Spannungen in dem Bauteil sind. Heutige Bauteile sind meistens am Computer entworfen worden, es gibt also für jedes Bauteil eine Vorlage im Computer. Das ist ähnlich wie bei einem Architekten, der ein Haus entwirft. Dieser macht auch vorher einen Plan, wie die Zimmer verteilt sind, wie groß die Fenster sein sollen und wie viele Stockwerke das Haus haben soll. Für ein Bauteil, das in einem Auto verwendet werden soll, gibt es auch eine Vorlage im Computer. Damit diese Vorlage in der richtigen Weise „wächst“, muss man wissen, welche Kräfte auf das Bauteil im Auto wir-

ken. Die Kräfte muss man messen und dem Computer mitteilen. Der Computer kann daraufhin berechnen, wie sich diese Kräfte im Bauteil verteilen. Ein Baum würde nun in den Bereichen mit hohen Spannungen mehr Holz anlagern. Genau das macht auch der Computer. Er lagert in mehreren Schritten so lange Material auf die stark belasteten Bereiche an, bis die Spannung gleichmäßig verteilt ist. Stellt man nun das Bauteil nach diesem Vorschlag des Computers her, so ist es viel haltbarer als sein Vorgänger.

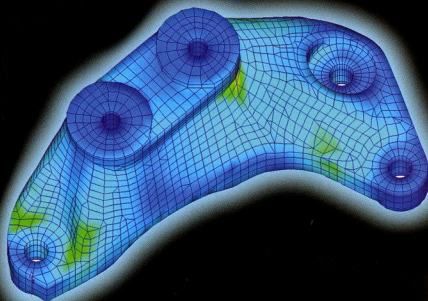
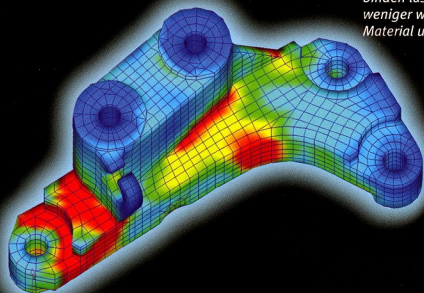
Das Programm, das eine solche Berechnung durchführt, nennt man CAO (Computer Aided Optimization = „Verbesserung mithilfe des Computers“; englisch)

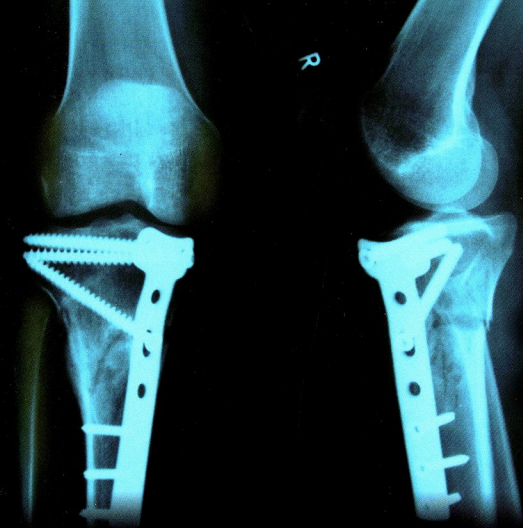
Was ist die „Soft Kill Option“?

Durch die CAO-Berechnung ist das Bauteil nun stabiler geworden, weil die Spannungen gleichmäßiger verteilt wurden. Leichter wurde es aber nicht. Im Gegenteil, es könnte sogar ein wenig schwerer werden, weil ähnlich wie beim Baum zusätzlich auf die hoch belasteten



Das hier gezeigte Bauteil ist ein Motorhalter, der im Auto den Motor mit der Karosserie verbindet. Ganz oben ist er noch ziemlich groß. Die SKO-Methode entfernt die wenig belasteten Abschnitte des Bauteils. Der Computer glättet nun den Entwurf, damit sich die Spannungen gleichmäßig verteilen und sich der Motorhalter mit den anderen Bauteilen verbinden lässt. Das Ergebnis ist ein stabiles Bauteil, das etwa ein Drittel weniger wiegt als der erste Entwurf. So kann der Ingenieur am Auto Material und Gewicht sparen.





Das Röntgenbild zeigt Stäbe, die an gebrochenen Knochen festgeschraubt wurden. Auf diese Weise kann der Knochen wieder gerade zusammenwachsen.

Abschnitte Material aufgelagert wurde. Um ein Bauteil stabiler und gleichzeitig leichter zu machen, müssen noch die wenig belasteten Teile entfernt werden. Das Vorbild hierfür ist der Knochen, der bei fehlender Belastung Material abbaut. Vorlage ist auch hier wie beim CAO ein Computermodell des Bauteils, in dem die Spannungen angezeigt werden. Nur werden bei dieser neuen Berechnung nicht die hoch belasteten Bereiche verändert, sondern die mit den niedrigen Spannungen. Diese „Faulpelze“ sind für die Stabilität des Bauteils nicht notwendig und können entfernt werden. Die Berechnung, die nun stattfindet, nennt man SKO, kurz für „Soft Kill Option“ (den englischen Ausdruck kann man ungefähr mit „Entfernen der weichen Bereiche“ übersetzen). Der Computer tut nämlich so, als wären die wenig belasteten Teile weich wie schmelzender Käse. Diese „weichen“ Bereiche werden entfernt und nur der „Hartkäse“, also die Ab-

schnitte des Bauteils, die wirklich benötigt werden, bleiben stehen. SKO kann auch einem Ingenieur helfen, der noch keine genaue Vorstellung hat, wie ein ideales Bauteil aussehen könnte. Dieser Ingenieur entwirft dann im Computer einen einfachen Klotz, aus dem das Bauteil berechnet werden soll. Er muss nur wissen, wo der Klotz in der fertigen Maschine befestigt werden soll und welche Kräfte auf das Bauteil wirken. Dann entfernt das SKO-Programm alle überflüssigen Abschnitte. Das ist vergleichbar mit einem Bildhauer, der an einen Marmorblock so lange Material entfernt, bis die Statue fertig ist. Wie gehören nun CAO und SKO zusammen? Zunächst wird das wenig belastete Material durch die SKO entfernt. An diesem Leichtbau-Entwurf verteilt dann das CAO-Programm die Spannungen möglichst gleichmäßig, indem in Bereichen mit hoher Spannung Material aufgelagert wird. Das Ergebnis ist ein Vorschlag für eine verbesserte Form des Bauteils – leicht und dennoch stabil!

Anwendungen von CAO und SKO

Wo findet man Anwendungen?

findet man im medizinischen Bereich sowie im Automobilbau. Bei komplizierten Knochenbrüchen etwa müssen in einer Operation oftmals die Knochenstücke über Platten oder Stäbe miteinander verbunden werden. Dadurch werden sie in einer stabilen Stellung gehalten und können wieder gerade zusammenwachsen. Die Platten werden mit so genannten orthopädischen Schrauben am Knochen befestigt. Diese Schrauben müssen möglichst klein sein, damit

Ganz links: Der Computer berechnet die Spannungen, die am Motorhalter bei normalem Betrieb auftreten würden. Rote und gelbe Bereiche zeigen hohe Spannungen an, in den blauen Abschnitten sind die Spannungen gering. Links: Das CAO-Programm hat auf den Abschnitten mit hoher Spannung Material angelagert. Die Spannungen sind nun gleichmäßig verteilt – das Bauteil hält länger.

sie am Knochen wenig Schaden anrichten. Da die Schrauben durch die Bewegungen des Patienten belastet werden, kam es früher vor, dass sie brachen. In manchen Fällen wurde eine weitere Operation notwendig, in der die gebrochenen Schrauben entfernt und neue eingesetzt werden mussten. Mit dem CAO-Programm konnte die Form des Gewindes verbessert werden, sodass die



Das Perlboot ist ein Tintenfisch mit einer gekammerten Schale. Obwohl die Wände sehr dünn sind, hält die Schale den hohen Wasserdruck beim Tauchen aus.

Schrauben viel haltbarer sind. Die neuen Schrauben sind für die Patienten eine deutliche Verbesserung.

Im Automobilbau werden SKO- und CAO-Programme angewandt, um leichtere Bauteile zu entwerfen. Eines dieser Bauteile ist der Motorhalter. Mit dem Motorhalter wird der Motor an der Karosserie des Fahrzeugs befestigt. Der Motorhalter des Opel Vectra konnte auf diese Weise um rund ein Drittel leichter gebaut werden. Auch auf andere Bauteile wurden die Programme angewandt, sodass das Gewicht der Autos um etwa 70 Kilogramm verringert werden konnte. Ein leichteres Auto verbraucht weniger Benzin. So helfen die Erkenntnisse aus der Natur schließlich, die Natur zu schonen.

Was ist das Geheimnis des Perlboots?

Die Natur zeigt dem Menschen nicht nur, wie er Bauteile verändern kann, damit sie stabiler und leichter sind. Auch

manche Materialien aus der Natur haben Eigenschaften, über die Ingenieure nur staunen können. Das Perlboot oder Nautilus zum Beispiel, ein urtümlicher Tintenfisch, ist ein „tierischer Techniker“. Eine Besonderheit dieses Tintenfisches ist seine Schale. Gewöhnliche Tintenfische besitzen keine Schale, sondern eine Kalkplatte, den Schulp, im Inneren ihres Körpers. Schulpse sieht man oft an Vogelkäfigen, wo sie den Vögeln zum Schärfen des Schnabels dienen. Der Nautilus dagegen besitzt eine sehr schöne Schale, die

einem Schneckenhaus ähnelt. Die Nautilusschale besteht aus mehreren Kammern, die nach innen hin immer kleiner werden. Jede Kammer besitzt ein Loch, durch das der Nautilus einen Schlauch steckt, den Siphon. In den Kammern befindet sich Gas. Mit dem Siphon kann der Tintenfisch die Gasmenge in der Schale und damit seinen Auftrieb verändern. Auf die gleiche Weise tauchen auch U-Boote auf oder ab.

Nur kann der Nautilus viel tiefer tauchen als die meisten U-Boote, bis etwa 800 Meter Tiefe. Je größer die Tauchtiefe, desto größer ist aber der Wasserdruck. Um nicht vom hohen Druck zerquetscht zu werden, besitzen U-Boote dicke Wände. Die Wände einer Nautilus-Schale sind mit einem Millimeter dagegen sehr dünn. Warum wird der Nautilus nicht zerdrückt? Er wendet drei Tricks an.

Gekammerte Schale des Perlboots

Erstens wird beim Tauchen die Gasmenge in der Schale geringer, weil Wasser einströmt. Das muss der Nautilus machen, damit er schwerer wird und absinken kann. Durch das Wasser im Gehäuse ist der Druckunterschied zwischen innen und außen nicht mehr so hoch, die Schale wird weniger belastet. Zweitens wird die äußere Schale durch die inneren Kammerwände verstärkt. Drittens ist die Schale des Nautilus mit einem ganz besonderen Material verstärkt, dem Perlmutter.

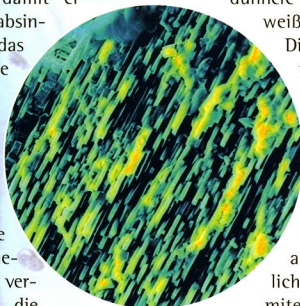
Den Namen hat das Perlmutter von den Perlen, die aus dieser Substanz aufgebaut sind. Perlmutter glänzt nicht nur schön, es ist auch ein leichtes und gleichzeitig extrem festes Material. Dabei besteht es fast nur aus Kalk. Daneben enthält es noch kleine Mengen an Eiweißen und Chitin, dem Stoff, aus dem auch die Insekten- und Krebspanzer aufgebaut sind.

Was sind Verbundmaterialien?

Kalk ist ein eher brüchiges Material. Perlmutter ist aber fast 3000-mal so fest wie der Kalk, aus dem es überwiegend aufgebaut ist. Das Geheimnis des bruchfesten Perlmutter wird sichtbar, wenn man es aufschneidet und extrem vergrößert. Das Perlmutter, das für das bloße Auge wie eine glatte, einheitliche Fläche aussieht, ist in

Wirklichkeit aus vielen winzig kleinen Kalkplättchen aufgebaut. Zwischen den Kalkplättchen liegen dünnere Schichten aus Eiweißen und Chitin.

Diese Schichten sind viel weicher und nachgiebiger als die Kalkplättchen. Perlmutter ist also kein einheitlicher Stoff wie etwa Eisen, sondern besteht aus unterschiedlichen Stoffen, die miteinander verbunden sind. Solche Materialien nennt man



Mikroskopische Aufnahme der Kalkplättchen des Perlmutter

auch Verbundmaterialien. Es ist verblüffend, aber die weichen Eiweiß- und Chitinschichten sorgen dafür, dass das Perlmutter so fest ist. Um das zu verstehen, muss man sich vorstellen, was geschieht, wenn jemand ein Material, zum Beispiel Plexiglas, verbiegt. Wird eine Plexiglasplatte zu stark verbogen, bricht sie schlagartig auseinander. Ein Riss, der irgendwo an der Platte entsteht, breitet sich in kürzester Zeit aus. Da alles aus einer Substanz besteht, nämlich Plexiglas, gibt es keine Stelle, an der der Riss aufgehalten werden könnte. Anders ist es bei Verbundmaterialien. Wird eine Perlmuttertschicht wie in der Schale des Nautilus gebogen, so wird meistens gar kein Riss entstehen. Das liegt daran, dass die Kalkplättchen sehr klein sind und dadurch kaum zu zerbrechen sind. Wenn du einen Zweig in immer kleinere Stückchen brichst, sind die Stücke irgendwann so klein, dass du sie nicht mehr weiter zerbrechen kannst. Ähnlich ist es mit den kleinen Kalkplättchen. Sie zerbrechen nicht, sondern weichen auseinander.



Damit aber nicht alles auseinander fällt, gibt es die Eiweiß- und Chitinschichten, die die Kalkplättchen wie ein Klebstoff verbinden. Da sie weicher sind als der Kalk, werden sie gedehnt und fangen dadurch die Kräfte auf. So verhindern sie das Zerbrechen der Schale. Ein Verbundmaterial ist also aus festen und weichen Stoffen aufgebaut, die eng miteinander verbunden sind. Durch die „Zusammenarbeit“ erhält das Verbundmaterial eine Festigkeit, die viel größer ist als die der einzelnen Stoffe.

Perlmutter ist nicht das einzige

Welche Verbundmaterialien gibt es in Natur und Technik?

Verbundmaterial in der Natur. Das bekannteste natürliche Verbundmaterial ist Holz. Der Aufbau unterscheidet sich aber vom Perlmutter. Beim Perlmutter befinden sich kleine feste Plättchen in einer nachgiebigen Umgebung. Beim Holz dagegen sind zugfeste und druckfeste Substanzen miteinander verbunden.

Anders als bei Tieren sind die Zellen von Pflanzen von festen Zellwänden umgeben, deren Hauptbestandteil die Cellulose ist. Cellulose

kann Zugkräfte gut aushalten. Die druckfeste Substanz nennt man Lignin. Wenn Pflanzen Lignin in ihre Zellwände einbauen, dann verbinden sie zugfeste und druckfeste Stoffe miteinander zu einem besonders festen und gleichzeitig leichten Material, dem Holz.

Ein weiteres Beispiel für Verbundmaterialien in der Natur ist das Chitin, der Hauptbestandteil der Insekten- und Krebspanzer. Mit Chitin können sowohl die dünnen und nachgiebigen Flügel der Libellen als auch die festen Panzer eines Hummers hergestellt werden. Ob das Verbundmaterial weich oder hart ist, hängt von den Stoffen ab, die mit dem Chitin verbunden werden.

Ein bekanntes technisches Verbundmaterial sind so genannte kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Sie bestehen aus zugfesten Kohlefasern, die mit druckfestem Kunstharz verstärkt



werden, und sind ziemlich leicht. Autos und Flugzeuge könnten viel leichter sein, wenn sie aus CFK gebaut wären. Ein Nachteil der CFK ist, dass sie teuer sind. Häufig findet man sie in Sportgeräten. Viele Radrennfahrer etwa benutzen leichte Rennräder aus diesem Material.

Lebewesen haben der Technik

Kann sich Kunststoff selbst reparieren?

Moderne Rennräder sind oft aus dem leichten und doch stabilen Verbundmaterial CFK (kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe) hergestellt. Diese Räder werden auch Carbonräder genannt.



eine wichtige Fähigkeit voraus – sie können sich selbst reparieren. Diese Fähigkeit ist im Tier- und

Pflanzenreich unterschiedlich stark ausgeprägt. Während unsere Haut kleinere Verletzungen reparieren kann, besitzen manche Salamanderarten die Fähigkeit, verlorene Beine nachzubilden. Bei Pflanzen kann man oft wieder ganze Pflanzen aus einzelnen Zweigen oder Wurzelstücken wachsen lassen.

Selbstreparatur ist eine Fähigkeit, die in der Regel nur bei Lebewesen vorkommt. Schäden an technischen Produkten hingegen müssen durch den Menschen repariert werden.

Jedoch gibt es auch in der Technik Möglichkeiten, dass sich Beschädigungen selbst reparieren. Wissenschaftler der Universität Freiburg haben untersucht, wie Pflanzen auf Verletzungen reagieren. Pflanzengewebe besteht aus Zellen, die von einer festen Hülle, der Zellwand, umgeben sind. Untersucht man eine Liane, findet man sowohl festes Gewebe aus Zellen mit einer dicken,

festen Zellwand als auch weiches Gewebe aus Zellen mit einer dünnen Zellwand. Reißt nun das feste Gewebe ein, so dringen die weichen Zellen in den Riss ein, verformen sich dabei und verschließen den Riss. Man kann sich diese Zellen vorstellen wie aufgeblasene Luftballons in einer Kiste. Würde man in eine Wand ein Loch bohren, so würden die Luftballons in das Loch hineinquellen und es verschließen.

Eine Schweizer Firma, die tragbare, luftgefüllte Brücken baut, fand dieses Prinzip sehr nützlich. So bekamen die Freiburger Forscher den Auftrag, eine Hülle zu entwickeln, die kleine Löcher von selbst verschließt. Unter der Hülle befindet sich ein Kunststoffschaum. Sticht jemand ein Loch in die Hülle, so dringt der Schaum in das Loch ein und verschließt es.



Der Axolotl kann verlorene Beine nachwachsen lassen.



Damit diese luftgefüllte Brücke bei einem Riss nicht zusammenbricht, soll zukünftig eine Hülle verwendet werden, die Löcher von selbst verschließen kann.



Schnelle Schwimmer – die Tricks von Haien, Delfinen und Pinguinen

Warum haben Haie eine raue Haut?

Haie gehören zu den erfolgreichsten Tiergruppen unseres Planeten. Seit 380 Millionen Jahren durchqueren die schnellen Raubfische die Meere. Wenn eine Tiergruppe über so lange Zeit erfolgreich ist, kann man annehmen, dass ihr Körper besonders gut an ihre Lebensweise angepasst ist. Haie haben keine schleimige Haut, wie Karpfen oder Forellen, sondern sie besitzen eine raue Haut, die sich anfühlt wie Sandpapier. Sie besteht aus winzigen Schuppen. Dabei handelt es sich um Zähnnchen, denn wie unsere Zähne bestehen sie aus einer äußeren Schicht aus Zahnschmelz und einer inneren Schicht aus Zahnbein. Der Hai trägt also seine Zähne nicht nur im Maul, sondern zusätzlich auf dem ganzen Körper. Dem Haiforscher Professor Wolf-Ernst Reif aus Tübingen fiel auf, dass schnell schwimmende Haie auf ihren Schuppen Rillen besitzen. Diese sind

bei schnellen Hochseehaien besonders ausgeprägt. Außerdem sind sie immer in Richtung des vorbeiströmenden Wassers ausgerichtet. Deshalb vermutete er, dass die Rillen dazu dienen, den Reibungswider-

Schnelle Räuber: Seit vielen Millionen Jahren gleiten Haie durch die Meere.

STRÖMUNGSWIDERSTAND

Wenn sich ein Körper bewegt, dann muss er die Luft zur Seite drängen. Dies erfordert eine Kraft, die wir als Strömungswiderstand wahrnehmen. Strömungswiderstand kennst du etwa vom Radfahren bei Gegenwind. Der Strömungswiderstand wirkt noch stärker im Wasser, weil dieses viel dichter ist als Luft. Der Widerstand hängt zum einen von der angeströmten Fläche ab: Je höher und breiter ein Körper ist, desto größer ist der Widerstand. Wenn ein Radfahrer den Widerstand verkleinern möchte, dann beugt er sich tief über den Lenker. Damit verkleinert er die angeströmte Fläche und gibt seinem Körper zusätzlich eine strömungsgünstige Form. An einer solchen Form kann die Strömung gut entlanglaufen, ohne dass sich Luftwirbel ablösen. Die sich ablösenden Luftwirbel erzeugen einen hohen Widerstand. Der Widerstand, der durch das Verdrängen der Luft entsteht, wird als Druckwiderstand bezeichnet. Daneben erfährt ein Körper aber noch einen weiteren Widerstand, den Reibungswiderstand. Er entsteht, wenn sich Luft oder Wasser an der Oberfläche des Körpers entlangbewegt. Die anströmenden Luftteilchen werden an der Körperoberfläche abgebremst und das bremst wiederum den Körper. Der Strömungswiderstand eines Körpers setzt sich aus dem Druck- und dem Reibungswiderstand zusammen.

DAS HERTEL-FLUGZEUG

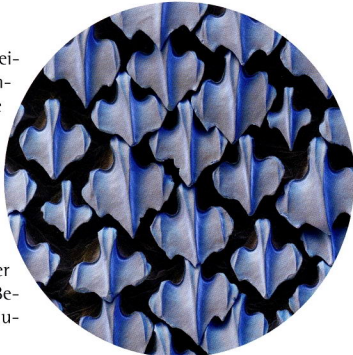
Der Luftfahrtingenieur Heinrich Hertel schlug schon 1962 vor, ein Flugzeug mit einem Spindelrumpf zu bauen. Das Hertel-Flugzeug mit Spindelrumpf blieb jedoch nur ein



Hertel-Flugzeug

Modell. Wahrscheinlich wäre es wesentlich Energie sparer geflogen als heutige Flugzeuge. Der Bau wäre aber schwierig und teuer gewesen. Der röhrenförmige Rumpf heutiger Passagierflugzeuge wird aus vielen gleichen Teilen zusammengebaut. Beim Hertel-Flugzeug müsste jeder Rumpfabschnitt einzeln gebaut werden.

stand beim Schwimmen zu verkleinern. Die meisten Physiker und Ingenieure glaubten ihm nicht; sie waren der Meinung, dass eine glatte Oberfläche am günstigsten sei. Rillen sind doch eigentlich Hindernisse für das Wasser, sodass mehr Reibungswiderstand entstehen müsste. Der Ingenieur Dietrich Bechert testete die Vermutung von Professor Reif.



Die Haischuppen sind so angeordnet, dass sich die auf ihnen befindlichen Rillen entlang des ganzen Körpers fortsetzen.

Die Rillen auf der Haihaut sind sehr klein. Herr Bechert wollte genau sehen, was auf der Haihaut geschieht. Deshalb baute er

Kann man die Haihaut nachbauen?

ein stark vergrößertes Modell der Haischuppen. Das Ergebnis erstaunte die Ingenieure: Die Haihaut verkleinert tatsächlich den Reibungswiderstand. Man stellt sich den Haihaut-Effekt so vor, dass sich in den Rillen viele kleine Wasserwirbel bilden, die wie ein Kugellager auf das entlanggleitende Wasser wirken. Mit diesem „Wirbelanzug“ kann der Hai leichter durch das Wasser gleiten. Der Haihaut-Effekt funktioniert aber nur beim schnellen Schwimmen, ansonsten sind glatte Oberflächen am günstigsten. Was beim Hai funktioniert, ist auch an anderen Oberflächen möglich. Denn das Prinzip hinter dem Haihaut-Effekt sind die Rillen, die in Richtung der Strömung verlaufen. Man muss also nicht die komplizierten Haischuppen nachbauen. Es genügt, eine Rillenfolie herzustellen.

len, die man auf Oberflächen aufklebt.

Der Haihaut-Effekt funktioniert auch an der Luft. So wurde eine Folie entwickelt, die man auf Flugzeuge kleben kann. Durch diese Rillenfolie können Flugzeuge Treibstoff einsparen. Allerdings findet man heute noch keine Flugzeuge mit dieser Folie. Es dauert mehrere Tage, um ein Flugzeug zu bekleben, denn die Folie muss ganz glatt von Hand aufgebracht werden. Solange könnten das Flugzeug weder Fracht noch Passagiere transportieren und die Fluggesellschaften würden mit dem Flugzeug kein Geld verdienen.

Der Haihaut-Effekt wurde auch auf Schwimmanzüge übertragen.



Warum können Delfine so schnell schwimmen?

Einige Tiere versetzen uns mit ihren Schwimmgeschwindigkeiten in Erstaunen. Delfine schwimmen oft lange Zeit in der Bug-

welle von Schiffen und können meterhoch aus dem Wasser springen. Ein wesentlicher Grund für die Schnelligkeit von Pinguinen, Delfinen, Haien oder Thunfischen liegt in ihrer Körperform. Alle diese Tiere

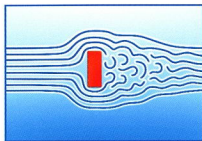
besitzen eine so genannte Spindelform: Der Körper ist von vorne betrachtet rund und wird zur Mitte hin schnell dicker. Die breiteste Stelle liegt im vorderen Körperbereich. Zum Körperende hin wird er wieder schmaler. Zunächst erscheint es erstaunlich, dass diese schnellen Schwimmer so dick und plump wirken. Jedoch kann die Strömung dieser Körperform besonders gut folgen, ohne zu verwirbeln. Man bezeichnet deshalb diese Körper auch als stromlinienförmig. Tiere mit dieser Körperform erfahren beim Schwimmen wenig Widerstand, sie müssen sich also beim Schwimmen weniger anstrengen. Auch

ihren Schwimmgeschwindigkeiten in Erstaunen. Delfine schwimmen oft lange Zeit in der Bug-

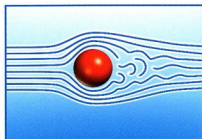


Pinguine können sich mit weiten Sprüngen aus dem Wasser katapultieren.

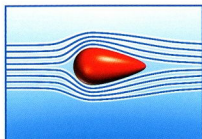
die Körperoberfläche trägt zur Verringerung des Widerstandes bei.



Stromlinien an verschiedenen Körpern: Hinter dem Balken kommt es zu starken Wirbeln, der Widerstand ist sehr hoch.



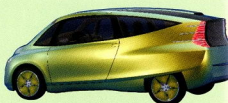
An der Kugel kann die Strömung schon besser entlangfließen, jedoch kommt es auch hier zu Verwirbelungen.



Dieser Körper ist stromlinienförmig gebaut, an ihm kann die Strömung entlanglaufen, ohne dass sich Wirbel ablösen.

Neben dem schon beschriebenen Haihaut-Effekt gibt es noch andere Möglichkeiten, die Reibung zu verringern. Delfine haben eine glatte, gummiartige Haut, die auftretende Wirbel dämpft, sodass die Strömung glatt am Körper entlanglaufen kann. Viele Fische dämpfen die Reibungswirbel durch Schleim.

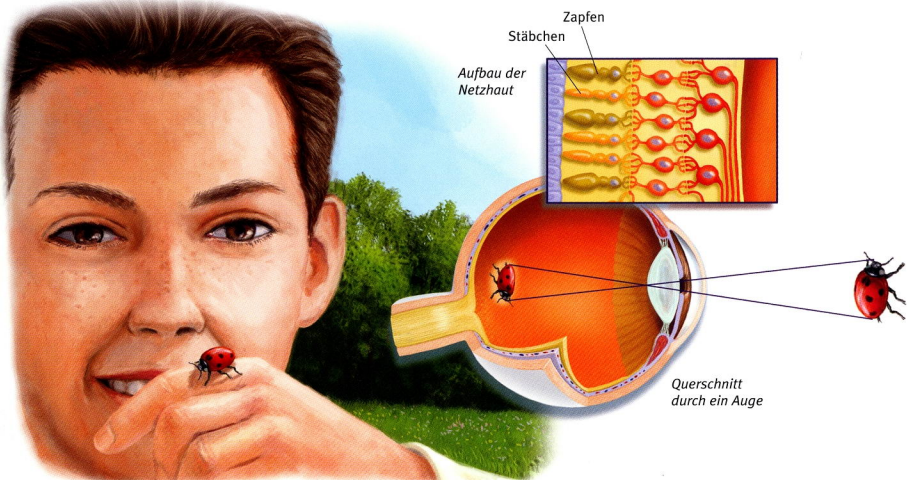
Pinguine benutzen ihr Gefieder für einen besonderen Trick: Das Gefieder kann Luft speichern und diese unter Wasser beim Beschleunigen freisetzen. So springen sie in einem Schleier aus Luftblasen aus dem Wasser. Diese Fähigkeit ist wichtig, um zum Beispiel auf Eisschollen springen zu können.



Vom Fisch zum Auto: Entwicklungsstufen des „Bionic Cars“

KOFFERFISCH IM AUTO

Ingenieure bei DaimlerChrysler suchten als Vorbild für die Form eines bionischen Autos ein Wassertier mit wenig Strömungswiderstand. Die strömungsgünstigen Formen von Pinguinen und Haien sind aber für ein Auto, das stabil fahren und in dem Menschen und Gepäck Platz finden sollen, ungeeignet. Sie entschieden sich daher für den Kofferfisch. Dieser kleine Fisch hat trotz seiner kastenartigen Gestalt sehr gute Strömungseigenschaften. Das „Bionic Car“ (bionisches Auto; englisch) gehört zu den Autos mit dem kleinsten Strömungswiderstand. Kaufen kann man es aber bisher noch nicht.



In unserem Auge wird das Bild der Umgebung umgekehrt auf die Sinneszellen in der Netzhaut geworfen. Dennoch steht für uns die Welt nicht auf dem Kopf. Das liegt an der Verarbeitung der Signale im Gehirn.

WO BRENNT'S?

Die meisten Tiere fliehen vor dem Feuer. Nicht so der Schwarze Kiefernprachtkäfer. Die Weibchen dieser Art nehmen Waldbrände schon auf große Entfernungen wahr, fliegen zum Brandherd und legen ihre Eier in die verkohlte Baumrinde. Sie besitzen besondere Sinnesorgane zum Aufspüren von Wärmequellen. Nach deren Vorbild haben Wissenschaftler der Universität Bonn einen bionischen Waldbrandmelder gebaut.



Schwarzer Kiefernprachtkäfer

Sinnesorgane

Jedes Lebewesen benötigt Sinnesorgane, um sich in der Umwelt zurecht zu finden. Der am besten entwickelte Sinn des Menschen ist der Lichtsinn, nach dem wir uns vor allem orientieren.

Weitere Sinne des Menschen sind der Hör-, Geruchs-, Geschmacks- und Tastsinn. Daneben haben wir noch Sinnesorgane für Temperatur und Gleichgewicht.

Jedes Sinnesorgan besitzt kleine Sinneszellen, die Informationen aus der Umgebung aufnehmen. Beispiele für solche Sinneszellen sind die Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut unserer Augen. Stäbchen erfassen nur die Helligkeit des Lichtes, sie sind vor allem in der Dämmerung wichtig. Die Zapfen dagegen ermöglichen uns das Farbsehen. Jede Sinneszelle ist mit Nervenzellen verbunden, die die Information in das Gehirn weiterleiten. Damit eine Sin-

neszelle aktiv wird, muss sie durch einen Reiz aus der Umgebung ange-regt werden. Bei den Sinneszellen im Auge ist dieser Reiz ein Lichtstrahl, bei den Riechzellen eine bestimmte Substanz in der Luft, die auf die Sinneszelle trifft. Die Weiterleitung der Information erfolgt bei allen Nerven auf die gleiche Weise: Es werden schwache elektrische Signale in Form von Spannungsschüben weitergeleitet. Je stärker der Reiz, desto mehr Spannungsschübe entstehen pro Sekunde. Es ist also gleich, ob die Sinneszelle durch Licht oder Schall angeregt wurde, im Gehirn kommt immer ein elektrisches Signal an.

Der Sinneseindruck entsteht erst im Gehirn. Ein Mensch, dessen Augen zwar funktionieren, dessen Sehnerv jedoch unterbrochen ist, wäre blind. Wie aber weiß das Gehirn, woher die Information stammt? Im Gehirn gibt es bestimmte Bereiche, wie ein Seh- oder ein Hörzentrum, die mit den jeweiligen Sinnesorganen über Nerven verbunden sind.

Sie sind für die Verarbeitung von Nervensignalen zuständig. Aus den Informationen, die unsere Sinnesorgane aus der Umgebung aufnehmen, wird im Gehirn ein Abbild unserer Umgebung entwickelt.

Die Welt sieht nicht für alle Lebewesen gleich aus. Die Blüte unten bei Tageslicht; so sehen wir sie. Oben dieselbe Blüte unter UV-Licht; so wird sie von Bienen gesehen. Die dunklen Felder leiten die Bienen ins Innere der Blüte.



Warum sieht die Welt für Tiere anders aus?

Wir halten es für selbstverständlich, dass die Welt so ist, wie wir sie wahrnehmen. Wir nehmen tatsächlich aber nur den Bereich unserer Umwelt wahr, den unsere Sinnesorgane aufnehmen können. Viele Tiere würden die gleiche Umwelt völlig anders wahrnehmen. Zum Teil liegt das daran, dass manche Sinnesorgane der Tiere leistungsfähiger sind. So sehen zum Beispiel Adler viel besser als Menschen. Katzen besitzen fast nur Stäbchen in ihrer Netzhaut. Das ermöglicht es ihnen, auch in der

Dämmerung sehr gut zu sehen, dafür ist für sie die Welt schwarz-weiß. Hunde können viel mehr Gerüche wahrnehmen als wir und eine Beute anhand von Geruchsspuren über Kilometer verfolgen.

Es gibt aber auch bei manchen Tieren Sinnesorgane, die Informationen wahrnehmen, für die wir gar keine Sinneszellen besitzen. So können Haie und andere Fische elektrische Felder wahrnehmen. Tauben können sich bei ihren Flügen am Magnetfeld der Erde orientieren. Bienen richten sich beim Flug zu ihren Futterquellen nach dem Sonnenstand. Die Biene kann das für

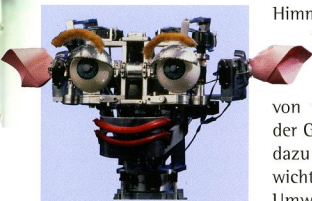
Bei Hunden ist der Geruchssinn viel besser ausgebildet als beim Menschen.

SYNÄSTHETEN

Wie wir die Welt wahrnehmen, hängt nicht nur von unseren Sinnesorganen ab. Denn diese liefern nur ein unvollständiges Bild der Umwelt. Erst das Gehirn erzeugt eine Vorstellung unserer Umgebung, in der wir uns zurechtfinden können. Was passiert aber, wenn Nervensignale des Gehörs durch eine zusätzliche Verbindung auch ins Sehzentrum gelangen? Dann entsteht zur Musik noch ein Farbeindruck. Oder in anderen Fällen ein bestimmter Geschmack. Menschen, bei denen die Sinneseindrücke nicht getrennt verarbeitet werden, nennt man Synästheten. Für sie können bestimmte Töne blau sein oder der Buchstabe H nach Brot schmecken.

Fledermäuse nutzen Ultraschallrufe auf der Jagd nach Beutetieren.

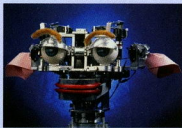




KISMET fröhlich,...

ROBOTERKOPF

Ein Computer „denkt“ ganz anders als ein Mensch, er versteht oft nicht, was der Benutzer möchte und umgekehrt. Seit Jahren bemühen sich Programmierer, Computer benutzerfreundlicher zu machen. Noch wichtiger ist das bei Robotern, da diese in der Regel keine Tastatur und keinen



...müde...



...und wütend

Bildschirm besitzen. Damit der Mensch mit dem Roboter sprechen kann, hat man vielfach mehr oder weniger menschenähnliche Roboterköpfe gebaut. Einer davon ist KISMET aus den USA, der nicht nur sehen und hören, sondern auch verschiedene Gesichtsausdrücke annehmen kann.

uns unsichtbare ultraviolette Licht sehen und somit bei bedecktem Himmel feststellen, wo sich die Sonne befindet.

Die Art, wie wir die Welt wahrnehmen, ist also nur eine von vielen Möglichkeiten. Was ist der Grund dafür? Sinnesorgane sind dazu da, dass Lebewesen die für sie wichtigen Informationen aus ihrer Umwelt finden: Nahrung, sich nähernde Feinde, Artgenossen. Ein Tier, das nachts auf Jagd geht, muss keine Farben sehen können. Viel wichtiger ist es, in der Dämmerung gut zu sehen. Fledermäuse, die sich teilweise in dunklen Höhlen aufhalten, müssen andere Möglichkeiten zur Orientierung finden. Sie stoßen Rufe aus, die für unsere Ohren zu hoch sind, den so genannten Ultraschall. Trifft ein solcher Ultraschallruf auf ein Hindernis, so gibt es ein Echo, das die Fledermaus mit ihren großen Ohren hören kann. So entsteht im Gehirn der Fledermaus auch ohne Licht ein „Bild“ der Umgebung.

Auch wir Menschen nehmen dank moderner Technik Dinge wahr, die unseren Sinnesorganen verborgen bleiben. Zum

Kann man die Sinne der Tiere nachahmen?

Beispiel werden über Antennen unsichtbare Wellen aufgefangen und im Fernseher in Bilder und Töne verwandelt. Die Signalübertragung funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie beim Tier: Ein Signal aus der Umwelt wird von einem Empfänger aufgenommen. Beim Tier ist der Empfänger ein Sinnesorgan, beim Fernseher eine Antenne. Das elektrische Signal muss dann wieder entschlüsselt und in ein Bild oder ei-

nen Ton umgewandelt werden.

In der Technik gibt es einige Geräte, die ähnlich funktionieren wie die Sinnesorgane von Tieren. So senden manche Schiffe Schallsignale aus und können am Echo feststellen, wie tief das Meer ist, ob sich Fischschwärme oder U-Boote unter ihnen befinden. Man nennt diese Technik Echolot. Eine andere Anwendung sind Geräte für Ultra-

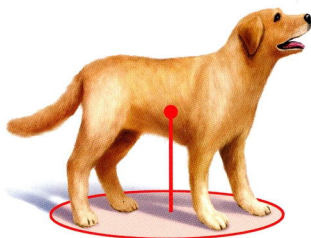


Mithilfe eines Ultraschallgerätes wird das Kind im Bauch einer Schwangeren sichtbar.

schalluntersuchungen in der Medizin, um etwa den Verlauf einer Schwangerschaft zu untersuchen. Auch in der Natur findet man die Nutzung von Schall zur Orientierung. Neben den schon erwähnten Fledermäusen senden auch tauchende Pottwale Schallsignale aus, um in der völligen Dunkelheit der Tiefsee Beute zu finden.

Das Echolot wurde jedoch unabhängig von Fledermäusen und Pottwalen entwickelt, es handelt sich somit nicht um Bionik. Es gibt aber auch Wissenschaftler, die nach natürlichen Vorbildern neue technische „Sinnesorgane“ bauen.

Wie Roboter das Laufen lernen



Der rote Kreis stellt vereinfacht die von den Füßen aufgespannte Fläche dar, der rote Punkt die ungefähre Lage des Körperschwerpunktes. Wenn sich der Körperschwerpunkt aus dem roten Kreis bewegt, so beginnt man zu kippen.

Wie laufen Tiere?

Laufbewegungen findet man im Tierreich in unterschiedlichsten Formen. Es gibt Tausendfüßler mit einigen hundert Beinen, Spinnen mit acht Beinen und Insekten mit sechs Beinen. Bei den meisten Wirbeltieren finden wir den vierbeinigen Gang, während neben den Vögeln nur wir Menschen dauerhaft auf zwei Beinen gehen.

Es ist gar nicht so einfach, beim zweibeinigen Gehen das Gleichgewicht zu halten. Vierbeinige Tiere können leichter das Gleichgewicht halten und noch einfacher ist es mit sechs Beinen wie bei Insekten. Wie schwer gerade der aufrechte Gang des Menschen ist, kann man auch daran sehen, dass vierbeinige Tiere meistens schon wenige Stunden oder Tage nach der Geburt laufen können, während Menschen ungefähr ein Jahr dazu benötigen. Warum ist gerade das zweibeinige Laufen so schwierig? Wenn man um die Füße eines Tieres eine Linie zieht, erhält man eine Fläche, die von den

Füßen aufgespannt wird. Bei einem Vierbeiner ist diese Fläche relativ groß, bei einem Zweibeiner eher klein. Damit ein Tier stabil stehen kann, muss sich sein Schwerpunkt über dieser Fläche befinden. Bei uns Menschen liegt der Schwerpunkt im Bauchraum. Bewegt man diesen Schwerpunkt aus der von den Füßen aufgespannten Fläche heraus, etwa indem man sich weit nach vorne oder nach hinten beugt, so gerät man in Gefahr, umzukippen. Die Bedeutung des Schwerpunktes lässt sich auch gut zeigen, wenn man eine Flasche immer weiter kippt. Wenn die Flasche so weit gekippt ist, dass der Schwerpunkt nicht mehr über dem Flaschenboden liegt, dann fällt sie um. Da die von den Füßen aufgespannte Fläche bei einem Zweibeiner wesentlich kleiner ist als beim Vierbeiner, ist schon das zweibeinige Stehen viel schwieriger. Beim Gehen ist dann nur noch ein Bein am Boden, während sich der Schwerpunkt des Körpers nach vorne bewegt. Der Geher würde umfallen, wenn er den Fall nicht mit dem vorderen Bein auffangen würde.

DINO-ROBOTER

Manchmal dienen nicht nur heute lebende Tiere als Vorbild für Laufroboter. Aus den USA stammt der Roboter Troody (Foto), der nach dem Vor-

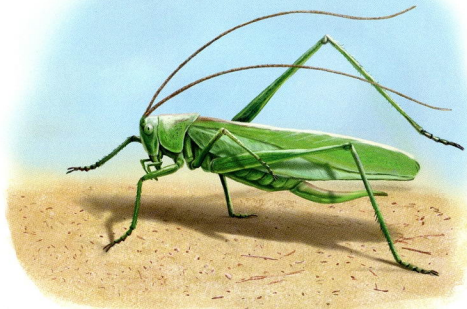


bild des kleinen zweibeinigen Dinosauriers Troodon aus der Kreidezeit gebaut wurde. Einen solchen Laufroboter zu bauen ist ziemlich schwierig, weil niemand weiß, wie sich Dinosaurier genau fortbewegt haben. Troody kann nicht nur geradeaus laufen, sondern auch Hindernisse erkennen und übersteigen.



Beim Tausendfüßler ist das Gewicht sehr gleichmäßig auf die Beine verteilt.





Insekten können stabil laufen, wenn sie jeweils zwei Beine auf einer Seite und eines auf der anderen Seite am Boden halten. Die anderen drei Beine werden vorwärts bewegt.

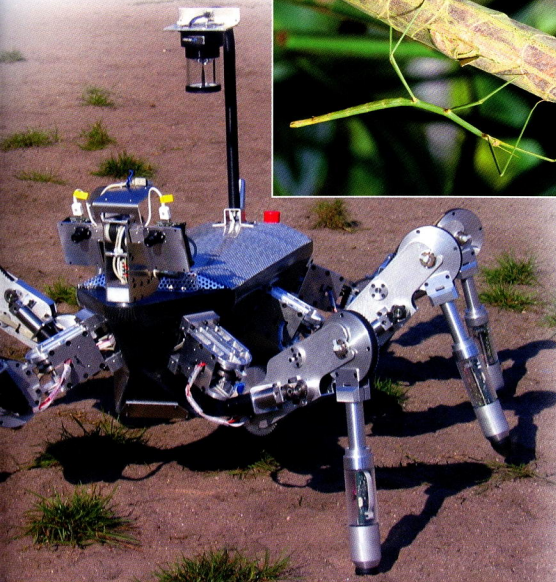
Zweibeiniges Gehen bedeutet also, ständig eine Fallbewegung aufzufangen.

Da das zweibeinige Laufen schwieriger ist als das vier- oder sechsbeinige, haben die meisten Laufroboter vier oder sechs Beine.

Wie laufen Roboter?

Der Gang der Stabheuschrecke (rechts) war Vorbild für die Steuerung des Laufroboters LAURON (unten).

Ein vierbeiniger Roboter kann zwei Beine auf gegenüberliegenden Sei-



ten anheben, ohne umzufallen. Ein Sechsheiner bewegt sich vorwärts, indem er auf einer Seite das erste und dritte Bein anhebt und auf der anderen Seite das mittlere. So bleiben die Roboter während des ganzen Laufvorganges stabil. Beim Laufen auf geraden Flächen muss man sich also keine Gedanken machen, dass der Roboter umkippen könnte. Ein Roboter mit Beinen soll aber nicht nur auf geraden Flächen gehen, denn dort wären Räder günstiger. Der Vorteil des Laufens liegt ja gerade in der Fähigkeit, auf unebenem Gelände vorwärts zu kommen.

Ein Beispiel für einen Roboter, der über Hindernisse klettern kann, ist der sechsbeinige LAURON. Wenn er an ein Hindernis stößt, muss der Roboter seine Laufbewegung an dieses anpassen. Vorbild für die Steuerung der Beinbewegung war die Stabheuschrecke. Die Stabheuschrecke ist ein Insekt, das einem Zweig ähnelt und sich so vor Feinden tarnt. Die Beine des Tieres werden nicht wie bei uns Menschen vom Gehirn gesteuert, sondern die Beine einer Seite teilen einander mit, wo sie sich befinden. Stößt nun das erste Bein auf ein Hindernis, so ertastet es dieses und teilt den nachfolgenden Beinen mit, dass sie nun einen größeren Schritt machen müssen. Die hinteren Beine lernen also von den vorderen.

LAURON bewegt sich auf die gleiche Weise. So läuft die Beinbewegung automatisch ab und der Computer, der LAURON steuert, spart Rechenleistung ein, die er für andere Aufgaben verwenden kann.

Zweibeinige Roboter zum Laufen zu bringen, ist viel schwieriger. Sie müssen ständig ihr Gleichgewicht

kontrollieren. Daher sind sie viel seltener. Meistens bewegen sie sich langsam mit kleinen Schritten, um nicht das Gleichgewicht zu verlieren. Einer der bekanntesten zweibeinigen Roboter ist der japanische ASIMO. Er sieht aus wie ein kleiner Astronaut und kann nicht nur gehen, sondern sogar tanzen und Treppen steigen. Roboter wie ASIMO sollen in Zukunft Begleiter des Menschen werden, die ihn bei einfachen Arbeiten unterstützen.

Schaut man sich einen gehenden

Warum bewegen sich Roboter so eckig?

Roboter an, so fällt auf, dass er sich anders als ein Mensch bewegt. Die Bewegungen sind oft

sehr langsam, manche Roboter bewegen sich eher ruckartig. Vor allem zweibeinige Roboter schwanken



seitlich oft sehr stark. Aber selbst wenn sich ein Roboter gleichmäßig bewegt, eines kann er in der Regel nicht: rennen. Beim schnellen Laufen des Zweibeiners oder beim Trab und Galopp von Vierbeinern sind für kurze Zeit beide Beine in der Luft. Schaut man sich die Beine eines Roboters genauer an, erkennt man, warum ihm das Gehen und Laufen so schwer fällt: Die Beine bestehen aus starren Bauteilen, die durch Gelenke miteinander verbunden sind. Unsere eigenen Beine dagegen besitzen zum einen feste Bestandteile, die Knochen. Daneben gibt es dehnbare Bestandteile, die Muskeln und an deren Ende die Sehnen, die den Muskel mit dem Knochen verbinden. Die Muskeln erzeugen nicht nur die Kraft für eine Bewegung, sie sind auch in der Lage, Energie zu speichern, wenn sie gedehnt werden. Ähnlich wie eine gespannte Bogen-sehne kann der gedehnte Muskel diese Energie bei der Laufbewegung wieder freisetzen. Wir haben sowohl an der Vorder- als auch an der Rück-

Bizeps und Trizeps ergänzen sich gegenseitig. Wird der Arm gestreckt, dann wird der Trizeps verkürzt, während der Bizeps gedehnt ist (linkes Bild). Beugt man den Arm, dann verkürzt sich der Bizeps und der Trizeps auf der Rückseite des Oberarmes wird gedehnt.

KÜNSTLICHE MUSKELN

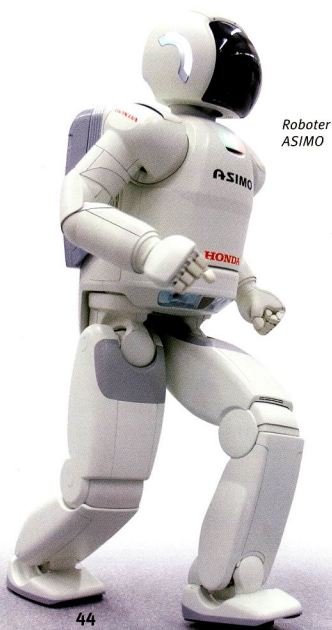
Wenn ein Muskel eine Kraft ausübt, verkürzt er sich. Die Firma Festo hat künstliche Muskeln (Festo-Muskeln) gebaut, die ähnlich funktionieren. Der künstliche Muskel besteht aus einem faserumhüllten



Schlauch.

Pumpt man Luft in diesen Schlauch, so

vergrößert er seinen Durchmesser und zieht sich dabei zusammen. Dadurch kann er ein Gewicht heben. Da er nur mit Luft gefüllt wird, ist ein Festo-Muskel sehr leicht.



Roboter ASIMO

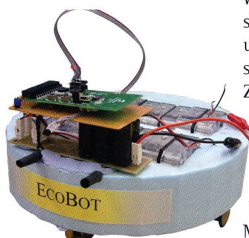
FLIEGEN FRESSEND

Für einen Roboter, der an einem Platz bleiben soll, etwa für einen Industrieroboter am Fließband, ist die Stromversorgung kein Problem. Soll er aber laufen oder ohne menschliche Begleitung unterwegs sein, dann sind die Batterien meistens nach kurzer

Seite unserer Beine Muskeln. Diese ergänzen sich gegenseitig: Wenn sich die Muskeln der Rückseite zusammenziehen, werden die Muskeln der Vorderseite gedehnt und umgekehrt. Durch die Zusammenarbeit von Muskeln wirken die Bewegungen von gehenden oder rennenden Menschen viel fließender als die von Robotern. Wie Muskelpaare sich gegenseitig ergänzen, kannst du auch gut an deinen Armen feststellen. Wenn du deine Arme beugst, zieht sich der Bizepsmuskel zusammen und der Trizepsmuskel auf der Rückseite des Oberarms wird gedehnt. Zum Strecken des Armes muss sich dann der Trizeps zusammenziehen. Einige Forscher versuchen, diese natürliche Bewegung nachzubauen. Sie verwenden in den Beinen oder Armen ihrer Roboter Metallfedern, Seile oder auch künstliche Schläuche, die sich wie echte Muskeln zusammenziehen, wenn man Luft hineinpumpt.

Mit den japanischen Roboterhunden (AIBOs) werden Fußballspiele ausgetragen. Deutschland wurde 2004 und 2005 Weltmeister im Roboterhundfußball.

Zeit leer. Hier wäre ein Roboter ideal, der sich wie ein Tier von seiner Umwelt ernährt. Tatsächlich wurde bereits ein Roboter entwickelt, der Energie aus dem „Verdauen“ von Fliegen gewinnen kann. Die Fliegen werden von dem Roboter Ecobot durch Abwassergeruch angelockt und geraten in eine Falle, in der sie von Bakterien verdaut werden. Aus den verdauten Fliegen gewinnt der Roboter Strom. Er erzeugt aber nur wenig Strom und bewegt sich deshalb sehr langsam. Und sein Gestank ist unerträglich!



Sind Roboter eine Gefahr für Menschen?

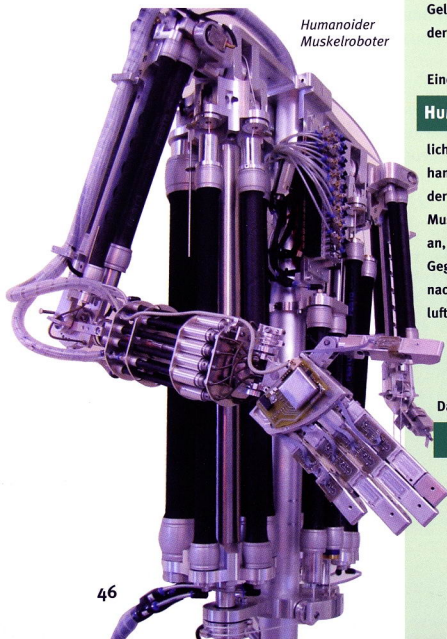
Im Jahr 2005 fand in Japan die Weltausstellung EXPO statt. Auf einer Weltausstellung stellen die einzelnen Länder sich und auch ihre Technologie vor. Auf dieser Ausstellung wimmelte es von menschenähnlichen Robotern. In Japan sind Roboter viel weiter verbreitet als in Europa. Manche sind zum Spielen da, wie der Roboterhund AIBO (Kumpel; japanisch), andere sitzen am Empfang von Ausstellungen oder betreuen sogar alte Menschen im Altersheim. Auf der Expo gab es eine Roboterband, die Jazzmusik spielte. Es gibt viele Menschen, denen diese Entwicklung Sorgen macht. Denn wenn ein Roboter dem Menschen immer ähnlicher wird, kann er ihn auch irgendwann ersetzen? Tatsächlich sind bereits viele Arbeitsplätze in Fabriken durch Industrieroboter ersetzt worden. Andererseits könnten Roboter auch als Helfer in Umgebungen eingesetzt werden, die für Menschen zu gefährlich sind, etwa in Katastrophengebieten.



BIONISCHE ROBOTER

Roboter sehen zwar oft aus wie Menschen oder Tiere, sind aber deshalb nicht unbedingt bionisch. Denn von Bionik kann man nur sprechen, wenn wirklich ein Prinzip aus der Biologie übertragen wurde. Ein Roboter, der mit Kameras sehen und mit Mikrofonen hören oder wie der Hunderoboter AIBO auf vier Beinen laufen kann, sieht ähnlich aus wie ein Lebewesen. Jedoch handelt es sich nur um eine Ähnlichkeit zwischen Natur und Technik, also um eine Analogie. Es gibt aber auch Wissenschaftler, die versuchen, Prinzipien aus der Natur auf Roboter zu übertragen, zum Beispiel: künstliche Muskeln, Sinnesorgane nach natürlichen Vorbildern oder auch die Verarbeitung elektrischer Signale nach dem Vorbild von lebenden Nerven-zellen.

Humanoider Muskelroboter



In Deutschland versuchen einige Wissenschaftler, bionische Roboter zu bauen. In Saarbrücken wurde ein bionischer Roboterarm entwickelt, der wie unsere Arme aus festen und nachgiebigen Teilen, in diesem Fall Metallfedern, besteht. Roboterarme, die in der Industrie eingesetzt werden, besitzen meistens starre, schwere Arme. Der bionische Roboterarm kann dagegen leichter gebaut werden und braucht deshalb weniger Energie. Dank der Federn gibt er bei Berührung nach. So ist für Menschen, die mit dem Roboterarm arbeiten, die Verletzungsgefahr kleiner.

Das Spinnenbein war Vorbild für einen kleinen Greifer, den Forscher aus Ilmenau im Thüringer Wald entwickelt haben. Springspinnen können mit gewaltigen Sprüngen ihre Beute fangen. Die schnelle Sprungbewegung wird aber nicht wie bei Menschen durch Muskeln ausgeführt. Stattdessen pumpen sie Flüssigkeit in ihre Beine, die sich dann schnell strecken. Der Spinnenbein-Greifer der Thüringer Forscher funktioniert ähnlich, nur wird statt Flüssigkeit Pressluft verwendet. Er besteht aus einem Kunststoffschlauch mit unterschiedlich dicken Wänden. Wird Luft hineingepresst, so wirken die dünneren Wandteile als Gelenk. Sie stülpen sich wie Kaugummiblasen aus. Mit der Menge der hineingepressten Luft verändert der Greifer seine Form.



Gelenk nach dem Vorbild des Spinnenbeins

Einen Roboter mit künstlichen Muskeln der Firma Festo hat das Team um

HUMANOIDER MUSKELROBOTER

Rudolf Bannasch und Ivo Boblan an der TU Berlin entwickelt. Der menschenähnliche humanoide Muskelroboter hat zwei Arme mit jeweils einer Fünffingerhand, die mit Pressluft angetrieben werden. Auch die Größe und die Länge der Arme entsprechen einem menschlichen Arm. Beine besitzt der humanoide Muskelroboter nicht. An den Gelenken setzen wie bei uns Menschen Muskeln an, die sich gegenseitig ergänzen. Der eine Muskel beugt das Gelenk, sein Gegenspieler streckt es wieder. Mit den Muskeln lassen sich sowohl weiche, nachgiebige als auch kraftvolle Bewegungen ausführen. Durch die leichten, luftgefüllten Muskeln muss der humanoide Muskelroboter weniger Masse bewegen und benötigt deshalb weniger Energie als Industrieroboter mit ähnlicher Leistung.

Das vier- oder sechsbeinige Laufen in flachem Gelände ist für Roboter nicht sehr schwierig. Anders sieht es aus, wenn der Roboter sich auf unebenem Boden bewegt. Künstliche Kakerlaken, die über Geröllfelder rennen und sich durch Schlamm und hohes Gras wühlen, lassen sich in Boston in den USA beobachten. Der sechsbeinige RHex dreht seine Beine im Kreis. So sehen seine Bewegungen

RHex

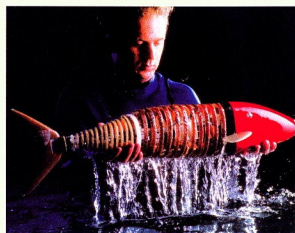


zwar ziemlich hektisch aus, er ist aber auch sehr schnell. Sein ebenfalls insektenartiger Kollege RiSE ist zwar nicht so schnell, klettert aber wie ein riesiger Käfer Bäume hinauf. Aber auch wenn ein Roboter unebenes Gelände gut bewältigen kann, ist es möglich, dass er das Gleichgewicht verliert. Auch so perfekte „Laufmaschinen“ wie wir Menschen geraten manchmal ins Stolpern, etwa wenn wir auf eine Wurzel treten. Wir können aber

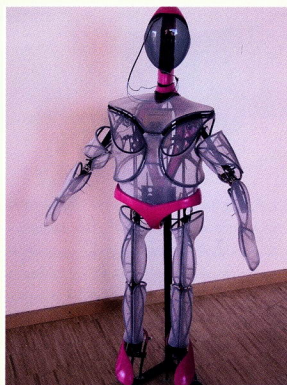
dank unserer Reaktionsfähigkeit das Fallen meistens verhindern. Einer der in Boston entwickelten Roboter, „Big Dog“ genannt, kann selbst heftige seitliche Stöße auffangen, ohne zu fallen. Er macht dann einen weiten Ausfallschritt und kommt wieder zum Stehen.



Der künstliche Fisch Airacuda der Firma Festo kommt seinem natürlichen Vorbild sehr nahe. Er bewegt sich durch einen Flossenantrieb mithilfe künstlicher Muskeln vorwärts.



Der Fischroboter RoboPike ahmt die Schwimmbewegungen eines Fisches nach.



Der Roboter Lara bewegt sich mit künstlichen Muskeln aus Drähten, die sich zusammenziehen, wenn Strom hindurchfließt.



Der Roboter Spinybot II hat kletternde Insekten und Spinnen zum Vorbild. An seinen Füßen sind winzige Metallstifte, die ihm das Klettern ermöglichen.



Der Roboter Black Spider (schwarze Spinne; englisch) bewegt sich mit seinen acht Beinen wie eine Spinne. Spinnen pumpen Flüssigkeit in ihre Beine, um sie zu strecken. Black Spider verwendet Druckluft – wie der Spinnenbein-Greifer.



Die „Eiserne Hand“ des Ritters Götz von Berlichingen

Es kommt immer wieder vor, dass Menschen bei einem Unfall oder im Krieg eine Hand verlieren. Früher hat man nur einfache Ersatzhände aus Holz oder Metall auf den Armstumpf gesetzt. Komplizierter war da schon die berühmte „Eiserne Hand“ des Ritters Götz von Berlichingen. Er hatte 1504 im Krieg eine Hand verloren und ließ sich eine eiserne Hand anfertigen, an der sich die Stellung der Fingerglieder einstellen ließ. Damit konnte er ein Schwert fassen und angeblich sogar kämpfen. Bis ins 20. Jahrhundert musste die Stellung der Kunsthand mit der gesunden Hand eingestellt werden. 1916 baute der berühmte Arzt Ferdinand Sauerbruch eine Ersatzhand, die von dem geschädigten Arm aus gesteuert werden konnte. Er verband den Bizepsmuskel im Oberarm mit der Hand. Spannte man den Bizeps an, so konnte die Hand zugreifen. Mehr als einfaches Zupacken war damit aber nicht möglich. Eine Schwierigkeit beim Bau einer Kunsthand liegt auch darin, dass die Gegenstände in unserer Umgebung ganz unterschiedliche Formen haben, an die sich die Hand anpassen muss. Am besten nimmt man deshalb für die Finger ein weiches Material, das sich an den Gegenstand anschmiegen kann. Im Forschungszentrum Karlsruhe wurde nun eine bioni-



Die Karlsruher Hand wird an einem Patienten getestet.

sche Hand entwickelt, die über Luft oder eine Flüssigkeit gesteuert werden kann. Bei der menschlichen Hand kommt die Kraft in der Hand hauptsächlich aus dem Unterarm. Bei der bionischen Hand kommt ebenfalls die Kraft aus dem Unter-

arm, von dort wird Öl in die einzelnen Finger gedrückt. An den Fingergelenken befinden sich kleine Kissen. Wird Öl in die Kissen gepumpt, so streckt sich der Finger. Da die Hand keine schweren Elektromotoren besitzt, ist sie sehr leicht.

An der gesunden Hand werden die Bewegungen über Gehirn und das entlang der Wirbelsäule verlaufende Rückenmark gesteuert. Nerven enden in der Muskulatur und steuern die Handbewegung. Bei der Karlsruher Hand erfasst ein Computer die Bewegung der Muskulatur im Armstumpf, die normalerweise die Finger steuern würde. Anhand dieser Muskelbewegungen kann der Computer berechnen, welche Handbewegung der Träger der Kunsthand gerade ausführen möchte. Eines kann die Hand noch nicht – fühlen. Auch dieses Problem möchten die Wissenschaftler in Zukunft lösen.

Am Patienten ist die Hand dann mit einer hautfarbenen Hülle überzogen.



Index

AIBO 45

Alracuda 47
 Allen, Bryan 19
 Analogie 7, 8
 Anfouling 16
 ASIMO 44
 Auftrieb 20
 Auge 39

Baker-Galeone 6

Baker Matthew 6
 Barnasch, Rudolf 46
 Baum 26
 Berblinger, Albrecht
 Ludwig 17
 Bernoulli, Daniel 18
 Bernoulli-Effekt
 18, 25
 Bionic Car 38
 bionische Hand 48
 Black Spider 47
 Boblan, Ivo 46

CAO 30, 31

Carbonrad 35
 Chamäleon 6
 Chitin 33, 34

Daedalus 21

da Vinci, Leonardo 6, 7
 deLaurier, James 23
 Delfin 38
 de Mestral, George 5

Ecobot 22

Evolution 6

Fischroboter 47

Fledermaus 40, 41
 Flügelprofil 19
 Francé, Raoul 4

Gacko 15, 16

Gleichgewicht 42
 Gossamer
 Albatross 19

Hai 36–38

Haihaut 37
 Hertel-Flugzeug 37
 Hertel, Heinrich 37
 Holz 34
 Honiglötfel 14
 Hubel, Tatjana 22
 Hubschrauber 7
 Hummelfalter
 Muskelroboter 46

Igor 22

Ikarus 21

Kannenpflanze 11

Karlsruher Hand 48
 Katzenpflanze
 reifen 5
 Kelly, Michael 4
 KISMET 41
 Klette 5
 Klettverschluss 5
 Knochen 28
 Kofferrisch 38



Lara 47

Lauroboter 43
 LAURON 43
 Lilienthal, Otto 18, 19
 Lotusan® 13, 14
 Lotus-Effekt® 13, 14
 Lotuspflanze 10–14

Miesmuschel 14

Mohn 4
 Morphofalter 10, 11
 Muskeln 44, 45

Nautilus 32

Neinhuis,
 Christoph 12, 13
 Netzhaub 39, 40

Oberflächen- spannung 14

Ornithopter 23

Patent 4

Perlboot 32
 Perlmutter 33
 Pinguin 20, 38
 Prof. Barthlott,
 Wilhelm 11–13
 Prof. Mattheck,
 Claus 28
 Prof. Rechenberg,
 Ingo 13
 Prototyp 9

Randwirbel 22, 23

RHex 46, 47
 RISE 47
 RoboPike 47

Salzstreu 4

Sandfisch 33
 Sauerbruch,
 Ferdinand 48
 Schlaufenspropeller 22
 Schneckenklee 7
 Schneider von Ulm 17
 Seepecken 16
 Selbstreinigung
 10–14, 24
 Selbstreparatur 35
 Sir Cayley, George
 17, 18
 SKO 30, 31
 Spannungen 27
 Spindelform 38
 Spinnenbein-
 Greifer 46
 Spinnenroboter 47

Spinybot II 47

Stabheuschrecke 43
 Stacheldraht 4
 Steele, Jack 7
 Strömungswiderstand
 36
 Synästheten 40

T 002 42

Technische Biologie 9

Ultraschall 40, 41

Verbundmaterial

33, 34
 von Berlichingen,
 Götz 48

W 002 42

Wirtbaum 18
 Windbäume 27
 Winglets 22, 23

Zanon-Gleiter 25