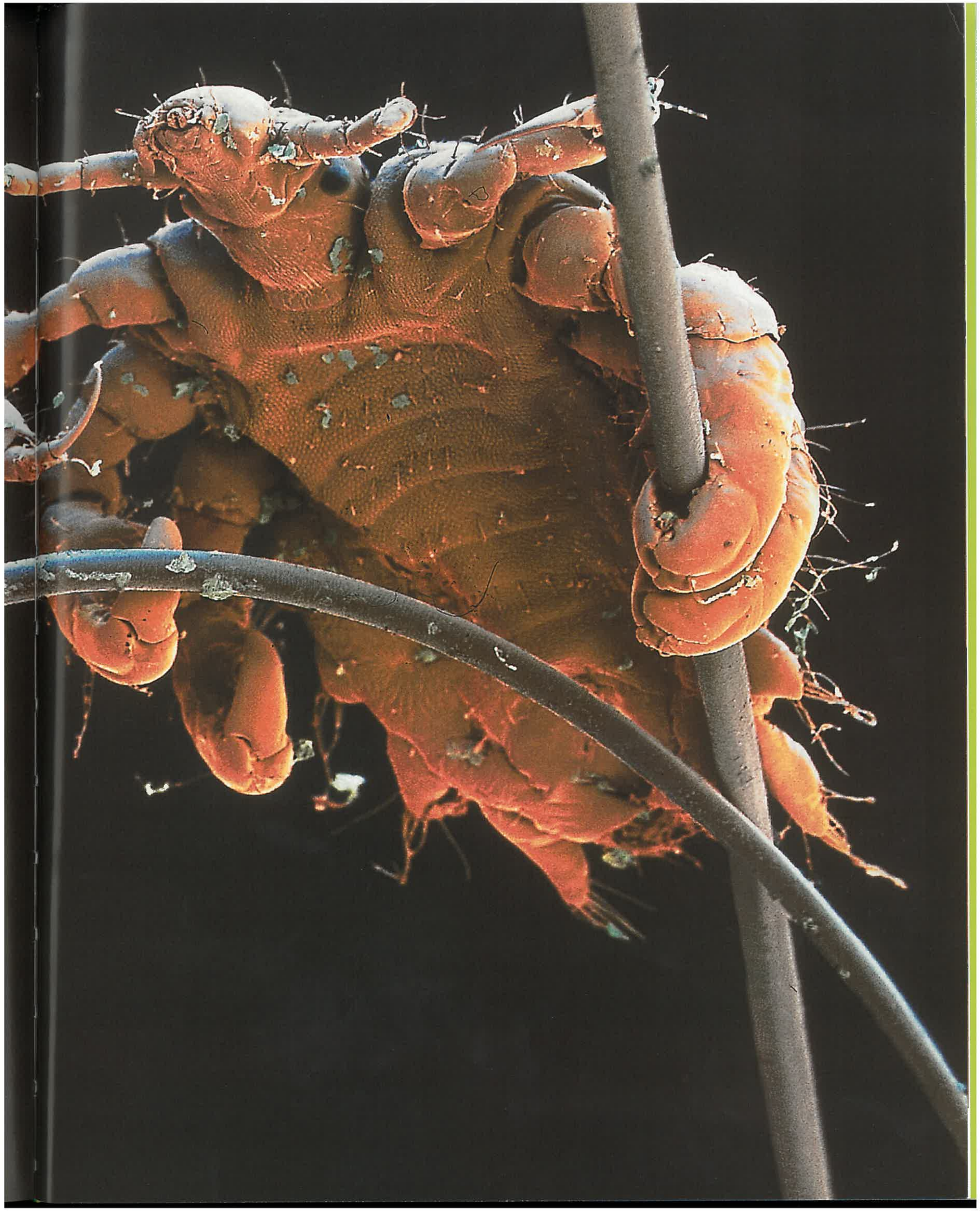
Die Natur ist der radikalste Nanotechniker. Es erscheint daher notwendig, die perfekten Arbeitsweisen und Fertigungsmethoden lebender Systeme kennen und verstehen zu lernen. In der Mikrotechnik gibt es inzwischen Zahnräder mit einem Durchmesser, der kleiner ist als der eines menschlichen Haares. Aber die Ideenschmiede der Natur scheint unerschöpflich. Die winzigsten Saugpumpen, von denen 50 auf einen Millimeter gehen, Kugelgelenke, so fein wie eine Nadelspitze – die biologische Evolution hat sie hervorgebracht. Mit der Mikrobionik bekommen wir jetzt ein Werkzeug an die Hand, die Fülle der Konstruktionen in der Natur mit eigenständigen Entwicklungen nachzuahmen.

Winzig klein und doch ganz groß

Geniestreiche der Schöpfung im Mikrobereich



Zu den Bildern auf Seite 212/213: Kopfläuse und Filzläuse leben im Haarwald, auch des Menschen. An den schwankenden Untergrund, der in der starken Vergrößerung an Schilfstengel erinnert, sind sie perfekt angepaßt. Mit den Endgliedern und den Klauen ihrer Beine umklammern sie die Haare wie mit Steigeisen und hangeln sich daran entlang. Das ist nur ein Beispiel aus der Funktionsmannigfaltigkeit der »natürlichen Lupenwelt«. Mundwerkzeuge von Kriebelmücken und Hinterleibszangen von Ohrwürmern erinnern an technische Werkzeuge.

Die technische Entwicklung geht heute immer mehr in Richtung auf kleine und kleinste Konstruktionen. Miniaturisierung heißt das Schlagwort, von dem man manchmal das Gefühl hat, daß es ein wenig als Allheilmittel mißbraucht wird. Wenn die Entwickler gefragt werden, was man denn mit diesen kleinen und kleinsten Dingen anfangen kann, lautet die stereotype Antwort: »Das wird sich dann schon zeigen. Hauptsache, wir können einmal in kleinen Dimensionen bauen. Anwendungen finden sich dann schon.« Das mag blauäugig klingen. Aber die Entwickler haben die technische Tradition auf ihrer Seite. So war es immer. Als sich Marconi mit »Ätherwellen« befaßt hatte, war das eine hübsche physikalische Spielerei. Heute sehen wir damit fern und telefonieren über Satelliten. Die Anwendung hat sich prompt gefunden. Als in den frühen 60er Jahren in den Bell-Entwicklungslaboratorien in Amerika an so skurrilen Dingen herumexperimentiert worden ist, wie sich beispielsweise Elektronen durch »verschmutzte« Halbleiter quälen, konnte niemand ahnen, daß daraus der Transistor, die gedruckten Schaltungen und die miniaturisierten Chips entstehen, wie wir sie heute kennen. Und daß sich daraus Dinge entwickeln werden, die wir uns heute noch kaum vorstellen können, bis hin zu zigarrenpackungsgroßen Netzwerken mit größerer Schaltungskapazität, als sie das menschliche Gehirn aufweist.

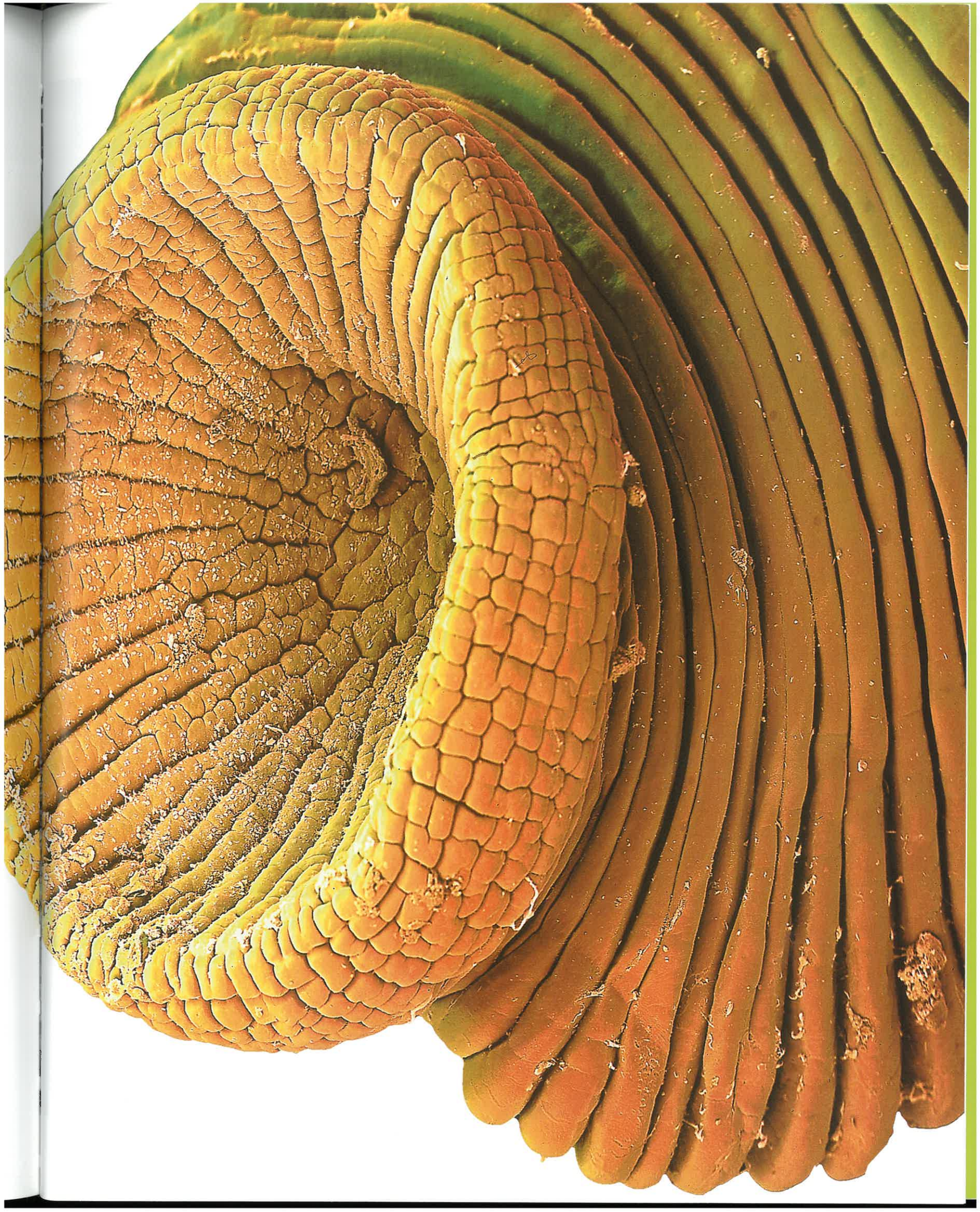
Mechanische Meisterleistungen bilden die langgestreckten Wirbelreihen insbesondere bei Fischen und Schlangen. Ihre Berührungs-, Gleit- und Anschlagflächen sind harmonisch so aufeinander abgepaßt, daß einerseits Bewegung möglich ist, andererseits das Gesamtsystem statisch bestimmt bleibt. Es gibt auch extrem verformbare Gebilde, wie etwa die Saugnäpfe von Blutegeln (rechts).

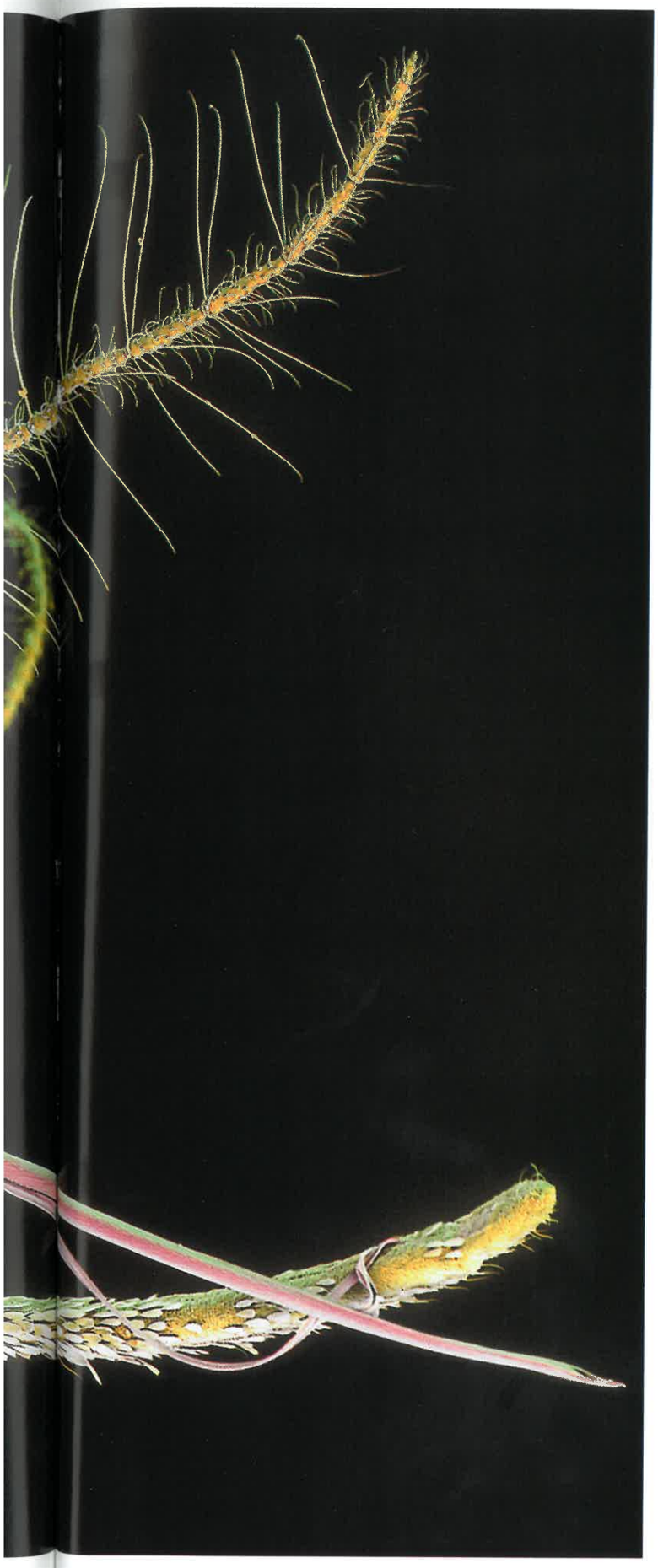
Mechanisches Design im Mikrobereich

Wie dem auch sei: Heute arbeiten bereits Großforschungseinrichtungen an der Mikrominiaturisierung im mechanischen Bereich. Die Mikromechanik führt beispielsweise zu Zahnrädern mit Durchmessern kleiner als der eines menschlichen Haares. Das sind punktgroße Gebilde, von denen hundert auf einen Kubikmillimeter gehen, und so fort. Dabei wird allerdings gerne vergessen, daß man nicht beliebig linear verkleinern kann.

Wenn man eine Anhängerkupplung von vielleicht 60 cm Größe, die nach dem Haken-Öse-Prinzip arbeitet, auf 10 cm verkleinert, funktioniert sie noch immer. Bei 10 mm schon nicht mehr so gut, bei 0,1 mm überhaupt nicht mehr: Reibungs- und Adhäsionskräfte spielen neben anderen immer eine dominierende Rolle, während der Kraftschluß nicht mehr notwendigerweise auf Druckkräfte zurückgeführt werden muß.

Im Bereich der Natur ergibt sich schon beim ersten Hinschauen, daß Mikromechanik eher die Regel ist als die Ausnahme. Flügelkopplungsmechanismen etwa bei fliegenden Wanzen sind 1/10 mm groß, Speichelpumpen auch; und sie haben all das, was solche Mechanismen brau-





chen, wenn auch in »höchstintegrierter«, materialtechnisch raffinierter und unkonventionell-vielfältiger Ausfertigung.

Wenn man also technische Mikrominiaturisierung im mechanischen Bereich anstrebt, lohnt sich der Blick auf die Natur allemal. Seit es das Rasterelektronenmikroskop gibt, hat man eine große Zahl funktionell hochinteressanter Mechanismen entdeckt oder zumindest mit neuen Augen gesehen. Wenn wir sie nun mit technischen Werkzeugen oder Geräten vergleichen, so denken wir nicht immer an die direkte Übertragung, sondern wollen zunächst einmal nur den Blick öffnen für Analogien im technisch-biologischen Bereich. Wir kommen in einem der folgenden Kapitel über den Lotus-Effekt auf die Bedeutung der Analogieforschung zurück. Dazu Beispiele, die auf den nächsten Seiten illustriert sind.

Eine kleine Reise durch die Welt der Mikrostrukturen

Halten: Flügelklemmung und Besenhalter

Bei Landwanzen werden Vorder- und Hinterflügel im Flug zusammengekoppelt, nach der Landung aber gelöst. Diese Doppelfunktion wird durch ein besonders raffiniertes Koppelstück an der Hinterkante der Vorderflügel bewerkstelligt: Gleitkopf und Gleitkamm. Hier hinein wird der langgestreckt-hakenförmig umgebogene Vorderrand der Hinterflügel gedrückt. Gerichtete Schuppen verhindern ein Herausrutschen, gebogene kräftige Haare halten den Hinterflügel ortsfest. In ähnlicher Weise fassen die beiden sternförmig genoppten Gummiteile eines technischen Klemmhalters den hineingedrückten Besenstiel fest, lassen ihn aber nach kurzem, heftigem Zug wieder frei.

Tragen: Insektenflügel und Wellpappe

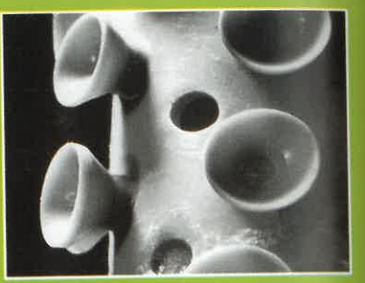
»Tragen« bedeutet zunächst einmal »sich selbst tragen« und dann gewöhnlich noch »Zusatz-

Viele Insekten sind geradezu Schatzkammern an mechanischen Einrichtungen. Bevor man sie auf mögliche Übertragungen in eine Mikrotechnik abklopfen kann, muß man sie allerdings erst einmal erkannt und »technisch« beschrieben haben. An dieser Stechmücke wären bereits eine ganze Reihe von Mechanismen zu studieren: die Feinstruktur der Antennen als »Molekülfilter«. Die Antenneneinlagerung in Form von »Fast-Kugelgelenken«. Die Gegeneinanderführung der Einzelteile im Stechapparat des Rüssels. Die Rüsselverstauung in der Rüsselscheide. Scharniergelenke an den Beingliedern. Und vielerlei mehr. Dazu kommen sensorische Gesichtspunkte.

Flügelkoppelung bei Landwanzen und Besenklemme
Bei zahlreichen fliegenden Insekten werden die Vorder- und Hinterflügel durch Koppelungsmechanismen zusammengehalten. Die Besenklemme umfaßt in ähnlicher Weise den Rundstiel des Besens.

Flügelverspannung bei einer kleinen Libelle und technische Wellpappe
Insektenflügel sind häufig so aufgebaut, daß eine sehr dünne Spreite zwischen tragenden Adern zickzackförmig auf und ab verspannt ist. Damit gewinnen die Flügel Steifigkeit. In ähnlicher Weise funktioniert Wellpappe.

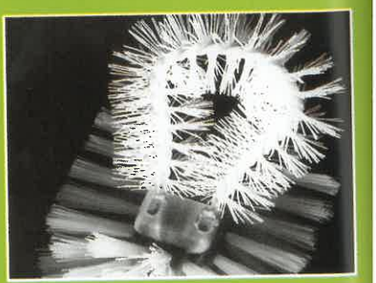
Saugnäpfe des Gelbbrandkäfers und Saugnapf-Seifenhalter
Das Männchen des Gelbbrandkäfers besitzt an seinen Vorderbeinen Saugnäpfe. Endsprechende technische Saugnäpfe finden sich beispielsweise an Badezimmermatten und Seifenhaltern.

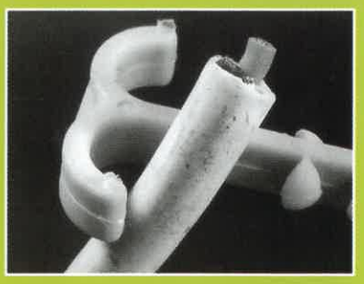


Eingeklapptes Fußstück beim Stutzkäfer und Taschenmesser
Stutzkäfer leben in zerfallenen biologischen Stoffen. Bei den Beinen wird das Schienenglied in das Schenkelstück eingeklappt und das Fußteil wiederum in die Schiene. Bei den technischen Vielzweck-Taschenmessern wird dieses Verstau-Prinzip vielfältig benutzt.

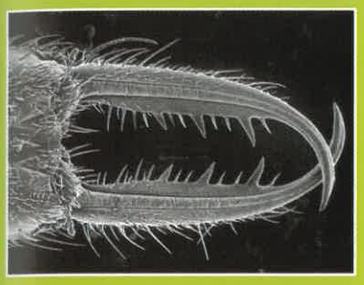
Holzbohrer der Riesenholzwespe und Bohrraspel
Die Riesenholzwespe bohrt sich zur Eiablage mit einem stecknadeldünnen, dreiteiligen Legebohrer 1 bis 1,5 cm tief ins Holz ein. Analoge technische Bohrwerkzeuge für den Heimwerker sind als Bohrraspeln bekannt.

Fühlerputzapparat des Handkäfers und Klobürste
Der Handkäfer besitzt einen Fühlerputzapparat an seinem Vorderbein in Gestalt einer »Rundbürste«. Auch in der Technik gibt es Spezialbürsten zur Reinigung von Ringnuten.

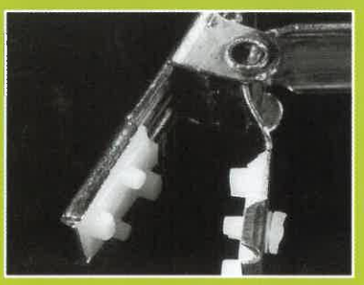




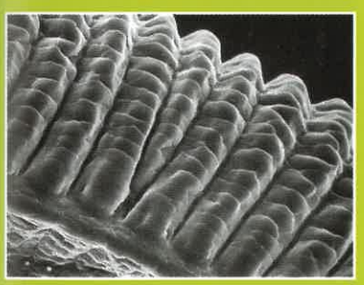
Klammerklaue des Hundeflohs und Spezialdübel zur Kabelverankerung
Beim Hundefloh enden die Beine in rückgebogenen Hafthaken, deren Wölbung sich dem Durchmesser eines Hundehaares anpaßt. Ähnlich angepaßt sind bestimmte Untergreifdübel für Elektroleitungen.



Oberkiefer des Ameisenlöwen und Kombizange
Die Oberkiefer des Ameisenlöwen sind Vielzweckgeräte, die als Sandwurfschaufel, Festklemmeinrichtung, Anstechapparat und Saugvorrichtung dienen. In ähnlicher Weise ist eine Kombizange für mehrere Funktionen geeignet.



Greifzange bei der Zikadenwespe und Hosenträger-Clip
Die Weibchen der Zickadenwespen tragen an den Vorderbeinen ein pinzettenartiges Greiforgan. Damit klemmen sie sich an ein Wirtstier an. Ganz analog klemmt sich ein Hosenträger-Clip in den Hosenbund.

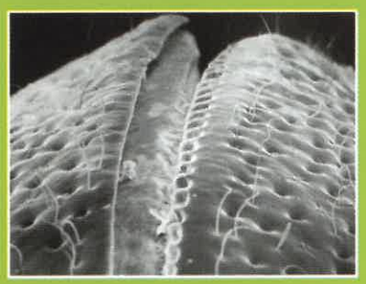


Biegeader am Sandlaufkäfer-Flügel und Biegesäule einer Taschenlampe
Der Sandlaufkäfer besitzt im Hinterflügel Biegeadern. Sie können spalt-, knick- und beulungsfrei verbogen werden und entsprechen so Metall-Duschschläuchen oder Trägern für Taschenlampen.

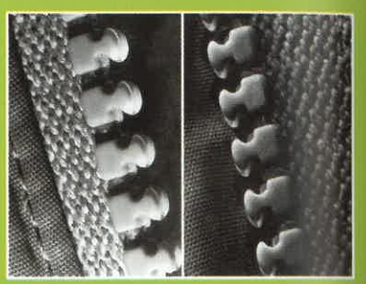
Adernverbindung bei einem Kleinlibellen-Flügel und technische Klebung
Sich »überkreuzende« Adern am Insektenflügel sehen so aus, als ob sie verklebt wären. Bei Holzverleimungen bilden sich ähnliche Formen.

Druckknopfsystem beim Rückenschwimmer und technischer Druckknopf
Der Rückenschwimmer besitzt eine wohlausgebildete Druckknopfeinrichtung zum Ankoppeln der harten Vorderflügel an den Rumpf. Funktionell entsprechen sie den Druckknöpfen der Bekleidungsindustrie.

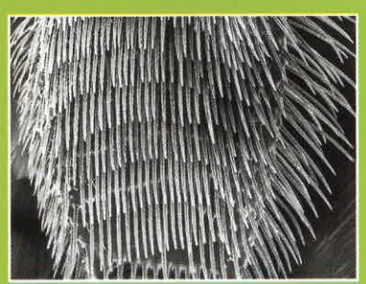
Saugrüssel bei der Schmeißfliege und Tupfer »Wattestäbchen«
Die Schmeißfliege besitzt einen Tupfrüssel. Das Prinzip der Oberflächenverbreiterung ist im technischen Bereich bei Wattestäbchen verwirklicht.



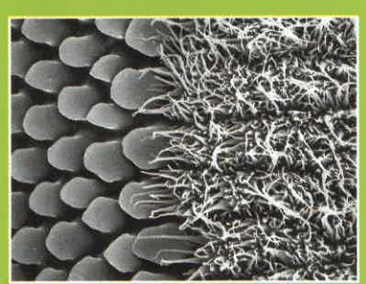
Reißverschlußsystem beim Zwergrückenschwimmer und technischer Reißverschluß
Mit Hilfe einer Art Reißverschlußsystem, nämlich nacheinander einrastender Nuten und Noppen, werden beim Zwergrückenschwimmer die Flügeldecken gegeneinander fixiert. Die chitinösen Strukturen werden beim Einrasten eines einzelnen Zackens ein wenig gedehnt und schließen sich dann wieder.



Großaufnahme des Reißverschlußsystems
Technische Reißverschlüsse werden neuerdings aus Preis- und Fertigungsgründen gerne aus Kunstsoff geformt. Auf das Naturprinzip dieses Systems wurde bereits im vorhergehenden Beispiel eingegangen.

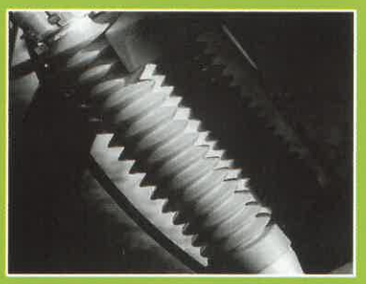


Pollenbürste bei der Honigbiene und Kunststoffbürste
Die Honigbiene besitzt an der Innenseite des sogenannten Fersenglieds eine Pollenbürste. Bei manchen Kunstsoffbürsten enden die parallel schräg verlaufenden Kunststoffstrahlen in kleinen Knöpfchen.



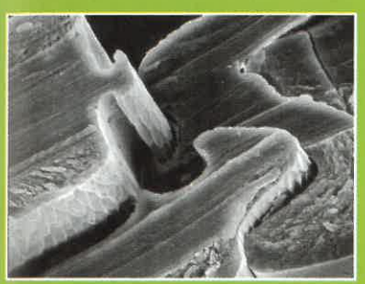
Statistische Verhakung am Koppelungssystem des Rückenschwimmers und technischer Klettverschluß
In eine feine, chitinöse »Wolle« des einen Teils greifen feinste Widerhakenschichten des anderen Teils ein. Dies reicht entsprechend den technischen Klettverschlüssen für eine solide Verbindung.

Flügelkoppelung bei der Honigbiene und Vorhangschiene
Viele vierflügelige Insekten koppeln Hinter- und Vorderflügel über ein Haken-Ösen-System aneinander. Dabei ist auch ein Hin- und Herschieben möglich. In ähnlicher Weise laufen die den Vorhang tragenden Röllchen in den U-förmigen Schienen technischer Vorhangstangen.

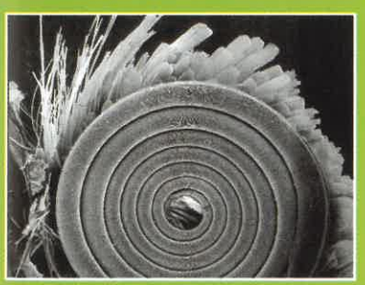


Stoßdämpfer am Fliegenrüssel und an einer Motorradgabel
Die Schnabelschwebfliege besitzt an der Rüsselbasis ein stoßdämpferartiges Gebilde, das möglicherweise die Erschütterungen beim kräftigen Aufsetzen abdämpft. Technische Stoßdämpfer finden sich beispielsweise als Federbeine bei Motorrädern.

Gleitführungen beim Legebohrer einer Schlupfwespe und Parallelführungen bei einem Rechenschieber
Der Legebohrer besteht aus mehreren Teilen, die gegeneinander arbeiten können. Die Teile verzahnen sich gegeneinander mit Nut- und Federverbindungen. Genau dies ist das Prinzip der Parallelführung von Rechenschiebern.



Schwalbenschwanzführung bei der Legeröhre von Heuschrecken und technische Schwalbenschwanzeinrichtung
Ein Legebohrer besteht aus 3 Paaren von Anhängen des 8. und 9. Hinterleibsegments, die mit sehr »sorgfältig gefertigt« erscheinenden Schwalbenschwanzführungen ineinandergleiten. Präzise laufende Schwalbenschwanzführungen werden in der Technik häufig benötigt.

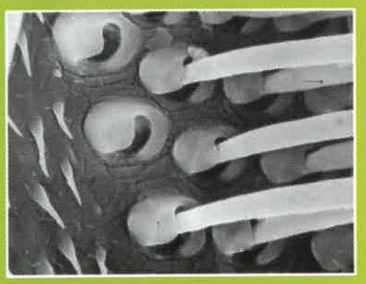


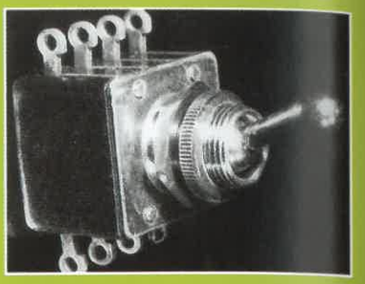
Rüssel des Zitronenfalters und »Jahrmarktstute«
Die meisten Schmetterlinge besitzen einen ausrollbaren Saugrüssel. Nach Aufhören der Muskelkontraktion rollt er sich aufgrund seiner Eigenelastizität von selbst wieder spiralförmig ein. Die spiralartig eingerollte Jahrmarktstute wird durch Hineinblasen aufgerollt.

Kugelgelenkiger Fühleransatz beim Bienenwolf und Foto-Kugelgelenk
Insektenfühler müssen in alle Richtungen bewegt werden können. Diesem Zweck dient eine kugelige Einlenkung des basalen Fühlerglieds. Gleiches gilt für Foto-Kugelgelenke.

Antirutschsystem bei einer Pflanzenwespe und »Einwegbürste«
Die »Stichsägen« der Pflanzenwespe tragen seitlich Gleitschuppen, die die Bewegung in die Strichrichtung nicht behindern, dagegen ein Herausziehen beim Einarbeiten verhindern. Manche Kleiderbürsten tragen eine ähnliche Anordnung kurzer Bürsten.

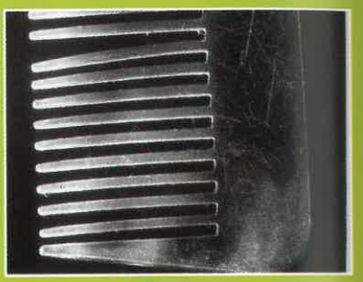
Haar-Einlenkungen bei der Ruderwanze und Kippschalter
Die Schwimmhaare der Ruderwanzen schnappen je nach der Richtung des Wasserdrucks über eine instabile Zwischenstellung (Engstelle) in die eine oder andere Stellung um. Damit entspricht diese Einlagerung ganz exakt technischen Kippschaltern.





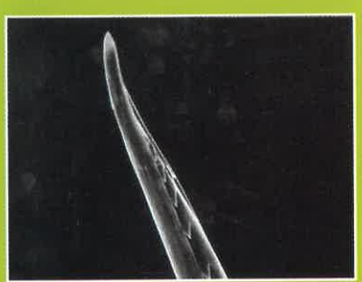
Nochmals Legebohrer und Bohrraspel
Auf gleiche Vergrößerung gebracht überzeugt das Naturgebilde durch seine hochfeine Ausführung. Das technische Bildungsprodukt begnügt sich mit einer Grobspirale.

Pollenkamm bei der Honigbiene und Haarkamm
Nach dem Abflug von einer Blüte kämmt die Biene jeweils mit dem Pollenkamm eines Beins den Blütenstaub aus der Bürste des anderen Beins aus und drückt ihn in das »Körbchen« auf der Schienenaußenseite. Der technische Kamm kämmt Schmutzpartikel aus.



Stichsäge bei Blattwespen und technische Taschenmesser-Säge
Die Hinterleibsanhänge der Blattwespen zeichnen sich durch sägeblattartige Auswölbungen aus, mit denen sie sich beim Gegeneinanderarbeiten der einzelnen Teile rasch in Pflanzenmaterial einsägen. Es gibt auch Mehrfachzahnungen, ganz analog den Klappsägen bei modernen Vielzweck-Taschenmessern.

Giftstachel der Honigbiene und Injektionskanüle
Der Giftstachel, bestehend aus dunkelgefärbtem, sehr hartem Chitin, ist außerordentlich dünn und langgestreckt, schmalkonisch. Am Ende trägt er eine seitliche Mündung. Technische Injektionskanülen erreichen auch in feinster Ausführung nicht die Zartheit und Stabilität des biologischen Gegenstücks.



Hinterleibsende des Buchdrucker-Käfers und Klappspaten
Die Borkenkäfer leben in selbstgegrabenen Gängen unter der Baumrinde. Mit spatenartigen Flügelabstürzen drücken sie beim Rückwärtskriechen baggerartig das Bohrmehl aus den Öffnungen.

lasten abfangen«. Insektenflügel tragen sich nicht nur selbst, sondern sind in der Lage, beträchtliche Flächendrücke (Luftkräfte, die auf die Spreite wirken) abzufangen, ohne sich über die Maßen zu verbiegen und ohne zu knicken.

Insektenflügel gewinnen Steifigkeit – das heißt Stabilität gegen Durchbiegung aufgrund der beträchtlichen aerodynamischen Flächendrücke – nach dem Wellblech- oder Faltwerkprinzip. Die Falten laufen im allgemeinen etwa längsgerichtet, so daß gerade die Längsrichtung gegen Durchbiegung gefeit ist. In ähnlicher Weise funktioniert Wellpappe. Auch sie hat eine Vorzugsrichtung größter Biegesteifigkeit. Solche Konstruktionen helfen, Material zu sparen und damit auch Baukosten zu senken und Bauzeiten zu verkürzen.

Verbinden: Saugnäpfe und Seifenhalter

Elemente so zusammenzukoppeln, daß sie sich je nach Bedarf feststellen, verschieben oder ganz lösen können, das ist eine außerordentlich wichtige Problematik in Natur und Technik. Bei den konstruktiven Ausführungen ist die Struktur stets fein auf die Detailfunktion abgestimmt. Ansaugen, Verhaken und Tausende andere Mechanismen sind verwirklicht.

Das Männchen des Gelbrandkäfers (*Dytiscus marginalis*) besitzt an den Vorderbeinen gestielte Saugnäpfe. Beim Aufsetzen verbreitern sich die fein-chitinösen, halbkugeligen Kappen an ihren zarten Rändern, und beim Zurückziehen schaffen sie wegen der spaltfreien Randlagerung einen Unterdruck und haften somit. Seifenhalter können beidseitig gestielte Saugnäpfe tragen, die analog wirken und dadurch die glatte Seife festhalten können.

Bewegen: Beineinklappen und Taschenmesser

Bewegen bedeutet, Konstruktionsteile gegeneinander verkipp-, verdreh- und verschiebbar zu machen, ohne daß sich dabei die Verbindung lösen darf. Hierfür gibt es auch viele biologische Beispiele, zum Beispiel Gleitführungen, Parallelführungen, Schwalbenschwanzführungen sowie die hier genannten Klappmechanismen.

Stutzkäfer (*Histeridae*) leben meist in zerfallenden biologischen Stoffen. Zum Einarbeiten in das oft zähe Substrat besitzen sie kräftige »Beinschaufeln«. Diese können auch zusammengelegt werden. Hierbei wird das Schienenglied in das Schenkelstück eingeklappt, und das fünfgliedrige Fußteil wiederum wird in einer Nut der Schiene verstaut. Dabei wirkt der Schenkel wie die äußere Hülle eines Taschenmessers, aus dem nach Bedarf Einzelteile hochgeklappt werden können.

Eindringen: Legebohrer und Bohrraspel

Werkzeuge zum Bohren, Stoßen und Stechen gibt es nicht nur in der Technik, zum Beispiel in der klassischen Waffentechnik, sondern in vielfältiger Ausbildung auch in der Biologie. Für das Eindringen sind injektionsnadelähnliche Mechanismen oder Miniaturbohrer und -sägen entwickelt worden.

Die Riesenholzwespe (*Urocerus gigas*) entwickelt sich als Larve in Nadelholz. Die Weibchen bohren sich zur Eiablage mit einem stecknadeldünnen dreiteiligen Legebohrer ins Holz ein. An dessen Stechborstenrinne werden zwei sägeartig rauhe Stechborsten über Nut und Feder geführt. Der Legebohrer trägt Einrichtungen zum Eindrehen, zur Gangerweiterung und zur Verankerung. Entsprechendes gibt es für das Eindringen. Analoge technische Werkzeuge sind als Bohrraspeln bekannt.

Aufnehmen: Fühlerbürste und Rundbürste

Das Ergreifen und Aufnehmen von Material, sei es flüssig oder pulverförmig, bedarf speziell ausgeformter tupfer-, schaufel- oder bürstenartiger Werkzeuge. Bisweilen reicht dazu die kapillare Haftung zwischen dem Aufnehmer und der aufzunehmenden Substanz. Oft spielen Adhäsion,

Die Großaufnahme der seitlichen Widerhaken einer Zecke im Rasterelektronenmikroskop läßt feine Partikelchen erkennen, hier farblich abgehoben. Das sind Bakterien. Die von Zecken übertragene Krankheit Borreliose wird von Bakterien ausgelöst.

also Anziehungskräfte, oder leichte Klebung dabei eine Rolle.

Der Handkäfer (*Dyschirius*) besitzt an seinen Vorderbeinen einen Fühlerputzapparat in Gestalt einer »Rundbürste« aus radiär gegeneinander stehenden, abgeplatteten Borsten, deren Enddurchmesser genau auf den mittleren Durchmesser des Fühlers abgestimmt ist. Mit einer ähnlichen Rundbürste reinigt die Honigbiene ihren Fühler. Sie benutzt dieses Gerät besonders häufig, wenn sie leicht klebrige Pollen einträgt. Auch in der Technik gibt es Spezialbürsten zur Reinigung von Längsführungen, Rundzylindern oder – wie bei der Klosettbürste – Ringnuten.

Was bringt ein solcher Formenvergleich?

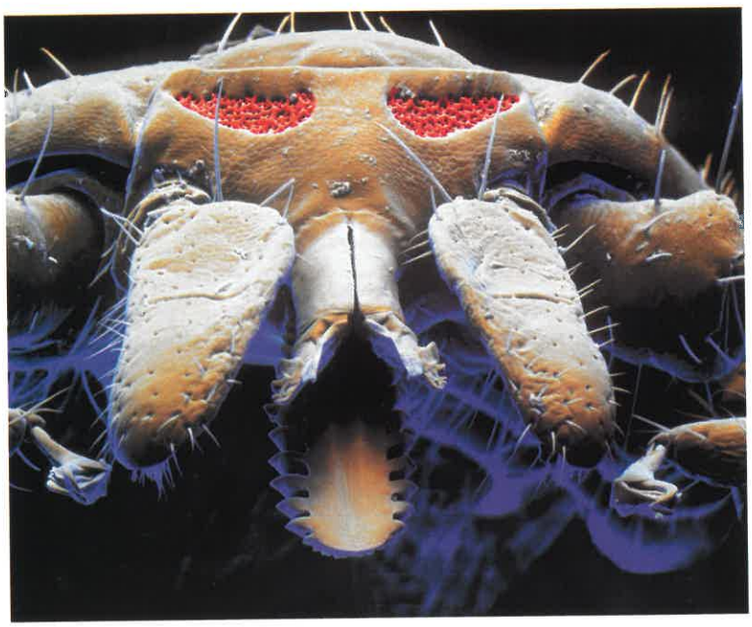
Technische Gebilde entstehen in einem Konstruktionsprozeß über Schmierskizzen, Reinzeichnungen, Detailfertigung, Zusammenbau. Ganz anders »natürliche Konstruktionen«: Die Gebilde der Natur, so kompliziert sie auch immer sein mögen, formen sich im Versuch-Irrtum-Feld der Evolution über kleine, zufällige Änderungen (Mutationen) und das Verwerfen der nicht angepaßten Formen (Selektion). So unterschiedlich die Methoden auch sind: Verblüffend ist die Tatsache, daß Natur wie Technik bei gleichen »Vorgaben« zu außerordentlich ähnlichen konstruktiven Lösungen kommen können. Dies wurde an sechs Beispielen dokumentiert, die scheinbar einfach sind, in Wirklichkeit aber hochkomplexen Anforderungen entsprechen müssen.

Der Biologe ist oft in der mißlichen Lage, zwar ein »morphologisches System« vor sich zu haben, aber den Komplexheitsgrad der Anforderungen, denen das System zu entsprechen hat, nicht zu durchschauen.

»Konstruktionsmorphologie« nennt der Biologe eine Betrachtungsweise, die biologische Gebilde nicht nur rein morphologisch oder anatomisch beschreibt. Sie bezieht stets die Funktion mit ein und versucht, die Vielfalt all derjenigen Querbeziehungen zwischen Struktur und Funktion zu erkennen und zu formulieren, die erst eine funktionierende biologische Konstruktion ausmachen.

Der Techniker wiederum kann aus dem oft sehr fein ausgeprägten strukturfunktionellen Zusammenspiel viel lernen, sei es zur Detailverbesserung bereits bestehender Konstruktionen, sei es als Anregung für neuartige.

Nochmals eine Zecke. Der Oberteil des Saugrüssels ist abgebrochen, man sieht die untere, schaufelförmige Struktur mit den seitlichen Widerhaken.



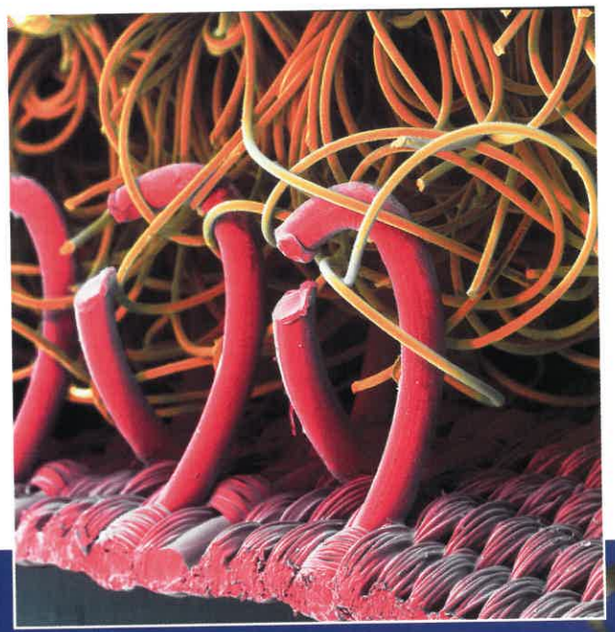
Die ungeheure Vielfalt »ähnlicher« biologischer Konstruktionen

Dem Organismenbereich kann man aufgrund seiner langen Evolutionszeit und des äußerst vielfältigen Spielfelds eine ungleich größere Zahl an Konstruktionsmöglichkeiten zuerkennen als der Technik.

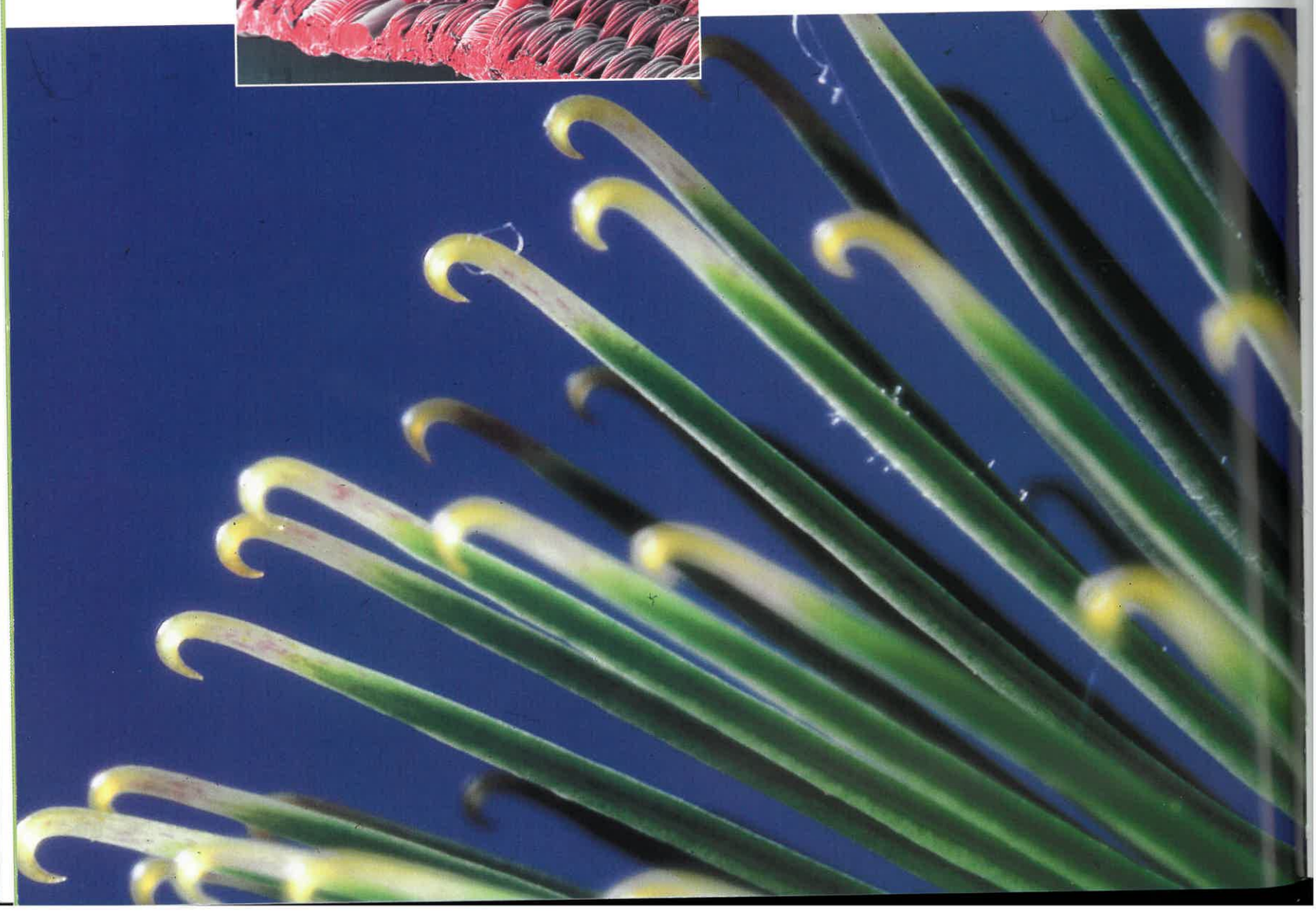
Allein für das mechanische Prinzip »Anklammern« gibt es vielleicht tausend bekannte und sicher zehntausende noch nicht erforschte natürliche Konstruktionen. Diese Konstruktionen haben die Eigentümlichkeit, in ihrer Struktur stets perfekt auf die Funktion abgestimmt zu sein. Das ist überhaupt ein Kennzeichen biologischer Konstruktionen: das optimale Zusammen-

spiel von technologischer Anforderung und Materialeigentümlichkeit, von Materialgestaltung und Materialaufwand. Aufgrund dieses »funktionellen Abgestimmtseins« ist die Optimierung auch der kleinsten und scheinbar nebensächlichsten Anforderungen typisch für die Formenwelt des Lebens. Somit kann man kaum einen Fehler machen, wenn man versucht, von der Natur zu lernen. Dies kann und darf freilich nicht durch sklavische Nachahmung geschehen; ein direkter Nachbau würde nicht funktionieren. Das tatsächlich unendlich große Sammelwerk für Konstruktionen der Natur kann aber die vielfältigsten Anregungen geben für eigenständiges technisches Gestalten.

Wie bereits erwähnt liegt hier der Schwerpunkt auf dem Wort »eigenständig« oder, sagen wir genauer, »ingenieurmäßig eigenständig«. In den frühen 60er Jahren gab es schon einmal einen Anlauf, Bionik zu betreiben. Er hatte jedoch keinen rechten Erfolg; man sagt, die Zeit wäre dafür noch nicht reif gewesen. Ich meine aber, daß damals zuviel von »Naturkopie« (Biomimese) geredet worden ist. Der Ingenieur konnte damit wenig anfangen und kann es auch heute nicht. Anregungen aus der Natur ja, Naturkopie nein.



Die Große Klette, Arctium lappa, verankert sich mit ihren Widerhaken in »statischer Haftung«. Genau dieses Haftungsprinzip wurde beim Velcro-Klettband übernommen. Nicht jeder, aber genügend viele der gekröpften Haken verfangen sich in einem Wollfilz. In den 50er Jahren konnte man als Werbeslogan für eine Fototasche mit stufenlos verstellbarem Innenfach lesen: »Der Klette abgeschaut«.



Analogieforschung – das ist das Zauberwort

Ein Flügelkoppel-Mechanismus bei einer Wanze und ein Besenhalter sind biotechnisch analoge Systeme. Sie arbeiten zwar mit ganz unterschiedlichen Materialien, Größenordnungen, Konstruktionseigentümlichkeiten, aber sie sind beide auf ein und denselben Zweck ausgerichtet: im vorliegenden Fall auf das feste Einklemmen eines vorgegebenen Teils durch ein optimal angepaßtes anderes.

Die Bedeutung der Analogieforschung im bionischen Bereich kann man gar nicht hoch genug einschätzen. Der Begriff stammt von dem Berliner Biologen Gerhard Helmke, der bereits in den frühen 60er Jahren für die Parallelbetrachtung biologischer und technischer Strukturen und Systeme geworben hat. Solche Betrachtungsweisen sind tatsächlich ein Ausgangspunkt für viele Studien, zumindest im mikromechanisch-biologischen Bereich. Sie wurden allerdings häufig mißverstanden. Verbieten sich solche Vergleiche nicht aufgrund von technischen Modellgesetzen oder von Nichtlinearitäten in der Größenabhängigkeit ihrer Kenngrößen?

Wagen wir doch einmal einen solchen Vergleich, der nach allem, was man technisch weiß, eigentlich »verboten« ist: Vergleichen wir einen Grashalm und einen Fernsehturm.

Vorab muß man festhalten: Verboten ist gar nichts. Vergleichen darf man alles. Ein Vergleich kann sich höchstens als sinnleer herausstellen – dann wurde dieser Ansatz umsonst verfolgt. Wenn man aber nicht vergleicht, kann man auch nicht auf weiterführende Ideen kommen. Daß Ideen nicht immer und nicht bei jedem Vergleich hervorsprudeln, darüber wundert sich der Forscher nicht. Der Forschungsalltag besteht zum Großteil aus mißglückten Ansätzen. Das war nie anders.

Am Beispiel einer pflanzlichen und einer technischen Hochbaukonstruktion sei diese Überlegung bzw. dieser Vergleich für den Leser einmal etwas ausführlicher erläutert.

Der Technikvergleich läßt den Getreidehalm besser verstehen

Durch das ältere biologische Schrifttum geistert das Märchen von der technischen Überlegenheit des Getreidehalms. Ein Getreidehalm sei im Mittel d = 0,4 cm dick und l = 1,60 m hoch (Längen-Dicken-Verhältnis 400 : 1). Wäre ein 3 m breiter Schornstein so gut konstruiert wie ein Getreidehalm, könnte er 1,2 km hoch gebaut werden. Kann das stimmen?

Die technische Physik zeigt, daß dem nicht so ist. Bereits im 19. Jahrhundert war bekannt (Barba-Kicksches Gesetz der proportionalen Widerstände), daß zwischen Dicke d und Länge l von Hochbauten, die unter zentraler achsenparalleler Belastung nur dem Eigengewicht unterworfen sind, nicht die Beziehung gilt $d \sim l$, sondern die Beziehung $d \sim l^{3/2} \sim l^{1,5} \sim l \sqrt{l}$

Würde ein Getreidehalm 120 m hoch wachsen, so dürfte er nicht 30 cm, sondern er müßte 3,3 m dick sein (Verhältnis 36 : 1). Das entspricht den Proportionen des schlanksten Industrieschornsteins der Welt, der ehemaligen Halsbrücker Esse bei Freiberg in Sachsen. Auch Bäume werden um so plumper, je höher sie sind. Ein Blick auf die Technik bewahrt also vor unangemessener Überschätzung der biologischen Konstruktion.

Der Naturvergleich kann der Technik neue Impulse geben

Wir haben in meiner Arbeitsgruppe unter anderem das in der Gräserevolution weit entwickelte Pfeifengras (*Molinia coerulea*) auf seine Stabilitätseigenschaften hin untersucht und dabei neben anderen interessanten Befunden folgendes Ergebnis erhalten: Obwohl das Flächenträgheitsmoment der tragenden Elemente kleiner ist

Der Körper der langsam anfliegenden Honigbiene steht schräg im Raum, und diese Lage sorgt dafür, daß die Flügel fast horizontal schlagen. Sie erzeugen somit nur Hub, so daß die Biene im Schwirrflug vor der Blüte stehen kann, bevor sie landet.

als bei einem weniger hoch entwickelten Gras, biegt sich Molinia bei Seitenwind weniger ab, ist also steifer. Ein Vorteil, der mit geringem Materialaufwand, aber cleverer Materialverteilung erreicht wird: Kann das ein Vorbild für Lampenmasten sein?

Sie merken, wohin die Überlegungen laufen. Der analoge Vergleich steht immer am Beginn einer bionischen Betrachtung, denn man hat ja immer etwas aus dem technischen Bereich, mit dem verglichen werden soll, und etwas aus dem natürlichen Bereich, das sich für den Vergleich anbietet. Geht man nun an diesen Vergleich unter dem sattsam bekannten Aspekt der Bedenkenträger heran (man darf doch nicht, das geht doch gar nicht), so wird man natürlich auch keine Ideen bekommen. Geht man zu naiv heran, wird man zwar Ideen bekommen, aber die taugen wahrscheinlich nichts. Sie entsprechen möglicherweise nicht den physikalischen Gegebenheiten und müssen wieder verworfen werden. Geht man aber so heran, daß man sich den Blick für Wesentliches bewahrt, dabei aber immer im Hinterkopf hat, daß die Übertragung letztlich physikalisch korrekt erfolgen muß, erweist sich die Analogieforschung als ungemein faszinierendes Hilfsmittel. Die alten Philosophen hätten gesagt: Das ist ein ideales »heuristisches Prinzip«, sprich: Man kommt auf Ideen, die einem sonst nicht einfallen würden.

Ein Beispiel ist die Honigbiene

Am Flugbrettchen eines Bienenstocks herrscht eilige Geschäftigkeit. Bienen landen, drängeln sich hinein, andere fliegen aus. Einige aber sitzen auf dem Brettchen, krallen sich mit den Klauen ihrer Beine fest und lassen die Flügel brummend schwingen, wie ein Flugzeug kurz vor dem Start. Bienenflügel und Propellerflügel erzeugen hohen Standschub, das heißt auch eine sehr massive, gerichtete Luftströmung nach hinten. Nur dreht sich beim Flugzeug der Propeller, während der »Flügelpropeller« der Biene schwingt. Bienen lüften damit ihren Stock, wenn es heiß ist. Sie ziehen Luft aus dem Stock heraus und blasen sie ins Freie. Man spricht vom »Fächeln«. Beim Flug fliegen die Bienen etwa mit 270 Flügelschlägen pro Sekunde. Beim Fächeln reduzieren sie die Schlagfrequenz auf rund 170 Schläge pro Sekunde, wahrscheinlich deshalb, weil sie sich sonst vom Flugbrettchen losreißen würden.

Mehrere parallel stehende Bienen und erst recht hintereinanderstehende (sie wirken dann wie eine »zusammengesetzte Turbine«) lüften mit ihrem winzig kleinen Flügel-Schwingapparat in erstaunlich effektiver Weise den doch vergleichsweise riesigen Stock. Könnte man danach nicht einen »bionischen« Miniaturlüfter hoher Effektivität bauen, mit dem man beispielsweise Computergehäuse lüften und kühlen könnte? Zunächst einmal muß natürlich die Kinematik des Fächelns ganz genau untersucht werden.

Vor längerer Zeit habe ich dazu Zeitlupenaufnahmen von fächelnden Bienen gemacht, und zwar über ein Spiegelsystem aus drei Raumrichtungen. Danach kann man die Lage des Flügels im Raum in etwa rekonstruieren. Er schwingt, wie gesagt, etwa 170 mal auf und ab (Schlagschwingung) und dreht sich dabei periodisch um eine Längsachse hin und her (Kippschwingung). Die Schlagschwingung und die Kippschwingung spielen mit einer gewissen Phasenverschiebung zueinander. Sie werden aktiv ein-

Bereits »vollgetankte« Honigbienen wiegen etwas über 0,1 g. Dazu kommt noch die Last der Pollenhöschen. Für diese Masse erscheinen die Flügelflächen recht klein. Ganz extrem ist dies bei den dicken und schweren Hummeln. Wenn man die Luftkräfte nach den klassischen Theorien rechnet, kommt man beim Hub nur etwa auf das halbe Körpergewicht. Damit könnte die Hummel gar nicht erst abheben. Tatsächlich muß man Effekte periodisch sich ablösender Wirbel mit einbeziehen. Das braucht der klassische Flugzeugbau nicht. Nur so lassen sich bestimmte Irritationen seitens der Ingenieure eines großen amerikanischen Flugzeugbauers erklären.

Am Flugbrettchen eines Bienenstocks stehen an heißen Sommertagen fächelnde Honigbienen mit leicht erhobenem Hinterleib. Mit ihrem »Flügelpropeller« ziehen sie im »Standschub« warme Luft aus dem Stock.

gestellt durch Muskeln im Flügelgelenk und gleichzeitig passiv durch die Luftkräfte, die die Spreite abbiegen. Mehr als ein erster quantitativer Eindruck war das aber nicht. Durch die Doktorarbeit meiner Mitarbeiterin Monika Junge, die in Zusammenarbeit mit dem russischen Strömungsmechaniker Shekhovtsov die Fächelkinematik präzise aufnahm und über neuartige Rechnungen auch die instationäre Luftkrafterzeugung mit periodischen Ablösungen und alles, was dazugehört, in den Griff bekam, wurde das anders. Es liegt damit eine genaue biologische Deskription vor, im Sinne des Deskriptionskatalogs in der bionischen Vorgehensweise. Eines konnte man allerdings nicht so leicht darstellen. Die Strömung konnte im Windkanal nicht sichtbar gemacht werden, weil die Bienen, kaum mischte man Rauch oder andere Partikelchen zur Strömungssichtbarmachung bei, mit dem Fächeln aufhörten. In Zusammenarbeit mit Junge hat der Entwicklungsingenieur Robert Spillner nun eine künstliche Biene gebaut, nur dreimal so groß wie eine natürliche, die ihre Flügel praktisch so bewegt wie das biologische Vorbild: Die kinematischen Kurven von Vorbild und Nachbau stimmen befriedigend überein. An der »Kunstbiene« konnte man im Windkanal nun die Strömungsverhältnisse genau studieren und damit lernen, die Strömung, die die lebende Biene erzeugt, zu verstehen: technische Biologie par excellence. Was lag nun aber näher, als bionisch weiterzugehen und aus dieser »künstlichen Biene« einen kleinen Schwinglüfter zu entwickeln?

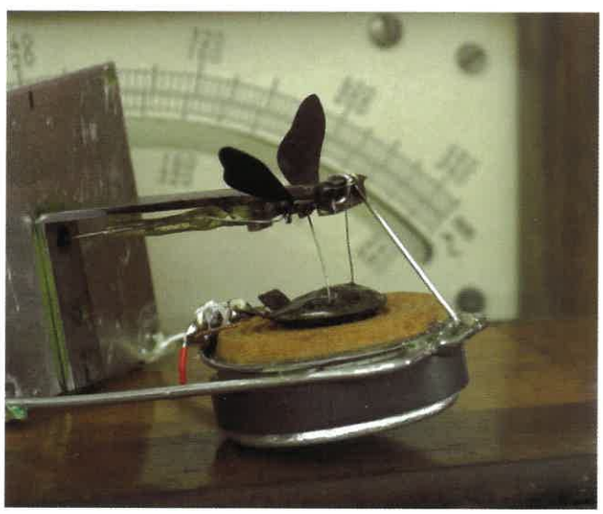
Vor anderthalb Jahrzehnten hat uns die Firma Bosch einen fingergroßen Miniaturlüfter gegeben, bestehend aus einem Schwingquarz und zwei daran befestigten, gegeneinander schwin-

genden Blättchen. Er hatte den großen Vorteil, daß er keine drehenden Teile besaß. Was nicht vorhanden ist, kann auch nicht altern beziehungsweise verschleißen. (Damit hat ja auch einmal der alte VW-Käfer geworben: Sein luftgekühlter Boxermotor brauchte kein Kühlwasser, das damit auch nicht auslaufen oder im Winter einfrieren konnte.) Wir haben seinerzeit versucht, die Biege- und Drehschwingung des Insektenflugs auf solche Lüfterblätter zu übertragen, doch dieser Ansatz konnte nicht weiterverfolgt werden: Die Blätter bildeten Schwingungsknoten aus, statt ordentlich Luft zu fördern. Robert Spillner hat das Problem dagegen in einem neuartigen Ansatz gelöst, dessen Einzelelemente zur Zeit zum Patent angemeldet sind und deshalb noch nicht öffentlich vorgestellt werden können.

Hocheffiziente Miniatur-Schwingungslüfter wären von beachtlichem technischem Interesse. Mit geringstem Energieaufwand könnten kleine, scharfe Luftstrahlen erzeugt werden, wobei die Lüftermechanik selbst alterungsbeständig ist. Die sirrenden Geräusche der üblichen schnellaufenden Kleinstlüfter können vermieden werden. Zur Kühlung von Computerbauteilen wird sich dieses System sicher eignen. Vielleicht auch zur Feinführung der Luftdurchströmung in Kraftfahrzeugen, wenn man viele solche Parallellüfter verwendet? Eine große Automobilfirma ist daran interessiert.

Wieder ein typisches Beispiel für bionische Entwicklung. Ausgangspunkt ist eine interessante biologische Frage. In diesem Fall: Wie bringen es die kleinen Bienen fertig, so einen großen Stock zu entlüften? Zur Lösung dieser Frage ist viel Grundlagenarbeit nötig, die Zeit und Geld kostet, und bei der Fachkenntnisse verschiedener Arbeitsrichtungen zusammenfließen müssen. Das alles kann sich aber in erstaunlicher Weise amortisieren.

Bioniker, die immer mit einem Bein im Bereich der natürlichen Konstruktionen und Verfahrensweisen stehen, mit dem anderen in den entsprechenden technischen Bereichen, die also immer darauf achten müssen, daß sie Biologie und Physik oder Biologie und Chemie nach naturgesetzlichen Kriterien (und das sind im Grunde immer physikalische) verbinden, kennen den Spagat dieser Betrachtungsweise. Sie kennen aber auch die Faszination, und sie sind durch spektakuläre Erfolge in den letzten Jahren immer mehr in der Lage gewesen, bionisches Forschen und seine Übertragung in Wirtschaft und Industrie zu verankern. Es ist eigentlich in der Regel so gewesen, daß man zunächst einmal zweckfrei (natürlich nicht zwecklos!) auf die Natur gesehen hat, ohne bei jedem Blick an Übertragungen zu denken. Das Schlüsselerlebnis kommt regelmäßig dann, wenn bei einer solchen Kenntnis- und Übertragungskette der nächste Baustein aus der Technik kommt.



In Entwicklung befindet sich ein Flügel-Miniaturlüfter nach dem Fächel-Prinzip der Honigbienen.

Botaniker haben sich Pflanzenblätter angeschaut und festgestellt, daß diese oft wasserabweisend und im mikroskopischen Bild feingenoppt erscheinen. Solche Oberflächen verschmutzen nicht. Das Kohlrabiblatt bietet ein Beispiel, die Blütenblätter der Stiefmütterchen ein anderes, und die ostasiatische Lotusblume ist das berühmteste.