

Ferenc Greguss

Patente der Natur

Unterhaltsames aus der Bionik

Verlag Neues Leben Berlin

Titel der ungarischen Originalausgabe: „Eleven találmányok“
Erschienen im Verlag Móra Ferenc

Ins Deutsche übertragen von Andreas Borosch

Die Sachzeichnungen und Fotos wurden der ungarischen Originalausgabe entnommen.

ISBN 3-355-00610-6

© Ferenc Greguss, 1976

Für die Sachzeichnungen

© Miklós Lőrincze, 1976

Für die deutsche Übersetzung

© Verlag Neues Leben, Berlin 1985

2., überarbeitete Auflage, 1988

Lizenz Nr. 303 (305/292/88)

LSV 1399

Schutzumschlag und Einband: Karl-Heinz Döring

Typografie: Christel Ruppin

Illustrationen: Miklós Lőrincze

Schrift: 11 p Garamond

Gesamtherstellung: Karl-Marx-Werk Pößneck V 15/30

Bestell-Nr. 643 565 9

01680

Zurück zur Natur

Es wäre einfacher gewesen, meinem Buch den Titel „Bionik“ zu geben. Doch wer kennt schon dieses Wort? Selbst mancher Bibliothekar ist ratlos, wenn nach einem Buch zu diesem Thema verlangt wird, obwohl dieser fremdsprachige Ausdruck in bezeichnender Weise darauf hindeutet, daß es sich um eine Wissenschaft handelt, die eine Verbindung zwischen der Biologie und der Technik herstellt. Es stimmt zwar, daß der Begriff selbst nicht alt ist. Obwohl sich bereits Ende des vergangenen Jahrhunderts einige Techniker mit Interesse der Natur zugewandt haben, erhielt die Bionik im Bereich der Wissenschaft ihre Allgemeingültigkeit und Anerkennung erst, nachdem dieser Wissenschaftszweig im September 1960 auf die Tagesordnung der in den Vereinigten Staaten durchgeführten ersten Bionikkonferenz gesetzt wurde.

Seitdem werden auf der ganzen Welt die Forschungen auf dem Gebiet der Bionik immer intensiver durchgeführt: Die Zahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen steigt von Jahr zu Jahr. Im Blickpunkt der Bionik und ihrer Erkenntnisse sind seither unzählige Einzelheiten und Phänomene der Tierwelt aufgedeckt worden. A. I. Berg, Mitglied der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, äußerte sich hierzu wie folgt: „Die Aufgabe der Bionik ist es, biologische Objekte mit dem Ziel zu erforschen, die gegenwärtigen technischen Systeme zu modernisieren oder neue

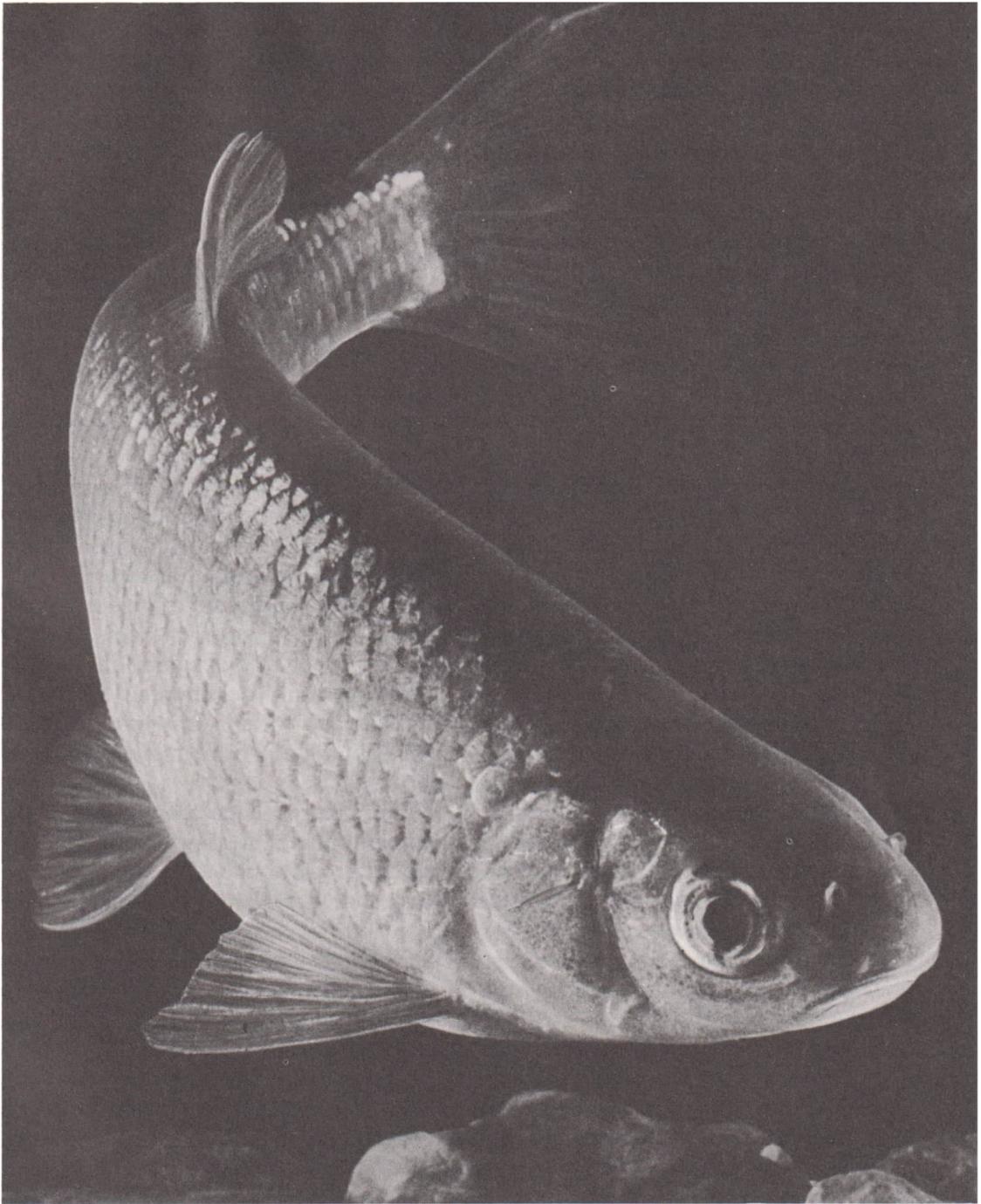
und vollkommeneren zu schaffen und deren Ergebnisse zu nutzen.“

Wir leben in einer stürmischen Zeit, die uns immer weiter von der Natur entfernt. Für ein Stadtkind ist es bereits zu einem großen Erlebnis geworden, wenn es ein Pferd statt auf der Leinwand oder auf dem Bildschirm einmal in Wirklichkeit zu sehen bekommt. Im Banne der Technik lassen uns abstrakte Begriffe und ausgeklügelte mikroelektronische Rechner allmählich vergessen, daß die Grundlagen unserer Kenntnisse darüber auf der Beobachtung der Natur beruhen. Der Ingenieur, der nach neuen Lösungen sucht, führt seine Experimente entsprechend den Naturgesetzen durch. Er ist bemüht, die besten Ergebnisse herauszufinden, doch seine Zeit ist knapp. Der Natur standen für die stammesgeschichtliche Entwicklung Jahrmillionen zur Verfügung. Der amerikanische Forscher G. Watt weist in treffender Weise auf diesen Unterschied hin: „In der technischen Planung weiß der Mensch, was er erreichen will, und er nähert sich diesem Ziel in dem Maße und mit der Perfektion, wie es seine Fähigkeiten zulassen. Der Planungsablauf der lebenden Organismen hingegen besteht aus einer ununterbrochenen Reihe vererbter Variationen. Der Kampf um das Dasein merzt jene aus, die weniger gut funktionieren, und bevorzugt solche, die vom Gesichtspunkt einer Weiterentwicklung besser zur Geltung kommen.“

Die Erfindungen aus dem Bereich der Tierwelt, von denen in diesem Buch die Rede sein wird, sind lediglich vom menschlichen Standpunkt Erfindungen, denn sie kamen in Wirklichkeit als Ergebnis einer millionenfach variierten natürlichen Auswahl zustande. Ihre Vollkommenheit ist in zahlreichen Fällen unbestritten, so daß sie uns eine ausgezeichnete Hilfe geben, die Welt der Lebewesen besser zu verstehen, und wir bewußt durch ihre „Einfälle“ im Interesse der Lösung schwieriger technischer Aufgaben eine Wahl treffen können. Mein Buch führt den Leser einerseits in dieses unerschöpflich reiche „Erfindungsreservoir“, und andererseits demonstriert es den lohnenden Nutzen der Bionikforschung in der technischen Planung.

Der Themenkreis ist freilich derart

weit verzweigt, daß es mir unmöglich ist, meine Streifzüge auf alle Bereiche der Bionik auszudehnen. Ich habe mich deshalb vor allem bemüht, einen umfassenden Überblick zu geben. Einzelne Aspekte werden mit der Zeit vielleicht an Bedeutung verlieren, doch andere Details durch erneute Untersuchungen in neuen Farben erstrahlen und sich noch klarer entfalten. Wer in die Geheimnisse der Natur dieser neuentdeckten Welt hineinblickt, wird sich zweifelsohne in ein verzaubertes Schloß versetzt fühlen, in dem Insekten ihre Ohren an den Füßen haben, Fledermäuse in Ultraschalltönen trällern und Fische zuweilen in der Luft fliegen. Und vielleicht bereitet es dann dem Leser Freude, den Weg der Entdeckungen in der Natur selbst zu beschreiten.



Der im Wasser schwimmende Fisch – eine lebendige Welle zwischen den Wellen. Es ist schwierig, seine Bewegung in mathematischen Formeln auszudrücken. Trotz der vielen Versuche gelang es nicht, ein derart flexibles Unterwasserfahrzeug zu konstruieren, das den Bewegungen der Fische gleichkommt.

Lebende „Unterseeboote“

In der Nähe der Küste von Ekuador mußte die Mannschaft eines sowjetischen Fischereischiffs eine überraschende Feststellung machen. Das Schiff schaukelte friedlich im Wasser, da erbebt plötzlich der Schiffsrumpf, als hätte sich ein Torpedo in die Seite des Schiffes gebohrt. Die Matrosen rannten sofort in den Kielraum, um nach der Ursache zu suchen. Zu ihrer großen Überraschung entdeckten sie im hereinströmenden Wasser die Reste eines riesigen Schwertfisches. Eine spätere Untersuchung ergab, daß der unter Wasser jagende Fisch vermutlich seine Beute verfehlt hatte, so daß er gegen das Schiff geprallt war. Die kinetische Energie dieses lebenden Torpedos war so gewaltig, daß sein gezahntes Schwert die 8 Zentimeter starke Seite des Schiffes durchbohrte und ein 46 Zentimeter breites Loch riß. Der Fisch verlor zwar durch den unerwarteten Zusammenstoß sein Schwert, vermittelte aber den Tierforschern zugleich neue Erkenntnisse über die außergewöhnliche Schwimffähigkeit der Raubfische.

Bemerkenswert ist dabei, daß Fische über keine rotierende Schiffsschraube verfügen und mit ihren Brustflossen auch nicht ausdauernd rudern können, sondern diese hauptsächlich nur zum Steuern benutzen. Wer grazil dahinschwebende Fische im Aquarium beobachtet, dem fällt sicherlich auf, wie der Fisch seinen Körper S-förmig fortbewegt und warum er überhaupt auf eine

solche schlängelnde Bewegung angewiesen ist. Er stößt sich — ein lebendes Wasserfahrzeug — mit einzelnen Schlägen der Schwanzflosse in ähnlicher Weise nach vorn wie die plätschernden Ruder den Kahn.

Das Schwimmen ist eine komplizierte Form der Fortbewegung. Forscher versuchen bereits seit mehr als einem halben Jahrhundert diesem Geheimnis auf die Spur zu kommen, doch erst in den letzten zwei Jahrzehnten wurden plausible Lösungen gefunden, seitdem nämlich neben den Biologen auch die Mathematiker dazu beitrugen, die Fortbewegungsphysik des bunten Getriebes der schwimmenden Wasserwelt in Form von Zahlen und Formeln in ein einheitliches System zu fassen.

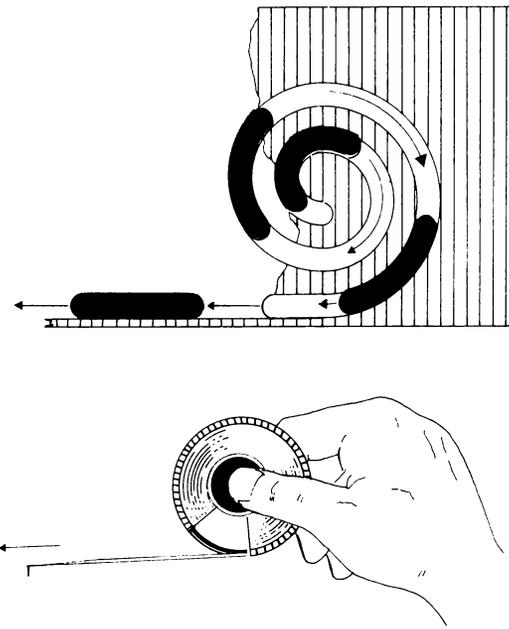
Die theoretischen Forschungen begannen mit einem spiralförmig gebogenen festen Rohr und einer erstaunlichen Fragestellung: Kann ein in dieses Rohr gesteckter elastischer, gleichmäßig dicker Stab (zum Beispiel ein biegsamer Kunststoffstab) durch das Rohr geschoben werden, so daß er am anderen Ende wieder herauskommt?

Diese Frage hätte bereits von den Physikern des 18. Jahrhunderts beantwortet werden können. Schon damals erkannten sie die sowohl einfache, aber auch kompliziert klingende Regel: Verändert ein Körper seine Form und Lage, wird er stets bestrebt sein, mit der geringsten Potentialenergie auszukommen. Im Fall des in das Rohr gedrückt-

ten elastischen Stabes bedeutet dies, daß sich der Stab früher oder später wieder gerade ausrichten wird.

Falls im Rohr keine Reibung vorhanden ist, wird der Stab ohne weiteres durch das Rohr gleiten. Er wird sich stets in die Richtung in Bewegung setzen, in der die Krümmung im Rohr geringer ist, also in die Richtung, in die er sich am besten aufrichten kann. All dies geht im Bruchteil einer Sekunde vor sich: Der Stab schießt förmlich aus dem Rohr, wie ein Stahlbandmaß auf einen einzigen Knopfdruck aus dem Gehäuse herauschnellt.

Doch was geschieht, wenn wir ein wellenförmiges Rohr benutzen? (Eine

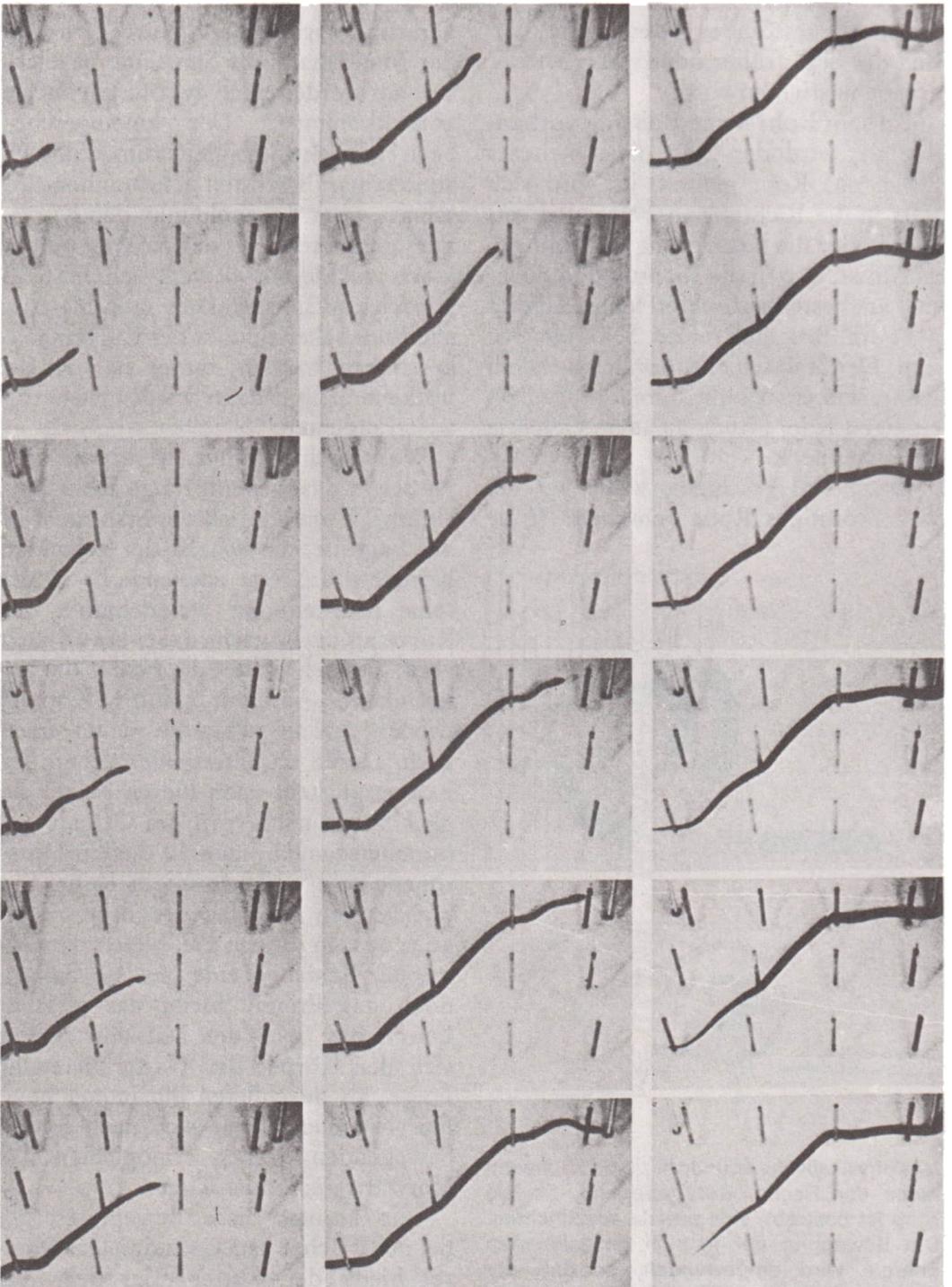


Das physikalische Grundprinzip des Schwimmens der Fische. Der gebogene, flexible Stab ist bestrebt, sich gerade auszurichten. Die Bewegung der in sich gespeicherten Energie wird umgewandelt, so daß der Kunststoffstab aus der Glasröhre herausdringt. Das spiralförmig aufgerollte Meßband läuft gleichfalls aus diesem Grund aus dem Behälter.

derartige regelmäßige Kurve wird in der Mathematik als Sinuslinie bezeichnet, wir werden noch des öfteren auf sie zurückkommen.) Der hineingeschobene elastische Stab gleitet unverzüglich von dem am stärksten gekrümmten Abschnitt, vom Scheitelpunkt der Kurve, zum geraderen Teil des Rohres weiter. Doch von hier aus bewegt sich der Stab zunächst nicht weiter. Er muß bis zum nächsten Scheitelpunkt der Kurve nachgeschoben werden, bis er sich erneut festklemmt, um dann wieder ruckartig weiterzugleiten.

Was geschieht aber, wenn wir eine Natter in das wellenförmige Rohr hintun? Wozu der leblose Stab nicht in der Lage ist, das schafft der gelenkige Körper des Tieres spielend. Es strafft seine Muskeln am Scheitelpunkt der Kurve an und rutscht dabei etwas nach vorn. Danach richtet die Natter die gekrümmten Abschnitte ihres Körpers wieder gerade aus und gleitet nach vorn. Durch das Zusammenziehen der Körpermuskeln nach hinten gleitet sie gleichzeitig nach vorn. Im Grunde genommen braucht man zu diesem Experiment kein wellenförmiges Rohr. Ein mit Nägeln beschlagenes Brett reicht auch aus. In diesem Fall bieten die Nägel der Schlange eine gewisse Stütze, doch das Prinzip bleibt das gleiche: Durch das Spiel der Muskeln ringelt sich der Körper der Natter in steter Folge, als durchliefen ihn immer neue Kurvenwellen. Diese sich nach hinten bewegenden Wellen ermöglichen das Vorwärtsgleiten des Tieres.

Wie kommt diese Bewegungsregel bei den Fischen zur Geltung? Das Wasser bietet der Natter oder dem Aal – wenn auch in geringerem Umfang – den gleichen Widerstand wie ein festes Rohr oder ein mit Nägeln bestücktes



Die Wellenbewegung der Natter auf einem mit Nägeln beschlagenen Brett. Sie bewegt sich von der unteren linken zur oberen rechten Ecke. Die Einzelaufnahmen zeigen, daß ihr gekrümmter Körper, sich an den Nägeln stützend, voranleitet.

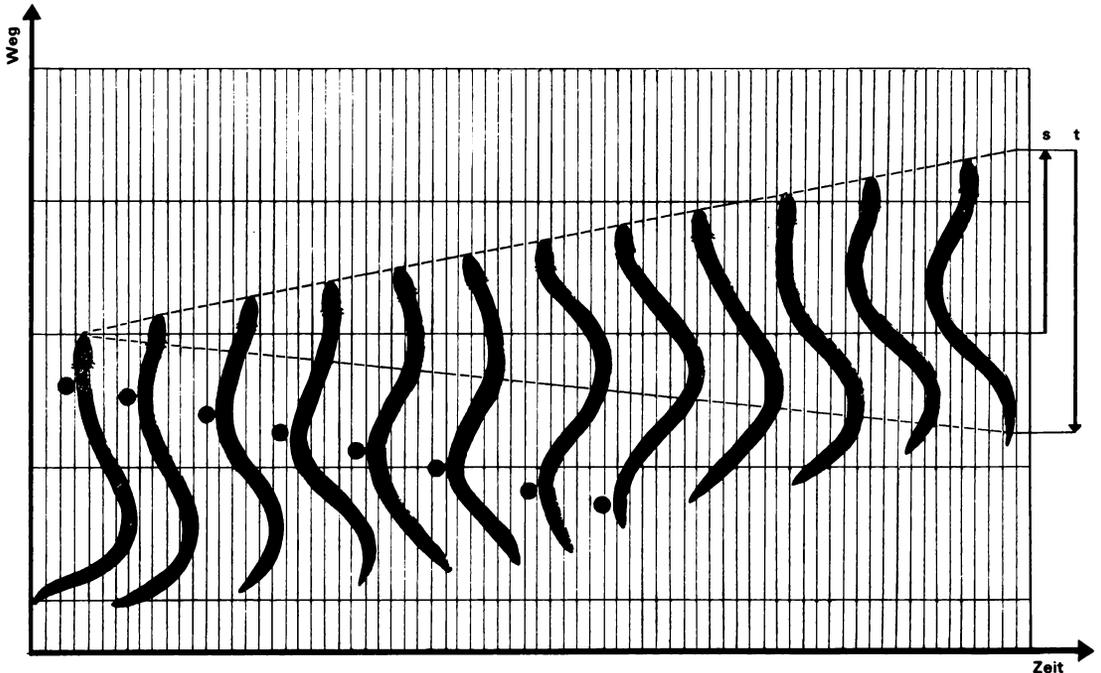
Brett. So gleiten zum Beispiel die niedrig entwickelten Arten der Wasserwelt durch schlängelnde Wellenbewegungen nach vorn. Der englische Forscher H. J. Lighthill hat festgestellt, daß dieses charakteristische aalmäßige Schwimmen von der Mehrheit der wirbellosen Wassertiere und selbst von einem Teil der Wirbeltiere angewandt wird. Mit „Wellenschwimmbewegungen“ schwimmen beispielsweise auch Lungenfische, denn diese Bewegungen stellen die einfachste Form des Schwimmens dar.

Elastische Ruder

Mit Aufnahmen von Spezialkameras wird das Rätsel um die eigenartige Wellenbewegung der Fische verständlich.

Auf der von uns dargestellten Zeichnung nach einer in Zeitabständen von 0,1 Sekunden geknipsten Aufnahme eines schwimmenden Aals kann festgestellt werden, daß sich der Körper des Tieres tatsächlich in Wellen bewegt. In dem Maße, wie der Aal nach vorn gleitet, läuft die Körperwelle in entgegengesetzter Richtung am Leib des Tieres entlang.

Die Körperwelle läuft stets schneller nach hinten, als der Fisch sich vorwärts bewegt. Der Unterschied zwischen den beiden Geschwindigkeiten ist um so kleiner, je wirksamer der Fisch die potentielle Energie seines Körpers in kinetische Energie umsetzt. Messungen haben ergeben, daß die Schwimgeschwindigkeit des Aals um ungefähr 60 Prozent geringer als die der Welle ist, mit der er sich durch die mühelosen Be-

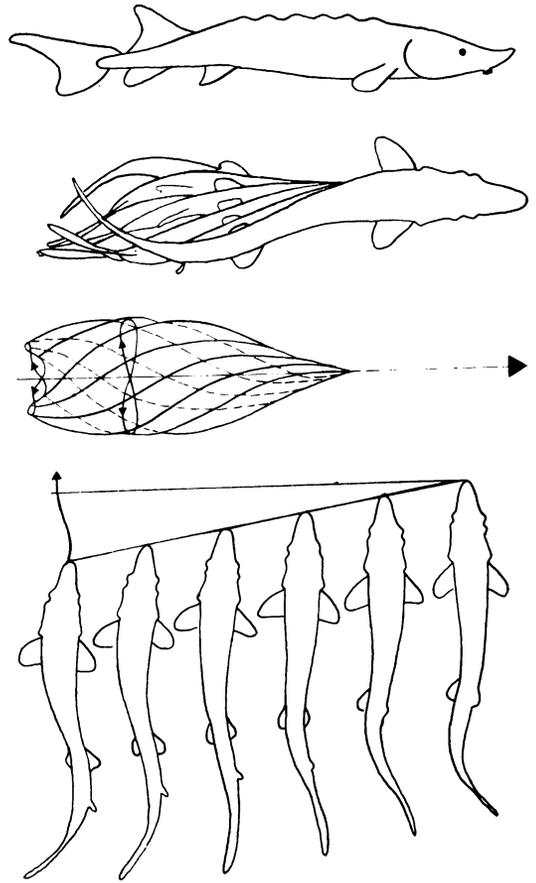


Die einzelnen Phasen der Wellenschwimmbewegungen des gemeinen Aals. Die Zeichnung demonstriert in vortrefflicher Weise, wie sich an dem elastischen „Schnürsenkel“ die Körperwellen (Zeit) – in Phasen von 0,1 Sekunde – stets schneller nach hinten bewegen, als die Geschwindigkeit beträgt, mit der der Aal vorwärts schwimmt (Weg).

wegungen seines Körpers scheinbar nach hinten bewegt. Mit dem Wellenschwimmen können deshalb keine hohen Geschwindigkeiten erreicht werden, doch vom Gesichtspunkt der Ausnutzung des Energievorrats ist dies vor allem auf langen Strecken eine besonders ökonomische Schwimmethode. Das ist auch eine Erklärung für die weiten Wanderungen der Aalfische in und durch die Ozeane.

Im Verlauf der stammesgeschichtlichen Entwicklung trat nach und nach eine stufenweise Veränderung im charakteristisch zylindrischen Körperbau der Aalfische ein. Bei vielen Vertretern der Klassen Knorpel- und Knochenfische spitzte sich der auf beiden Seiten abgeflachte, spindelförmige Körper zum Schwanz hin zu, so daß der Widerstand beim Schwimmen geringer wurde. Doch zum wellenförmigen Schwimmen erweist sich der ursprünglich breite Querschnitt des Körpers als notwendig, da sich dieser Muskelteil während des Schwimmens vom Wasser am besten abstößt. An Stelle des zusammengedrückten Schwanzes treten deshalb dünne Rücken- und Bauchflossen: Der Schwanz wird zum senkrechten „Lenkinstrument“.

Bei den weitverzweigten Ordnungen und Familien kann im Rahmen der stammesgeschichtlichen Entwicklung gleichzeitig eine weitere interessante Änderung festgestellt werden. Der Körper des Fisches wird nach und nach starrer! Während des Schwimmens bewegt sich nur noch der Schwanzteil, also im Verhältnis zum gesamten Körper nur noch die Hälfte oder ein Drittel. Von der ursprünglichen Körperwelle der Aale verbleibt allenfalls eine Viertelwelle: Der Halbierungspunkt des Körpers bleibt bewegungslos, wobei die



Die Wellenbewegung des gemeinen Störs. Der Körper wird zum Schwanz hin schmaler, dadurch schwimmt er mit geringerem Widerstand als der Aal. Der erforderliche Flächenumfang zur Wellenbildung wird durch die Doppelschwanzflosse wesentlich gefördert. Im Verhältnis zu seiner Körperlänge entsteht fast zu zwei Dritteln eine vollkommene Sinuswelle (oben). Die Zeitdifferenz zwischen den hier aufgezeigten Bewegungen der Schwimmphasen beträgt 0,25 Sekunden.

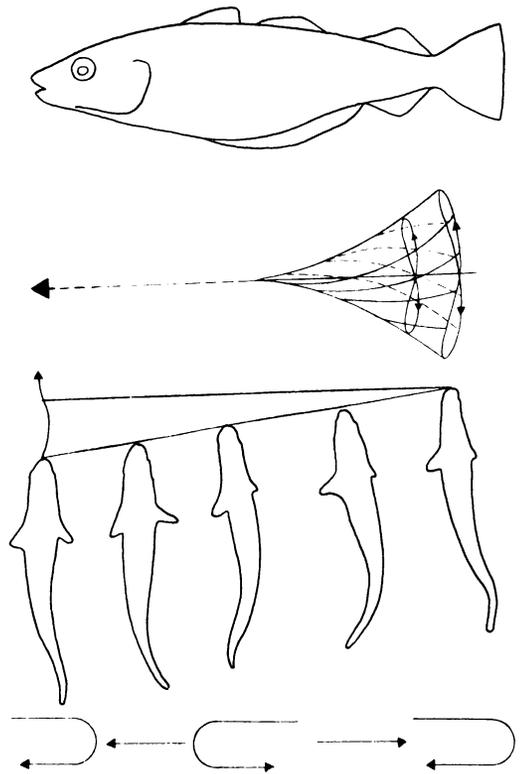
Schwanzschläge den Scheitelpunkt der Welle erreichen. Durch diesen plötzlichen „Wellenstoß“ entstehen enorme Seitentriebekräfte am Schwanz des Fisches.

Mathematischen Berechnungen zufolge wird die Schwimmfähigkeit der Fische insbesondere durch die

Schwanzschlagfrequenz bestimmt. Von dieser hängt es ab, ob die Fische langsam, dafür aber ausdauernd oder schnell, dagegen jedoch nicht lange schwimmen. Die Geschwindigkeit der seitlichen Bewegung des Schwanzes kann theoretisch mit der Verschiebungsgeschwindigkeit eines „Wassersegments“ verglichen werden, das vom seitlich schlagenden Schwanz des Fisches abgestoßen wird. Daraus kann eindeutig eine Wechselbeziehung abgeleitet werden: Je größer der Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem Fischschwanz und dem Wassersegment, um so größer die Schubkraft des Fisches, je schneller vermag er zu schwimmen. Wenn hingegen der Schwanz das Wasser langsam beiseite schiebt, schwimmt der Fisch „glatter“ und mit geringerer Kraftanstrengung.

Die Stärke der seitlichen Schlagkraft wird auch vom Flächenumfang der Schwanzflosse beeinflusst. Je größer sie ist, um so mehr Kraft kann sie entfalten, so wie auch ein großflächiges Ruder den Kahn schneller nach vorn treibt. Weshalb verjüngt sich trotzdem die Form des Fisches zum Schwanz hin wie ein Dolch? Wenn sich der Fischkörper nach hinten verbreitern würde, könnte er doch mit noch größerer Kraft das Wasser seitlich verdrängen! Dennoch, in der Welt des Wassers sind derartige Lösungen nirgends zu finden.

Im unmittelbaren Umkreis des Schwanzumfangs bilden sich nämlich Wasserwirbel. Diese winzigkleinen wirbelnden Strudel entstehen durch die Bewegungsenergie des Fisches und mindern seine Fortbewegungsgeschwindigkeit. Die sich verjüngende Form des Fischkörpers eliminiert ebendieses störende „Zwischenspiel“. Wenn der Schwanz seitlich ausschlägt, vermindert



Der Dorsch schwimmt nur mit Schwanzschlägen. Durch die seitlich schlagende Schwanzflosse entstehen Einviertelwellen, was demnach bedeutet, daß diese Fischart schnell, doch nicht ausdauernd schwimmen kann (oben). Die Zeichnungen über die Fortbewegung zeigen die einzelnen Phasen des Schwanzschlags in Verbindung mit den Bewegungen. Die fünfte Bewegung ist zugleich der Beginn des nächsten Schwanzschlags.

sich mit einemmal an der Oberfläche des zur größten Geschwindigkeit fähigen Teilstücks – dort nämlich, wo der Körper am schmalsten ist – die Schlagkraft, so daß sich weniger Wirbel bilden. Hinzu kommt noch, daß die Verbreiterung der Schwanzflosse keine großen Wirbel verursacht, weil sie sich bei jedem Schlag in eine entgegengesetzte Richtung biegt.

Die Rückenflosse befindet sich eben-

falls nicht zufällig in der Mitte des Körpers. Sie gleicht die starke Seitenkraft der Schwanzschläge aus, deshalb ist es dem Fisch möglich, pfeilgerade zu schwimmen. Eine besondere Bedeutung kommt auch den unteren, sich an beiden Seiten befindlichen Brustflossen zu: Sie leisten hauptsächlich bei einer plötzlichen Richtungsänderung Hilfe. Darauf besonders angewiesen sind „schnellschwimmende“ Fische; denn im Wasser ist das plötzliche Verringern der Geschwindigkeit bedeutend schwieriger als auf dem Festland. Wer hat sich nicht schon darüber gewundert, wie zwei Schiffe auf dem Meer zusammenstoßen können. Wie kann so etwas nur vorkommen, ist doch die Wasseroberfläche unermesslich groß. Doch zuweilen kreuzen sich die Schifffahrtsrouten, und wenn sich nun zufälligerweise zwei Schiffe einander nähern, so droht die Gefahr einer Kollision. Oft ist es dann schon zu spät, ein Ausweichmanöver durchzuführen; es gibt jetzt keine Hilfe mehr. Um ein Frachtschiff von 500 000 Tonnen zu stoppen, ist ein Bremsweg von mehr als 8 Kilometern erforderlich! Ist die Strecke des Kollisionskurses kürzer, stoßen die Schiffe unweigerlich zusammen. Fischen kann eine solche Katastrophe jedoch nicht widerfahren. Stellt sich ihnen bei einer hohen Geschwindigkeit ein unerwartetes Hindernis in den Weg, spreizen sie schlagartig ihre Brustflossen auseinander. Diese „Bremsklappen“ brechen innerhalb von Augenblicken die Vehemenz der Schwimgeschwindigkeit, und der Fisch ist in der Lage, mit einem einzigen Schwanzschlag in eine andere Richtung zu schwimmen.

Schwebende Pelerine

„So viele Fischarten — so viele Schwanzformen.“ Diese beinahe sprichwörtlich geltende alte Feststellung hat den Forschern auf dem Gebiet der Bio-



Der Schwanz des Wales erinnert an die aufgerichteten Tragflächen eines Flugzeugs. Für das schnelle Schwimmen ist dies entsprechend den Grundsätzen der Bionik eine unbedingte Voraussetzung. Der Schwanz der Säugetiere der Wasserwelt ist im Gegensatz zu dem der Fische waagrecht ausgerichtet.

nik bereits viel Kopfzerbrechen bereitet. Diese Mannigfaltigkeit reicht von der runden über die ovale bis zur gabelförmigen Schwanzflosse.

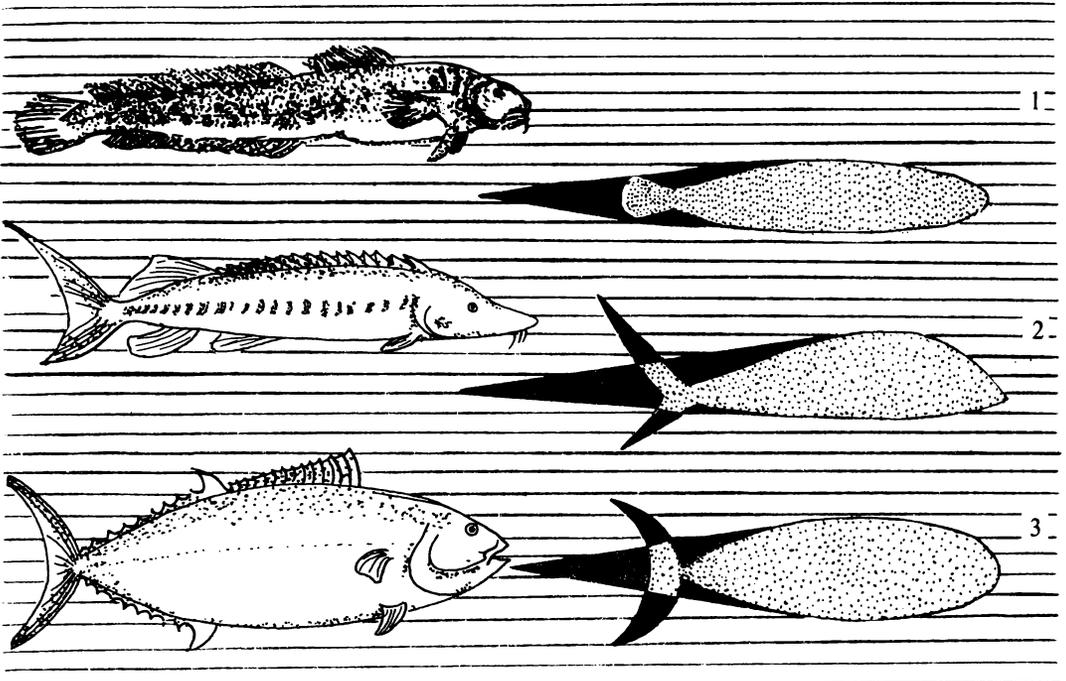
Warum diese große Vielfalt? Umständliche Ermittlungen sowie analoge Untersuchungen und Experimente in

der Flugzeugtechnik haben schließlich Aufschluß über bestimmte Gesetzmäßigkeiten gebracht. So wie Überschallflugzeuge wegen des enormen Luftwiderstands nur mit nach hinten gerichteten Tragflügeln ihre hohe Geschwindigkeit erreichen können, so konnten die Fische im Laufe der stammesgeschichtlichen Entwicklung ihre Schwimmgeschwindigkeit nur in der Weise erhöhen, daß sich die Schwanzflosse vervollkommnete, das heißt, daß sie sich so veränderte, indem sie allmählich die Form einer Mondsichel annahm und sich weit nach hinten verlagerte, so daß sie schließlich den für Überschallflugzeuge charakteristischen Tragflügeln ähnelt.

Bei schnellschwimmenden Fischen

spitzt sich der Körper vor der Schwanzflosse kegelförmig zu, um die durch die kräftigen Schwanzschläge verursachten Wasserwirbel abzuschwächen, wohingegen sich die Flosse selbst zur großflächigen Ruderschaukel verbreitert. Die vordere Kante der Schwanzflosse ist allerdings nicht so messerscharf, wie man das vielleicht erwarten könnte. Sie ist eher dick und abgerundet, doch sie teilt mit Leichtigkeit das Wasser. Dazu geben Strömungsmessungen einen guten Aufschluß: Die „Vorderkanten“ von Flugzeugtragflügeln verursachen einen geringeren Wirbel, je abgerundeter sie sind. Dies kann auch an den Schwanzflossen schnellschwimmender Meeresfische beobachtet werden.

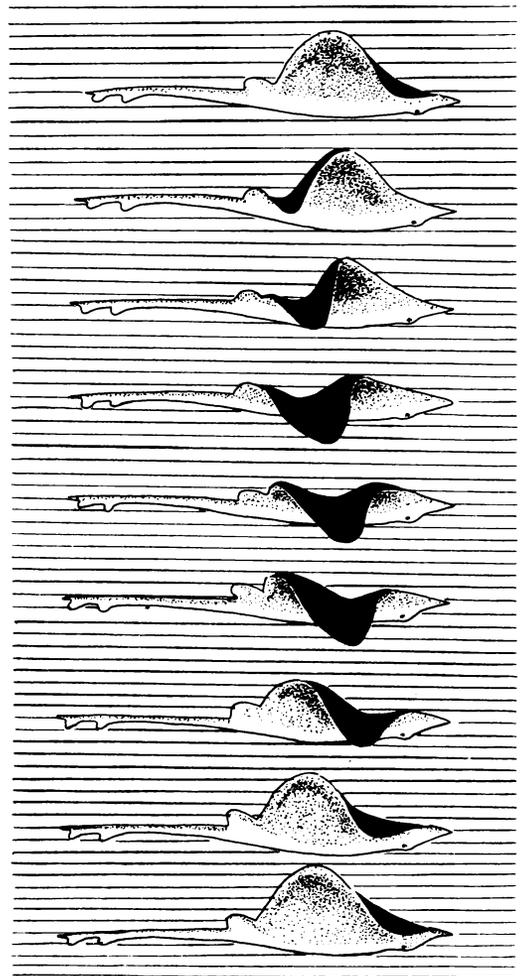
Solche „Schnellschwimmer“ sind bei-



Die Aalquappe ist ein recht schlechter Steuerer (1), denn ihre Schwanzflosse bewegt sich in einer Wirbelzone, die sich während des Schwimmens hinter ihrem Körper bildet. Der nach hinten ausgerichtete pfeilförmige Schwanz des gemeinen Störs (2) und das sichelförmige „Steuerruder“ des Thunfisches (3) bieten bedeutend bessere Möglichkeiten einer sicheren Steuerung.

spielsweise Thunfische, Schwertfische und im allgemeinen die großen Raubfische, für die es eine Existenzfrage ist, daß sie ihr flüchtendes Opfer leicht erreichen können. Obwohl Delphine den Säugetieren zugeordnet werden, ist ihr Schwimmen dem der Fische ähnlich. Auf Grund der Form ihrer Schwanzflosse können sie bis auf eine besondere Ausnahme zu den Schnellschwimmern gezählt werden: Ihr „Ruder“ ist nicht senkrecht, sondern waagrecht, so daß es beim Schwimmen mal nach oben und mal nach unten schlägt. Weshalb veränderte sich die Haltung ihres Schwanzes im Laufe der stammesgeschichtlichen Entwicklung? Das wissen wir bis heute nicht. Vielleicht findet die Bionik in der Zukunft eine Antwort darauf.

Der Fischschwanz ersetzt indes nicht nur die kreiselnde Schraube eines Schiffes, sondern auch das Steuerruder. Auf den Zusammenhang zwischen dem Steuern und der Form der Schwanzflosse machte als erster der sowjetische Biologe J. G. Alejew aufmerksam, als er im Rahmen langwieriger Experimente das Schwimmen der Aalquappe untersuchte. Ihm schien es zunächst unverständlich, weshalb die Schwanzflosse dieses Fisches wie eine Scheibe geformt ist. Im Laufe seiner Experimentaluntersuchungen im Wasserkanal gelang es ihm, dieses Rätsel zu lösen. Derartige Schwanzflossen sind an Fischen zu finden, die man als „langsam schwimmende“ Fische bezeichnet, wie etwa bei den Schiffen die Schleppschiffe. Sie sind nämlich auf schnellen Richtungswechsel nicht angewiesen und deshalb nur mit einfachen Steuerungsorganen ausgestattet. Da das Organ am Schwanzende, in der Wasserwirbelzone, angebracht ist, können diese Fische nur schlecht steuern. Die Schwanzflosse des



Der Rochen bewegt seine „Pelerine“ so geschickt, daß ihn die sich nach hinten fortbewegenden senkrechten Körperwellen mühelos vorwärts treiben.

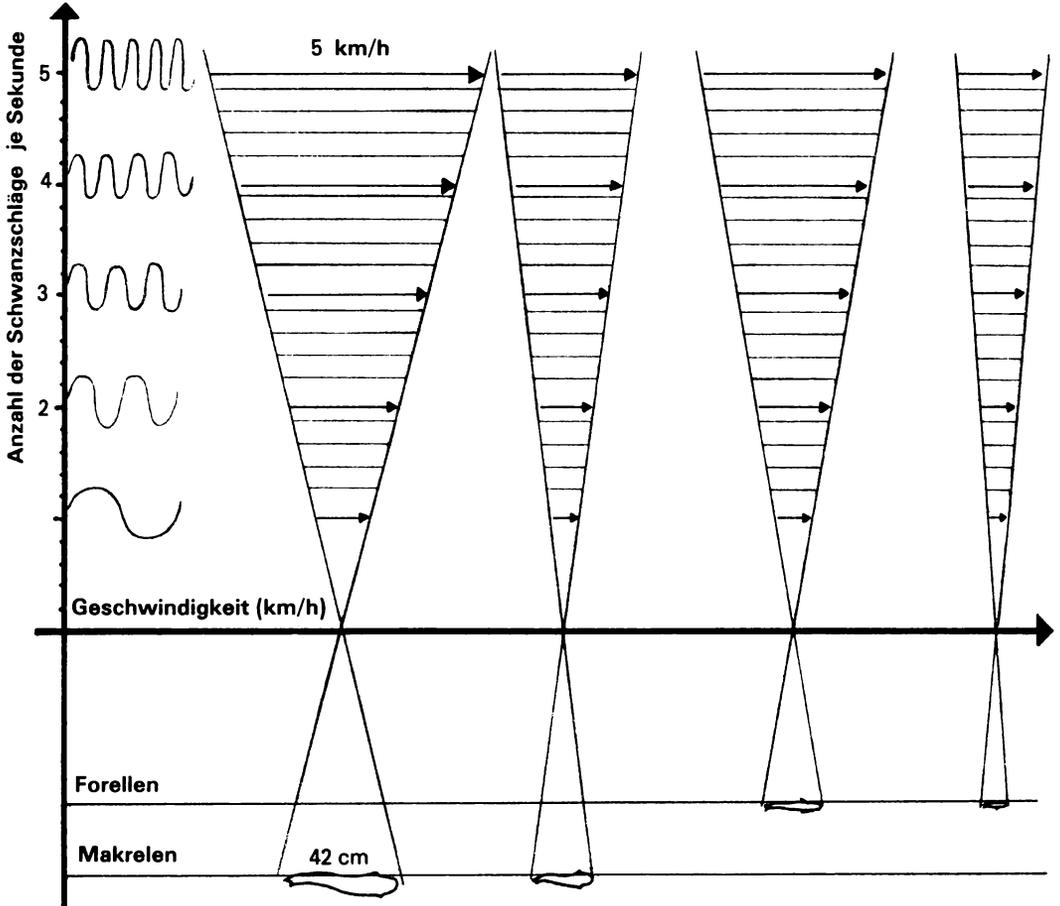
Thunfische und des Hais hingegen ist so breit, daß sie aus der Wasserwirbelzone weit herausragt, so daß sie in vollkommener Weise als Steuerruder benutzt werden kann.

Eine weitere Besonderheit ist an der Schwanzflosse der Haie und der Thunfische festzustellen: Die obere Seite der Flosse ist größer als die untere. Das ist nicht zufällig! Während der Schwanz

beim Schwimmen rechts und links ausschlägt, wölbt er sich gleichzeitig etwas im Wasser wie eine quer gehaltene Ruderschaukel, so daß er nicht nur Schubkraft, sondern auch Auftriebskraft entfaltet. Fische ohne Schwimmblase sind auf diesen „Trick“ angewiesen, sonst würden sie während des Schwimmens immer tiefer sinken. Mit ihren gewissermaßen zu kleinen Flügeln versteiften

Brustflossen erhöhen sie ebenfalls die Auftriebskraft. Die schnellschwimmenden Meerestiere erinnern somit wahrhaftig an schwimmende Flugzeuge.

Die Natur hat im Laufe der Stammesgeschichte jedoch auch andere Möglichkeiten erprobt. So sind zum Beispiel bei den Gitarrenfischen die Brustflossen äußerst groß entwickelt, wodurch sie auf Schwanzflossen nicht angewiesen



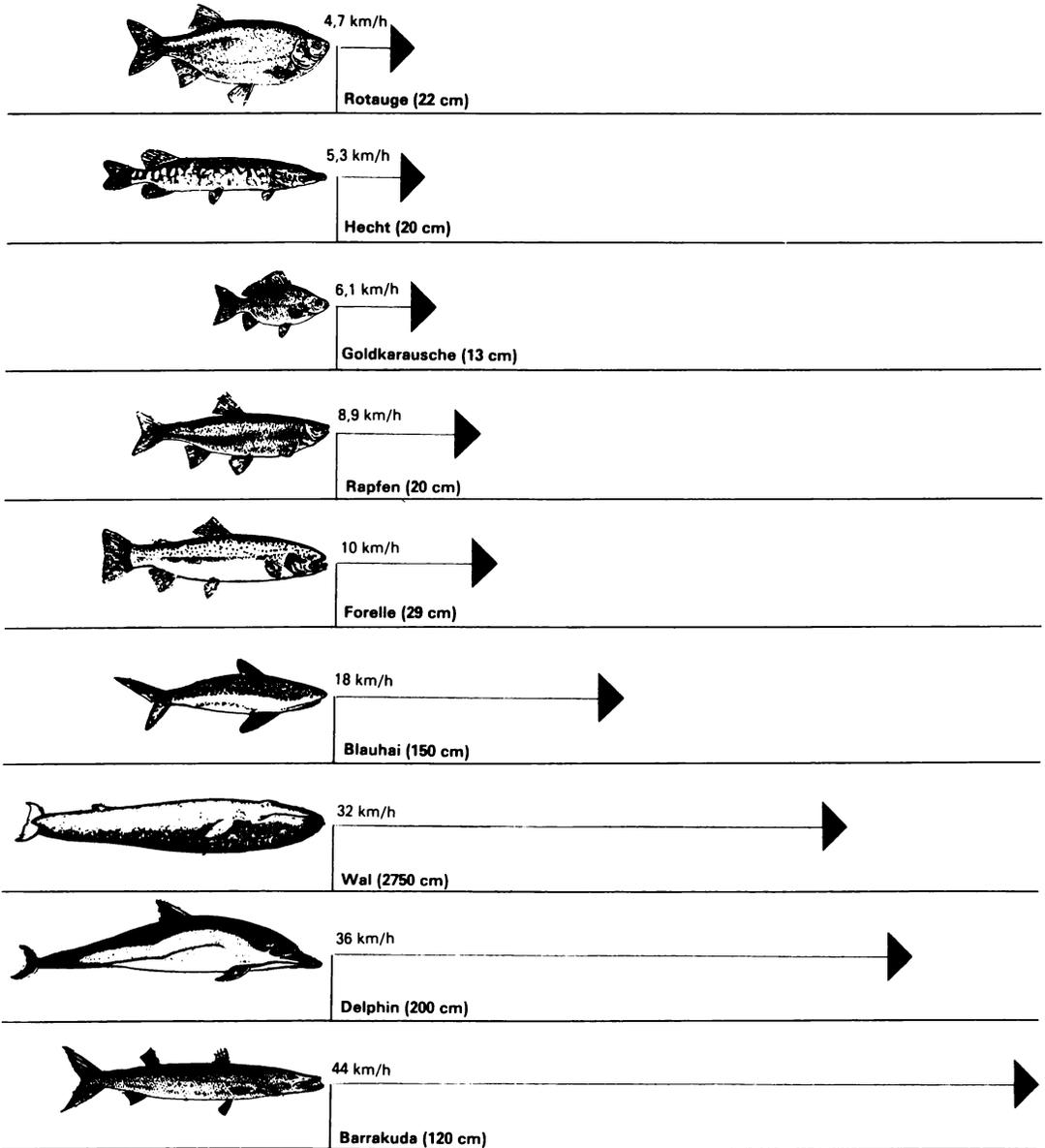
Die „Antriebsmotoren“ der Fische funktionieren mit einer beinahe ingenieurmäßigen Genauigkeit. Zwischen der Länge, der Anzahl der Schwanzschläge und der Schwimmgeschwindigkeit besteht eine mathematische Wechselbeziehung. So kann die „Geschwindigkeitsschere“ einer jeden Fischart aufgezeichnet werden. Die Fischarten werden zwischen den unteren Bügeln der Schere angeführt, so daß aus der Tabelle zu entnehmen ist, daß die Schwimmgeschwindigkeit von der Anzahl der Schwanzschläge abhängt. Der kürzere Biegel der Geschwindigkeitsschere von Forellen bedeutet, daß diese Fischart ein besserer Schwimmer als die Makrele ist.

sind. Die bei den Rochen zur enorm großen Pelerine umgebildete Brustflosse machte bei den meisten Fischen dieser Art die Schwanzflosse ebenfalls überflüssig. Diese in ihrem Aussehen einer lebenden Untertasse ähnelnden Fische wenden im wesentlichen die Methode des senkrechten Wellenschwimmens an. Die Schubkraft wird durch die an ihrem waagrecht kreisenden scheibenförmigen Körper nach hinten treibenden Wellen produziert. Gewohntermaßen lauern sie im Sand der Ufergewässer auf ihre arglosen Opfer, denn dies ist für sie in der Tat die vorteilhafteste Bewegungsform, ansonsten könnten sie nur schwimmen, wenn sie ihren Körper „hochkant“ stellen würden.

Die Reihe der Schwimmmarten von Fischen wollen wir mit dem Goldbutt abschließen. Dieser große runde Fisch von einem halben Meter Durchmesser schwimmt in seiner Jugend noch in Form von aalartigen Wellenbewegungen in vertikaler Richtung. In einem bestimmten Abschnitt seiner Entwicklung dreht er sich jedoch zur Seite, und von da an bewegt sich und jagt der Goldbutt nur noch am Meeresboden. Dabei wandert ein Auge allmählich von unten auf die Oberseite; sein „Gesichtsausdruck“ wirkt dadurch so eigentümlich „trübseelig“. Von da an ähneln seine Schwimmbewegungen völlig denen der Rochen.

So wie wir auf Grund der Form eines Kraftfahrzeugs oder Flugzeugs entsprechend den Regeln aerodynamischer Gesetze auf deren Geschwindigkeit schließen können, genauso genügt es, einen Blick auf einen Fisch zu werfen, und wir können uns sofort eine Vorstellung über seine Schwimmfähigkeit machen. Ein Fisch kann zweifelsohne um so schneller schwimmen, je pfeilförmiger seine Schwanzflosse, je stromlinien-

förmiger sein Körper, je schmaler sein Rumpf vor der Schwanzflosse und je kleiner seine Rückenflosse ist. Doch es gibt noch einen ausschlaggebenden Gesichtspunkt! Die Fortbewegungsgeschwindigkeit hängt auch von der Körperlänge und der Anzahl der Schwanzschläge ab. Messungen des sowjetischen Forschers S. W. Persin zufolge erreichen im allgemeinen die aalartig schwimmenden Fische – die eine Länge bis zu 2 Metern erreichen können – eine Geschwindigkeit von höchstens 10 Kilometern in der Stunde; die mit Hilfe von Schwanzschlägen schwimmenden Fische hingegen sind theoretisch in der Lage, das Wasser mit einer Geschwindigkeit von 150 Kilometern in der Stunde zu durchqueren, falls sie länger als 1 Meter sind. R. Bainbridge, der das Schwimmen vieler Fischarten untersucht hat, konnte mit Hilfe von Filmaufnahmen mit einer Spezialekamera analytisch feststellen, daß sich bei der Erreichung der gleichen Geschwindigkeit die Anzahl der Schwanzschläge der Fische und ihre Körperlänge zueinander umgekehrt proportional verhalten. Doch vom Gesichtspunkt der Geschwindigkeit ist auf jeden Fall die Körperlänge ausschlaggebend! Eine 4 Zentimeter lange Forelle schlenkert vergeblich ihren Schwanz achtzehnmal in der Sekunde, das winzige Tierchen erreicht jedoch nur eine Geschwindigkeit von 2,3 Kilometern in der Stunde. Dies reicht nicht einmal aus, um einen am Ufer gehenden Fußgänger zu überholen. Thunfische, deren Körperlänge mitunter 1 Meter überschreitet, erreichen mit 10 Schwanzschlägen innerhalb einer Sekunde eine Geschwindigkeit von weit mehr als 70 Stundenkilometern. Dem Thunfisch würde demnach das Blaue Band genauso zustehen wie



Einige amtliche Schwimgeschwindigkeiten nach einer Zusammenstellung des englischen Professors James Gray. Zu den Fischen, die Spitzengeschwindigkeiten erreichen, werden von den Forschern Schwertfischarten und die Familie der Fahnenfische gerechnet. Nach Messungen des sowjetischen Experten W. P. Sotschiwko erreichen einzelne mehrere Meter lange Exemplare Geschwindigkeiten von 120 bis 150 Kilometern je Stunde.

dem schnellsten Passagierschiff, dem der Spitzengeschwindigkeit von 70 Ozeanriesen „United States“, das mit Kilometern in der Stunde den Ge-

schwindigkeitswettbewerb für die Überquerung des Atlantischen Ozeans gewann.

Im allgemeinen ist es nicht leicht, die Spitzenschwimmgeschwindigkeit von Fischen festzustellen. Deshalb werden in vielen Büchern oft äußerst unterschiedliche Angaben gemacht. Wenn ein Fisch einem schnellfahrenden Schiff ausdauernd folgt, ist die Messung verhältnismäßig einfach. Sowjetische Forscher haben vor einigen Jahren zur Prüfung der Schwimmgeschwindigkeit der Aalquappe eine interessante Methode angewandt. Auf dem Rücken eines gefangenen Fisches befestigten sie ein kleines, 25 Gramm schweres elektronisches Gerät. Dann setzten sie den Fisch wieder ins Wasser. Das Gerät sandte Ultraschalltöne aus, so daß man den Fisch vom Ufer aus genau verfolgen konnte. Dabei ermittelten die Forscher, daß sich die Schwimmgeschwindigkeit der Aalquappe entsprechend den Tageszeiten ändert. Während des Tages bewegt sie sich kaum, nach Sonnenuntergang werden ihre Bewegungen immer lebhafter, doch nie schwimmt sie schneller als 600 Meter in der Stunde.

Eine weitere Meßmethode besteht darin, den Fisch in einen durchsichtigen, mit Wasser gefüllten Behälter zu setzen; das zylinderförmige Gefäß wird nun mit immer schnellerer Geschwindigkeit gedreht. Wenn es, von oben aus betrachtet, auch aussieht, als stünde der Fisch auf der Stelle, so entspricht seine Schwimmgeschwindigkeit in Wirklichkeit der Drehgeschwindigkeit des Behälters. Zwei englische Forscher konnten dadurch feststellen, daß beispielsweise ein 55 Zentimeter langer Dorsch eine Schwimmgeschwindigkeit von 7,2 Kilometern in der Stunde erreichen kann, Meeresforellen jedoch mit einer

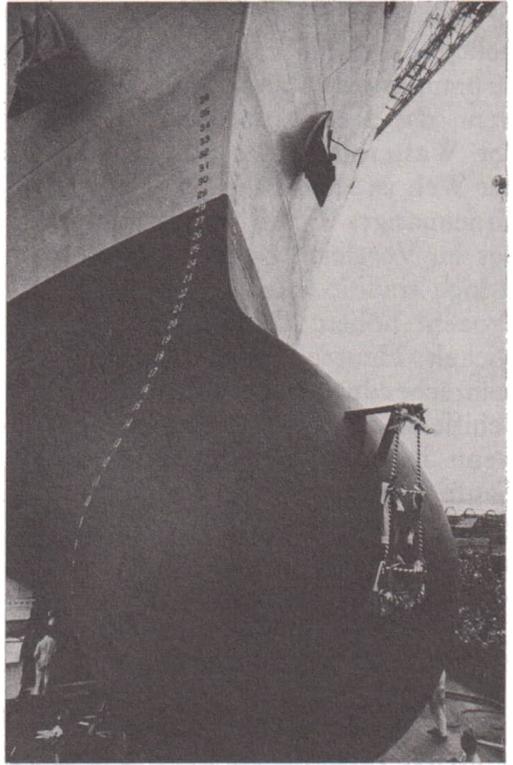
Geschwindigkeit von mehr als 10 Kilometern in der Stunde schwimmen.

Zu den Rekordschwimmern werden von den Forschern Schwertfische, Fahnenfische und die Barrakudas mit einer Geschwindigkeit von 120 bis 150 Kilometern in der Stunde gerechnet. Dies ist in der Tat bereits ein schwindelerregendes Tempo unter Wasser, denn selbst moderne Atomunterseeboote erreichen nur eine Stundengeschwindigkeit von 40 bis 50 Kilometern. Diese Angaben über Schwimmgeschwindigkeiten wurden jedoch unter laboratoriumsmäßigen Bedingungen noch nicht überprüft. Eins ist jedoch sicher, daß Fische auch mit ihrem spezifischen Schleim den Reibungswiderstand des Wassers an ihrem Körper verringern. Die amerikanischen Forscher M. W. Rosen und N. E. Cornford haben in unterschiedlichen Wassermengen die von der Haut von Fischen abgeschabte schleimige Substanz aufgelöst und die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers mit entsprechenden Instrumenten gemessen. Auf diese Weise konnte das Geheimnis um die Geschwindigkeit des Barrakudas aufgedeckt werden. Dieser Raubfisch kann durch die Schleimhaut den Reibungswiderstand seines Körpers im Wasser um 66 Prozent mindern. Da dieser Wert bei den Friedfischen bedeutend geringer ist, ist es kein Wunder, daß im wesentlichen dieser Vorzug zum erfolgreichen Beutewerb der Raubfische beiträgt.

Was lehren uns Fische?

Die spindelförmige starre Form der Unterseeboote ähnelt nicht besonders der Form der schnellschwimmenden Fische. Bioniker haben jedoch Versuche unternommen, um diese lebenden Fahrzeuge

zu kopieren. Die Projektierung des amerikanischen atomgetriebenen Unterseeboots „Skipjack“ erfolgte exakt nach dem Muster eines Thunfisches. Dabei wurde darauf geachtet, daß das Verhältnis der gesamten Länge zum größten Durchmesser des Unterseeboots 100:36 beträgt, was dem Schiffskörper eine ideale Stromlinie verleiht. Doch im Vergleich zur möglichen Geschwindigkeit des Thunfisches kann das



Bau des englischen Gasbehälterschiffs „Gazana“. Der Bug des 178 Meter langen Fahrzeugs quillt wie eine mächtige Birne aus dem Schiffskörper heraus. Diese strukturelle Lösung verringert wesentlich den Wellenwiderstand.



Selbst Flugzeugkonstrukteure könnten von Fischen lernen, wenn beispielsweise eine 40 Meter lange Boeing-Maschine des Typs 707 nach der Form des Thunfisches gebaut würde. An Stelle der bisher 160 hätten 480 Reisende Platz, und die aerodynamischen Eigenschaften wären auch günstiger (oben). Das als Senkrechtstarter projektierte Flugzeug würde von seitlich angebrachten Strahltriebmotoren in die Luft gehoben werden (unten). Die Modelle wurden von Professor H. Hertel projektiert.

Unterseeboot nur die Hälfte dieser Geschwindigkeit erreichen. Im Bereich der Manövrierfähigkeit hingegen hat sich das neue Unterseeboot als besonders wendig erwiesen. Ein größeres Schiff kann im allgemeinen hinsichtlich seiner eigenen Länge nur in einem vier- bis fünfmal größeren Umkreis wenden, die „Skipjack“ hingegen ist in der Lage, selbst bei großer Geschwindigkeit den Kurs mit einemmal zu ändern und in einem kleineren Umkreis zu wenden.

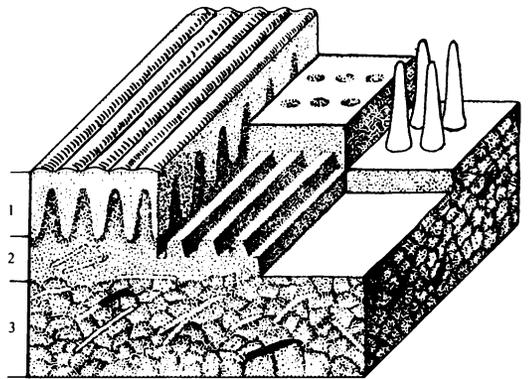
Schiffsprojektanten nutzen auch die Erkenntnis, daß die „Nase“ schnellschwimmender Wassertiere nicht zufäl-

lig stumpf ist. Merkwürdigerweise entsteht dadurch im Wasser ein geringerer Strömungswiderstand, besonders dann, wenn das Tier in unmittelbarer Nähe der Wasseroberfläche schwimmt. Auf der Welt ist erstmals in Japan solch ein birnennasiges Schiff gebaut worden, das im Vergleich zu einem ähnlichen, jedoch traditionellen Typ eine um 50 Prozent höhere Geschwindigkeit entwickelt. Heutzutage findet diese wellenbrechende Lösung beim Bau neuer Schiffe immer mehr Anwendung, und wenn in den Fernsehnachrichten die Taufe eines neuen Ozeanschiffs gezeigt wird, können wir mit Sicherheit am Unterteil des Vorderstevens die charakteristische Ausbuchtung feststellen. Zahlreiche Konstrukteure versuchten die Bewegung des Schwanzschlags der Fische mittels mechanischer Vorrichtungen nachzuahmen. Dabei wurden Boote konstruiert, bei denen an Stelle von festen Rudern elastische Steuerruder angebracht sind, die durch entsprechende Rechts-Links-Bewegungen Schubkraft im Wasser entfalten.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß Ingenieure die Idee des Baus von Tragflächenbooten den Haien zu verdanken haben. Genauso, wie an der steifen Brustflosse des Hais eine erhebliche Auftriebskraft entsteht, kann auch ein schwerer Schiffskörper mittels einiger kleiner, fester Tragflügel über das Wasser gehoben werden. Sobald das Boot eine bestimmte Geschwindigkeit erreicht hat, erhebt es sich, sich auf die unter Wasser befindlichen Tragflügel stützend, aus dem Wasser; dadurch kann es sich mit einem bedeutend geringeren Widerstand bewegen. Unter den sowjetischen Tragflächenbooten erreicht die auch auf der Donau verkehrende „Möwe“ eine Geschwindigkeit

von 60 Kilometern in der Stunde, die Boote des Typs „Wolga“ und „Raketa“ erzielen sogar 80 bis 90 Kilometer je Stunde.

Vor fast vierzig Jahren richtete das damals berühmt gewordene Gray-Paradoxon erstmalig die Aufmerksamkeit der Bioniker auf die Delphine. Der englische Forscher Gray stellte nämlich fest, daß Delphine sonderbarerweise eine höhere Geschwindigkeit erreichen, als auf Grund ihrer Muskelkraft und Körperform zu erwarten wäre. Die Untersuchungen konzentrierten sich schließlich auf die Delphinhaut. Man stellte dabei fest, daß sich unter der äußeren dünnen Oberhaut eine sogenannte Dämpfungsschicht befindet. Diese elastisch verformbare Dämpfungsschicht ist von engen Kanälen durchzogen. Unter der Dämpfungsschicht liegt eine starke Lederhaut aus elastischem Gewebe. Die Kanäle der Dämpfungsschicht



Die Delphinhaut ist in ihrer Elastizität jedem Polstersessel überlegen. Unter der mit feinen Rillen durchzogenen äußeren Oberhaut, der „Dämpfungsschicht“ (1), befinden sich die Lederhaut (2) und die Bindegewebefasern (3).



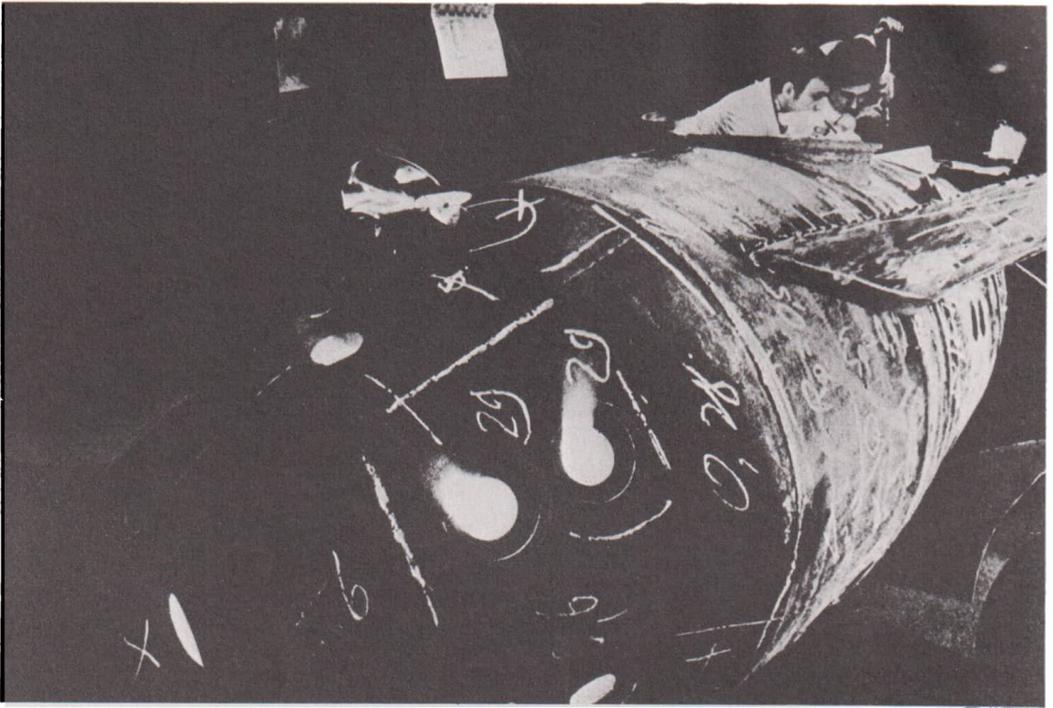
Die Proportionen des Delphinkörpers begünstigen die hohe Schwimmgeschwindigkeit: Der Körper ist viermal so lang als sein größter Durchmesser.

schicht sind mit einer öligen Flüssigkeit gefüllt. All dies sagte den Biologen nicht besonders viel, doch die Fachexperten für Bionik waren darüber sehr erstaunt. Diese mehrschichtige Haut ist so elastisch wie ein erstklassig gepolstertes Sofa. Wird die Haut einem Druck ausgesetzt, buchtet sie sich leicht ein, wobei aus den Kanälen der Dämpfungsschicht Öl herausgepreßt wird.

Wofür soll diese eigentümliche Delphinhaut gut sein? Untersuchungen im Wasserkanal brachten dann die Lösung: Diese Besonderheit der Delphinhaut vermindert die Reibung der Wasserströmung auf ein Minimum. Lediglich

im Bereich des Schwanzansatzes brechen noch Wasserwirbel ein, welche die Bewegungsenergien des schwimmenden Körpers im Wasser beeinträchtigen. Diese an und für sich geringen Wasserwirbel werden durch die den ganzen Körper entlanglaufende elastische Haut in vollkommener Weise abgedämpft, so daß der stromlinienförmige Delphin eine Geschwindigkeit von mehr als 50 Kilometern in der Stunde erreichen kann.

Die Gleitfähigkeit des Delphins wird auch dadurch noch erhöht, daß seine Haut wasserabstoßend ist. Entsprechende Messungen der sowjetischen



Sowjetische Forscher haben die hydrodynamischen Eigenschaften der Delphinform eingehend studiert und danach Unterwasserversuchsfahrzeuge gebaut.

Forscher A. Glagoljewa und Z. Alfonin ergaben, daß auf einer solchen Oberfläche weniger Wasserwirbel entstehen als auf einer „feuchten“ Hautschicht. Der wasserabstoßende Körper verhält sich im Wasser so, als gleite er auf einem Wellenlager: Um ihn bilden sich aus den Molekularansammlungen ringförmige Falten. Die Wasserschicht an seiner Oberfläche schmiegt sich wie eine Molekularmembrane eng an den Körper des Delphins an und wirkt dadurch erheblich der Entstehung energievereschlingender Wasserwirbel entgegen.

Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde im Jahr 1960 vom amerikanischen Forscher O. Kramer das als *Laminoflow* bezeichnete Kunstleder hergestellt. Zwischen den laminaren Grenz-

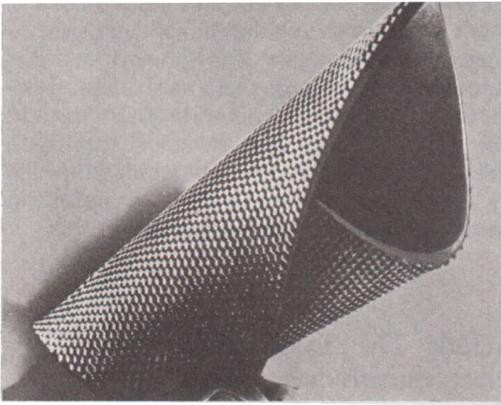
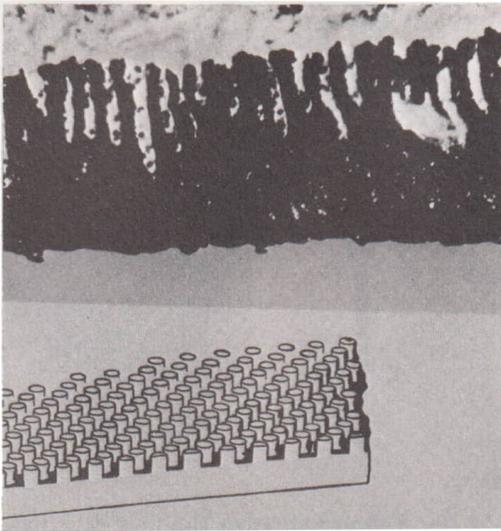
schichten dieser 3,5 Millimeter starken elastischen Kunststoffplatte sind in regelmäßigen Abständen kleine Stifte angebracht, die sich bei einer äußeren Krafteinwirkung wie die Kanalpapillaren der Lederhaut des Delphins zusammendrücken. Der Raum zwischen den Stiften wird mit einer schwingungsdämpfenden Flüssigkeit ausgefüllt. Dieser der Delphinhaut nachgemachte Kunststoff hat die in ihn gesetzten Hoffnungen vollauf erfüllt. So wurden Torpedoboote mit einem Überzug aus Laminoflow gebaut, wodurch die Boote eine um 30 Prozent höhere Geschwindigkeit als die früheren stahlgepanzerten Boote erreichten. Auf der Suche nach weiteren Möglichkeiten beschäftigten sich Forscher im Bereich der Bio-

Achtung! Wir tauchen!

„Wir tauchen weiter, jetzt jedoch sehr langsam. Unser Benzinvorrat kühlt weiter ab, dadurch dringt immer mehr Wasser durch die Zusammenziehung des Benzins in die Schwimmtrommel, was uns nach und nach immer größere Schwierigkeiten bereitet. Ich empfinde es so, als strömten diese vielen hundert Liter Wasser durch meine Adern.“ Dies schrieb Jacques Piccard, der berühmte Meerestiefenforscher, der in der Tat einem außerordentlichen Erlebnis teilhaftig wurde. Mit seinem Bathyskaph „Trieste“ tauchte er am 23. Januar 1960 im westlichen Teil des Stillen Ozeans und erreichte im Marianengraben eine der tiefsten Stellen des Weltmeeres: 10 912 Meter.

Im Ruhezustand schwimmt dieses besondere Tiefseeforschungsschiff auf der Wasseroberfläche. Um zu sinken, muß es schwerer werden. Woher erhält das Schiff das erforderliche Mehrgewicht? In der Schwimmtrommel der „Trieste“ werden mehr als 100 Kubikmeter Leichtbenzin gelagert. Auf das Tauchkommando öffnen sich Ventile, durch welche Meereswasser in die Benzinbehälter eindringt. Der zunehmende Wasserdruck preßt die leichte Flüssigkeit auf einen immer kleineren Rauminhalt zusammen, die Behälter werden ständig schwerer, und das Tauchschiff beginnt zu sinken.

Will man wieder auftauchen, wird Benzin in die Schwimmtrommel gepumpt. Das leichtere Benzin verdrängt das Wasser nach außen, und das Tiefseetauchgerät steigt an die Oberfläche. Auf Unterseebooten werden die Tauchbehälter im allgemeinen nur mit Luft gefüllt, und wenn sie wieder nach oben steigen sollen, wird das Meereswas-

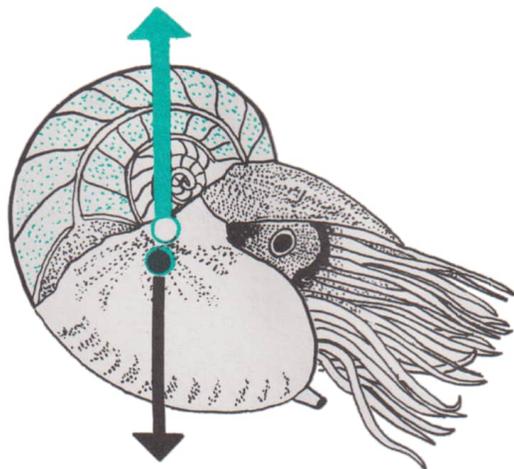


Die Lederhautgranülen der elastischen Delphinhaut unter dem Mikroskop (oben). Dieses „Patent“ der Natur wurde von der Technik kopiert (Mitte). Die fußmattenähnliche künstliche Delphinhaut (unten), in mehreren Schichten zusammengeklebt und mit einer Flüssigkeit gefüllt, reduziert die hemmende Bremswirkung der Wasserwirbel.

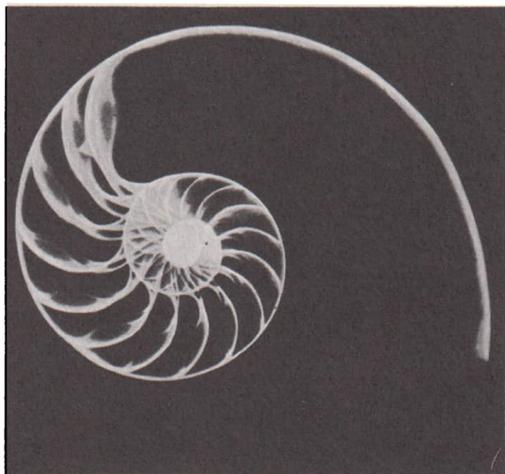
nik bereits mit dem Problem, wie man mit dieser künstlichen Delphinhaut die Geschwindigkeit von Ozeanschiffen erhöhen könnte.

ser mit komprimierter Luft herausgedrückt.

Dieses sinnvolle und einfache Tauchverfahren wird in der Natur bereits seit Jahrmillionen angewandt. Eine uralte Variante des berühmten Unterseeboots „Nautilus“ von Kapitän Nemo ist der zu den Kopffüßern gehörende Schneckenpolyp Nautilus, auch als „Perlboot“ bezeichnet. Der Nautilus „weiß“ es seit mehr als 50 Millionen Jahren, wie man außerordentlich schnell einige hundert Meter tief tauchen und dann wieder an die Oberfläche gelangen kann. Das Tier selbst lebt in einer spiralförmigen, jedoch durch eine Membranhaut abgeteilten äußeren Kammer seines Gehäuses, gewissermaßen am Eingang seiner „Wohnung“. Die inneren Kammern sind teils mit Gas und teils mit Wasser



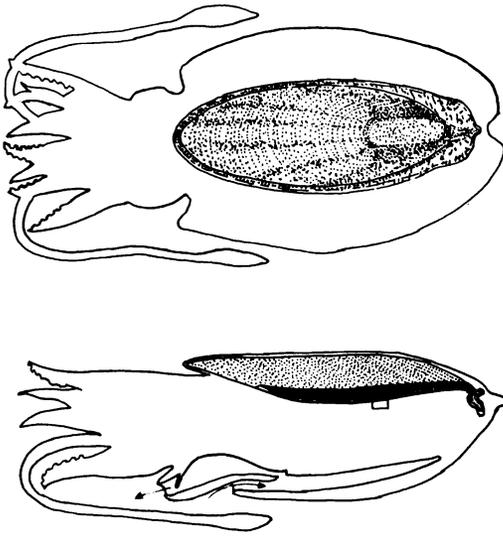
Will der Schneckenpolyp Nautilus tauchen, läßt er Wasser in die mit Gas gefüllten Kammern einströmen, wodurch sich sein spezifisches Gewicht erhöht. Der Schwerpunkt des Nautilus liegt in ausgeglichenem Zustand tiefer als der auf ihn einwirkende Angriffspunkt der Auftriebskraft. Der Nautilus kann sich deshalb im Wasser nicht überschlagen; falls er unerwartet umkippt, kehrt er sofort in seine waagerechte Schwimmlage zurück.



Röntgenbild vom Kalkgehäuse des Schneckenpolyps Nautilus; es stellt auf Grund der räumlichen Konstruktion in Form einer Schraubenwindung ein mathematisches Meisterstück dar. Das Tier selbst belegt den schwarz aussehenden Hohlraum des seltsamen Wohngehäuses. Die gerippten Kammern sind mit Gas gefüllt, wodurch das Tauchen im Wasser geregelt wird.

gefüllt. Die Tauchautomatik funktioniert ebenso wie die der „Trieste“: Wenn es in die Tiefe tauchen will, läßt es immer mehr Wasser in die mit Gas gefüllten Kammern. So wird es schwerer und sinkt wie ein ins Wasser geworfener Stein in die Tiefe. Will es wieder auftauchen, preßt es mit Hilfe von Gas das Meereswasser aus den Kammern heraus, wodurch sich die auf die Membranhaut einwirkende Auftriebskraft erhöht und der Nautilus wie eine Luftblase in die Höhe steigt.

Ein naher Verwandter der Polypen, die Sepia, sorgte ebenfalls für eine Überraschung bei den Biophysikern. Von dem im allgemeinen als Tintenfisch bezeichneten Tier ist überwiegend nur bekannt, daß es beim Herannahen eines



Die ovale Knochenscheibe der Sepia (Ansicht von oben) ist ein überaus geeigneter Tauchbehälter. Vor dem Tauchen saugt die Sepia Wasser in die poröse Kalkplatte (unteres Bild – Seitenansicht), wodurch sich ihr Gewicht erhöht. Beim Auftauchen wird dieser Vorgang in entgegengesetzter Weise vorgenommen.

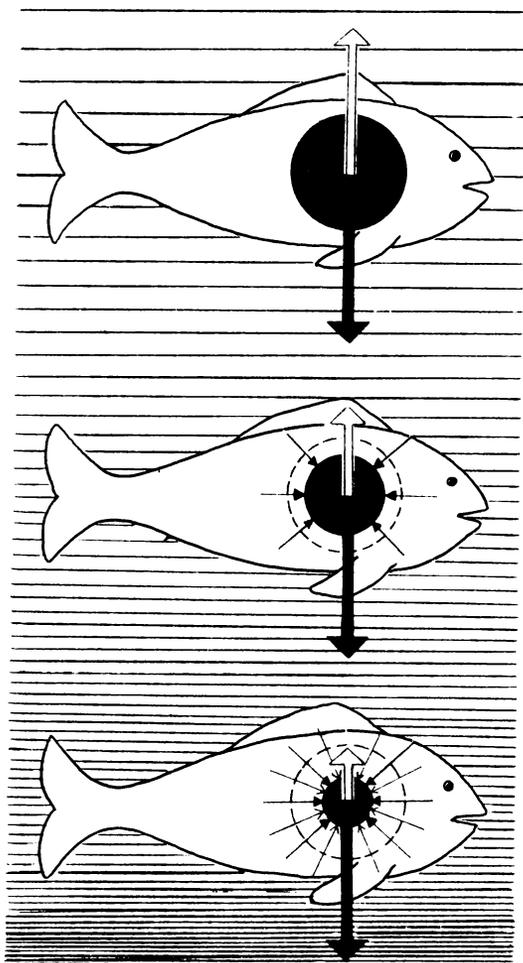
Feindes plötzlich eine schwarzbraune Flüssigkeit („Tinte“) verspritzt, wobei es das Wasser um sich dunkel färbt, um sicher Reißaus nehmen zu können. Genaue biologische Untersuchungen jenes flossenähnlichen flachen Schulp, der sich unter der Haut der gesamten Körperlänge des Tintenfisches entlangzieht, haben ergeben, daß dieser Schulp lediglich ein Zehntel seines Körpergewichts ausmacht. Unter dem Mikroskop konnten an der Kalkplatte ungefähr 100 dünne, löchrig-poröse Schichtstrukturen entdeckt werden. Nachdem die Dichte des Schulp mit 0,6 Gramm je Kubikzentimeter ermittelt wurde, konnte er befriedigt beiseite gelegt werden. Die Erklärung ergab sich von selbst: Die Masse eines 1000 Kubikzen-

timeter großen Tintenfisches beträgt nur 960 Gramm, weil er durch das geringere spezifische Gewicht der Kalkplatte von seinem Gesamtgewicht 40 Gramm „verliert“. So kann die Sepia überall geruhsam auf dem Wasser treiben.

Dieser sonderbare Schulp ließ die englischen Forscher E. Denton und J. B. Gilpin-Brown nicht zur Ruhe kommen. Warum schleppt jeder Tintenfisch mit solcher Ausdauer diese beträchtliche Masse mit sich? Sie führten Experimente in Meeresaquarien durch, indem sie Sepiaexemplare von der Oberfläche und dem Boden des Meeres einsammelten und untersuchten. Auf Grund von Gewichtsmessungen an Schulpen der Tintenfische konnten aufschlußreiche Abweichungen festgestellt werden. Die Schulp der auf dem Meeresboden aufgefundenen Tintenfische ergaben ein spezifisches Gewicht von 0,7, wobei 30 Prozent des Gesamtgewichts auf das in dem haarfeinen Strukturgefüge befindliche Wasser zurückzuführen war. Hingegen betrug das spezifische Gewicht der Schulp von den an der Wasseroberfläche eingesammelten Kopffüßern nur 0,5, und sie enthielten nur 10 Prozent Wasser.

Damit wurde den Forschern ihre Vermutung bestätigt. Die Kalkplatte der Sepia ist demnach nicht nur ein einfacher „Rettungsring“, sondern auch ein selbstfunktionierender Tauchbehälter. Vor dem Tauchen pumpt der Tintenfisch – mit Hilfe des Blutkreislaufs – Meereswasser in seinen Schulp. Je mehr Wasser in ihn eindringt, um so größer wird sein spezifisches Gewicht und damit auch das Gesamtgewicht des Tintenfisches. Das Tier beginnt zu sinken. Will es sich jedoch in obere Wasserregionen begeben, preßt es das Was-

ser aus den winzigen Kanälen des Schulp's heraus. Welcher Methode bedient sich dabei der Tintenfisch? Darauf konnte bisher noch keine Erklärung ge-



Treibt der Fisch in vollkommener Ruhe im Wasser, ist die auf seinen Körper einwirkende Auftriebskraft genau mit dem Eigengewicht ausgeglichen (oberes Bild). Beim Tauchen zieht er die Schwimmblase zusammen. Dadurch reduziert sich das Volumen des Körpers, es verringert sich zugleich die auf ihn einwirkende Auftriebskraft, und er beginnt zu sinken (mittleres Bild). Je mehr sich der Tauchbehälter zusammenzieht, eine um so größere Tauchgeschwindigkeit erreicht der Fisch (unteres Bild).

funden werden. Tatsache jedoch ist, daß im Verlauf von Probefängen im Hafen von Plymouth selbst in einer Tiefe von 30 bis 75 Metern Tintenfische gefunden wurden; anderen Angaben zufolge tauchen diese sonderbaren lebenden Unterseeboote bis in eine Tiefe von 180 Metern.

Fische tauchen mit vollkommeneren Methoden. Sie mühen sich nicht damit ab, Wasser in ihren Körper hinein- oder aus ihm herauszupumpen. Sie bedienen sich eines elastischen Gasbehälters, der – ausgedehnt – die auf ihren Körper einwirkende Auftriebskraft erhöht und – zusammengezogen – sie reduziert. Diese besondere Vorrichtung – die Schwimmblase – hat eine doppelte Funktion: Einerseits gleicht sie in jeder Wassertiefe den auf den Körper einwirkenden Wasserdruck aus, andererseits reguliert sie das Tauchen beziehungsweise das Aufsteigen.

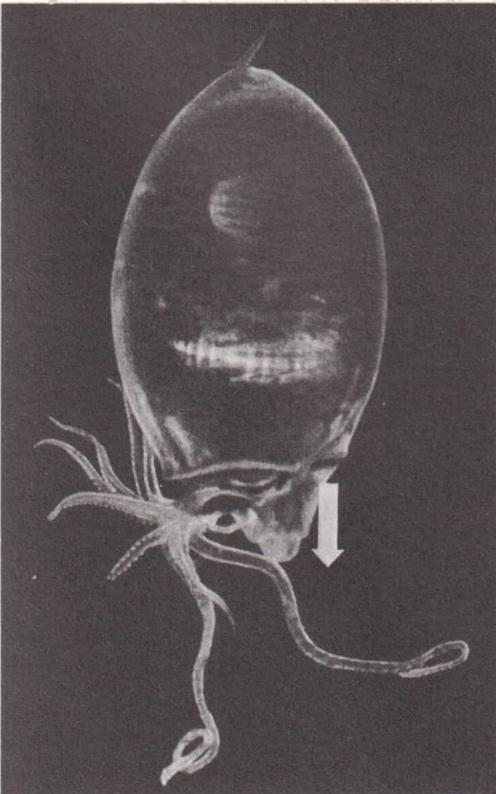
Diese sonderbaren „Luftballons“ sind im Organismus der meisten Knochenfische vorhanden, doch bei den niedrigeren Arten der Knorpelfische (dazu gehören Haie, Rochen usw.) fehlen sie vollkommen. Im allgemeinen befindet sich die Schwimmblase unter der Wirbelsäule, und je nachdem, ob sie eine freie Öffnung nach außen hat oder nicht, unterscheiden die Biologen Fische mit luftzugänglichen und geschlossenen Schwimmblasen. Fische mit luftzugänglichen Schwimmblasen – so die Karpfenlarven – schwimmen, nachdem sie aus dem Fischlaich geschlüpft sind, einen oder eineinhalb Tage an der Wasseroberfläche, um ihre Schwimmblase mit Luft „vollzutanken“.

Die sowjetischen Forscher Kostojanz und Wassilenko untersuchten, ob diese „geschluckte“ Luft unverändert in der Schwimmblase von Fischen mit offenem

Luftzugang erhalten bleibt. Erstaunlicherweise wurde in der Blase eine ganz andere Gaszusammensetzung vorgefunden, als sie in der freien Luft vorkommt. Die Schwimmblase des Meer-aals ist zu 87,7 Prozent mit Sauerstoff gefüllt, in der von Regenbogenforellen wurden hingegen 95,5 Prozent Stickstoff und nur 3,7 Prozent Sauerstoff gemessen, obwohl bekannt ist, daß die Luft 78 Prozent Stickstoff, 21 Prozent Sauerstoff und 0,03 Prozent Kohlendioxid enthält. Wieso gibt es derart große Unterschiede? Dies konnte bisher noch nicht festgestellt werden, doch die un-

terschiedliche Gaszusammensetzung ist offensichtlich auf verschiedenartige biologische Ursachen zurückzuführen.

Mit Hilfe der Schwimmblase kann der Fisch in jeder Wasserschicht gewissermaßen schwerelos im Wasser treiben und auch leicht schwimmen. Zur Fortbewegung braucht er lediglich durch den Schlag seines Schwanzes einige Energie aufzuwenden. Will ein mit einer luftzugänglichen Schwimmblase ausgestatteter Fisch tiefer sinken, drückt er einfach die Schwimmblase etwas zusammen, läßt dabei einige Luftblasen ab, und das spezifische Gewicht



Eine Art der Tintenfische, der *Heliocranchia pfefferi*, schwebt gern kopfüber nach unten. Dieser Tintenfisch nutzt seinen Körper, der mit einer leichteren Flüssigkeit als Wasser angefüllt ist, als Tauchbehälter. Bei schneller Ortsveränderung schaltet er auf Raketenantrieb um. Das physikalische Prinzip der „Wirkung – Gegenwirkung“ wird von ihm bereits viel länger angewendet als von der modernen Raketentechnik unserer Zeit.

seines Körpers wird um eine Nuance größer als das des Wassers. Falls er an die Oberfläche steigen will, drückt er seinen „Luftbehälter“ auseinander, so daß ihn das Wasser gewissermaßen von allein „hochwirft“.

Fische mit geschlossenen Schwimmblasen öffnen beim Sinken das Sicherheitsventil ihres „Gasbehälters“. Das Sicherheitsventil kann ähnlich wie die Blendvorrichtung bei Fotoapparaten reguliert werden, nur daß dies mit Hilfe von Muskelringen erfolgt: Bei der Öffnung gelangt überschüssiges Gas in den Blutkreislauf, die Schwimmblase zieht sich dadurch zusammen, und das Tier beginnt zu sinken. Das dabei entwichene Gas kann selbstverständlich wieder ergänzt werden und sogar durch eigenproduziertes Gas, das in den Gasdrüsen des Fisches hergestellt wird. Bei einem geringeren Höhenunterschied ändert der Fisch das Volumen seiner Schwimmblase lediglich durch Muskelkraft. Die Regulierung verläuft so präzise, daß das mühelose Treiben eines Aquarienbewohners jeden Betrachter von der Vollkommenheit dieser „Erfindung“ überzeugen kann.

Obwohl die Schwimmblase bei Knorpelfischen noch nicht entwickelt ist, helfen sich – wie wir wissen – zum Beispiel die Haie auf besonders einfache Weise: Mit Hilfe ihrer großen und starken Brustflossen heben sie ihren Körper während des Schwimmens wie auf unter Wasser befindliche Flügel. E. Corner und seine Mitarbeiter untersuchten vor einigen Jahren ein interessantes Problem. Weshalb befindet sich in der Leber einiger Tiefseehaiarten übermäßig viel ungesättigter Kohlenwasserstoff, der gegenüber Wasser ein geringeres spezifisches Gewicht besitzt? Entsprechende Untersuchungen gaben eine in-

teressante Antwort: Die Leber der Haie und anderer Arten erfüllt im Grunde genommen die Rolle der „Schwimmboje“. Als dann später die spezifischen Gewichte der Leber und des Haikörpers getrennt ermittelt wurden, stellte sich heraus, daß die Leber stets um so viel leichter als der restliche Körperteil schwerer als das Wasser war. Demnach bedienen sich die einzelnen Arten der Knorpelfische auch eines „Rettungs-rings“, allerdings nicht in Form einer Schwimmblase.

Dadurch wurde gleichzeitig das Rätsel um jenes biophysikalische Phänomen gelöst, weshalb an den Brustflossen nicht so viel Auftriebskraft entsteht, wie bei der kleinsten Schwimmgeschwindigkeit zur Hebung des Haifischkörpers unentbehrlich wäre. Jetzt ist es durchaus einleuchtend, daß diese Tiere auch mit kleineren Brustflossen zurechtkommen, weil ihre Leber im Salzwasser des Meeres für eine genaue Ausbalancierung des Körpers sorgt.

Lebende Taucherglocken

Als das Tauchgerät „Trieste“ im Marienegraben auf festen Boden stieß, entdeckten die Forscher in einigen Metern Entfernung einen lebenden Fisch. „Dieser etwa 30,5 Zentimeter lange und 15 Zentimeter breite Fisch, welcher offensichtlich der Familie der Plattfische angehörte, entfernte sich langsam, äußerst langsam von uns, wobei er zur Hälfte im Grundschlamm schwamm. Darauf verschwand er im Stockdunkeln, in sein unendliches Reich“, schrieb Jacques Piccard. Damit bekamen die Biologen endlich eine Antwort auf die alte Frage: Bis zu welcher Tiefe können Fische im

Ozeanwasser leben? Nunmehr ist es eindeutig, daß sie selbst vor der größten Tiefe nicht zurückschrecken.

Wie kann ein lebender Organismus diesem enormen Wasserdruck standhalten? Nach Überschlagsrechnung ist der Fischkörper in einer Tiefe von 10 Kilometern einem Wasserdruck von 10 kN/cm² ausgesetzt. Ein solcher Druck wirkt vergleichsweise auf ein Stück Würfelzucker ein, auf dem 20 Sack Zement liegen. Wir können uns sicherlich leicht vorstellen, wie der Würfelzucker auseinanderbrechen würde – der Fisch jedoch hält diesem Druck stand, wofür es die naheliegende Erklärung gibt: Seine Körpersubstanz besteht zum größten Teil aus Wasser. Wasser jedoch läßt sich erfahrungsgemäß nicht zusammendrücken.

Was durch die Anpassung des Organismus der Tiefseefische verständlich erscheint, ist im Fall der 20 bis 25 Meter langen Pottwale um so unverständlicher. Diese Großsäuger wagen sich selbst in eine Tiefe von mehreren tausend Metern vor. So wurde beispielsweise im Jahr 1951 in einer Tiefe von 2200 Metern ein im Unterseekabel zwischen Lissabon und Malaga verfangener toter Pottwal gefunden. Wie konnte der Pottwal in eine solche Tiefe gelangen? Untersuchungen zufolge befinden sich in den Luftwegen der Lunge von Pottwalen kleine Klappen. Taucht das Tier in die Tiefe, so schließt sich dieses komplizierte Schleusensystem. Auch bei Drücken von 1 kN/cm² (= 100 kp/cm²), denen der Körper des Wales ausgesetzt ist, entweicht diese Luft nicht aus dem Körper. Gleichzeitig befinden sich im Blut des Wals eine große Menge Atmungspigmente (Hämoglobin), die durch ihren reichen Sauerstoffgehalt den Organismus bei erhöhter Beanspru-

chung unterstützen. Die Muskeln des Wals binden ebenfalls viel Sauerstoff, deshalb ist sein Fleisch so dunkelrot. Und schließlich die wichtigste Gewähr für das Tieftauchen: Sein Körpergewebe ist fast zu 100 Prozent mit einer druckbeständigen Flüssigkeit durchsetzt.

Eine andere interessante Variante der lebenden Unterseeboote sind die Vertreter der Staatsquallen, die eine eigentümliche Tiergemeinschaft bilden. Die kleinen, schlauchförmigen Polypen siedeln auf festsitzenden Generationen, wobei das ganze System einer gutorganisierten Jagdgemeinschaft ähnelt, die gerade ein Schiff oder, besser gesagt, ein Wasserluftschiff bestiegen hat. An der Oberfläche der Kolonie befindet sich eine Luftblase. Die „Schwimboje“ der als *Stephanomia* bezeichneten Tiere ist beispielsweise nicht größer als ein Stecknadelkopf, doch sie hält die gesamte „Gesellschaft“ schwebend an der Oberfläche des Wassers. Diese winzige Kugel ist gewissermaßen das Tauchgerät der Tiere. Das Tierchen kann mit einer entsprechenden Muskelbewegung oben an der Gaskugel ein kleines Ventil öffnen oder schließen. Wenn das Gas herausgelassen wird, sinkt das Tier blitzschnell zu neuen Jagdgründen in die Tiefe. Will es wieder nach oben steigen, treten die Gasdrüsen in Aktion, füllen die Kugel, und das „Wasserluftschiff“ der *Stephanomia* steigt in die Höhe.

Die *Hippopodius*, die gleichfalls zur Ordnung der koloniebildenden Medusen gehört, ist sogar in der Lage, das Tauchen zu beschleunigen. Droht ihr Gefahr, lichtet sie den Anker: Sie hebt die tiefer hängende Stammkolonie zwischen ihren Schwimmglocken hoch. Dadurch verlagert sich das gesamte

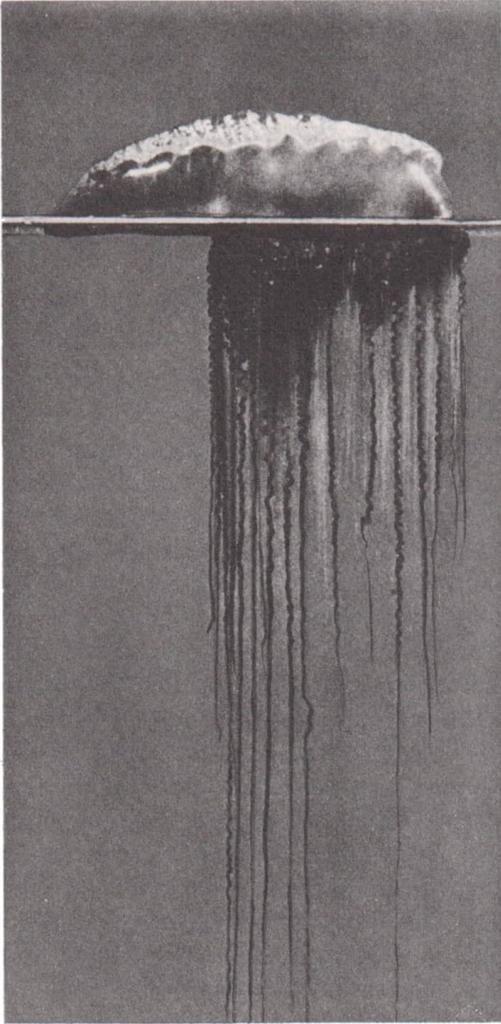
Schwergewicht der Kolonie, und die Hippopodius kippt wie ein überladener Kahn jählings um, obwohl sie noch an

der Wasseroberfläche treibt. Daraufhin schaltet sie ihren Wasserstrahlantrieb ein und sinkt „kopfüber“ in die Tiefe.

Der Wasserstrahlantrieb ist eine der ältesten Erfindungen der Natur. Er beruht auf dem physikalischen Prinzip, daß jeder Kraft eine gleich große Gegenkraft entgegenwirkt, wie beispielsweise auch ein abgefeuertes Gewehr „zurückstößt“. Raumforschungsraketen können gleichfalls aus diesem Grund durch den luftleeren Raum jagen: Die entstehende Kraft beim Ausströmen der heißen Gase aus der Raketendüse wirkt in gleicher Stärke auf die Rakete ein und treibt sie ins „Nichts“ nach vorn.

Tiere stoßen freilich an Stelle von Gasen Wasser aus. Dieses einfache Triebwerk wird von den aus der Urwelt stammenden Schneckenpolypen und auch von den graziös auf dem Wasser treibenden Medusen angewandt. Die Meduse läßt zunächst das Wasser in ihre Kuppel einströmen, zieht darauf die am Rand der Kuppel verlaufenden ringförmigen Muskeln zusammen und spritzt das Wasser blitzschnell aus der Verengung.

Den Medusen ähnlich, insbesondere deren transparentem Körper, sind Salpen. Diese zum Unterstamm der Manteltiere gehörenden sonderbaren Wesen haben ein effektives Zweitaktpumpensystem entwickelt. Nachdem sie durch ihre Mundöffnung das Wasser in ihren Körperhohlraum aufgenommen haben, schließen sie das eigens dafür entwickelte Einlaßventil und pressen durch Kontraktion ihres Hautmuskelschlauchs das Wasser aus der hinteren Körperöffnung wieder heraus. Die Larve der Libelle verbindet den Rückstoßantrieb mit der lebensnotwendigen Atmung. Wegen der Aufnahme von Sauer-



Die Blasenmeduse *Physalia* schwimmt so leicht auf der Wasseroberfläche wie ein ins Wasser geworfener Luftballon. Der an der Wasseroberfläche ausgebreitete hellglänzende Streifen ist das Segel, in das selbst die sanfteste Brise hineingreift. Die auf Beute ausgerichteten Fangfäden unterstützen die Meduse bei Wendemanövern und bei Geschwindigkeitsveränderungen.

stoff durch die „Darmkiemen“ aus dem Wasser muß der Körper des Tieres ständig mit frischem Wasser durchströmt werden. Es stößt das vorn eingesogene Wasser nach hinten wieder hinaus und kann bei Gefahr mit Stößen bis zu einem halben Meter vor seinen Angreifern fliehen.

Die beiden auf den Schalenrücken der Meereskammuschel befindlichen Muskeln bilden eine ähnlich feste Wasserisolation wie der Gummiring am Metalldeckel eines Konservenglases. Lediglich am Ansatz des Gelenkbandes ist beidseitig je eine kleine Öffnung vorhanden. Sobald die Muschel ihre Schale schließt, schießt Wasser aus den Öffnungen heraus, und das Tier kann sich rechtzeitig einer unfreundlichen Begegnung, beispielsweise mit einem See stern, entziehen.

Vielen Arten der Kopffüßer ist dieses „Rettungsraketen“prinzip bekannt. Der gemeine Tintenfisch schwimmt im allgemeinen mit Hilfe von Wellenbewegungen seiner pelerinenartigen Flossen, doch beim Fliehen saugt er den Mantelhohlraum an der Bauchseite mit Wasser voll, schließt die Ansaugöffnung mittels zweier druckknopfartiger Knorpel lamellen und stößt an der anderen Öffnung der Mantelhöhle das Wasser kräftig hinaus. Bezeichnend für die Vollkommenheit des Wasserstrahlantriebs ist, daß entsprechend vorgenommenen Messungen Geschwindigkeiten bis zu 54 Kilometern in der Stunde erreicht werden.

Zur Stabilisierung des Schwimmens verwenden die rhomboidförmigen Kopffüßer waagerechte Lenkorgane, wobei sie durch den entsprechenden Einsatz ihrer Spritzdüsen die Lenkung regeln. Der achtfüßige gemeine Polyp wandelt im allgemeinen mit belustigen-

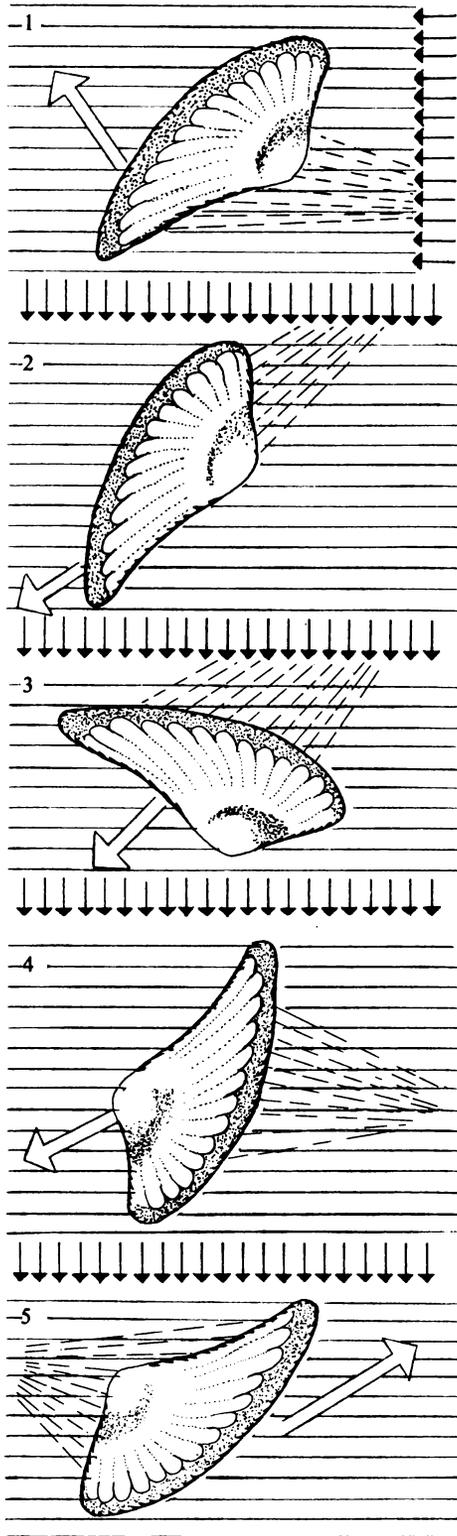
den Ballettschritten am Meeresgrund, doch beim Nahen einer Gefahr schaltet er sofort auf Strahlantrieb um und flieht mit 5 Stößen in der Sekunde.

Mit gutem Wind zu fremden Ufern

Dies trifft insbesondere auf die an der Wasseroberfläche herumschwärmenden Blasenmedusen zu, die in Ermangelung einer eigenen Antriebsenergie den Wind für ihre langen und wechselvollen Meeresreisen zu Hilfe nehmen. Die als Portugiesische Galeere bekannten lebendigen Segler bilden Gemeinschaftsstöcke, in denen Polypen und Medusen in friedlicher Eintracht zusammen leben. Sie lassen sich auf der Wasseroberfläche treiben und nutzen die Auftriebskraft ihrer verhältnismäßig großen Luftblase aus. Dabei strecken sie ihre Fangfäden oft bis zu 50 Metern tief ins Wasser.

Auf dem oberen Teil der Luftblase befindet sich ein purpursilbriges, kammförmiges Gebilde — das Segel der Portugiesischen Galeere. Bei aufkommendem Wind strafft diese das Segel, läßt die Fangfäden tiefer nach unten sinken und richtet sich so aus, daß sie einen Winkel zur Windrichtung von ungefähr 40 bis 45 Grad bildet. Dabei beachtet sie die Wasserströmung; ihre Fangfäden richtet sie stets — ähnlich dem Notanker bei Seglern — entsprechend der Windrichtung, der Wasserströmung und der Geschwindigkeit aus. Von Zeit zu Zeit manövriert sie, indem sie sich um die eigene Achse dreht.

Die kleinen Portugiesischen Galeeren sind jedoch nicht alle gleich. Sie unterscheiden sich nämlich dadurch, daß das Segel des einen Typs nur auf von links, das des anderen nur auf von rechts wehendem Wind angesprochen



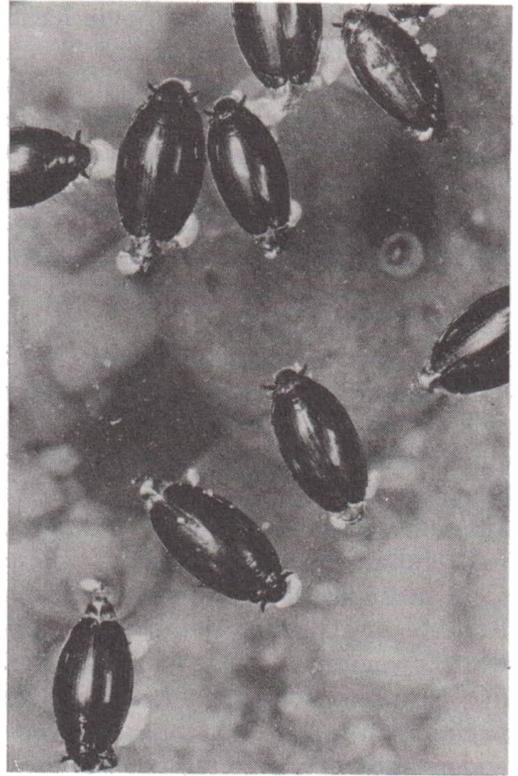
wird. So segeln diese „Segler vor dem Wind“ in unterschiedliche Richtungen der Weltmeere. Die Wissenschaftler glaubten deshalb für lange Zeit, es handle sich um zwei verschiedene Arten. Weshalb sie sich voneinander unterscheiden, wissen wir bis heute noch nicht! Die segelnden „Galeeren“ sind aber zweifellos außerordentlich gute Verkehrsmittel: Sie durchheilen die Ozeane bei einer Windgeschwindigkeit von 680 Zentimetern je Sekunde und einer Wasserströmung von 0,5 bis 9 Zentimetern je Sekunde mit einer Stundengeschwindigkeit von fast 10 Kilometern.

Die Segelqualle – die *Veleva veleva* – erinnert eher an eine schwimmende Untertasse. An ihrem scheibenförmigen Körper befindet sich ein S-förmiges Segel mit einem Durchmesser von 30 Zentimetern. Unter diesen Quallen treten gleichfalls Individuen mit nach links und nach rechts ausgerichteten Segeln auf. Die von Menschen geschaffenen Segelboote sind zwar vollkommener, weil mit der Umdrehung der waagerechten Segelstange die Änderung der Windrichtung ausgeglichen werden kann, während das Schiff die ursprüngliche Richtung beibehält. Die *Veleva veleva* hingegen richtet sich, wenn der

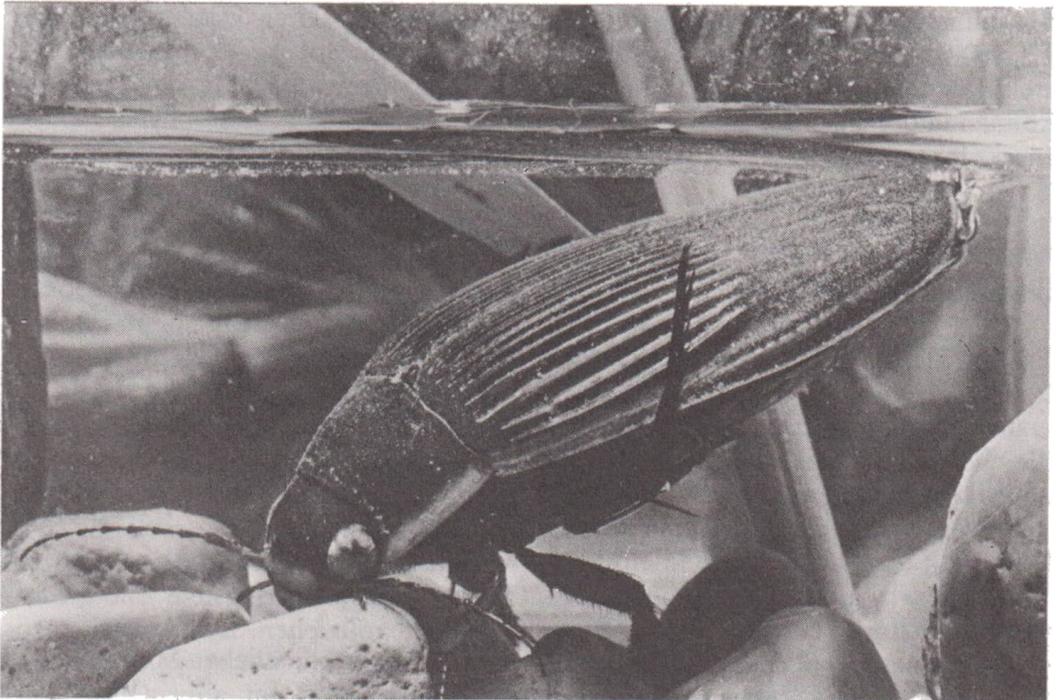
Die Portugiesische Galeere – die *Physalia* – gleitet über die Wasseroberfläche, indem sie die Windenergie ausnutzt. Ist die Windströmung günstig, treibt sie ungestört ihrem Reiseziel entgegen (1). Ändert der Wind jedoch überraschend seine Richtung (zum Beispiel um 90 Grad), gerät das Segel in eine ungünstige Stellung (2). Die *Physalia* beginnt zu manövrieren: Ihre Fangfäden als Anker nutzend, dreht sie sich langsam (3), um dann mit ihrem Segel bald vom Wind erfaßt zu werden (4), schließlich wendet sie und setzt ihren Weg in entgegengesetzter Richtung fort (5).

Wind bläst, so aus, daß ihr Segel gegen den Wind stets einen Winkel von 25 bis 30 Grad einnimmt und sie selbst von der sanftesten Brise mühelos nach vorn getrieben wird.

Die Insekten haben den alten Traum vom „Dreiarten“-fahrzeug in der Natur verwirklicht. Der Schwimmkäfer beispielsweise läuft – wenn auch sehr unbeholfen, eher hüpfend –, fliegt sehr gut, schwimmt und taucht ausgezeichnet; die drei Teile seines Körpers (Kopf, Brust und Hinterleib) bilden miteinander eine derart ideale stromlinienförmige Karosserie, als wäre sie auf Grund genauester hydrodynamischer Messungen konstruiert worden. Der 3 Zentimeter lange Käfer ist auch um die Minde-



Der Gelbrandkäfer aus der Familie der Schwimmkäfer (unten) läuft (hüpft), fliegt und schwimmt, der Taumelkäfer saust mit hoher Geschwindigkeit über das Wasser (oben rechts).



rung der Reibung besorgt! Seine harte Chitinschale ist mit einer feinen öligen Absonderungsschicht überzogen. Es ist daher kein Wunder, daß er für kurze Zeit mit einer Geschwindigkeit von 60 Zentimetern in der Sekunde durch das Wasser jagt, was vergleichsweise – bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Maßstäbe – der Geschwindigkeit eines Motorboots entspricht.

Doch den Geschwindigkeitsrekord hält der winzige, 4 bis 8 Millimeter große Taumelkäfer. Er verfügt über einen vollkommenen Mechanismus: Seine Ruderbeine, die sich in der Sekunde mit 50 bis 60 Schlägen bewegen, sind außerordentlich gelenkig. Diese nicht mehr als 0,01 Millimeter starken Ruderbeine schließen sich bei der Vorwärtsbewegung automatisch zusammen und straffen sich bei der Bewegung nach hinten so, daß sich ihr Strömungswiderstand um das Vierzigfache erhöht. Filmaufnahmen beweisen, wie der Käfer blitzschnell seine Ruder handhabt: Er bewegt sie innerhalb von 4 Millionstelsekunden nach vorn. Bionikforscher können in der Tat von diesem winzigen Insekt lernen!

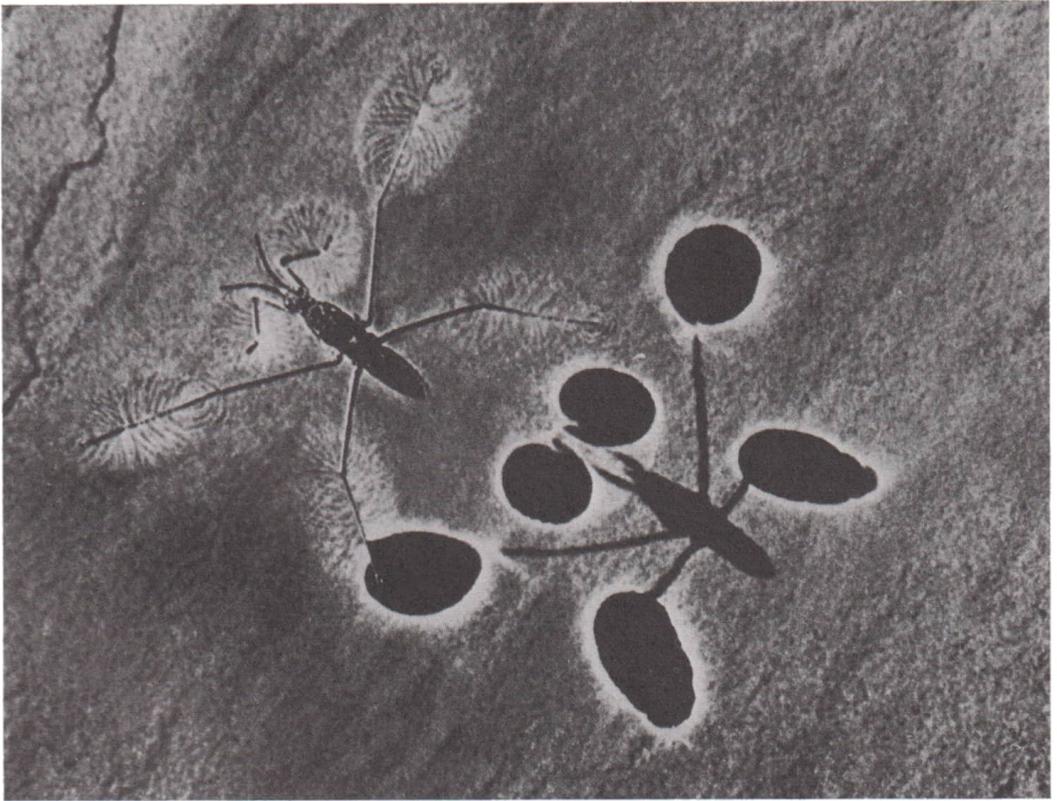
Mit trockenem Fuß über das Wasser

Es gibt Tiere, die auch auf dem Wasser laufen. Dies ist für den Physiker nicht erstaunlich, denn ihm ist bekannt, daß die Wassermoleküle an der Wasseroberfläche eine glatte, straffe Haut bilden. Wenn wir zum Beispiel eine Rasierklinge mit der flachen Seite in ein Glas Wasser legen, geht sie nicht unter, obwohl die Klinge schwerer als das Wasser ist. Genauso gehen dank dieser unsichtbaren Haut Wasserspinnen und

Wasserwanzen nicht unter, sondern können auf der Wasseroberfläche laufen.

Es galt lange als Rätsel, wie diese an der Wasseroberfläche dahingleitenden winzigen Insekten das Ufer erreichen können. Wasser bildet an der Wand eines Glasbehälters einen abschüssigen Rand. Wenn eine Wasserwanze zum Hochsteigen an der abschüssigen Wand ansetzt, müßte sie bereits auf halbem Weg zurückgleiten, denn ihre Füße können sich nirgendwo festhalten. Und trotzdem rutscht sie nicht zurück. Dem französischen Forscher René Baudoin gelang es, dieses Rätsel zu lösen. Er beobachtete nämlich, daß der winzige Augenmoderkäfer, der zur Familie der Moderkäfer gehört, beim Überqueren einer abschüssigen Wasserwand eine Substanz produziert, die das Wasser nicht abstößt, sondern anzieht. Seine Füße werden dadurch angefeuchtet, und von diesem Augenblick an klammert er sich an das Wassergefälle und springt auf das Ufer. Eine andere Art ist nicht einmal auf irgendeine chemische Substanz angewiesen, sie wendet lediglich einen einfachen physikalischen Trick an. Beim Hochlaufen an dem steilen Wassergefälle durchstößt sie auf halbem Weg mit einem kräftigen Schlag ihres Beines die Wasserhaut. Das dem Fuß des Käfers anhaftende Wasser läßt ihn nicht mehr zurückgleiten – und er kann mit einem einzigen Sprung das Ufer erreichen.

In den Jahrtausenden der stammesgeschichtlichen Entwicklung haben die verschiedenen Tierarten solche Methoden „experimentiert“, die sie in die Lage versetzten, die Bewegungen in ihrer ruhigen Welt mit geringstem Energieaufwand zu vollziehen. Die Vollkommenheit der unterschiedlichen Methoden des Schwimmens ist im allgemeinen ent-



Der auf den Grund des Teiches geworfene Schatten verrät die Wasserwanze (Wasserläufer). Unter langen dünnen Beinen befinden sich die elastisch eingewinkelten, auf dem Wasser liegenden Membranen, die als schwarze „Pantöffelchen“ auf dem Bild zu sehen sind.

sprechend der Entwicklung der Organismen der verschiedenen Tierarten verlaufen, doch sie hängen auch eng mit der Lebensweise des Tieres zusammen. Diese Bedingungen haben im wesentlichen einzelne spitzfindige „Erfindungen“ zustande gebracht. Doch wir treffen auch auf sonderbare Fälle. So hat die Süßwasserhydra auf alle üblichen Schwimmformen verzichtet und bewegt sich mit kleinen Radschlägen nach vorn. Zuerst krümmt sie sich, auf dem unter Wasser befindlichen Boden stehend, setzt ihre Fühler auf dem Boden auf,

schwingt dann mit ihren Armen zum Handstand und richtet sich aus dieser Lage wieder auf die Füße.

Die Bionik steht dieser Fortbewegungsform noch verständnislos gegenüber. So viel ist jedoch gewiß, daß diese besondere Fortbewegungsform der Hydra nicht zufälligerweise entstanden ist und gegebenenfalls vielleicht auch in der Technik mit Erfolg angewendet werden könnte. Das Studium der Fortbewegungsformen der Wasserwelt hält zweifellos noch viele Überraschungen für die Bioniker bereit.



Pferd und Reiter fliegen sozusagen durch die Luft. Die vier Beine haben sich im Laufe der Stammesentwicklung der Tierwelt als außergewöhnlich vorteilhaft erwiesen; doch einzelnen Arten gelang es, sich ihrer Umgebung durch andere Fortbewegungsmethoden anzupassen.

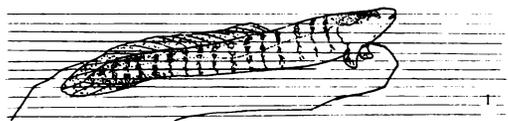
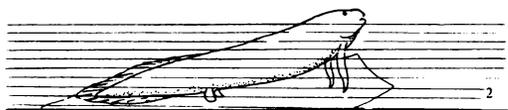
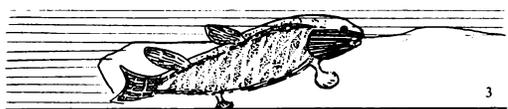
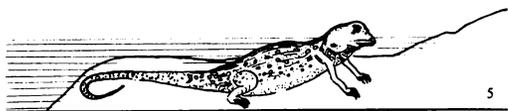
Vergebliche Suche nach dem Rad

In Florida wagen sich Hunde kaum an das Ufer kleinerer Seen. Sie fürchten, von Fischen gebissen zu werden. Diese Befürchtungen sind nicht unbegründet, denn die Gefahr lauert dort wirklich in Gestalt von am Ufer herumkriechenden Aalwelsen auf sie. Diese Raubfischart lebt in den Gewässern Südasiens, aber auch in Florida hat sie sich schon eingebürgert. Hier wurde sie bereits zur Plage. Das angriffslustige Tier, das bis zu einer Länge von einem halben Meter heranwächst, greift kleinere Tiere nicht nur im Wasser an, sondern es wagt sich auch an Land. In den Kiemen des Fisches befindet sich eine Blase, deren reich mit Blutadern durchzogene Wand unmittelbar aus der Luft Sauerstoff entnimmt. So kann sich der Aalwels über mehrere Stunden auf dem Festland aufhalten, wobei er sich, auf seine kräftigen Brustflossen gestützt, vorwärts bewegt, und er greift selbst Hunde an, wenn ihm die neugierigen Vierbeiner im Weg stehen.

Dieser sonderbare Fisch ist gewissermaßen ein lebendes Zeugnis für die vor mehr als 350 Millionen Jahren erfolgte Entwicklung. Die Wassertiere wagten sich aufs Land, um auf dem damaligen Sumpfboden der Ufer Fuß zu fassen — beziehungsweise damals waren es noch die Flossen. Der amerikanische Schriftsteller Robert Silverberg veranschaulicht diesen Vorgang in beinahe poetischer Weise in seinem Roman „Tower of Glass“: „... es gab noch keinen einzi-

gen Menschen, nur den Fisch. Ein glitschiges Etwas mit Kiemen, Schuppen und kleinen kugelrunden Augen. Er lebte in der Tiefe des Ozeans, und der Ozean war wie ein großes Gefängnis, die Luft wie ein über dem Gefängnis befindliches Dach. Niemand konnte das Dach überwinden. ‚Du stirbst, wenn du hinaufsteigst‘, sagten alle. Der Fisch stieg hoch und starb. Ein zweiter Fisch, der hochstieg, starb ebenfalls. Als jedoch ein weiterer Fisch hochstieg, war diesem zunächst zumute, als habe man ihm auf den Kopf geschlagen, seine Kiemen brannten, die Luft war zum Erstickten, und die Sonne glühte wie eine Fackel in seinen Augen. Er lag im Morast, wartete auf das Sterben und starb doch nicht. Er kroch mühsam an das Ufer der Einbuchtung zurück, tauchte ins Wasser und sagte: ‚Hört her, dort oben ist die Welt ganz anders.‘ Er stieg von neuem hoch, verblieb dort an die zwei Tage und starb dann. Die anderen Fische waren auf diese neue Welt auch neugierig. Und sie krochen auf das modrige Ufer, blieben dort und lernten, wie man Luft einatmen muß. Sie lernten des weiteren, wie man sich aufrichten, wie man gehen, wie man, den Sonnenstrahlen ausgesetzt, auf dem Trockenen leben muß...“

Daraus geht freilich nicht genau hervor, wie die vierbeinigen Tiere entstanden sind, doch der Prozeß ist unverkennbar. Die Wassertiere lebten zunächst so wie die Fische im Wasser. Sie



Als im Laufe der stammesgeschichtlichen Entwicklung der Tiere die Fische sich auf das Festland wagten, hat sich ihr Körper allmählich der neuen Umgebung angepaßt. So bildeten sich aus den Flossen die Füße. 1. Einzelne Flösselhechtartige stützen sich selbst heute noch beim Ausruhen auf ihre fleischigen Brustflossen. 2. Lurchfische oder Lungenfische stützen sich ebenfalls auf ihre Brustflossen, und sie sind auch zum Atmen fähig. 3. Die mit Schuppen bedeckten Flossen vieler Fischarten erinnern schon an Gliedmaßen. 4. Die als Labyrinthzähner bezeichneten, bereits ausgestorbenen Amphibienfische haben sich aus den Schuppenfischen entwickelt. 5. Im ruhenden Zustand heben die Echsen mit den Vorderfüßen ihren Körper vom Boden ab. 6. Die schuppenhäutigen Echsen bewegen sich auf vier Beinen über den Erdboden.

brauchten sich um ihr eigenes Gewicht nicht zu kümmern, dank ihrem vortrefflichen Tauchbehälter (Schwimmbüse) trieben sie schwerelos auf dem Wasser. Wenn allerdings ein Tier auf das Ufer hinausstieg, mußte es auf das Gleichgewicht achten, denn ein „hochkant“ aufgestellter Fisch fällt leicht um.

Zum Hochklettern waren zwei Seitenstützen notwendig, so daß während der im Laufe der Jahrtausende anhaltenden Entwicklung die Flossen der Fische, welche das Festland besuchten, immer steifer wurden. Dem Fisch wurde es dadurch möglich, wie ein dreibeiniger Hocker auf beiden Brustflossen und der Schwanzflosse zu stehen. Später wurden auch die Flossen um den Beckengürtel nach und nach steifer, und der Fisch konnte den Körper vom Boden erheben. Die Flossen stützten sich flach auf die Erde, was die Bewegung im seichten und modrigen Gelände erleichterte. Aus den Stützflossen entwickelten sich später die Gliedmaßen. Ihr Aufbau gleicht überraschenderweise den Armen und Beinen des Menschen: Zunächst entstand nur ein gerader Knochen, der die Flosse sozusagen waagrecht verstärkte (der Oberarm), daran fügten sich senkrecht zwei kürzere Knochen (der Unterarm), schließlich bildeten sich an dem den Boden berührenden Flossenteil die Gelenkbein- und Vorderfußknochen sowie die Zehen.

Dieses Z-förmige Gefüge wuchs an vier Stellen aus dem Tierkörper heraus. So sind bereits die Körper der Amphibien und Reptilien angeordnet. Die Beine stoßen fast starr von der Seite zur Wirbelsäule und bieten dem Tier die sicherste Abstützung, da sich der Schwerpunkt des Tieres nahe dem Boden befindet. Eidechsen können ebendeswegen an schroffen Felsen hinaufkriechen, ihr

Schwerpunkt zieht sie nicht nach hinten. Es ist ihnen auch möglich, während des Laufens schnell „abzubremsen“. Auf dem Weg der weiteren stammesgeschichtlichen Entwicklung wurden die Beine immer vollkommener und gerader. Der Schwerpunkt des Pferdes ist bereits so hoch, daß ein lebensgetreues Modell auf einem Brett mit einem Neigungswinkel von 30 Grad nicht stehen bleibt, sondern nach hinten fällt.

Die stammesgeschichtliche Entwicklung der Tiere war demnach eng mit dem geraden Aufrichten und der Verlängerung der Beine verbunden. Bei Eidechsen und Krokodilen ist das auf dem Boden von den Beinen gebildete Rechteck größer als der Körper des Tieres. In der späteren Entwicklung geraten die Beine unter den Körper, das Rechteck verkleinert sich. Das ermöglichte eine schnellere Bewegung, doch auf Kosten einer kleineren Standfläche. Was beispielsweise Pferde oder Antilopen dadurch an Geschwindigkeit gewannen, verloren sie an Standfestigkeit. Das kleiner gewordene Stützrechteck bedeutet für sie, daß ihr Schwerpunkt instabiler wurde.

Im Grunde ist dies kein Verlust, sondern lediglich ein extremes Beispiel für den engen harmonischen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Gleichgewicht in der Natur. Die Natur versucht beim Körperaufbau eines jeden Tieres, die beiden entgegengesetzten Anforderungen auszugleichen. Die imaginäre „doppelarmige Waage“ verlängert „ebenerdige“ Tiere, wodurch sie bei einer verhältnismäßig geringen Geschwindigkeit mit einem sicheren Gleichgewicht entschädigt werden. Ratten, Mäuse und andere Nagetiere befinden sich ungefähr in der Mitte des Armes der Pendelwaage, bei den schnell

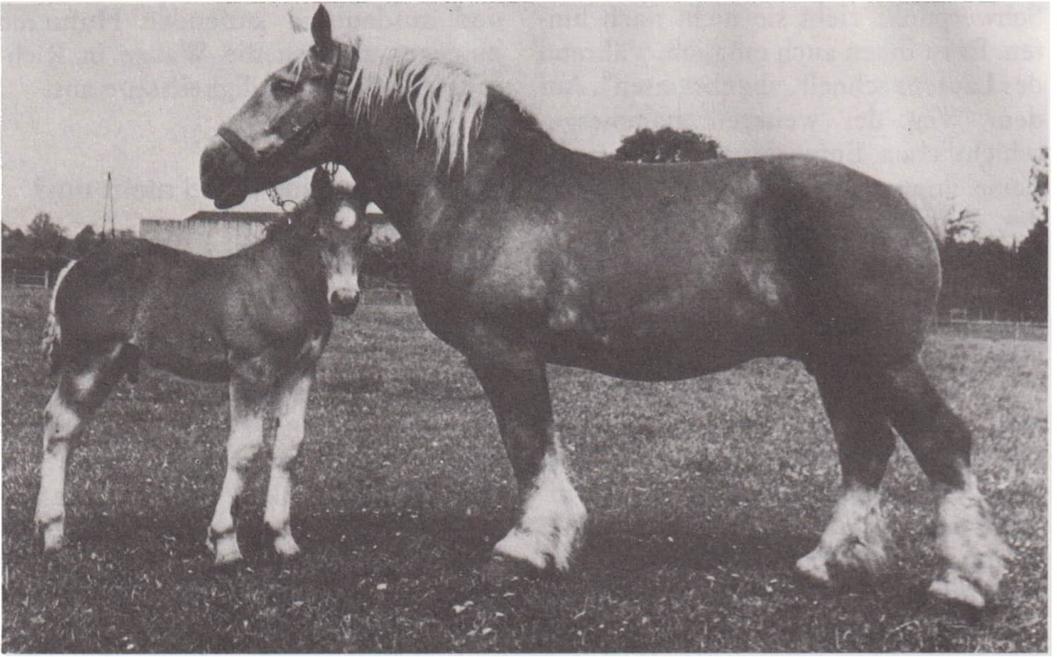
und ausdauernd laufenden Huftieren hingegen pendelt die Waage in Richtung der Geschwindigkeitsseite aus.

Wieso kippt das Pferd nicht um?

Der englische Professor James Gray konnte im Rahmen seiner eingehenden Untersuchungen an Bewegungsformen der Tiere bei Vierbeinern einen interessanten mechanischen „Trick“ feststellen: Ihr Gewicht ist nicht gleichmäßig auf alle vier Beine verteilt. Bevor wir darüber nachdenken, weshalb dies so ist, scheint es zweckmäßig, sich einen Tisch vorzustellen. Legen wir in unserer Vorstellung zunächst ein schweres Lexikon auf die Mitte des Tisches und versuchen dann, ein Bein des Tisches wegzunehmen. Dies wird nicht möglich sein, ohne daß der Tisch sofort umfällt. Vierbeinige Tiere allerdings fallen nicht um, wenn sie eins ihrer Beine hochheben. Wieso eigentlich nicht?

Den Schwerpunkt des Tisches bildet das Lexikon, da es genau auf dem Kreuzungspunkt der beiden Diagonalen der Tischplatte liegt. Das Umkippen des Tisches ist also auf die Verlagerung des Schwerpunkts zurückzuführen. Schieben wir das Lexikon jedoch ein wenig nach vorn, kann eins der beiden hinteren Beine unbeschadet weggenommen werden. Der Schwerpunkt des Tisches befindet sich dabei innerhalb des von den verbliebenen drei Beinen gebildeten Dreiecks. Die stabile Grundstellung des Dreiecks ist die wichtigste Voraussetzung für die Fortbewegung aller Vierbeiner.

Auf der Grundlage dieser Gesetzmäßigkeit können vierbeinige Tiere in zwei Gruppen eingeteilt werden. Der Schwerpunkt der einen Gruppe liegt nä-



Drei Beine genügen, damit das Pferd fest steht. Ein wenig nach vorn gebeugt, befindet sich sein Schwerpunkt innerhalb des Dreiecks, das von den beiden vorderen und dem hinteren rechten Bein gebildet wird.

her an den Vorderbeinen. Wenn das Pferd ruhig steht, hebt es häufig eins der hinteren Beine. Es kann sich dies ruhig erlauben! Die beiden vorderen Beine und ein hinteres Stützbein bilden ein Dreieck, innerhalb dessen sich der Schwerpunkt befindet, ja, wenn es erschreckt wird, schlägt es sogar mit unheimlicher Kraft aus, ohne daß es dabei das Gleichgewicht verliert. Dazu sind auch Kühe in der Lage.

Zur anderen Gruppe gehören beispielsweise die Hasen, Eichhörnchen und Bären. Da ihr Schwerpunkt nahe ihrer beiden hinteren Beine liegt, können sie sich zu jeder Zeit leicht aufrichten; denken wir dabei nur an die haselnußknabbernden Eichhörnchen oder an die Zirkusbären. Verschiebt sich der Schwerpunkt hinter die beiden Hinterbeine, fällt das Tier nach hinten um. Die

Natur hat auch folgende Möglichkeiten erprobt: Die Känguruhs stehen zum Beispiel auf zwei Beinen, wobei sie sich auf ihren dicken, starken Schwanz stützen und mit gewaltigen Sprüngen fortbewegen.

In der Welt der Technik scheint es als ganz natürlich, daß Kraftwagen auf Rädern rollen, doch in der Natur finden wir keinerlei Spuren einer derartigen Lösung. In der Welt der Lebewesen konnte sich ein „Bestandteil“, welches sich um eine Achse mehrmals dreht, nicht entwickeln, denn die Gliedmaßen der Tiere sind von Nervensträngen und Blutadern durchzogen, die bei einer Umdrehung der Gliedmaßen sofort zerreißen würden. Wie funktionieren aber die Beine?

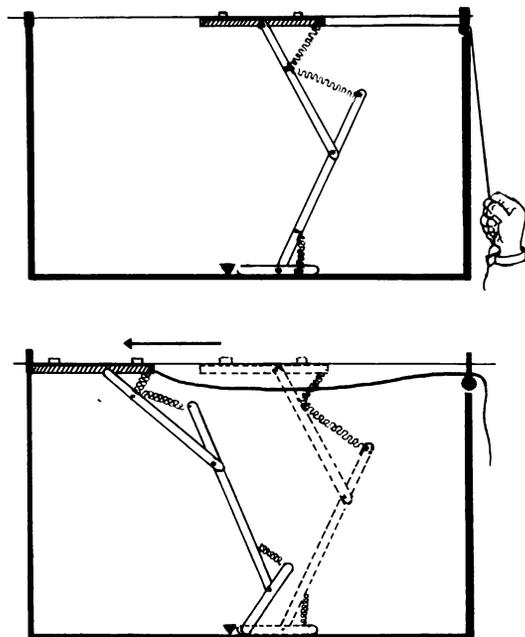
Wir müssen uns ein Rad vorstellen, das sechs Speichen hat, und sogleich er-

halten wir Klarheit über dieses einfache Patent der Natur. Diese sechs Speichen sind in unserer Vorstellung in der Weise durch sechs Beine zu ersetzen, daß die Fußsohlen aneinanderstoßen. Zur fortlaufenden Umdrehung des Rades sind aber sechs Beine gar nicht erforderlich. Von ihnen können glattweg vier eingespart werden, wenn das Bein, welches während des Rollens sich gerade vom Boden abhebt, dem anderen entgegen-eilt und wenn es wieder an der Reihe ist, sich auf den Boden stützt. Im wesentlichen bewegt sich auch der Mensch so.

Auch ein Vergleich mit einem Kraftwagen trägt zum Verständnis bei, in welcher Weise Beine den Körper vorwärts bringen. Die Räder werden bekanntlich mit Hilfe verschiedener

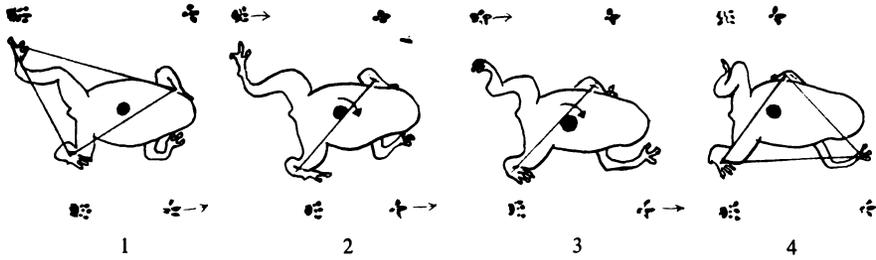
Transmissionen ins Rollen gebracht. Da die Gummireifen aufgrund der Haftreibungskraft am Boden haften, überträgt sich die Drehkraft auf den Kraftwagen und schiebt den Wagen nach vorn. Zum „Antrieb“ der beiden Beine sind also Muskeln erforderlich, die imstande sind, die Beine vom Boden zu lösen. Dabei ziehen sich die Beinmuskeln zusammen, während sich der Körper selbst nach vorn bewegt. Hat das eine Bein seine Aufgabe erfüllt, löst es sich vom Boden und schwingt, ähnlich einem Pendel, von neuem nach vorn. Wird diese Bewegung durch die Muskeln beschleunigt, ist der Gang schneller.

Beine in der Luft



Ein aus Stahlfedern modelliertes Tierbein. Da die Bodenreibung die Weiterbewegung des Fußes nicht zuläßt, bewegt sich der Körper nach vorn. Deshalb ist es für Tiere außerordentlich schwierig, auf dem Eis zu gehen, da hier die stützende Reibung fehlt.

Die Sicherheit des Ganges vierbeiniger Tiere ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß sie während des Gehens stets nur ein Bein in der Luft haben. Dabei können sie jeden Augenblick, falls ihnen Gefahr droht, stehenbleiben. Theoretisch kann die Einordnung der Beine nacheinander in sechs Etappen erfolgen, doch in der gesamten Tierwelt wird meistens folgende Variante angewandt: Dem hinteren linken Bein folgt das Heben des vorderen linken Beines, darauf folgt das rechte hintere Bein, und schließlich beschließt das rechte vordere Bein den Viertaktsschritt. Auf diese Weise gelangt das Tier wieder zu seiner Ausgangsstellung zurück und kann so die Gehbewegung fortsetzen. In Buchstaben ausgedrückt – H L (hinten links), V L (vorn links), H R (hinten rechts), V R (vorn rechts) –, erhalten wir nachstehende unendliche Reihe: H L – V L – H R – V R – H L – V L – H R – V R – H L – V L – H R – V R ... Aus dieser Reihe ist es möglich,



Der sich schnell fortbewegende Frosch streckt sein rechtes Vorderbein nach vorn (1). Doch er wartet nicht, bis dieses den Boden berührt, sondern er erhebt schon vorher auch sein linkes Hinterbein (2). Auf die beiden diagonal gegenüberliegenden Beine gestützt (3), gerät er schließlich erneut in die sichere Dreiecksstellung (4). Die Schwerpunktverlagerung ist durch den Punkt gekennzeichnet.

in jeder Phase einen Viertaktschritt zu entwickeln! Dadurch wird zwar die Reihenfolge scheinbar verändert, doch vom Gesichtspunkt der Gangart der vierbeinigen Tiere würde das an der Grundformel nichts ändern.

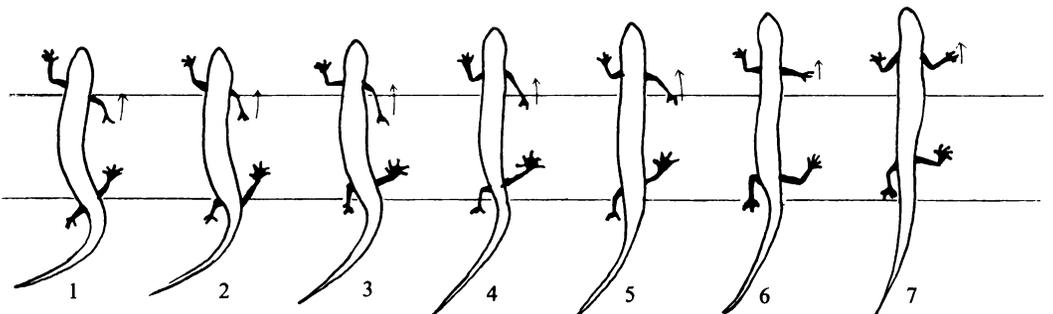
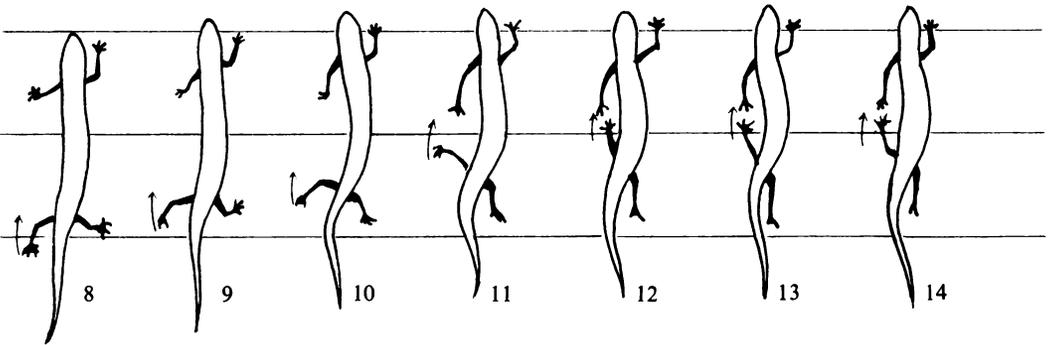
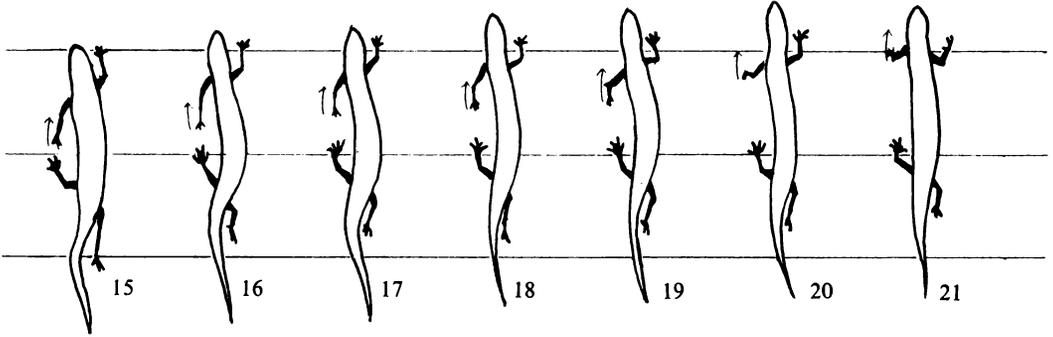
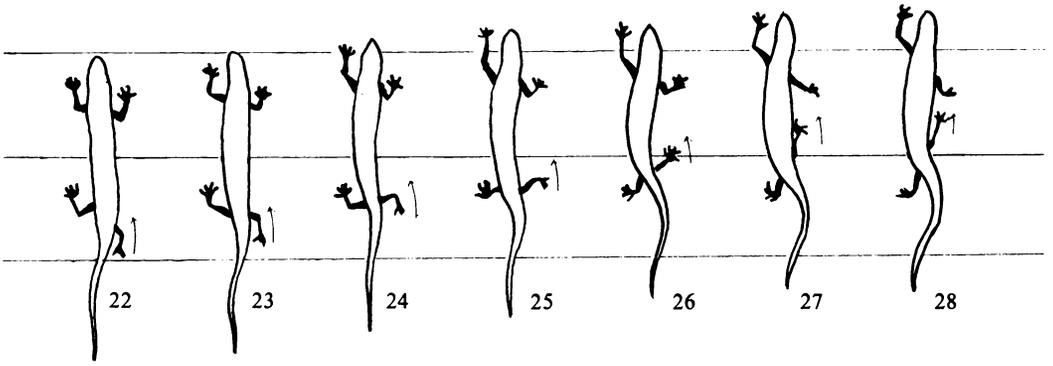
Wieso hat sich ausgerechnet diese Reihenfolge entwickelt? Die stammesgeschichtliche Entwicklung der Tiere erfolgte im Rahmen einer logischen Verkettung. Als Lurche ihre Beine auf das Festland setzten, war ihre Bewegung noch von der S-förmigen Wellenbewegung der Fische bestimmt. Am Rückgrat der Salamander, Kammolche und selbst am Rückgrat des Frosches verlaufen diese Körperwellen während der Fortbewegung auch heute noch so. Und weil ihre Beine ziemlich fest im Rückgrat „verankert“ sind, wird die Aufeinanderfolge der Beine bei der Fortbewegung von der jeweiligen Krümmung des Rückgrats bestimmt.

Diese Bewegungsreihenfolge erwies sich für die spätere Entwicklung der höherentwickelten Tiere als außerordentlich nützlich, selbst die Reptilien kommen in den Genuß dieses Vorteils. Die drei auf dem Boden stehenden Beine

bilden während der Fortbewegung stets ein Dreieck, das ihrem Körper eine sichere Stütze verleiht. Die Gangart der Tiere setzt sich demnach aus der Reihenfolge der von den Beinen gebildeten Dreiecke zusammen, und ihr Schwerpunkt verschiebt sich auf Grund der Biegung des Rückgrats stets in jenes Dreieck, dessen Winkel von den am Boden ruhenden Beinen gebildet wird. Mittels dieser Methode kann selbst ein behäbiger Frosch 400 Meter in der Stunde zurücklegen.

Während der Jagd auf Nahrung oder beim Fliehen vor Verfolgern muß die Geschwindigkeit erhöht werden. Dabei beschleunigen Tiere ihre Fortbewegung in besonderer Weise. In der Aufeinander-

Die Fortbewegung des fliehenden Kammolches. Zuerst streckt er seinen rechten Vorderfuß nach vorn (1-7), danach den linken hinteren Fuß (8-14), dann folgt der linke Vorderfuß (15-21), und schließlich beschließt der rechte hintere Fuß den ganzen Schritt. Wenn der Molch langsam kriecht, stützt er sich stets auf drei Füße. Dabei läßt sich erkennen, daß zugleich mit seinen in Bewegung befindlichen Füßen die gegenüberliegenden Gliedmaßen nach vorn gleiten.



derfolge heben sie das nächste Bein bereits, bevor das vorherige den Boden erreicht hat. Sie warten also nicht ab, bis sich das „Sicherheitsdreieck“ bildet. Filmaufnahmen zufolge ist dieser „Trick“ auch dem Frosch bekannt. Er verlagert den Schwerpunkt seines Körpers über die zwischen den beiden Stützbeinen entstehende Diagonale nach vorn, während seine beiden anderen Beine (zum Beispiel das vordere linke und das hintere rechte) zugleich in der Luft sind. Dies beschleunigt zweifellos die Geschwindigkeit seiner Fortbewegung, denn er braucht nicht abzuwarten, bis das linke vordere Bein den Boden erreicht, um danach das rechte hintere Bein zu heben. Der Frosch kann diese Beschleunigung im Laufe eines Viertakt-Gangabschnitts nur zweimal vollziehen.

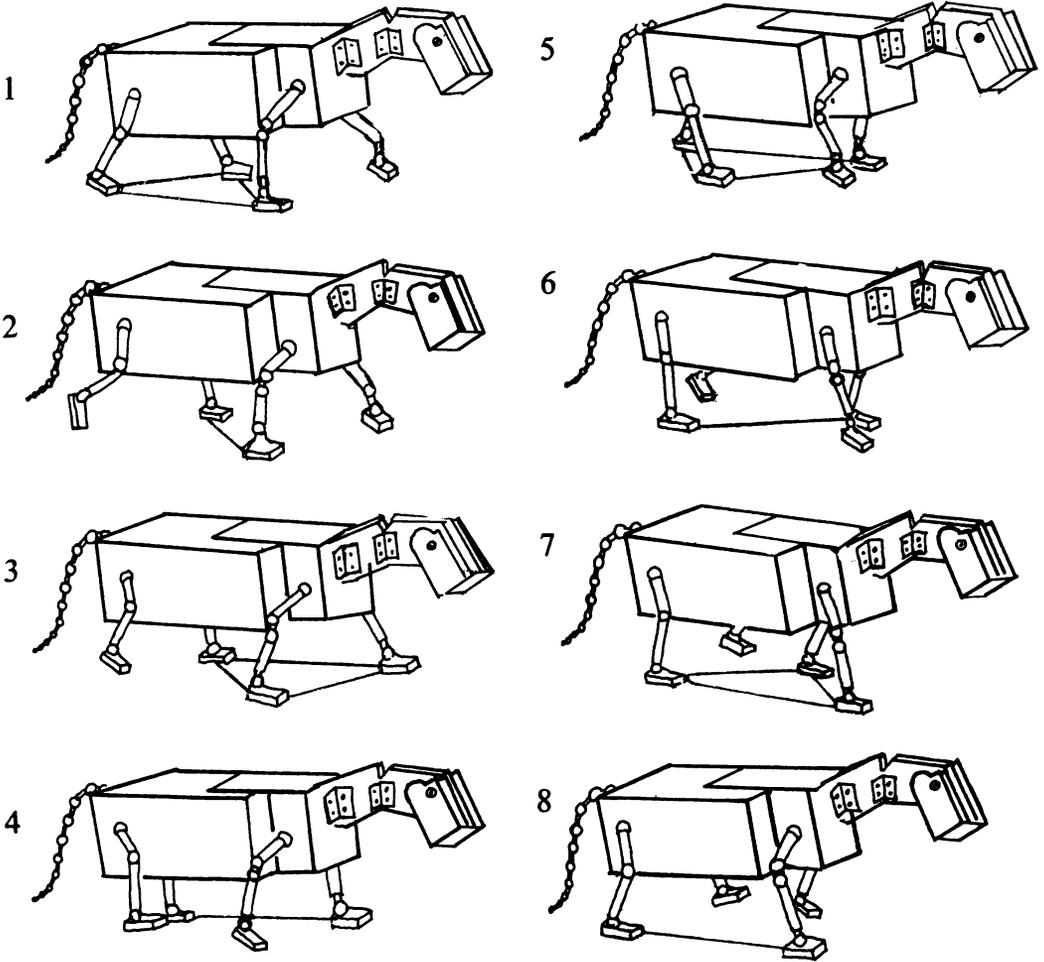
Das Pferd und die anderen Huftiere bedienen sich einer weiterentwickelten Methode. Ein Bein des Pferdes befindet sich während der Fortbewegung stets in der Luft! Selbst wenn wir die gesamten Schritte — während die Beine wieder die Ausgangsstellung einnehmen — in acht Phasen einteilen, können wir feststellen, daß in vier Phasen sich zwei Beine zugleich in der Luft befinden. Kraftwagen, die sich auf ihre beiden seitlichen Räder gestützt fortbewegen, sind nur in Geschicklichkeitsrennen zu sehen. Das gleiche macht das Pferd mühelos auf zwei Beinen, ohne besonders darauf zu achten.

Der Mensch beobachtet seit Urzeiten den Gang der Tiere und versucht, von Höhlenmalereien bis zu Gemälden des 20. Jahrhunderts über Jahrtausende hinweg einzelne Bewegungsphasen der vier Beine festzuhalten. Allerdings mit geringem Erfolg! Der Gang vierbeiniger Tiere kann erst genau fixiert werden,

seitdem Forschern Foto- und Filmapparate zur Verfügung stehen. Merkwürdigerweise erschienen seit den ersten einfachen und primitiven Bewegungsstudien nicht besonders viele Schilderungen über die Bewegung der Tiere. Zur Analyse des Gehens und Laufens des Pferdes werden zum Beispiel auch heute noch die ziemlich primitiven Aufnahmen des Engländers E. J. Muybridge genutzt. Dieser begeisterte Forscher stellte entlang einer Pferderennbahn so viele Fotoapparate auf, wie er Einzelbilder über den Lauf eines Pferdes machen wollte. Zur gegenüberliegenden Seite der Rennbahn führten von jedem Auslöser der einzelnen Fotoapparate dünne Fäden. Während das Pferd lief, zerrissen der Reihe nach die Fäden, wobei die Platten belichtet wurden. Es ist auch für uns heute noch erstaunlich, daß dieser unermüdliche Fotoamateure bereits um das Jahr 1870 Fotos anfertigte, die in einer Belichtungszeit von 6 Tausendstelsekunden die Bewegungen eines galoppierenden Pferdes festhielten.

Bewegungsanalysen bereiten den Forschern noch viele Schwierigkeiten und erfordern große Sorgfalt. So wurde von dem amerikanischen Biologen Lewis S. Brown ein einfaches Modell aus Holzplatten, Stangen und Kugeln angefertigt. Die einzelnen Bestandteile befestigte er so, daß sie leicht beweglich waren. Wenn auch dieses Modell keinem einzigen vierbeinigen Tier ähnlich sah, verhalf es doch, Fragen der Fortbewegung von Tieren zu klären.

Brown erhielt außerdem durch das Studium zahlreicher Foto- und Filmaufnahmen genau die gleichen Ergebnisse über Bewegungsphasen, wie sie James Gray lediglich auf der Grundlage theoretischer Erwägungen ableitete. Die

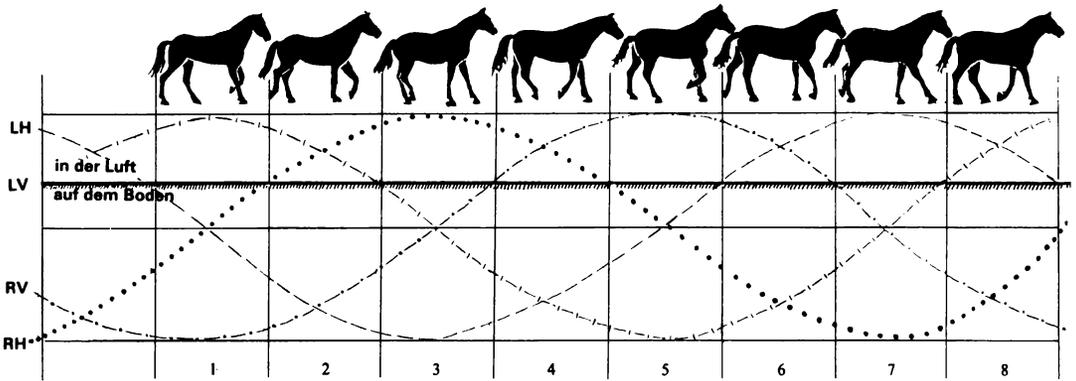


In ruhiger Gangart stützen sich die meisten vierbeinigen Tiere abwechselnd mal auf drei, mal auf zwei Beine. Den „unsicheren“ zweibeinigen Phasen folgt stets die sichere Abstützung der dreibeinigen Phasen. Das hier wiedergegebene einfache Modell (das Carneirotherium) zeigt die acht Bewegungen eines vollständigen Schrittes.

acht Bewegungen des in scherzhaft wissenschaftlicher Weise als Carneirotherium benannten Modells fixieren in exakter Weise die einzelnen Phasen eines vollständigen Schrittes. Dabei ist bereits der Anfang der Fortbewegungsphase aufschlußreich! Browns Untersuchungen zufolge setzt sich das Pferd aus der Ruhestellung stets so in Bewegung, daß es, wie auch die anderen Vierbeiner,

zuerst das linke hintere Bein hebt. Trottet das Pferd bloß im Paßgang, kann es schon mal vorkommen, daß es das andere Bein zuerst hebt, doch es macht dabei keinen ganzen Schritt. Den könnte es auch nicht tun, denn dabei geriete der gesamte Schrittrhythmus durcheinander.

Eine Analyse der acht Phasen der vollständigen Schrittreihe kann am be-



In ruhiger Gangart treten die Sinuslinien des gleichmäßigen Rhythmus des Pferdes in vollkommener Schönheit in Erscheinung. Die vier Kurvenlinien kennzeichnen die Stellung der vier Beine: In den einzelnen Phasen befinden sich einige in der Luft und einige auf dem Boden. Auf der Bodenlinie kennzeichnet der Schnittpunkt der Kurvenlinien den Moment, in dem ein Bein gerade den Boden berührt oder sich hebt. LH = linkes hintere, LV – linkes vordere, RV = rechtes vordere, RH = rechtes hintere Bein.

sten aus der Position vorgenommen werden, in der das durch die beiden hinteren Beine und das rechte vordere Bein gebildete Dreieck den Körper des Pferdes sicher abstützt. Dabei bewegt sich das linke vordere Bein nach vorn. In der zweiten Bewegungsphase hebt das Pferd bereits sein rechtes hinteres Bein, während das linke vordere den Boden noch nicht erreicht hat. Dabei verschiebt sich der Schwerpunkt des Körpers zwischen der Diagonale des linken hinteren und rechten vorderen Beines nach vorn. Der dritten Phase liegt gleichfalls ein bestimmter Moment zugrunde. Die beiden „diagonalen“ Beine und das den Boden berührende linke vordere Bein bilden ein Dreieck.

Die vierte Phase ist die interessanteste. Das Pferd wartet nicht ab, bis das nach vorn schwingende rechte hintere Bein den Boden erreicht, sondern es hebt gleichzeitig das rechte vordere Bein. Dadurch balanciert es einige

Augenblicke auf beiden linken Beinen! Im Verlauf der Bewegung bereitet dies auch keine Schwierigkeiten, denn während in der dritten Phase der Körper in die Dreiecksstellung hinüberkippt, verlagert sich zugleich der Schwerpunkt auf die Seite, so daß das Tier in der vierten Phase leichter auf beiden seitlichen Beinen das Gleichgewicht halten kann.

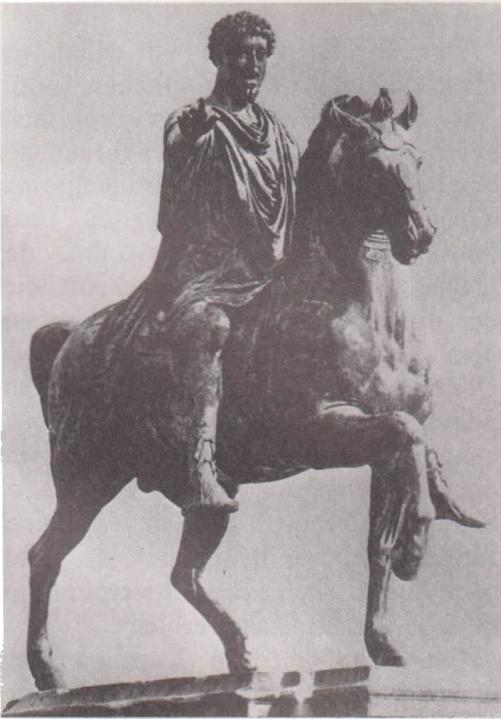
Diese unsichere Situation hält nicht lange an. In der fünften Phase erreicht das rechte hintere Bein den Boden, so daß der Körper wieder auf einem sicheren Dreieck steht. Danach wiederholt sich der gleiche Bewegungsablauf wie in den ersten vier Phasen, doch jetzt heben sich die Beine des Tieres so, als betrachteten wir die vorhergehenden Schritte in einem seitlich stehenden Spiegel. So folgt nach dem Dreieck der fünften Phase wieder das „Kippen“ (6), darauf ein vorderes Dreieck (7), schließlich verlagert das Tier seinen Schwerpunkt auf die beiden rechten Beine (8), und

die neunte Bewegungsphase ist bereits mit der Ausgangsphase identisch.

Dieser Pferdegang ist in Wirklichkeit nicht so kompliziert, wie es vielleicht unsere Darstellung beschreibt. Die Zeichnungsphasen der Bewegungen des Carneirotheriums sprechen dafür eine um so klarere Sprache. Doch aus den Zeichnungen geht auch hervor, daß diese blitzschnellen Phasen während des Bewegungsablaufs der Tiere außer-

ordentlich schwer zu beobachten sind. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß sich so manche falschen Bewegungsformen über Jahrtausende in der Kunst seit der Zeit des antiken Griechenlands bis in unsere Tage vererbt haben. Nach Meinung von L. S. Brown ist die Darstellung der Bewegung auf mehr als der Hälfte aller Gemälde und Skulpturen falsch interpretiert.

Die überlieferte falsche Darstellung



Das Pferd des Kaisers Marcus Aurelius beginnt sein linkes Hinterbein zu heben, um aus der stabilen Dreiecksstellung das Schwergewicht auf die beiden diagonal gegenüberliegenden Beine (rechtes hintere und linkes vordere) zu verlagern. In der natürlichen Gangart der Pferde wird allerdings ein solches spitzwinkeliges Dreieck nicht gebildet, denn diese Stützfläche wäre kleiner, als würde das Dreieck mit dem rechten vorderen Bein gebildet. Meister Andrea del Verrocchio veränderte offensichtlich deshalb die Stellung der beiden vorderen Beine des Pferdes der zum Muster ausgesuchten Statue des Marcus Aurelius für das Reiterdenkmal des Condottiere Colleoni. Im Grunde genommen stellt auch dies nicht genau die natürliche Gangart des Pferdes dar, denn entsprechend der Ansicht von Fachleuten wurden damals Pferde auf die schaukelnde rhythmische Gangart – den Paßgang – dressiert.

kann zuweilen für die Altersbestimmung der jeweiligen Epoche herangezogen werden. So konnten Forscher das richtige Alter einer Tierplastik des New-Yorker Metropolitan-Museums für Kunst bestimmen. Im Jahr 1967 schöpften Museologen Verdacht, daß eine für 2400 Jahre alt gehaltene griechische Pferdestatue aus Bronze eine Fälschung sei. Innerhalb einer Reihe einander widersprechender Angaben galt folgendes Argument als aufschlußreich und entscheidend: Die Statue stellt die Bewegung des Pferdes nicht echt und vollkommen dar, daher sei es nicht wahrscheinlich, daß sie von einem griechischen Künstler gefertigt wurde. Der Fälscher hatte in der richtigen Darstellung der Bewegung des Pferdes einen Fehler begangen.

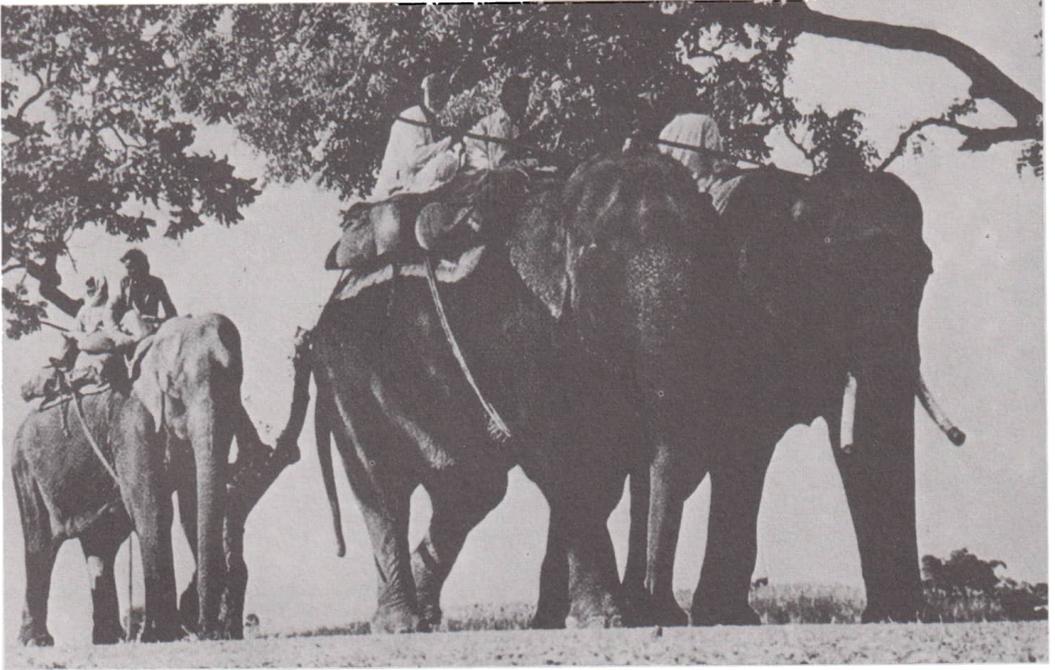
Jetzt können wir bereits selbst in kunstgeschichtlichen Büchern oder an Denkmälern nach Pferden Ausschau halten, die, wenn sie lebendig wären, sich sofort in ihren Schritten verhaspeln oder im nächsten Augenblick umfallen würden. Auf der Piazza del Campidoglio in Rom steht zum Beispiel die prachtvolle Reiterstatue des römischen Kaisers Marcus Aurelius. Doch leider kann selbst der kostspielige Aufwand der vergoldeten Bronze den Irrtum des Künstlers nicht ungeschehen machen: Im natürlichen Gang des Pferdes gibt es keine derartige Bewegungsphase. Dieser Fehler mindert jedoch nicht den künstlerischen Wert der Schöpfung; das Schwergewicht muß in der künstlerischen Aussage liegen und nicht in der Exaktheit der Darstellung. Merkwürdigerweise hielten Donatello und später Verrocchio, die beiden großartigen Künstler der Renaissance, diese Statue für ein Musterbeispiel, obwohl ihnen wahrscheinlich der Fehler auffiel, denn

Gattamelata und Colleoni wurden von ihnen bereits auf Pferden dargestellt, die in ihrer naturgetreuen Bewegung für bleibende Zeiten reglos erstarrt sind.

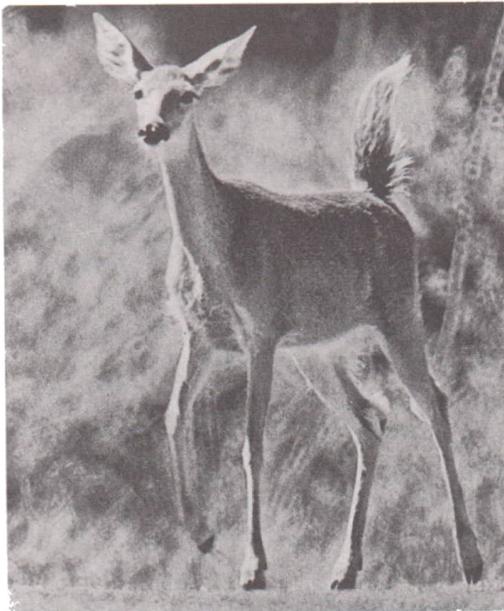
Das Kamel und die Giraffe bewegen ihre Beine in einem anderen Rhythmus. Die schwedische Forscherin Anna Innis Dagg, die hauptsächlich die Halsbewegung der Giraffen während des Ganges untersuchte, schlußfolgerte auf Grund von Fotoaufnahmen, daß das langhalsige Tier in der Weise vorwärts schreitet, daß es mal das rechte und mal das linke hintere und vordere Bein zugleich bewegt.

Der Giraffe verhilft vor allem ihr Hals zu diesem eigentümlichen Gang: Aus der Analyse der Bewegung geht hervor, daß sich der Hals während der Fortbewegung mal nach vorn neigt, mal wieder nach hinten schwenkt. Beim Festhalten der Beugungswinkel des Halses auf einer Grafik erscheint wieder die Sinuslinie, und verglichen mit dem Gang, kann eine verblüffende Übereinstimmung festgestellt werden: Sobald das Tier auf zwei Beine „kippt“, beugt sich auch der Hals nach vorn, was die Fortbewegung gewissermaßen in Schwung bringt. Bei der hinteren Dreiecksstellung beugt sich der Hals nach hinten, damit der Schwerpunkt innerhalb des Dreiecks verbleibt.

Ogleich über die Kopfbewegung von Tieren während des Gehens oder Laufens bisher wenig Analysen veröffentlicht wurden, ist es sicher, daß der Neigungswinkel des Halses eines jeden vierbeinigen Tieres im genauen Rhythmus zur Fortbewegung steht. Es ist sogar wahrscheinlich, daß der Hals zur rhythmischen Bewegung beiträgt. Wenn zum Beispiel das Pferd seinen Kopf hochhebt, verschiebt sich der Schwerpunkt etwas nach hinten, bei



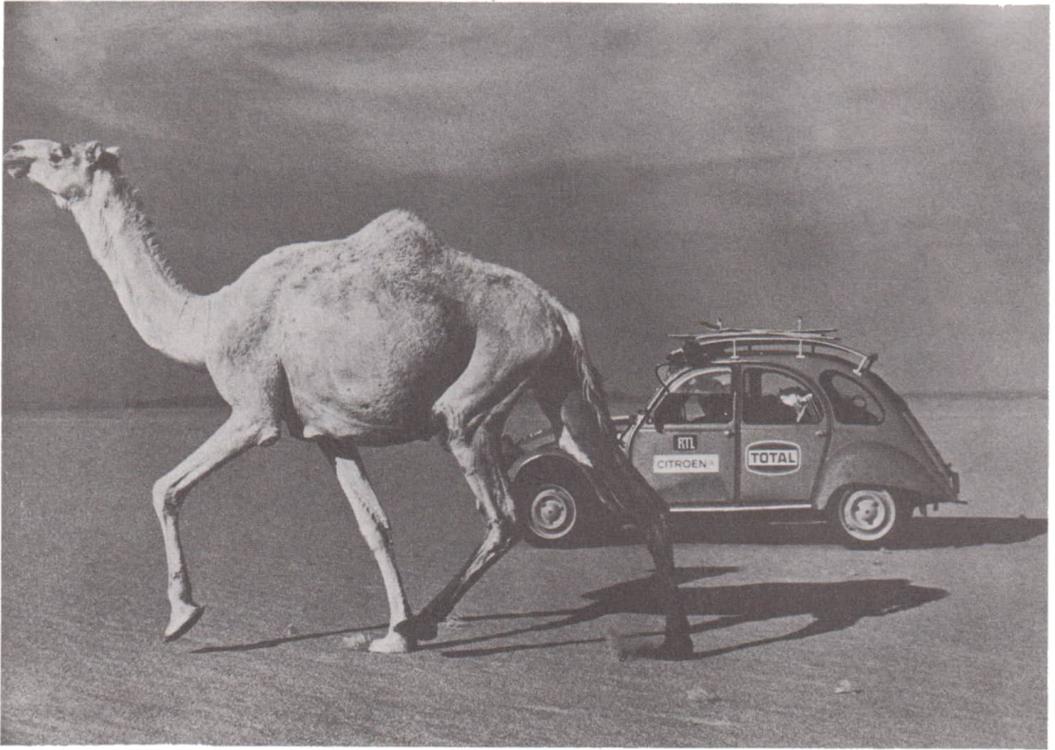
Momentaufnahmen von Gangphasen verschiedener Vierbeiner. Der in der Mitte des Bildes langsam dahinschreitende Elefant befindet sich gerade in Dreiecksstellung. Zu gleicher Zeit hebt er gelassen sein linkes Hinterbein.



Der Weißwedel- oder Virginiahirsch verlagert gerade das Schwergewicht auf das linke vordere und das rechte hintere Bein.



Die trabende Giraffe neigt sich nach links, wodurch der Schwerpunkt auf das vordere und hintere linke Bein verlagert wird.



Der Fortbewegungsrhythmus des Dromedars ist nicht so gleichmäßig wie der des Pferdes. Doch auch hier sind solche Augenblicke zu beobachten, daß beide seitlichen Beine vorwärts schwingen.

gesenktem Kopf hingegen gerät der Schwerpunkt mehr nach vorn. Im „Spiel“ seines Halses kann die gleiche Wellenbewegung festgestellt werden, wie sie sich von den Fischen über die Reptilien bis zu den vierbeinigen Säugetieren im Laufe der stammesgeschichtlichen Entwicklung in der Bewegung aller Tiere vererbt hat. Die rhythmische Sinuslinie hat sich hervorragend bewährt.

Schreitende Maschinen

Die Ingenieure unseres Zeitalters kommen immer mehr zu der Erkenntnis, daß das Rad die Aufgabe im Verkehr nicht immer erfüllt. Oft wären Maschi-

nenbeine dafür geeigneter, doch dabei bleibt die Frage offen, wie viele Beine ein derartiges Verkehrsmittel haben sollte. Die Natur selbst verfügt über eine überreiche Auswahl. Wahrscheinlich hält jener südafrikanische „Riesentausendfüßer“ den Rekord, der insgesamt über 680 Füße verfügt.

Wie kann man sich mit derart vielen Füßen vorwärts bewegen? Das ist verhältnismäßig einfach. Jeder Fuß berührt den Boden einen winzigen Augenblick später als der vorhergehende. So wie der Bewegungsbefehl am Körper des Tieres entlangläuft, so erheben sich abwechselnd die kleinen Gliedmaßen in die Luft oder berühren den Boden. Von der Seite aus gesehen, läuft auf diese

Weise die bekannte Wellenbewegung an den Gliedmaßen des gestreckten Tierkörpers entlang. So schnell wie diese scheinbare Welle nach hinten verläuft, genauso schnell bewegt sich das Tier nach vorn.

Der englische Professor M. W. Thring hat nach diesem Vorbild ein „hundertfüßiges“ Geländefahrzeug konstruiert, wobei er jedoch die Bewegungen des Modells wesentlich vereinfachte. Die abgefederten Füße sind an einem endlosen Stahlband am Unterteil des Fahrzeugs angebracht, wodurch es sich vorwärts bewegt. Sobald sich ein Bein am Ende der Maschine vom Boden abhebt, schreitet es am Laufband nach vorn, um dann erneut als Stütze zu dienen. Berechnungen zufolge könnte ein solches lastenbeförderndes Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 50 Kilometern in der Stunde erreichen, wenn man es tatsächlich bauen würde. Das Modell des Engländers ist jedoch noch viel zu primitiv, um daraus ein funktionsfähiges Exemplar in Originalgröße zu bauen.

Fachleute des Amtes für Raumfahrtforschung in den USA hingegen haben ein achtbeiniges Fahrzeug in Originalgröße gebaut. Die Maschine hebt abwechselnd je vier Beine, wodurch sie auch auf unebenem Boden leicht vorwärts zu schreiten vermag. Die Lenkung des Vehikels ist äußerst einfach. Der Elektromotor, dessen Handhabung gleichfalls kinderleicht ist, wird durch Akkumulatoren gespeist. Eine Möglichkeit der Nutzung bestünde beispielsweise als Verkehrsmittel für Körperbehinderte: In diesem Fahrzeug sitzend, könnten sie sich sogar treppauf und treppab bewegen.

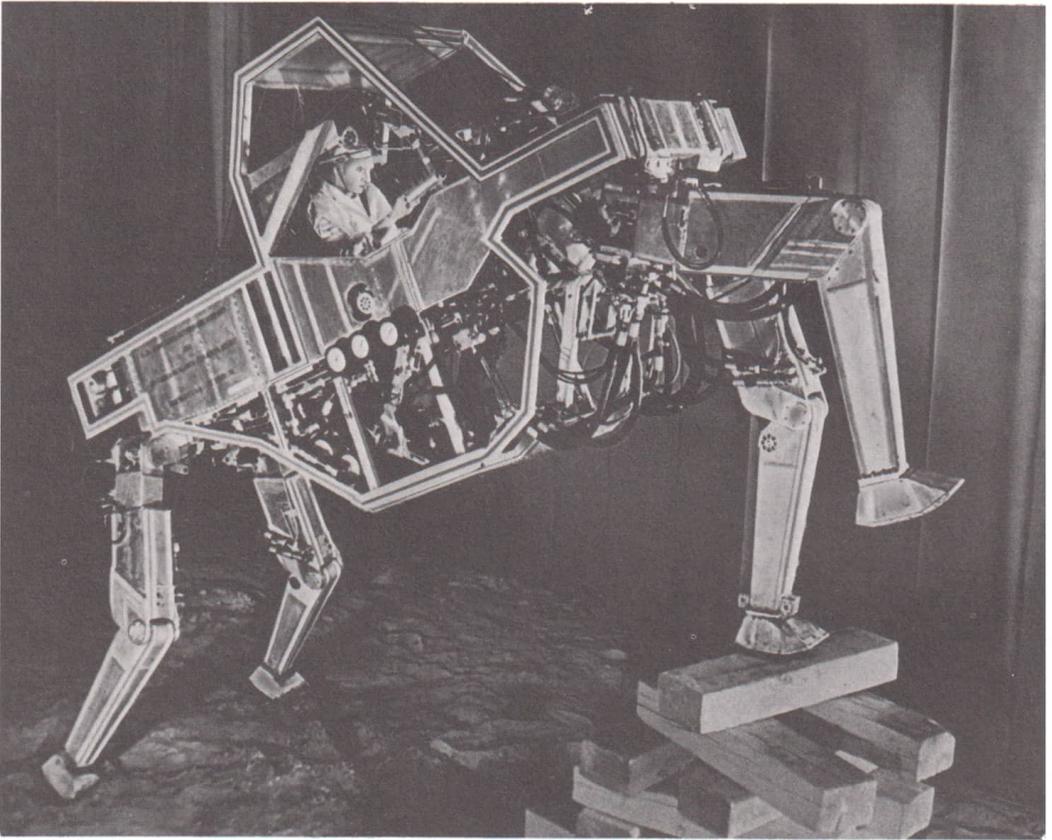
Im Jahr 1970 wurde das Versuchsmodell eines Maschinenpferdes angefer-

tigt. Das 3,3 Meter hohe und 1350 Kilogramm schwere Monstrum bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 8 Kilometern je Stunde, wenn der Lenker die Bewegungen der Stahlbeine geschickt steuert.

Das Maschinenpferd reagiert nämlich auf ein besonderes Kommando: Es überträgt die Bewegungen des Lenkers in der Steuerungskabine auf die Bewegungen der Maschine, vergrößert auf das Vierfache. Wenn der „Reiter“ seine linke Hand hebt, vollzieht das Pferd mit dem linken Vorderbein eine ähnliche Bewegung. Tritt der Lenker jedoch auf der Stelle, werden die Hinterbeine des Pferdes über die damit verbundenen mechanischen Fühler in gleichem Rhythmus bewegt.

Gegenüber den früheren aufrecht gehenden Robotern ist es dadurch dem Lenker möglich, die Richtung der Maschinenbeine selbst zu bestimmen sowie die Intensität der Bewegungen zu beeinflussen. Diese werden durch ein hydraulisches System über einen Steuerungshebel in der Steuerungskabine übertragen. Bei einiger Übung ist der Maschinenreiter mit geschlossenen Augen in der Lage, die Bewegungen des „Pferdes“ zu lenken.

Julius Mackerle, ein tschechischer Ingenieur, hingegen ist bestrebt, die Wellenbewegung der Tausendfüßer über das Rad zu nutzen, um den Bau eines zukünftigen Geländefahrzeugs zu realisieren. An jedem Rad des Vehikels reihen sich zwölf gummiballähnliche, elastische Luftbehälter aneinander, die, nacheinander aufgeblasen, den Mechanismus in Bewegung setzen, als ginge er auf Beinen. Obwohl an den „Ballrädern“ des Körpers fortlaufend Antriebskraft entsteht, kann angenommen werden, daß dieser Weg für die Konstruk-



Das amerikanische Maschinenpferd kann auf unwegsamem Gelände Lasten von einer halben Tonne transportieren. An der Konstruktion ist am interessantesten, daß die Hinterbeine in dieselbe Richtung knicken wie die Vorderbeine, obwohl die „Kniebeuge“ der hinteren Gliedmaßen jedes vierbeinigen Tieres nach hinten zeigt.

tion des Geländehikels der Zukunft nicht besonders geeignet ist.

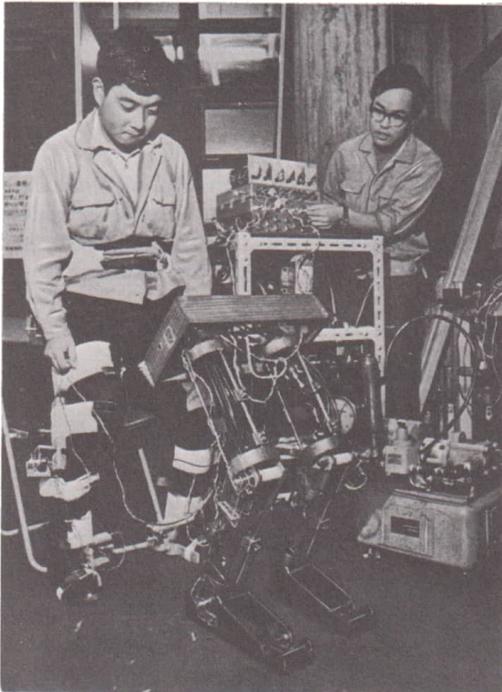
Offensichtlich scheint die Verwendung von vier Füßen die einfachste Lösung zu sein. Doch jedes Detail eines Beines mit mechanischen Konstruktionen nachzuahmen ist fast unmöglich, da vor allem die Gesamtharmonie der Beinbewegungen äußerst kompliziert ist. Der amerikanische Professor A. Frank konstruierte vor einigen Jahren ein Quadruped (Vierfüßer), dessen „Gliedermaßen“ an den Hüften und Kniegelenken mittels kleiner eingebau-

ter Elektromotoren beweglich sind. Die Lenkung dieser Konstruktion ist bedeutend einfacher als die des riesigen Maschinenpferdes. Die entsprechenden Befehle an die in den Beinen eingebauten Elektromotoren werden durch eine elektronische Rechanlage übermittelt. Nach Eingabe der Befehlssymbole an das „Maschinengehirn“, unter Berücksichtigung der Position und des Standwinkels der vier Beine, erfolgt die Reihenfolge der weiteren Steuerungsbeehle selbsttätig.

Das Versuchsmodell lernt das Gehen

zunächst in engen Laboratoriumsräumen. Die elektrischen Befehle an die Steuerung werden über Kabelbündel von einem Computer erteilt, doch es ist durchaus möglich, daß in Anbetracht der zunehmenden Reduzierung des Rauminhalts der Computer in einigen Jahren die Rechenmaschinen unmittelbar auf Gehmaschinen montiert werden können. Falls es außerdem gelingt, das Problem der Stromversorgung zu lösen, ist es durchaus möglich, daß das Quadriped das Geländevehikel des kommenden Jahrhunderts sein wird.

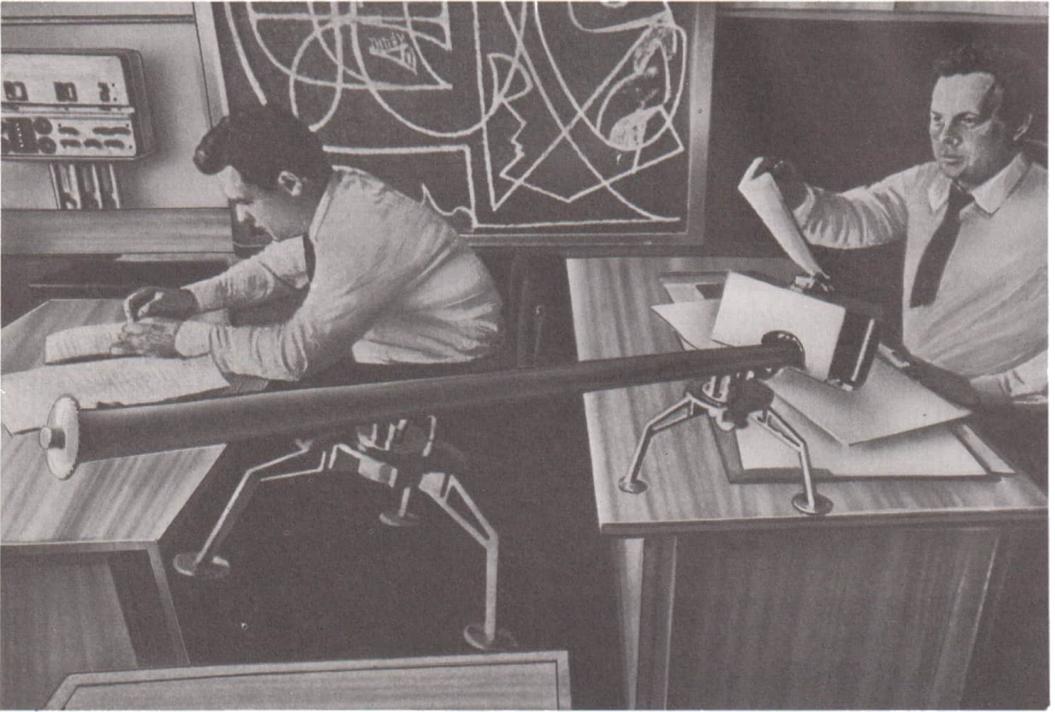
All diese Konstruktionen sind jedoch



Noch ungeschickte Schritte, doch bereits Vorläufer jener Roboter, die sich auf zwei Beinen fortbewegen werden. Diese Roboterbeine wurden von Forschern der Waseda-Universität in Japan zur Nachahmung der menschlichen Schritte, die mit Hilfe des Experimentators geführt werden, konstruiert.

von der Vollkommenheit der tierischen Bewegungsformen weit entfernt. Die meisten sind nicht imstande, Treppen zu steigen. Einige Forscher versuchen deshalb, dieses Problem beim Geländefahrzeug prinzipiell mit Hilfe des Rades zu lösen. Professor Thring projektierte einen Wagen, aus dessen Rädern kleine Stahldorne heraustreten, sobald das Fahrzeug eine Treppe erreicht. Die Ingenieure haben oft schwerwiegende Entscheidungen zu treffen: Nachahmung der Natur oder Weiterentwicklung vorhandener Mechanismen unter Berücksichtigung technischer Gesetzmäßigkeiten. Der sowjetische Wissenschaftler G. P. Katis hat zweifelsohne die Kunst der Schwerpunktverlagerung bei Tieren für seinen als „Wanderer“ bezeichneten Geländegänger übernommen.

Diese eigentümliche Konstruktion besteht aus sechs starren Beinen, von denen je drei eine „Pyramide“ bilden. Die beiden Pyramiden sind durch einen stangenartigen Körper miteinander verbunden, an dem die Lenkeinheit und das Energieversorgungssystem der Maschine in einer Kassette befestigt sind. Die Kassette ist mittels einer Zahnradkette verstellbar, so daß sie an jedes Ende des Stangenkörpers verlagert werden kann. So wie vierbeinige Tiere während des Gehens ihren Schwerpunkt verlagern, so hebt der „Wanderer“ eins seiner Enden mit den drei Beinen, wenn sich sein Schwerpunkt am entgegengesetzten Ende des Stangenkörpers befindet. Dabei dreht sich die Achse und sucht einen neuen Halt. Sobald die Taster der Beine einen festen Punkt ausgemacht haben, verlagert sich der Schwerpunkt durch die herabsinkenden Beine, das unbeschwerte Ende hingegen schwingt in die Höhe. Dieser einfache



Am Institut des sowjetischen Professors G. P. Katis „schreitet“ das Versuchsmodell eines Geländegängers geschickt von einem Tisch zum anderen. Der Schwerpunkt der Apparatur bildet die auf dem rechten Ende der Stabachse befindliche Steuerungseinheit. Wenn die linke Seite bereits festen Fuß gefaßt hat, gleitet der Steuerungskasten auf dieses Ende der Achse über.

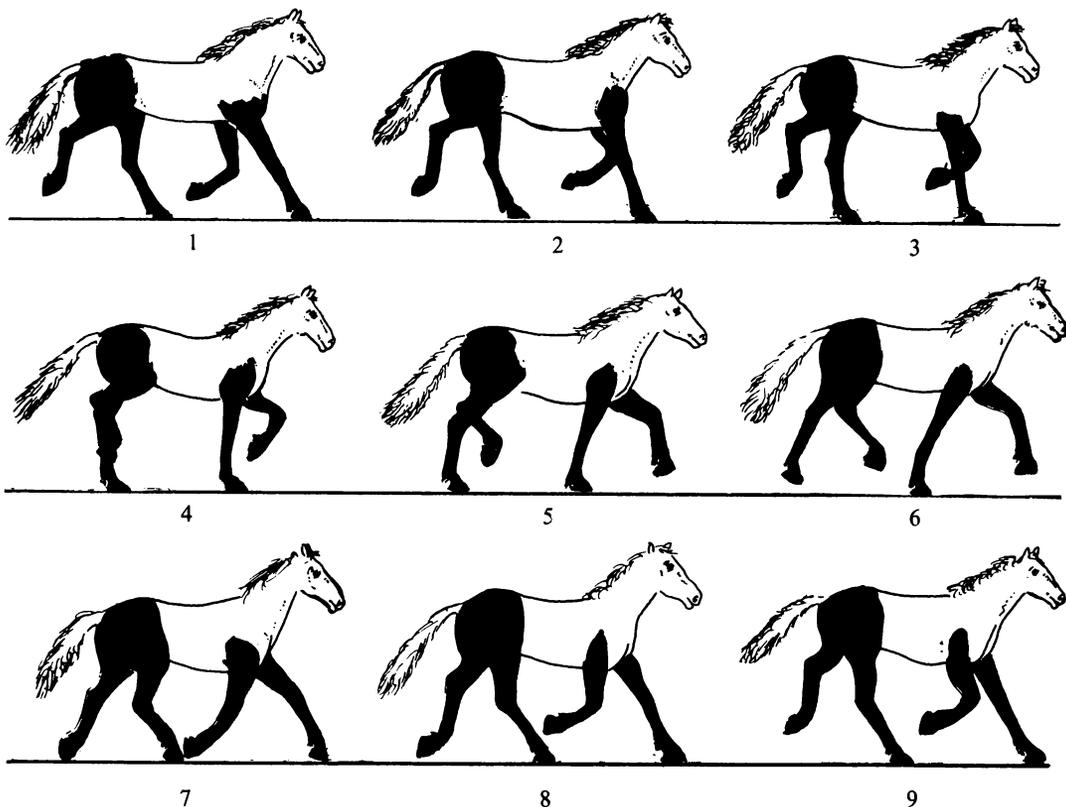
Wanderer kann nicht nur in der geologischen Forschung auf der Erde eingesetzt werden, sondern sicherlich auch mit großem Erfolg auf unbekanntem Himmelskörpern, wo er als Erkundungsroboter selbständig entscheiden muß, ob ihm der nächste Schritt einen festen Halt bietet oder nicht. Obwohl im Jahr 1971 erst ein verkleinertes Versuchsmodell des Wanderers angefertigt worden ist, werden wir sicherlich noch mehr über dieses Geländefahrzeug hören.

Entschwundene Schritte

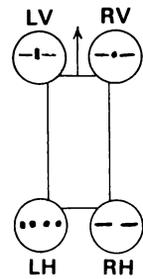
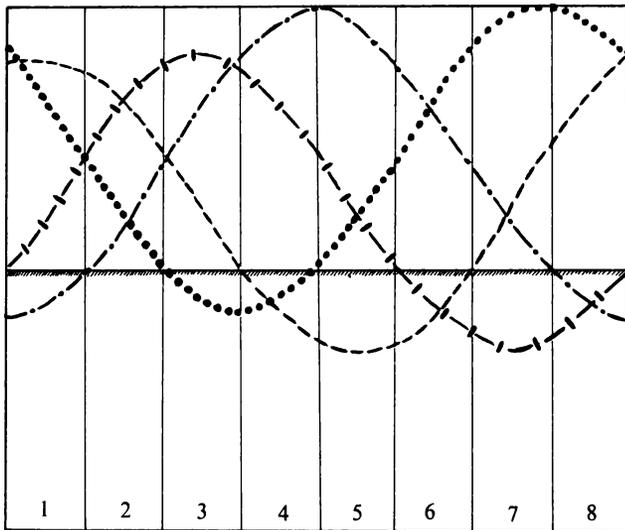
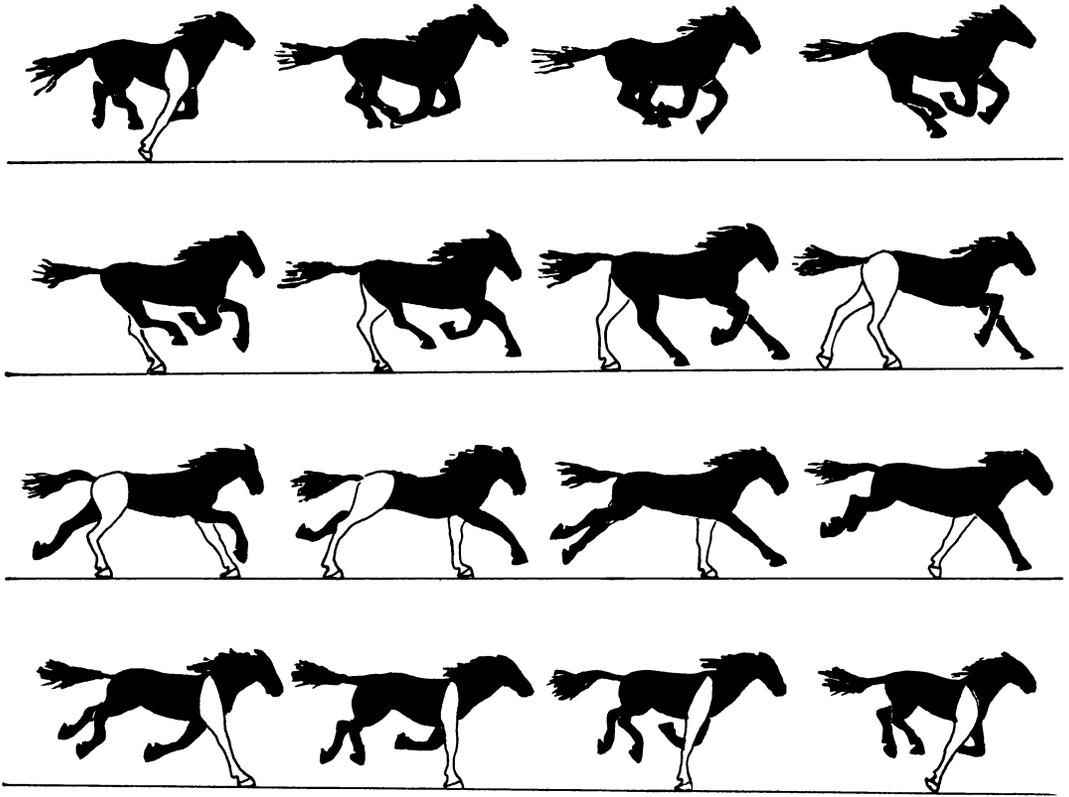
Bei beschleunigter Fortbewegung vierbeiniger Tiere verändert sich der Rhythmus der Schritte. Entsprechende Analysen an Pferden und Zebras haben ergeben, daß dabei der Moment der festen Aufstützung, das von den drei Beinen gebildete Dreieck, vollkommen verschwindet. Im Laufe dieser „ungeduldigen“ Gangart wartet das Tier die Herausbildung des Dreiecks nicht ab, da es inzwischen bereits das an der Reihe befindliche folgende Bein hebt. So entsteht der Rhythmus des Trabgangs, wobei jeweils nur zwei Beine den Boden berühren.

Dabei verlagert sich zum Beispiel der Körper des Pferdes von der vom linken hinteren und rechten vorderen Bein geschaffenen Diagonale nach der linken vorderen Seite, während das rechte Hinter- und das linke Vorderbein zu gleicher Zeit den Boden berühren; diese bilden erneut eine Diagonale, worauf dann eine Verlagerung des Schwerpunkts zur rechten vorderen Seite erfolgt. Das Tier läuft gewissermaßen im Zickzack, und es kann nur in der Weise das Gleichgewicht halten, wenn es rechtzeitig in die darauffolgende zwei-beinige Stütze wechseln kann.

Die schnellste Variante der vierbeinigen Fortbewegung ist der Galopp. Mehr als zwei Beine erreichen dabei nie den Boden! Es gibt aber auch Phasen, in denen nur ein Bein den Boden berührt. In solchen Situationen besteht die Gangart sozusagen aus einer Serie von Sprüngen, und wenn sich der Körper des Tieres mit der nötigen Kraft vom Boden abstößt, schwebt er gewissermaßen in der Luft. Die Schritte der vierbeinigen Tiere sind bei dieser Methode am längsten. Messungen zufolge beträgt ein „ganzer Schritt“ beim galoppierenden Pferd bis zu 7,9 Meter; der körperlich



Während des Trabens berühren immer nur zwei Beine des Pferdes den Boden. Dieser Wechsel des Schwergewichts entlang der Körperdiagonale ist eine regelmäßige Bewegungsfolge, die dem Tier auf eine lange Strecke die Möglichkeit für einen gleichmäßigen und rationalen Energieverbrauch bietet.



Das galoppierende Pferd stützt sich niemals mit drei Beinen auf den Boden, zeitweise befinden sich sogar alle vier Beine in der Luft. Es empfiehlt sich, das untere Diagramm mit der Darstellung auf Seite 48 zu vergleichen. Im Galopp stützt sich das Pferd in der 4., 6. und 8. Phase auf zwei Beine, in der 1. und 3. Phase nur auf ein Bein, in der 2. Phase hingegen fliegt es nahezu.

kleinere Gepard erreicht sogar noch längere „Schritte“. Nach Messungen von M. Hildebrand ist unter den vierbeinigen Tieren der Gepard Laufchampion: Er erreicht eine Stundengeschwindigkeit bis zu 110 Kilometern. Das Pferd erzielt in der Sekunde „nur“ 2,5 ganze Schritte, der Gepard hingegen 3,5. Die Geschwindigkeit wird durch einige interessante biomechanische „Patente“ im Körper galoppierender Tiere begünstigt.

So ist zum Beispiel die Renngeschwindigkeit um so höher, je näher sich an den Beinen die Anschlußstelle der „Sprungmuskeln“ dem Drehpunkt des Schenkelbeins während der Fortbewegung befindet. Vergleiche unter verschiedenen Tieren ergaben, daß bei gleich langen Beinen unterschiedliche Geschwindigkeiten erreicht werden. Al-

lerdings ist zur Erziehung einer höheren Geschwindigkeit größere Muskelkraft erforderlich, obwohl sich die Muskeln dabei nicht schneller zusammenziehen, sondern lediglich mehr Kraft entfalten. Dabei kommt das gleiche physikalische Gesetz zur Geltung wie beim Kehren mit dem Besen: Je kürzer der Besenstiel, um so schneller die Schwenkbewegung am Fußboden.

Das sogenannte Rolltreppenprinzip wird in dieser Hinsicht gleichfalls in einer interessanten konstruktiven Lösung realisiert. Fahrgäste, die auf der Rolltreppe der U-Bahn hinauflaufen, sind schneller oben, als wenn sie stehen geblieben wären, da sich die Geschwindigkeit der Treppe mit der des Menschen summiert. Das gleiche Prinzip kommt in den Gliedmaßen schnelllaufender Tiere zur Anwendung. Die ein-



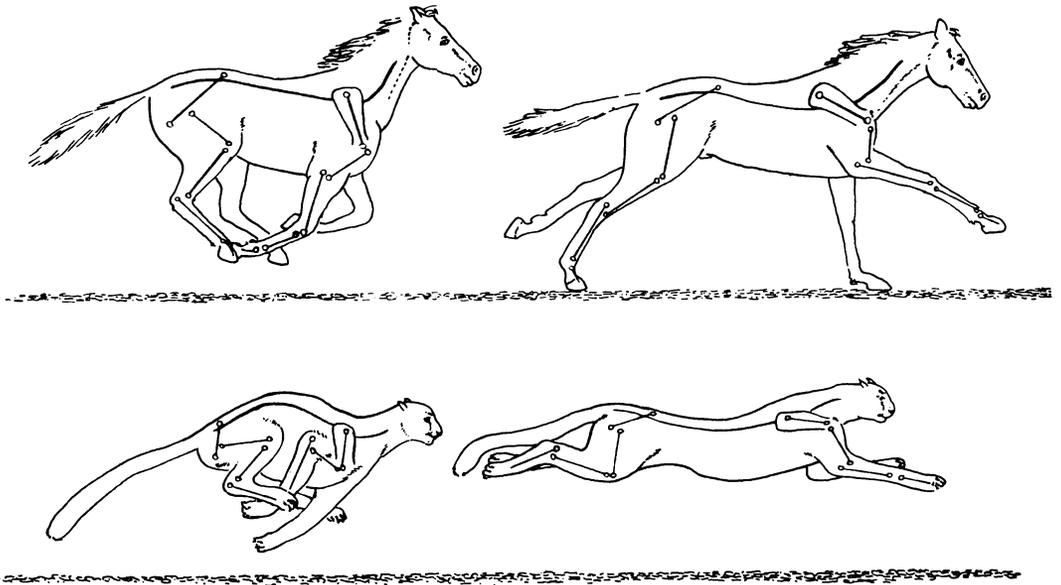
Der „Steigbügelrenner“ der Tierwelt, der Gepard, nähert seine Beine gewissermaßen dem Nacken, so schnell saust er dahin. Auf kurze Strecken nimmt er es sogar mit einem Kraftwagen auf. So können nicht einmal die sehr schnellen Gazellen vor ihm fliehen.

zelenen Teile des Beines bewegen sich in jeder Gelenkverbindung in eine Richtung, wobei sich die Muskeln zur gleichen Zeit zusammenziehen. So entwickelt sich aus der Summierung aller Teilchenbewegungen eines Beines am Fuß des Tieres die Höchstgeschwindigkeit, zu der ein einzelner Muskel in keiner Weise fähig wäre.

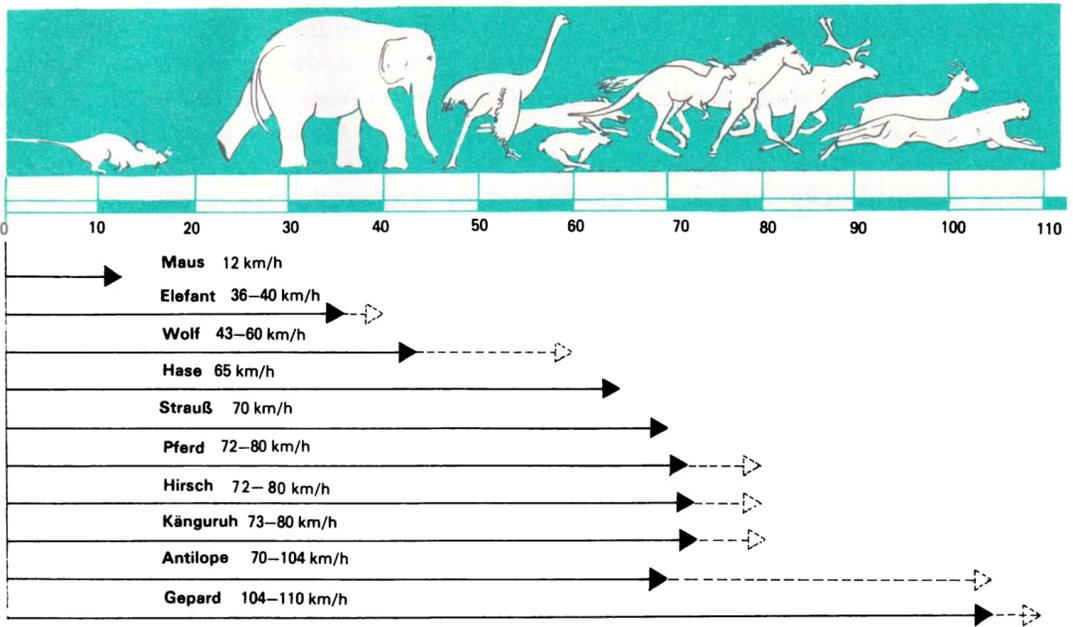
Das Rückgrat des jagenden Gepards oder Wolfes erfüllt während des Rennens gleichfalls eine wichtige Aufgabe. Im Augenblick der Berührung mit dem Boden spannt sich das Rückgrat wie ein Bogen. Sobald sich das Tier zum Sprung vom Boden erhebt, streckt sich das Rückgrat, wodurch die Wirkung des Sprunges gesteigert wird, wie auch der gespannte Bogen wegschnellen würde, ließe man ihn los. Dadurch vermag der Gepard seine Stundenge-

schwindigkeit noch um 10 Kilometer zu erhöhen.

Tiere mit langen Beinen haben es leicht – so denken wir –, denn mit kurzen Beinen ist das Laufen schwieriger. Doch zum schnellen Laufen sind nicht nur lange Beine notwendig. Auch die Fußsohlen haben bei der Geschwindigkeit des Laufens „mitzureden“. Der Bär, das Opossum und andere Wirbeltiere stützen sich auf ihre Sohlen, deshalb ist ihre Gangart ziemlich langsam. Wenn sie ihre Fortbewegung beschleunigen wollen, müssen sie vor allem ihre Sohlen vom Boden abheben. Ein mühsames Unterfangen! Das Pferd hingegen geht durchweg auf „Zehenspitzen“. Der Huf bedeckt das Ende des kräftigen mittleren Zehs, und dieser schließt sich in einem besonders steilen Winkel an die Mittelhand- beziehungsweise den Mit-



Die „Elastizität“ des Knochengerüsts erhöht die Vehemenz des Galopps. Das Rückgrat des mit 110 Kilometern in der Stunde dahinjagenden Gepards krümmt sich in der Luft, um sich daraufhin kraftvoll wie eine Feder wieder gerade zu strecken. Im Vergleich dazu ist das Rückgrat des Pferdes während des Rennens beinahe vollkommen steif.



In einer fiktiven Olympiade der Tiere müßten die Fähigkeiten der Teilnehmer mindestens in so vielen Laufdisziplinen gemessen werden, wie Sportler am Wettbewerb teilnehmen. Auf diesem Bild ist die Reihenfolge der Plazierungen des Kurzstreckenlaufs ersichtlich.

telfußknochen, an den Unterarm oder an das Schienbein an. Erreicht der Fuß den Boden, biegt sich die Mittelhand beziehungsweise der Mittelfuß elastisch nach unten, währenddessen sich das Sehnenband strafft. Beim Erreichen der höchsten Anspannung schnellt das Sehnenband kraftvoll und federnd zurück. Dies trägt zur schnellen Ausrichtung des Beines bei, was während des Laufens wiederum von neuem die Fortbewegungsgeschwindigkeit steigert.

Wo liegt die Grenze der Laufgeschwindigkeit? Sie hängt in erster Linie von der Bewegungsgeschwindigkeit der Beine ab. Wenn das Tier während des Laufens den Boden berührt, muß es die Beine mit einer größeren Geschwindigkeit als die des eigenen Körpers abdrücken, denn nur so kann es sich nach vorn abstoßen. Wenn es die Beine langsamer bewegt, „bremst“ es sich ab wie ein an

einem Abhang hinabfahrender Kraftwagen, dessen Motor vom Kraftwagenführer eingeschaltet wird, damit der Abrollschwung durch die Einschaltung des kleinsten Geschwindigkeitsgangs gemindert wird. Die Laufgeschwindigkeit der Tiere wird demnach von der Bewegungsgeschwindigkeit der Gliedmaßen bestimmt, was wieder vom Körperaufbau und von dem Entwicklungsstand der Muskulatur abhängt. Sicher ist aber, daß bei einer Tierolympiade in einem Gesamtlaufwettbewerb das Pferd die vorderste Platzierung erreichen würde: Es ist nicht nur schnell, sondern auch ausdauernd. Darum ist es kein Zufall, daß es das älteste Haustier als auch das älteste Verkehrsmittel des Menschen ist. Die Ingenieure können von ihm lernen!

Lebende Katapulte

Gerät der Pilot eines Strahltriebflugzeugs in Gefahr, kann er sich nur in einer Weise retten: Er sprengt mittels eines Knopfdrucks eine im Sitz des Überschallflugzeugs untergebrachte Dynamitpatrone, wodurch er — zusammen mit dem Sitz — aus dem Flugzeug geschleudert wird. Derartige Katapulteinrichtungen befinden sich heute bereits in jedem Strahltriebflugzeug, denn der Pilot könnte sonst die defekte Maschine in Anbetracht der hohen Geschwindigkeit und der orkanartigen Luftströmung nicht verlassen.

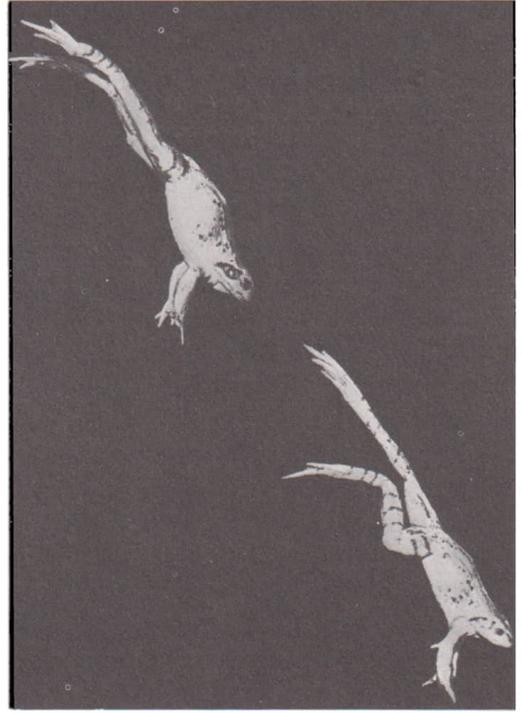
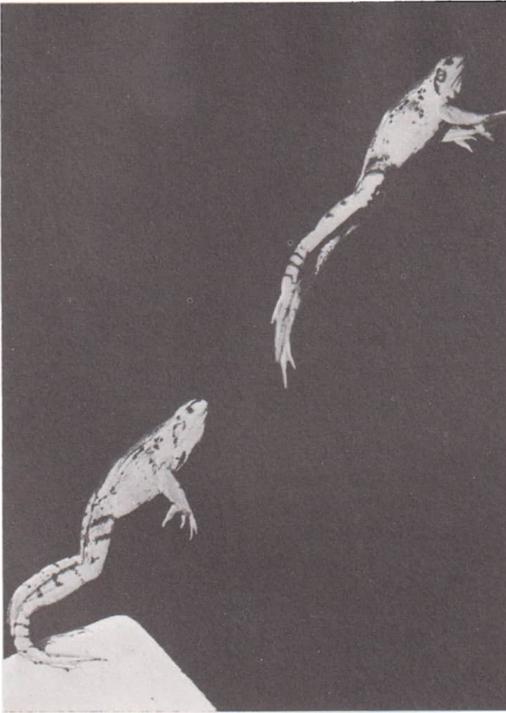
Die Methode des „Katapultierens“ ist in der Tierwelt gleichfalls nicht unbekannt, nur daß sich Tiere im Fall einer Gefahr selbst „herausschießen“. Im allgemeinen kann jedes vierbeinige Tier springen, doch bei der Suche nach guten Springern denken wir in erster Linie an das Känguruh, den Frosch, die Heuschrecke und den Floh. Den Rekord im Weitsprung würde bei einem verhältnismäßigen Vergleich ohne Zweifel der Floh gewinnen, denn er springt zweihundertmal so weit, wie sein Körper lang ist, während das Känguruh mit einer fünffachen Weite gegenüber seiner Körperlänge erheblich zurückbliebe. Selbstverständlich werden die möglich erreichbaren absoluten Ergebnisse auch wesentlich durch die Körpergröße bestimmt; in ihrer eigenen „Gewichtsklasse“ sind die Tiere deshalb gleich gute Springer. Doch von der gleichen Absprunglinie ausgehend, erzielt zweifellos das Känguruh mit Sprüngen bis zu 7,8 Metern die besten Ergebnisse, der Floh hingegen mit Weiten von 30 bis 50 Zentimetern den letzten Platz.

Wieviel Grad muß der Absprungwinkel des Tieres zur Erreichung der weite-

sten Entfernung betragen? Auf diese Frage geben die ballistischen Gesetze der Physik Auskunft: Der ideale Winkel liegt bei 45 Grad. Will der kluge Gärtner die entferntesten Blumenbeete mit dem Wasserschlauch erreichen, muß er den Schlauch in einem Winkel von 45 Grad halten. Vermutlich haben auch Frösche die gleichen Erfahrungen gemacht, denn sie springen in einem Winkel von 35 bis 40 Grad. Professor James Gray hat sogar Frösche beobachtet, die sich genau für den Winkel von 45 Grad entschieden.

Berücksichtigen wir lediglich die Sprunghöhe, so müssen noch weitere physikalische Gesetzmäßigkeiten beachtet werden. Die erreichbare Höhe hängt nicht von der Masse des Körpers ab. Ganz gleich, ob ein Mensch oder ein Floh von der gleichen Stelle abspringt, beide würden eine Sprunghöhe von 1 Meter erreichen, sofern sie sich mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 4,5 Metern je Sekunde vom Boden abheben. Für den Menschen bereitet dies keine besonderen Schwierigkeiten. Der Floh ist hierzu jedoch nicht in der Lage, obwohl er im Verhältnis zu seiner Körpermasse nicht schwächer ist als der Mensch. Doch hierbei spielen eben die bereits erwähnten Körpermaße eine wesentliche Rolle.

Die Körpermasse muß nämlich auf die Absprunggeschwindigkeit beschleunigt werden. Je länger der hierfür zur Verfügung stehende Weg ist, um so kleiner kann die erforderliche Beschleunigung sein. Bereitet sich ein Mensch in hockender Stellung zum Sprung vor, so steht ihm zur Beschleunigung seines Körpers bis zum Moment des Absprungs ein Weg von etwa einem halben Meter zur Verfügung. Nimmt man an, daß die Muskeln die Beine in einer Zeit



Vier Phasen des Froschsprungs. Beim Absprung richten sich die einzelnen Glieder der Beine allmählich gerade aus, wobei sich der Körper nach dem Prinzip der Stufenrakete beschleunigt. Er stößt in einem Winkel von ungefähr 35 bis 45 Grad vom Boden ab. Physikalischen Gesetzen entsprechend vermag er so am weitesten zu springen.

von 0,225 Sekunden strecken, so erreicht der Mensch die Absprunggeschwindigkeit von 4,5 m/s mit einer Startbeschleunigung von 19,7 m/s². (Im freien Fall wirkt auf alle Körper die Fallbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Im obigen Beispiel wirkt auf den Menschen eine Beschleunigung von 2 g).

Doch was soll der Floh tun? Selbst wenn er die Beine vollständig ausstreckt, wird er nur um 1 Millimeter größer. Ihm steht also zur Beschleunigung bis zum Absprung nur eine sehr kurze Wegstrecke zur Verfügung. Um trotzdem eine hohe Absprunggeschwindigkeit zu erreichen, muß er alle Bewegungen bis zum Absprung in einer kürzeren Zeit verwirklichen. Messungen zufolge ist sein „Katapult“ nur 0,001

Sekunde lang wirksam, so daß sich sein Körper unter Einwirkung einer Beschleunigung von 200 Gramm wie eine Pistolenkugel bewegt. Trotzdem kann der Menschenfloh auch dann nur eine Sprunghöhe von ungefähr 20 Zentimetern erreichen. Im Verhältnis zu seinem nur 1,5 Millimeter langen Körper ist dies immerhin noch ein großartiger Rekordwert.

Aus den bisherigen Beispielen geht hervor, weshalb gutschpringende Tiere lange Beine haben. Zur Erreichung der Anfangsgeschwindigkeit des Sprunges wird der Körper mit dem bekannten „Rolltreppentrick“ beschleunigt. Vor dem Sprung zieht der Frosch die Beine zusammen und spannt die Muskeln an. Im Moment des Absprungs treten zu-

nächst die stärkeren Schenkelmuskeln in Aktion, worauf die Beschleunigung durch die Muskeln des Unterschenkels fortgesetzt wird, schließlich wird das in die Höhe springende Tier von den Spannmuskeln der Ferse und der Zehe weitergeschoben.

Interessant ist auch, zu beobachten, wie der Frosch erforderlichenfalls den Wirkungsgrad seines Sprunges korrigiert. Durch das Andrücken der Vorderbeine an den Körper erfolgt eine Reduzierung des Luftwiderstands, die Augen dagegen werden wie Scheinwerfer eines modernen Kraftwagens in die Kopfhöhle eingezogen. Das merkwürdigste jedoch ist, daß der Frosch die Augen schließt, nachdem er sein Opfer angepeilt hat, und trotzdem stets sein Ziel erreicht. Forscher haben sogar beobachtet, daß der Frosch während des Sprunges – falls die Richtung nicht ganz stimmt – die Sprungrichtung verändert.

Einem Kollektiv des Technologischen Instituts Massachusetts gelang es, das Rätsel um die geschlossenen Augen des springenden Frosches zu lösen. Den Untersuchungen zufolge schließt zwar das Tier seine Augen, doch das untere Augenlid ist lichtdurchlässig, so daß der Frosch auch bei geschlossenen Augen sehen kann, wenn auch etwas undeutlicher. Die Genauigkeit des Sprunges kommt dadurch zustande, daß das Bild des Opfers stets auf denselben Punkt der Augennetzhaut fällt. Falls sich das Bild während des Sprunges verschiebt, bedeutet dies für den Frosch, daß er von der genauen Richtung abgekommen ist. In solch einem Fall verändert er reflexartig während des Fluges die Lage eines Beines, wodurch er den Schwerpunkt seines Körpers verändert und so genau sein Ziel erreicht.

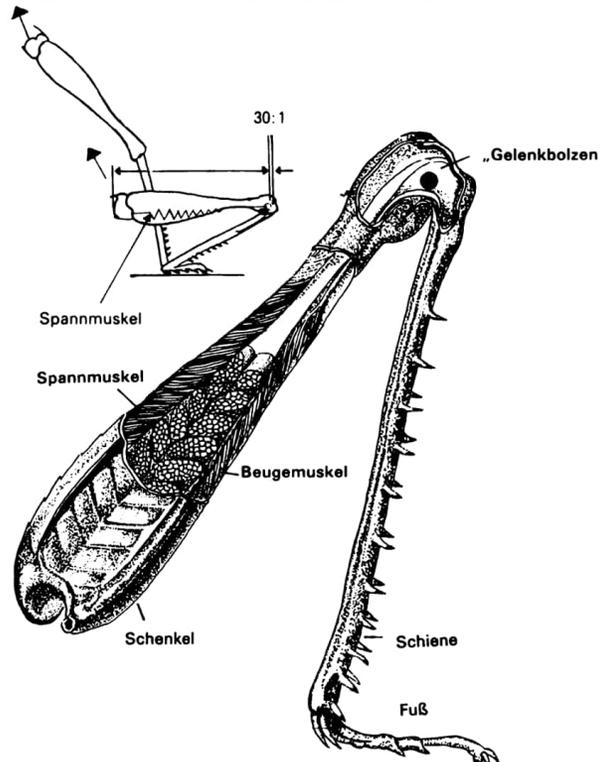
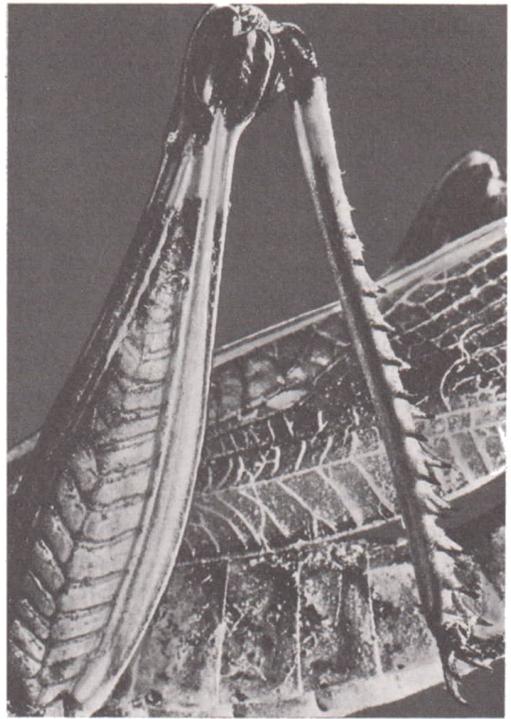


Dieses Akrobatenkunststück wiederholt die Heuschrecke *tagaus, tagein*. Nachdem sich der Schwerpunkt der Heuschrecke auf eine Linie mit dem Schenkelansatz verlagert hat, überschlägt sie sich in der Luft nicht, sondern behält ihre schräge Haltung bei und erreicht so, auf den Beinen federnd, den Boden.

Die fast gleiche Sprungmethode der Heuschrecke und des Grashüpfers ist vom biomechanischen Gesichtspunkt ebenfalls bemerkenswert. Eine Heuschrecke kann mit dem „Katapult“ ihrer eingeknickten Beine ungefähr 45 Zentimeter hochspringen. Um diese Höhe zu erreichen, muß sie mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 3 Metern je Sekunde vom Boden abspringen. Da sie im allgemeinen in einem Winkel von 60 Grad springt, ist entsprechend den physikalischen Gesetzen für jedes einzelne Bein

eine Schubkraft von 0,15 Newton nötig. Eine beachtliche Leistung, denn diese Kraft reicht aus, das Achtfache der eigenen Körpermasse anzuheben. Der amerikanische Forscher G. Hoyle bestätigte diese Werte auch experimentell. Er bettete eine Heuschrecke in Plastilin und befestigte an einem ihrer Beine eine Masse von 20 Gramm. Die Heuschrecke hob trotzdem das Bein an, leistete also eine Kraft von 0,2 Newton und bestätigte so die theoretischen Annahmen.

Dieser Wert erscheint um so erstaunlicher, wenn wir das Bein der Heuschrecke gründlicher untersuchen. Das eine Schenkelende ist 30 bis 40 Millimeter lang, und im Grunde genommen ist dieses dritte Glied des Beines ein zweiarmiger Hebel, dessen anderes Ende insgesamt 0,75 bis 1 Millimeter vom Drehpunkt des Gelenks entfernt ist, so als würde jemand eine neuartige Kinderwippe anfertigen, deren eines Ende 3 Meter, das andere aber nur 7,5 bis 10 Zentimeter lang ist. Ein auf die längere Wippenseite gesetztes 10 Kilogramm schweres Kind könnte mit seinem Vater nur schaukeln, wenn dieser mindestens 300 Kilogramm schwer wäre. Ebenso kann am Bein einer Heuschrecke nur deshalb eine Hubkraft von 0,2 Newton wirken, weil die sich zusammenziehende Muskulatur am kurzen Hebelarm des Beines eine Zugkraft von 8 Newton entfaltet. Da von den 2



Mit Hilfe ihres Hinterbeins schnellst sich die Heuschrecke wie ein Katapult in die Höhe. Ihre Schenkel funktionieren wie ein kleiner zweiarmiger Hebel, dessen Drehpunkt beim plötzlichen Zusammenziehen der „Feder“ des Spannmuskels eine Art „Gelenkbolzen“ darstellt. Gewöhnlich bedient sich die Heuschrecke, wenn sie springt, dieser Methode.

Gramm der Gesamtmasse der Heuschrecke etwa 1 Fünfundzwanzigstel auf die Beinmuskulatur entfällt, ist jedes Gramm der Muskulatur theoretisch in der Lage, eine Zugkraft von 200 Newton zu entwickeln. In der gesamten Tierwelt verfügen nur noch Muscheln über eine derart leistungsfähige Muskulatur.

Doch die Heuschrecke kann nicht nur springen, sondern auch – wie der Grashüpfer – laufen, indem das Tier die Muskeln langsam zusammenzieht. Wie ist das Insekt imstande, diese beiden extremen Aufgaben mit denselben Beinen zu lösen? Die mikroskopischen Untersuchungen von G. Hoyle brachten eine interessante Aufklärung. In den Muskelbündeln der Beine befinden sich „schnelle“ und „langsame“ Nervenstränge. Während der Grashüpfer läuft, erhalten die Muskelbündel lediglich von den „langsamen“ Nervensträngen Befehle zum Zusammenziehen. Setzt der Grashüpfer jedoch zum Sprung an, bleibt er vorher plötzlich stehen. Ein blitzschnelles Nervensignal durchdringt sämtliche Muskelfasern: Achtung, Bereitschaftshaltung! Beim Absprung ziehen sich auf Befehl der Nerven sämtliche Muskelfasern zusammen, so daß der Körper des Tieres innerhalb einer unglaublich kurzen Zeit beschleunigt wird.

Springspinnen haben außerdem das Sicherheitsseil erfunden. Sie schweben wie die Bergsteiger, die mit einem am Körper befestigten Seil einen Abgrund überspringen, in der Luft. Beim Springen zieht die Spinne einen Spinnfaden hinter sich her. Falls sie Gefahr wittert, wird das Fadenziehen plötzlich eingestellt, sie hält sich am Faden fest und ist so auch während des Fliegens imstande „abzubremsen“. Das „Sicherheitsseil“ verhindert das Weiterfliegen, sie er-

reicht den Boden und hat genügend Zeit, sich vor ihrem Feind in Sicherheit zu bringen. Die Spinne nutzt diese Möglichkeit aber auch, wenn von ihr die Entfernung bei der Beutejagd schlecht eingeschätzt wurde. Dabei fliegt sie nicht über ihr Ziel hinweg, sondern bremst vorher ab und stürzt sich noch rechtzeitig auf ihr Opfer.

Der Schnellkäfer drückt den Abzug ab

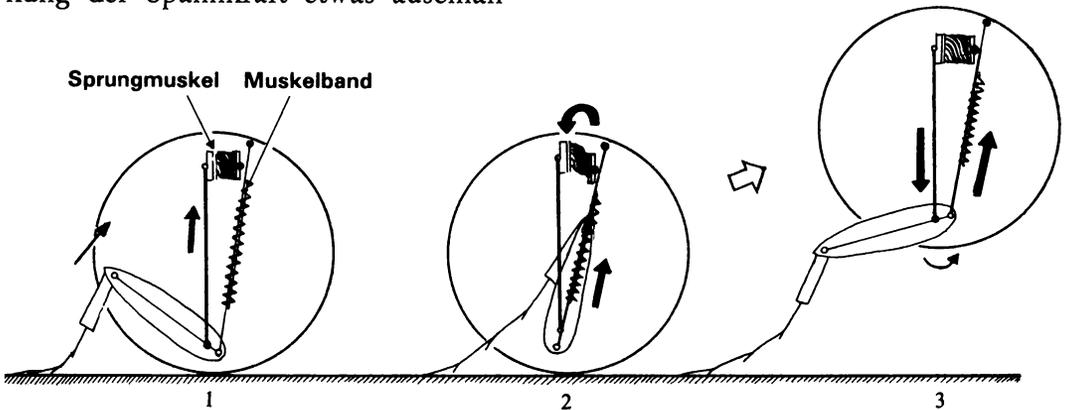
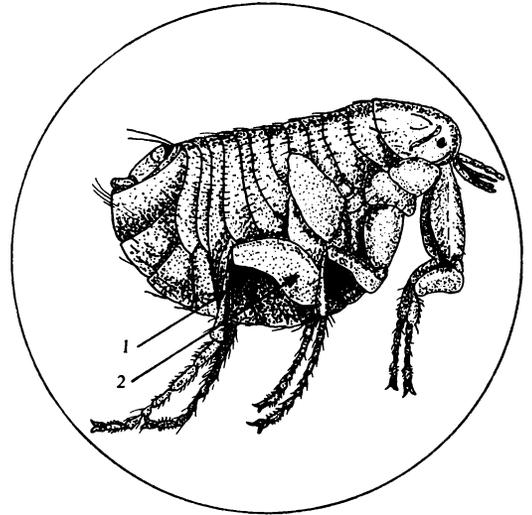
So unangenehm und nichtsnutzig der winzigkleine Floh auch ist, in den Augen eines Ingenieurs ist er jedoch ein wahres technisches Wunderwerk. Er verfügt über einen Katapult, der seinen Körper mit enormer Kraft auf die Anfangsgeschwindigkeit des Sprunges beschleunigt. Der Floh des Wildkaninchens springt 5 Zentimeter hoch, der Menschenfloh hingegen erreicht eine Höhe von 20 bis 30 Zentimetern, das ist ungefähr das Zweihundertfache seiner Körperlänge. Im Weitsprung beträgt seine Spitzenleistung etwa einen halben Meter.

In dem 0,5 Gramm schweren Körper werden im Moment des Absprungs unglaubliche Energien frei. Dabei handelt es sich tatsächlich um einen kurzen Augenblick, denn die beiden hinteren Beine strecken sich innerhalb 1 Tausendstelsekunde. Der englische Forscher H. C. Bennet-Clark interessierte sich vor allem dafür, wie der Floh in die Höhe schnellt. Dabei mußte die Analyse der Beinonstruktion mit außerordentlicher Geduld vorgenommen werden, doch ihm half eine Studie, in der bereits um das Jahr 1920 von zwei amerikanischen Forschern die Anatomie des äußerst kleinen Tieres genau beschrieben wurde. Was beim Menschen der

Oberschenkelknochen, ist bei den Insekten das dritte Beinglied, wissenschaftlich als Femur bezeichnet. Die Untersuchungen ergaben, daß der Floh die Beine vor dem Sprung in der Weise zusammenzieht, daß seine Schenkel in eine senkrechte Lage geraten, als würde jemand, auf der Erde sitzend, seine Beine anziehen. Im Augenblick des Abspringens schnellt der Femur plötzlich in die Waagerechte, währenddessen sich die Fußglieder, sich auf den Boden stützend, strecken.

Setzt das Tier zum Sprung an, ist ein leises Knacken zu hören. Dabei wendet sich der Schenkel in einer Viertelumdrehung, die Muskulatur ist angespannt. Im selben Augenblick, da der zweiarmlige Hebel des Femurs die senkrechte Lage einnimmt, wird der Spannmuskel durch das nach unten reichende kurze Ende derart angespannt, daß der Muskel zerreißen würde, wenn nicht ein besonderes Muskelbündel in Bereitschaft stünde. Dabei handelt es sich um ein kurzes zylinderförmiges Muskelbündel, das in Anbetracht der enormen Wirkung der Spannkraft etwas auseinan-

dergezerrt wird, wodurch aber viel Energie gespeichert werden kann. Berechnungen und Versuchen zufolge speichert ein stecknadelkopfgroßes Stück dieses Muskelbündels so viel Energie, daß damit ein Gewicht von 15 Gramm 1 Zentimeter hochgehoben werden könnte. Beim Sprungvorgang bewegt diese plötzlich frei werdende Energie den Körper des Flohs bis zum Augenblick des Absprungs mit einer Be-



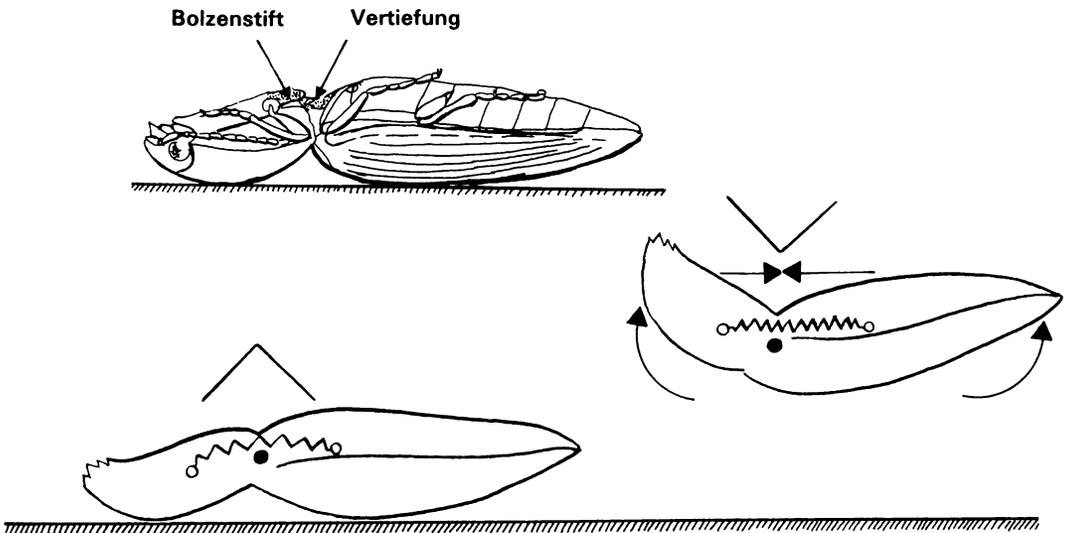
Bevor der Floh mit dem Bein zum Springen ansetzt (1), ist ein Knacken zu hören. Beim Anspannen des winzigen Muskelbündels staut sich eine große Energie auf (2). Im Augenblick des Absprungs zieht sich das quer verlaufende Muskelband zusammen, wodurch der Floh den „Abzug“ abdrückt. Dabei tritt die „Feder“ des Muskelbündels in Funktion und setzt den Beinmechanismus in Bewegung.

schleunigung von 200 Gramm. Währenddessen stützt sich das stachelbehaarte Ende des Beines auf den Boden. Wird der Floh auf eine Glasplatte gesetzt, versagt das lebende Katapult den Dienst, und er kann nicht springen.

Experimente haben eindeutig bewiesen, daß der Sprungmechanismus des Flohs entsprechend dem aufgezeigten Prinzip funktioniert. Das winzige Tierchen verbraucht bei jedem Sprung zweifellos enorm viel Energie, deshalb ist diese Fortbewegungsform für den Floh keinesfalls wirtschaftlich. Doch bei Gefahr oder bei einem schnellen „Wohnungswechsel“ (bei der Suche nach einem neuen Wirt) zieht er durchaus seinen Nutzen daraus.

Die meisten Käfer geraten in große Schwierigkeiten, wenn sie von einem Grashalm herunterpurzeln und auf den

Rücken fallen. Dabei zappeln sie, zu Tode erschreckt, und suchen nach einem Halt. Nicht in Schwierigkeiten geraten dabei Vertreter der zahlreich verbreiteten Familie der Schnellkäfer! Sie verfügen über einen Katapult, der sie aus solch leidigen Situationen befreit. Forschern war bis vor kurzem nicht bekannt, wie sich der Käfer aus dieser Rückenlage wieder „aufrichtet“. Untersuchungen des englischen Forschers G. Evans brachten erst im Jahr 1972 Klarheit über den rätselhaften Mechanismus des Schnellkäfers. Mit Hilfe von Zeitlupenaufnahmen stellte es sich heraus, daß ein 12 Millimeter langer Schnellkäfer 30 Zentimeter hochspringen kann, wobei er sich in der Luft mindestens einmal überschlägt. Die Beine benutzt er dabei nicht. Dazu wäre er auch nicht in der Lage, zumal er ja auf



Der Schnellkäfer kommt nicht in Verlegenheit, wenn er zufälligerweise auf den Rücken fällt. Er biegt seinen Körper in die Form eines umgekehrten V, wodurch sich gleichzeitig sein „Katapultmuskel“ spannt. Durch die Auslösung des Spreizbolzens zieht der Muskel den Brustkorb und den Hinterleib jählings zusammen. In Auswirkung der Bewegungsenergie der trägen Körpermasse schnellt der Käfer in die Luft und fällt dann, sich um seine eigene Achse drehend, auf die Füße.

dem Rücken liegt. Die Schnellkäfer haben dieses besondere Akrobatenstück während ihrer langen stammesgeschichtlichen Entwicklung einstudiert. Sie spannen vor dem Sprung den Körper zu einer umgekehrten V-Form. Im Augenblick des Sprunges klappen sie ihn plötzlich zusammen und nehmen dabei eine richtige V-Form ein.

Der Schwerpunkt des 12 Millimeter langen Käfers verlagert sich unterdessen um 0,6 bis 0,7 Millimeter nach oben. Zum 30-Zentimeter-Sprung muß sich das Insekt mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 2,4 Metern in der Sekunde vom Boden abstoßen, es steht ihm also nur der Bruchteil einer Sekunde zur Verfügung, um den Körper zu beschleunigen. Messungen zufolge nimmt der Schnellkäfer innerhalb 640 Millionstelsekunde die entgegengesetzte V-Form ein, wodurch er eine Beschleunigung von 380 Gramm erreicht!

Ein auf einen Nervenbefehl reagierender Muskel wäre zu einer derart schnellen Bewegung nicht in der Lage, deshalb spannt der Käfer während der Vorbereitung zum Sprung das aus der Brust in den Hinterleib führende Muskelbündel. Während sich der Muskel anspannt, bleibt der am Ende des Brustkorbs herausstehende harte Knebelstift in der winzigen Vertiefung des Hinterleibs hängen, ähnlich wie bei einer Jagdflinte, deren gespannter Hahn durch den Abzug gesichert ist. Im Moment des Sprunges drückt das Insekt den Abzug mit Hilfe einer dünnen Muskelfaser ab. Während dabei der Knebelstift ausgelöst wird, wird der Körper durch die enorme Kraft des plötzlich zurückschnellenden Muskelbündels in die entgegengesetzte V-Stellung gerissen.

Man muß zugeben, der Schnellkäfer

ist vollkommen schwindelfrei! Selbst durchtrainierte Raumfahrer können keine höhere Beschleunigung als 10 bis 15 Gramm ertragen. Der Kopf des Käfers hingegen bewegt sich im Augenblick des Sprunges — da er vom Drehpunkt der Brust und des Leibes 3,5 Millimeter entfernt ist — mit einer Beschleunigung von 2000 Gramm. Er hat sich anscheinend während der Jahrmillionen anhaltenden stammesgeschichtlichen Entwicklung dieser rasend schnellen Bewegung angepaßt.

Springende Dosen

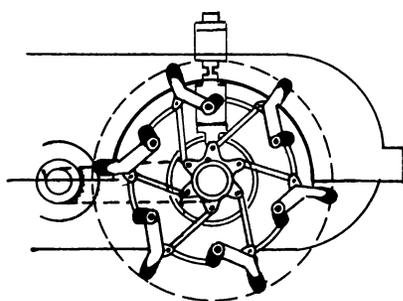
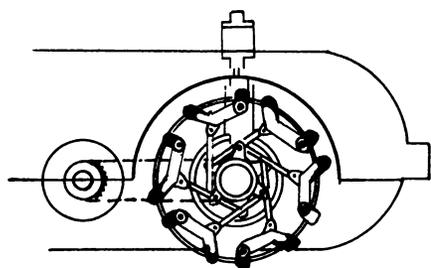
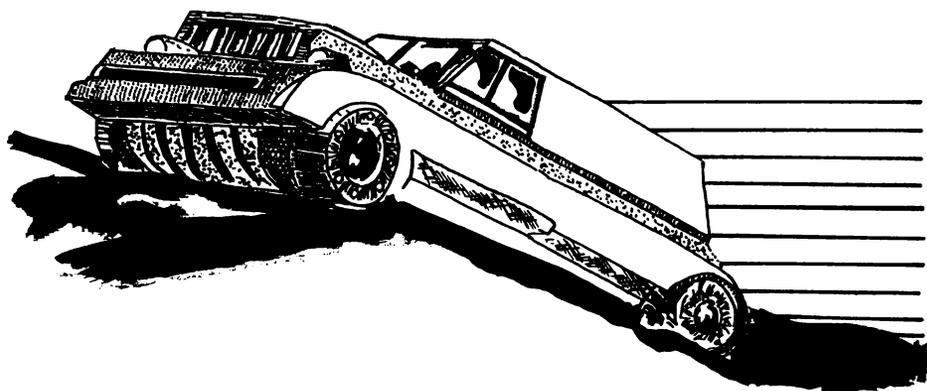
Die besondere Fortbewegungsform der Känguruhs, ihr „Galopp“ von 80 Kilometern in der Stunde, beschäftigt schon seit langem die Phantasie der Erfinder und Konstrukteure. Wie könnte man ein Fahrzeug konstruieren, das die Fortbewegungsform des Känguruhs nachahmt? Räder kommen offenbar nicht in Frage, denn das Ziel bei der Konstruktion eines derartig neuen Fahrzeugs sollte in erster Linie ein leichtes und müheloses Vorwärtkommen in unwegsamem Gelände sein.

Sowjetischen Ingenieuren gelang es schließlich, die Konstruktion eines Geländefahrzeugs zu entwerfen, das sich anstatt auf Beinen auf elastischen „Gummipantoffeln“ bewegt. In jedem Pantoffel rotieren um eine schräge Welle je zwei Gewichtsmasseln in entgegengesetzter Richtung. Erreichen die Masseln durch die Drehung den höchsten Punkt, reißt ihr Beharrungsvermögen das Fahrzeug in die Höhe; befinden sie sich jedoch auf dem tiefsten Punkt, drücken sie das Fahrzeug an den Boden. Diese Bewegung entspricht zwar nicht den Sprüngen des Känguruhs, doch

vom mechanischen Gesichtspunkt betrachtet, lassen sich mit dieser Konstruktion die gleichen Sprünge erreichen.

Im Hof des Sibirischen Forschungsinstituts für Metallurgie wurde bereits im Jahr 1959 ein nach diesem Prinzip gebautes funktionsfähiges Modell erprobt. Es bedurfte nur eines einzigen Blickes, um sich davon zu überzeugen, daß an dem vollkommen geschlossenen Kasten keine Spur von Rädern vorhanden ist und es sich dennoch – allerdings mit kleinen Sprüngen – vorwärts bewegt. Das Prinzip ist das gleiche: Die drehenden Gewichte drücken den Kasten ab-

wechselnd auf und nieder. Die Gewichte in diesem Kasten drehen sich allerdings um eine waagerechte Achse. Der Mechanismus ist so konstruiert, daß der Kasten beim Hochspringen um ungefähr 10 Millimeter gleichzeitig 50 Millimeter nach vorn gleitet. Dadurch ist es dem springenden Kasten möglich, in der Sekunde eine Strecke von 1,2 Metern zurückzulegen. Der große Vorteil dieses merkwürdigen Mechanismus besteht vor allem vom technischen Gesichtspunkt her darin, daß der Kasten vollkommen verschlossen ist. Förderrollen oder Räder fehlen völlig! Als wäre die Maschine ein Meisterstück des Ba-



Das sowjetische Geländefahrzeug „Pinguin“ ahmt die robbenartig gleitende Fortbewegungsform der „befrackten“ Vögel nach, wenn es auf glattes Gelände gerät. Mit der durch einen Wellenring erzeugten Umdrehung treten aus den Rädern des Fahrzeugs gummiverkleidete „Flügel“. Das Fahrzeug wird vor allem in der Arktis eingesetzt.

ron Münchhausen, der sich bekanntlich an seinen eigenen Haaren samt seinem Pferd aus dem Sumpf zog. Doch was im Märchen möglich, ist in Wirklichkeit nicht durchführbar. Hier werden tatsächlich Kräfte entfacht, aus denen Fortbewegung gewonnen wird.

Durch diese Experimentierfahrzeuge versucht man zwar der Mechanik des Springens im Bereich der Technik näherzukommen, es bestehen jedoch keine besonderen Aussichten auf Weiterentwicklung oder Vervollkommnung. Leistungsfähige Sprungfahrzeuge können erst gebaut werden, wenn die Erfinder den Mechanismus der Tiere in vollkommener Weise nachahmen. Andere Fortbewegungssysteme aus der Tierwelt haben bisher in vielen Fällen gute Hinweise zum Nachbauen geboten. In den Schneewüsten des Polargebiets beispielsweise versagen Fahrzeuge auf Rädern völlig. Pinguine jedoch haben seit Urzeiten erprobt, wie man sich auf glattem Schnee schnell vorwärts bewegen kann. Ihr watschelnder Gang sieht ziemlich ungeschickt aus, doch bei Gefahr fliehen sie auf eigentümliche Art. Nachdem sie sich hurtig auf die Schneedecke fallen lassen, „rudern“ sie mit Beinen und Flügeln, auf dem Bauch rutschend, und fliehen mit einer Geschwindigkeit von 30 Kilometern in der Stunde.

Der sowjetische Ingenieur A. F. Nikolajew dachte an diese Bewegungsform, als er ein Geländefahrzeug konstruierte, welches das Robben der Pinguine nachahmt. In den Rädern des Fahrzeugs sind gummiüberzogene „Flügel“ eingebaut. Im Ruhezustand sind an den einzelnen Rädern nur 12 kleine Gummirippen – die Enden der eingezogenen Flügel – zu entdecken. Wird das Fahrzeug jedoch in Bewegung gesetzt,

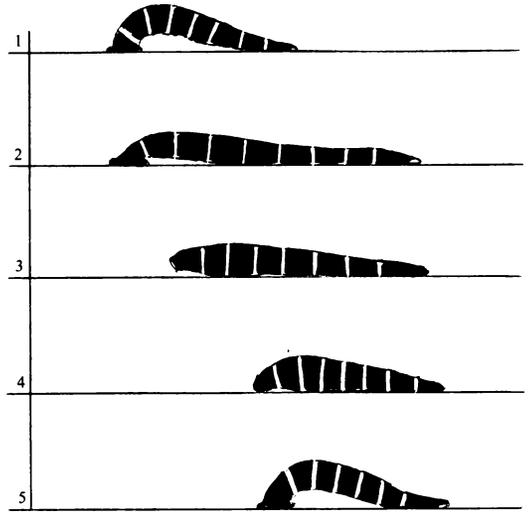
beginnen die Flügel im wahrsten Sinn des Wortes zu wachsen: Ein hydraulisches System schiebt sogenannte Flügelgreifer aus den Rädern. Da das Unterteil dieses 1,3 Tonnen schweren Geländefahrzeugs aus glattem Kunststoff besteht, kann es sich, auf dem „Bauch rutschend“, fortbewegen, wobei die aus den Rädern „herauswachsenden“ Flügel in den gefrorenen Boden oder Schnee greifen. Das Pinguin-Geländefahrzeug kann sich selbst bei einer Belastung von 300 Kilogramm verhältnismäßig schnell fortbewegen: Es erreicht im Reich des ewigen Eises und Schnees eine Geschwindigkeit von 50 Kilometern in der Stunde.

Wellen auf dem Festland

Kann man sich ohne Füße fortbewegen? Selbstverständlich! In der Tierwelt gibt es zahlreiche Beispiele dafür. Die Natur verfügt nämlich über einen einzigartigen „Getriebemotor“: den sich zusammenziehenden Muskel. Aus einer geschickten Anordnung der Muskeln haben sich jene besonderen lebenden Mechanismen herausgebildet, die auch ohne Beine eine Fortbewegung ermöglichen: So bewegen sich beispielsweise Ringelwürmer mittels einfachster Mechanismen fort. In ihrem Körper befinden sich zweierlei Muskulaturen: Längsmuskeln, die sich am ganzen Körper entlangziehen und die Körperlänge verändern, sowie Ringmuskeln, welche den Körper des Tieres umschließen und durch ihr Zusammenziehen den Querschnitt der einzelnen Segmente verringern.

Diese zwei Formen von Muskelbewegungen werden beim Egel während der Fortbewegung einander angepaßt, wo-

bei das Tier am Körperanfang auf den Saugnapf und am Körperende auf den Haftnapf angewiesen ist. Der Egel klammert sich mit dem Haftnapf zunächst fest, worauf dann durch das Straffen der Ringmuskeln der geringelte Körper zu einem immer kleineren Querschnitt zusammenschrumpft: Er streckt sich dabei mehr und mehr aus. Nachdem er seine größte Länge erreicht hat, klammert er sich mit dem Saugnapf fest, worauf die Längsmuskeln in Funktion treten und den Körper auf die möglichst kleinste Kürze zusammenziehen. In diesem „kugelrunden“ Zustand wird der Egel zur Scheibe. Wiederholt das Tier diese Bewegungen, klammert es sich erneut mit seinem hinteren Haftorgan fest, und die ganze Bewegungsreihe beginnt von vorn. Eine mühsame Arbeit bei der geringen Geschwindigkeit; doch dem Egel reicht sie!



Der Egel benötigt zur Fortbewegung keine Beine. Durch das Straffen seiner Ringmuskeln streckt er seinen Körper (1–2), danach zieht er ihn mit den Längsmuskeln zusammen (3–5). Zwischendurch klammert er sich abwechselnd mit dem Saugnapf und dem Haftnapf auf dem Gelände fest.

Der Regenwurm ist wesentlich länger als der Egel, ihm fehlen die Haft- und Saugnäpfe, doch er bewegt sich mit der gleichen Methode fort. Nur daß die Längsmuskeln nicht auf einmal, sondern abschnittsweise kürzer werden. Die Ringmuskeln ziehen sich ebenfalls nicht auf einmal zusammen, sondern segmentweise. Die Abschnitte der Verdickungen und Verengungen bewegen sich nacheinander am Körper des Regenwurms entlang, wobei er vorwärts gleitet. Sind dies nicht im Grunde genommen Körperwellen? Selbstverständlich, allerdings nur in Längsrichtung, wie auch an einer in Bewegung gesetzten losen Spiralfeder „dichte“ und „schütterere“ Stellen entlanglaufen (Longitudinalwellen). Am Körper des gleitenden Regenwurms stützen sich stets jene Stellen auf den Boden, die sich zusammenziehen, also die dicksten. An diesen festen Stützpunkten stößt sich der Regen-

wurm mit einer Kraft von 0,02–0,08 Newton ab und bewegt sich so nach vorn.

Am Körper des Egel und des Regenwurms ziehen sich die Längsmuskeln an beiden Seiten auf einmal zusammen. Bei anderen Tieren verläuft das Zusammenziehen an beiden Seiten in entgegengesetzter Weise. Während sich die Muskelstränge an der einen Seite zusammenziehen, dehnen sie sich an der anderen Seite aus. Dadurch krümmt sich das Tier mal nach links und mal nach rechts.

Wenn sich die an einer Seite vorhandenen Muskeln nicht auf einmal, sondern nacheinander zusammenziehen, entsteht am ganzen Körper eine Vielzahl von Wellen. Dabei handelt es sich um Transversalwellen. Und hier sind wir bei den Schlangen angelangt.

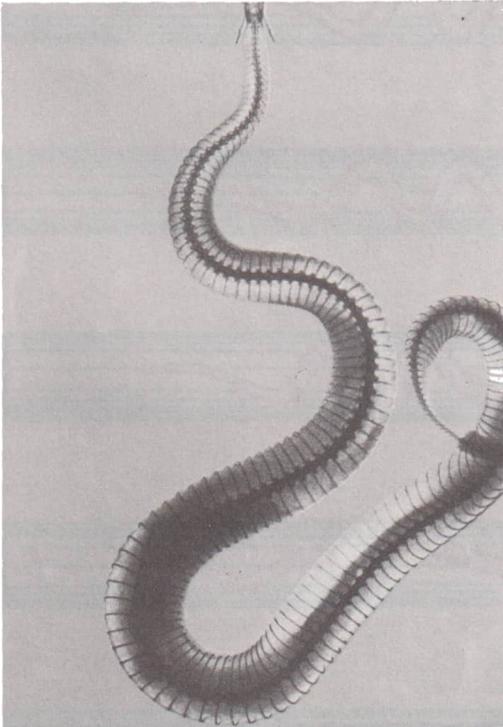
Die Welle, die am Körper der Schlange entlangläuft, bewegt sich genau mit der gleichen Geschwindigkeit nach hinten, wie sich die Schlange vorwärts bewegt. Über die Körperwelle haben wir bereits im Zusammenhang mit dem Schwimmen der Fische einiges erfahren, nur daß beispielsweise der Aal im Wasser niemals so schnell vorwärts gleitet, wie die Körperwelle an ihm ent-

langläuft. Auf dem Festland bietet der kompakte Boden einen sicheren Halt.

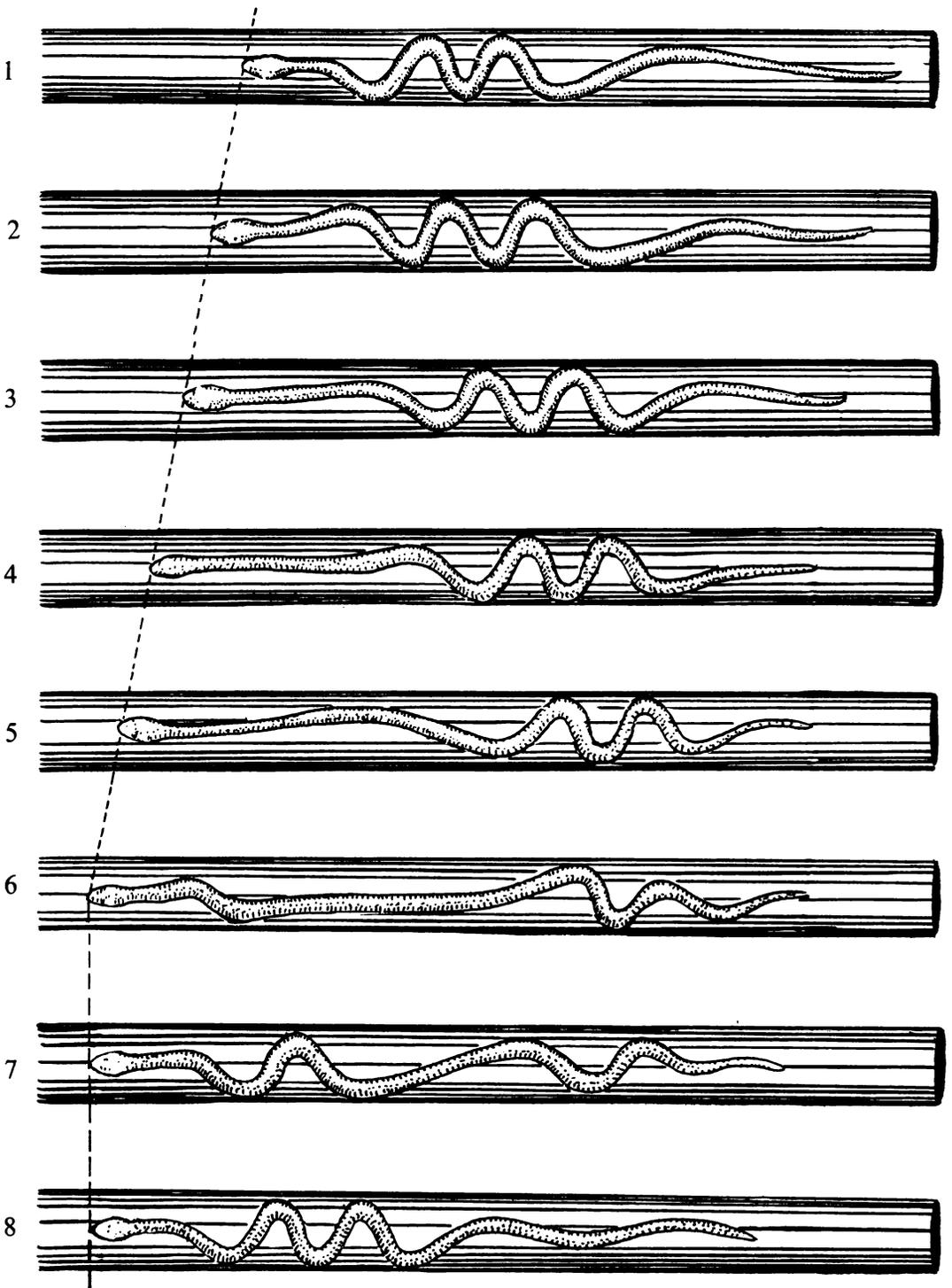
Die Schlange benötigt zur Wellenbewegung mindestens drei Stützpunkte, wovon sich einer stets gegenüber der einen Körperseite befinden muß. Dadurch können Schlangen – nach durchgeführten Messungen im Laboratorium – einen Weg von 6,4 Kilometern in der Stunde zurücklegen, obwohl sie in der Natur wahrscheinlich sogar eine größere Geschwindigkeit erreichen. Worauf kann diese außerordentliche Elastizität zurückgeführt werden?

Die Wirbelsäule der Menschen besteht aus 33–34 Wirbeln, die der Schlange hingegen setzt sich aus 100 bis 400 Wirbeln zusammen. Biologen interessieren sich schon seit langem für dieses ungewöhnlich elastische Gefüge. Messungen haben gezeigt, daß 2 benachbarte Wirbel in der Lage sind, sich zueinander in einem Winkel von 28 Grad nach oben oder unten zu beugen und in einem Winkel von 50 Grad nach rechts oder links auszuweichen. Obwohl die verschiedenen Körpergewebe diese Elastizität offensichtlich mindern, ist das Rückgrat zur Ausführung von Wellenbewegungen besonders gut geeignet. Zur Bildung eines vollkommen geschlossenen Ringes würden der Schlange theoretisch bereits 8 Wirbel genügen.

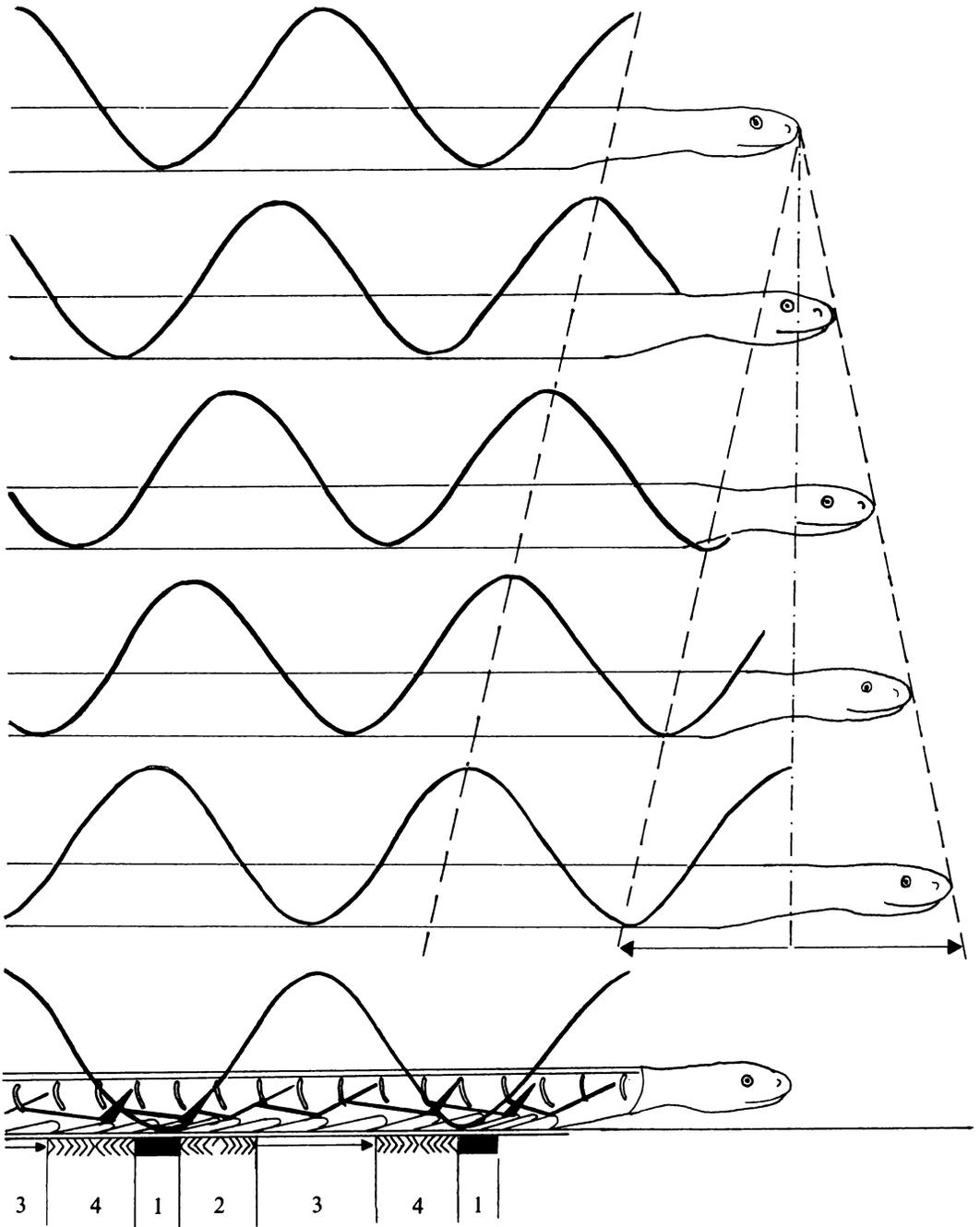
Die Körperlage wird demnach zu jeder Zeit vom Biegungsverhältnis der zueinanderstehenden Wirbel bestimmt, was hingegen wieder von der Spannung der beide Seiten verbindenden Muskeln abhängt. Besondere Muskelbündel stellen die Verbindung zwischen dem Rumpf der Schlange und der außerordentlich elastischen Haut her. Dadurch kann sich die Haut unabhängig vom Rückgrat verschieben, was übrigens



Die Schlange verdankt es ihrem biegsamen Rückgrat, daß sie sich auch auf dem Festland in Wellenbewegungen fortbewegen kann. Mit einem einzigen Wirbel kann sie sich zwar in keinem besonders großen Winkel bewegen, doch ein Teil des gesamten Rückgrats ergibt stets den erforderlichen Winkel. Auf dem Röntgenbild unserer Darstellung befindet sich am verschwommen dunkelschattigen Teil der Schlange ein kleines Kurzwellengerät, das den Forschern Aufschluß über den inneren Zustand des Schlangenkörpers gibt.



Die Schlange gleitet auch in einer engen Röhre leicht nach vorn. Sie krümmt sich innerhalb einer ganzen Körperwelle mindestens zweimal. Erreicht die Welle das Schwanzende, beginnt am Kopfende eine neue. Der Körper der Schlange stützt sich am Scheitelpunkt der Wellenlinie an die Röhrenwand.



Vipern und Boas gleiten in gerader Linie nach vorn. Diese erstaunliche Fortbewegungsform ist darauf zurückzuführen, daß die Schlange dabei mit ihren an den Wirbeln verbundenen Muskeln die elastische Haut in Bewegung setzt. Die nach hinten verlaufenden „Faltenbildungen“ stellen gewissermaßen längsseitige Körperwellen dar. Die Schlange gleitet mit der gleichen Geschwindigkeit nach vorn, mit der die Körperwelle nach hinten läuft. 1 – Stützpunkt; 2 – die Schlange streckt sich aus; 3 – sie bewegt sich fort; 4 – sie zieht sich zusammen.

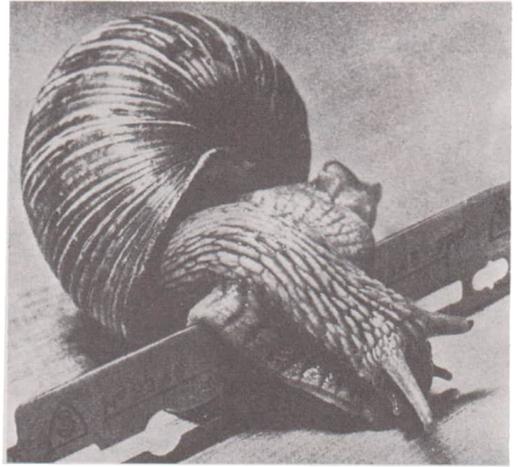
für einzelne Schlangenarten äußerst zweckdienlich ist, die (wie die Boas und die Vipern) pfeilgerade vorwärts gleiten.

Auf den ersten Blick scheint es uns völlig unverständlich, weshalb sich Schlangen in dieser Weise fortbewegen. Detaillierte Analysen haben jedoch ergeben, daß das rhythmische Zusammenziehen und Ausdehnen der Schlangenhaut – dank dem Spiel der mit den Rippen verbundenen Muskeln – gleichfalls eine günstige und zweckmäßige Fortbewegung möglich machen. Dabei stauen sich die Schuppen an bestimmten Stellen des Körpers abschnittsweise, die Schlange stützt sich an diesen Punkten auf den Boden und gleitet dadurch vorwärts. Die mit den Rippen verbundenen Muskeln ziehen die Haut an den Stützpunkten stets zusammen und dehnen den Abschnitt zwischen zwei Stützpunkten aus. Beim Gleiten schiebt die Schlange die zusammengezogenen Segmente an den Stützpunkten nach hinten, so daß sie sich selbst nach vorn bewegt. Der regelmäßige Wechsel dieser Abschnitte entspricht gewissermaßen dem regelmäßigen Rhythmus der Sinuswellen.

Dieser Rhythmus ist eine der bedeutendsten Gesetzmäßigkeiten der Fortbewegung in der Tierwelt, welche die Tiere im Verlauf ihrer stammesgeschichtlichen Entwicklung vom Wasser auf das Festland begleiteten. Es verwundert deshalb nicht, daß dieser Rhythmus auch an Schnecken wahrgenommen werden kann. Während der Fortbewegung verlaufen die Sinuswellen an beiden Seiten der Sohle (beziehungsweise des Fußes) der Schnecke parallel zueinander nach hinten. Wenn der kleine Hausbesitzer es sehr eilig hat, kann er in der Minute eine Strecke von 9 Zentime-

tern zurücklegen. Beim Wenden verlangsamt die Schnecke die Wellengeschwindigkeit auf der entsprechenden Seite und operiert wie ein kleines Raupenfahrzeug.

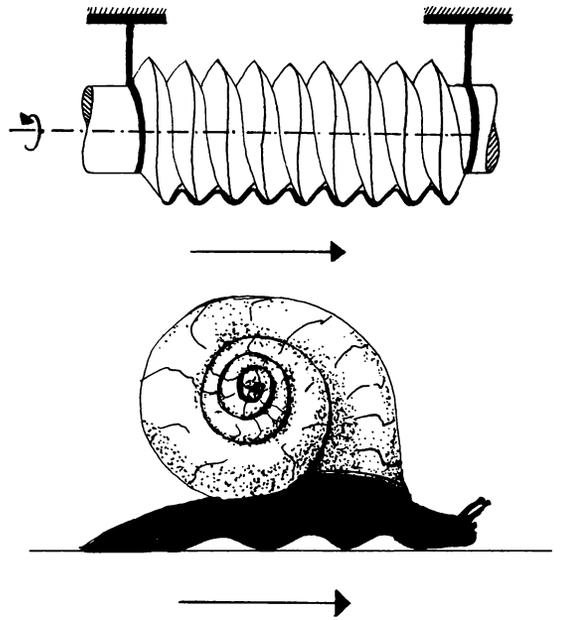
Der Fußmechanismus der Schnecken funktioniert in außerordentlich interessanter Weise, wie die englischen Forscher H. D. Jones und E. R. Trueman



Gespannte Situation auf dem Laboratoriumstisch. Wird die Schnecke über die Rasierklinge klettern? Mit den Wellenbewegungen ihrer Körpersohle hebt sie stufenweise einzelne Teile ihres Körpers über die Klinge, so daß sie ungestört ihren Weg fortsetzen kann.

festgestellt haben. An beiden Seiten befinden sich senkrechte Muskelbündel, die durch kleine, mit Körperfeuchtigkeit gefüllte Hohlräume voneinander getrennt sind. Zugleich ziehen sich an den „Füßen“ der Schnecke in schräger Richtung auch solche Muskelbündel entlang, die über der langsam fließenden Körperfeuchtigkeit einen „Baldachin“ bilden. Beim Zusammenziehen der senkrechten Muskelbündel üben diese im Rhythmus der Fortbewegungswelle einen Druck auf die mit Flüssigkeit gefüllten Hohlräume aus. Die Kör-

perfeuchtigkeit wird weder nach oben noch nach hinten, sondern nur nach vorn gedrückt. So treibt die Flüssigkeitsmasse das vor sich befindliche zusammengesogene Muskelbündel pendelartig vorwärts. Als Folge dehnt sich das Muskelbündel aus, die Fußseite erhebt sich und drängt nach vorn. Die Fortbewegungswelle setzt sich demnach aus dem Rhythmus der steigenden und sinkenden Phasen am Fuß der Schnecke zusammen. Sollten wir demnächst auf eine sich bequem und behutsam am Boden fortbewegende Gartenschnecke stoßen, lohnt es sich, die Wellenbewegung an ihr zu beobachten.



So wie das Gewinde einer sich auf der Stelle drehenden Schraube nach hinten läuft, genauso bewegt die Schnecke ihre Körpersohle. Da sie sich aber auf den Boden stützt, schiebt sich nicht die darunterliegende Erde nach hinten, sondern die Schnecke bewegt sich selbst mühelos nach vorn.



Seit Jahrtausenden bewundert der Mensch sehnsuchtsvoll den Flug der Vögel und Insekten. Doch erst der Technik unseres Zeitalters war es möglich, einzelne Lösungen aus der jahrmillionenalten Erfahrung der Tierwelt zu ergründen und nachzuahmen.

Flügel auf dem Rücken des Piloten

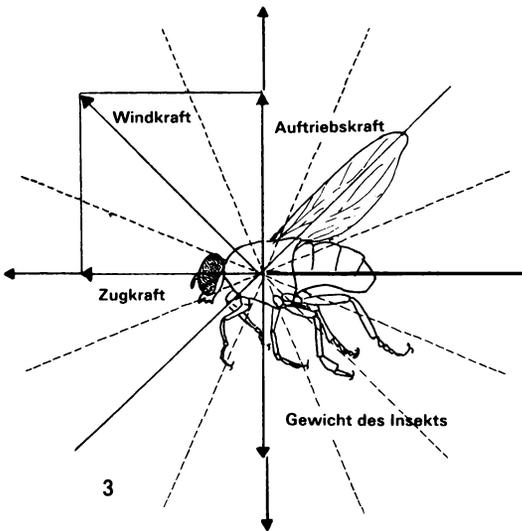
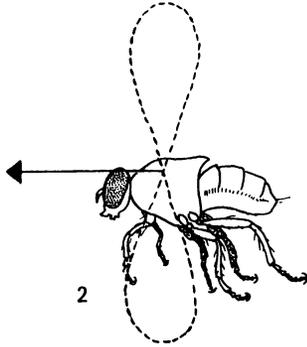
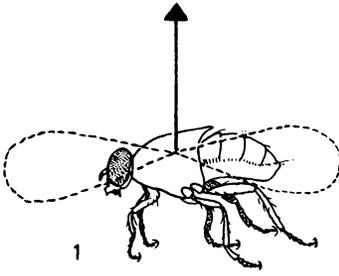
Der schwedische Forscher Jensen mußte seine gesamte Selbstbeherrschung zusammenehmen, um nicht die winzigen Heuschreckenflügel in die Ecke zu werfen, an denen er bereits seit Stunden herumbastelte. Er hatte sich auf eine schwierige Sache eingelassen, doch jetzt aufzugeben wäre schade. Er hatte sich vorgenommen, auf der Grundlage einer Zeitlupenaufnahme vom Flug einer Heuschrecke jede einzelne Bewegung an einem leblosen Heuschreckenflügel nachzudemonstrieren, um zu erkennen, welche Auftriebskraft dabei entsteht. Er drehte vorsichtig den in einem Windkanal untergebrachten Flügel in die erforderlich gewölbte Form, schaltete darauf die Luftströmung ein und las sorgfältig die Werte an den Meßgeräten ab. Die unter Hinzuziehung der Daten entstandene Grafik verriet schließlich ein interessantes Geheimnis. Obwohl das vordere steife Flügelpaar der Heuschrecke zur Erzeugung von permanenter Auftriebskraft geeigneter wäre, entstehen dennoch 70 Prozent der Auftriebskraft während des Fluges an den schwingenden Hinterflügeln.

Derartige umständliche Untersuchungen sind der Mühe wert, denn nur so vermögen Bioniker auf noch nicht bekannte „lebendige“ Erfindungen zu stoßen, die nicht nur im Bereich des Flugwesens verwertet werden können, sondern gleichermaßen neue Angaben über die Aviatik der Tierwelt liefern.

Der kunstvolle Zickzackflug einer unverschämten Fliege vor unserer Nase bereitet uns sicherlich mehr Ärger, als daß wir uns darüber wundern, wie diese außerordentlich vollkommene winzige Flugmaschine funktioniert. So viele gedrungene, behaarte, schlanke oder zierliche Insekten es auch gibt, alle bewahren jenes Geheimnis des Fliegens, das vom Menschen erst in diesem Jahrhundert erfolgreich enträtselt werden konnte.

Freilich, von den ungefähr eine dreiviertelmillion fliegender Insektenarten fliegen nicht alle gleich gut. Im allgemeinen verfügen die einzelnen Arten über um so vollkommeneren Mittel und Methoden, je schwierigeren Lebensbedingungen sie ausgesetzt sind. Etliche sind nur zu einigen jämmerlichen Flügelschlägen imstande und können kaum fliegen. Dazu gehört zum Beispiel der Schmetterling der Seidenraupe. Am Ende der Entwicklungsreihe dagegen finden wir die unangenehme, doch ausgezeichnet fliegende Hausfliege, offenbar jedes Bravourstücks fähig, das in der Luft auch nur möglich ist. Der Flugzeugkonstrukteur kann nur mit neidischen Augen den über dem Zeichentisch sich herumtollenden Fliegen folgen. Ihre Flugeigenschaften können selbst mit den neuzeitlichen Werkstoffen und mit solidesten Konstruktionen modernster Flugzeuge unserer Zeit nicht verwirklicht werden.

Auf den ersten Blick sehen diese



Schwingt der Flügel des Insekts in waagerechter Richtung, wird von dieser winzigen Luftschaube nur Auftriebskraft produziert (1). Schwingen die Flügel jedoch in senkrechter Richtung, dann entsteht Zugkraft (2). Beim waagerechten Flug flattert das Insekt in schräger Richtung, so daß sich die an den Flügeln auftretende schräge Windkraft auf die waagerechte Zugkraft und die senkrechte Auftriebskraft verteilt, währenddessen die letztere Kraft das Gewicht des Insekts ausgleicht (3).

hautflügeligen, summenden Flugzeuge wie Hubschrauber aus. Man könnte auch sagen, jedes Insekt besteht aus einem einzigen Propeller, dessen Achse und Motor der Insektenkörper selbst ist. Zwischen beiden besteht allerdings ein entscheidender Unterschied: Der Schraubenflügel des Hubschraubers kreist um seine Achse, die Flügel der Insekten hingegen können nicht kreisen, sie sind nur imstande, außerordentlich schnell zu schwingen. Beim Auf- und Niederschlagen des Flügels biegt sich das Ende der weichen Membranhaut etwas ein, wodurch von selbst das unentbehrliche Prinzip des Fliegens, die Neigungsfläche, entsteht. In Auswirkung der schwingenden Hin- und Herbewegung biegt sich der Flügel stets auf die entgegengesetzte Seite der Schlagrichtung. Durch waagerechtes Schwingen der Flügel wird erreicht, daß ausschließlich Auftriebskraft entsteht. Beim gleichen Schwingen der Flügel in senkrechter Richtung erzeugen die schrägestellten Flügel, ähnlich wie Flugzeugpropeller, Zugkraft. Fliegende Insekten müssen selbstverständlich zugleich in der Luft verharren und sich fortbewegen, so daß die schräg eingestellte Schwingungsebene der Flügel innerhalb der Senkrechten und Waagerechten das Gleichgewicht zwischen den beiden Anforderungen herstellt.

Beim Richtungswechsel der Flügelschläge entsteht ein aufschlußreiches aerodynamisches Phänomen. Schlägt der Insektenflügel nach unten, strömt die Luft sehr schnell nach. Am unteren toten Punkt unterstützt dieser Luftstoß nicht nur das Wechseln der schrägen Flügelstellung, sondern er verstärkt auch die Zugkraft an den plötzlich nach oben schwingenden Flügeln. Die vibrierenden Flügel bleiben dadurch nie

„ohne“ Luft (was eine häufige Erscheinung beim Hubschrauberflugel ist); mit der größten Schwinggeschwindigkeit tritt demnach zugleich die größte Zugkraft auf.

Was hat die Fliege in ihren Achselhöhlen?

Die verschiedenen Varianten der Insektenflügel haben sich aus dem alten „Doppeldecker“grundtyp entwickelt. Nur daß die beiden Flügel nicht untereinander, sondern hintereinander am mittleren Teil des Insekts, an der Brust,

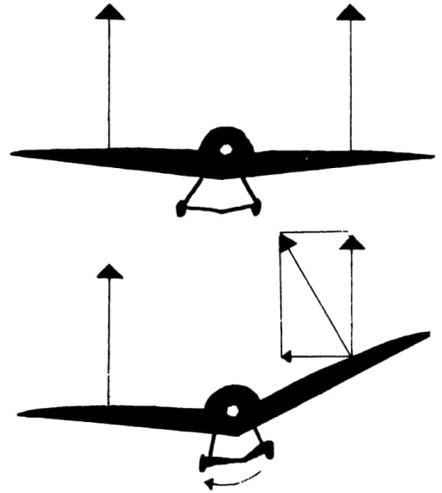
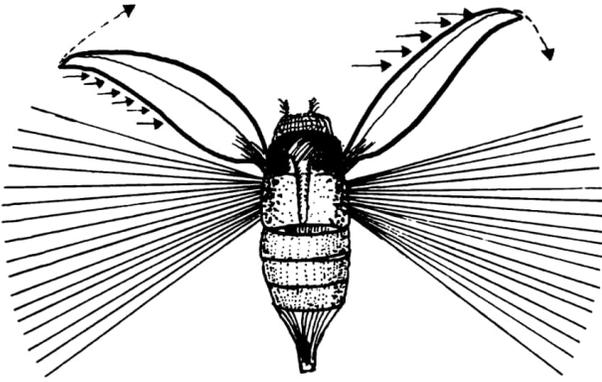


Der harte Chitindeckel schützt nicht nur die dünnen Hautflügel, sondern er hält auch den Körper des Maikäfers während des Fluges im Gleichgewicht. Für die Bewegungsgeschwindigkeit der schwingenden Hautflügel ist es bezeichnend, daß sie, obwohl die Aufnahme mit einer Belichtungszeit von 1 Tausendstelsekunde gemacht wurde, auf dem Bild nur verschwommen zu sehen sind.

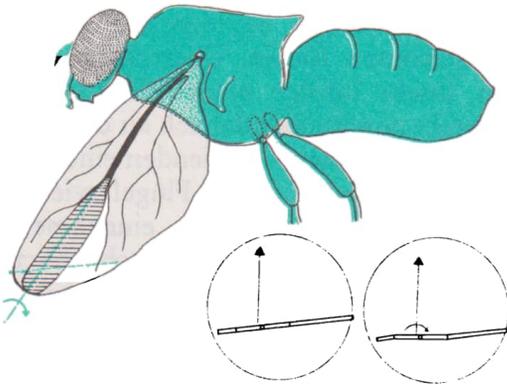
angebracht sind. Bienen, Wespen, Hornissen, Hummeln – kurzum, im allgemeinen die Hautflügler – benutzen ihre zwei Paar Flügel zugleich, so daß diese vom aerodynamischen Gesichtspunkt als ein einziges Paar funktionieren (funktionelle Zweiflügligkeit). Doch auch einzelne Flügelpaare können von Nutzen sein, wie uns dies die Heuschrecke beweist.

Bei Käfern ist das vordere Flügelpaar zu einer harten Flügeldecke ausgebildet, und diese dicke Chitindecke schützt im Ruhezustand die haardünnen, leicht zerreißbaren hinteren Flügel in ausgezeichneter Weise. Vielen Käfern sind die ausgebreiteten Flügeldeckel während des Fluges im Weg, doch einzelne nutzen sie zur Erhöhung ihrer Flugsicherheit. In einer mäßig auseinandergespreizten V-Form reduzieren sie das seitliche Kippen des „Insektenflugzeugs“, ähnlich wie die sogenannte Rollstabilisierung bei den aus Metall konstruierten Riesen. Überschlägt sich ein Insekt infolge eines Windstoßes, entsteht unmittelbar danach an den empor-schwingenden Flügelenden eine Gegenkraft, wodurch die Flügel wieder ihre ursprüngliche Lage einnehmen. Zur letzten Gruppe gehören schließlich die Fliegen und andere kleine Insekten, deren hinteres Flügelpaar auf winzige „Kolben“ zusammengeschrumpft ist (morphologische Zweiflügligkeit). Diese Kölbchen (Halteren) können nur nach sorgfältiger Untersuchung am Flügelansatz ausfindig gemacht werden, ihnen wurde deshalb lange Zeit keine besondere Bedeutung zugemessen.

Die hauchdünnen Hautflügel entsprechen in vollkommener Weise dem „Schwingschraubenflug“. An der Vorderkante hält ein fester Chitinstreifen den Flügel so straff, als halte jemand mit



Der sichere Flug des Maikäfers wird gleichfalls durch die harten Chitinflügel gefördert. Hierbei kann das gleiche Symptom wie bei Flugzeugen festgestellt werden: Gerät die Maschine durch einen stürmischen Luftstrom ins Kippen, entsteht an den schiefen Tragflächen eine geringere Auftriebskraft. Durch die größere Kraft auf der anderen Seite kippt das Flugzeug um seine eigene Achse wieder in die ursprünglich waagerechte Lage zurück.



Die Stubenfliege ist sogar während des Fluges imstande, die Auftriebskraft der Flügel zu steigern. Sie stellt das eingebaute Querruder entsprechend ein, wobei der Querschnitt der Flügel die Form eines kaum wahrnehmbaren Z einnimmt. Dadurch entsteht während der einzelnen Flügelschläge eine größere Auftriebskraft.

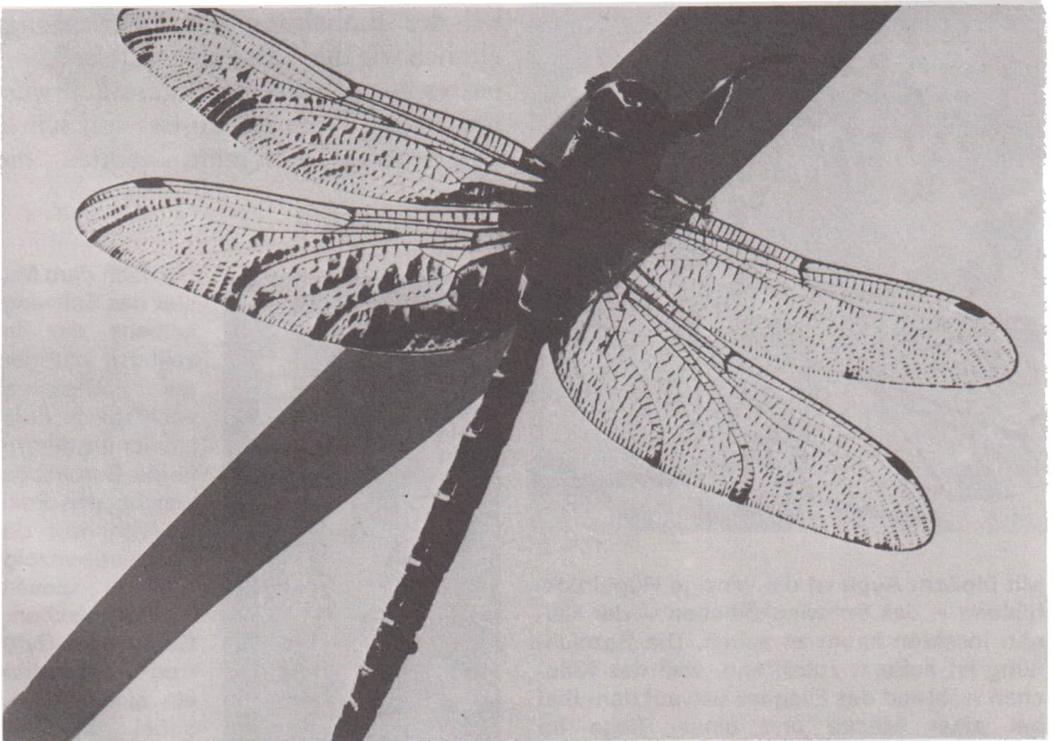
zwei Armen einen Mantel hoch. Die durchsichtige Flügelhaut ist derart flexibel, daß sie unter der Einwirkung des Auf und Ab der Flügelschläge leicht und mühelos in die entgegengesetzte Richtung umschwingt. An ihnen ist vom charakteristischen Querschnitt der Flugzeugflügel – der Stromlinienform, bei der vor allem beim Gleitflug beinahe von allein die Auftriebskraft entsteht – keine Spur vorhanden. Insekten müssen bei jedem einzelnen Flügelschlag Auftriebskraft entwickeln; sie sind darum auf eine kleine Erleichterung angewiesen. So wurde deshalb von der Hausfliege das eingebaute Querruder „erfunden“. Dieses sich in der Mitte des Flügels entlangziehende sogenannte ovale Fenster kann mit zwei parallellaufenden festen Chitinleisten verstellt werden, so daß das Flügelprofil eine leichte Z-Form annimmt. Dadurch wird der Druckunterschied der an den Flügeln

vorbeigleitenden Luft ausgeglichen. In welche Richtung die Flügel sich auch bewegen, die Luftkraft an ihnen steigert sich auf jeden Fall, wobei die senkrechte Komponente als Auftriebskraft auf das Insekt wirkt.

In den Anfangszeiten des Flugwesens bereitete den Konstrukteuren das gefährliche „Flattern“ der starren Tragflügel viel Kopfzerbrechen. Das Flattern trat vor allem bei Luftwirbeln auf und führte oft zum Bruch der Tragflügel. Später gelang es, ein Gegenmittel zu finden: Installation von Ballasteinlagen an der Stirnseite zur Stabilisierung der Tragflügel, wodurch mit Hilfe dieser trägen Masse eine Reduzierung der Vibration erreicht wurde. Der sowje-

tische Flugzeugkonstrukteur M. K. Tichonrawow entdeckte erst später, daß Libellen diese Lösung seit Urzeiten bekannt ist. An den Rändern ihrer Flügel, in der Nähe der Spitze, befindet sich nämlich ein verhärtetes Chitinkörnchen, das Flügelmal, das den Insektenflügel vor schädlichen Nebenschwingungen schützt.

Der prachtvoll farbigen Pigmentbeschichtung der Schmetterlingsflügel kommt gleichfalls eine interessante aerodynamische Bedeutung zu. So verändern beispielsweise die 0,2 Millimeter langen Schuppen des Kohlweißlings, die ähnlich wie Dachziegel die Flügel bedecken, die Beschaffenheit der Flügeloberfläche. Während sie an der unteren



Die Libelle wendet jene aerodynamische Lösung an, auf die Flugzeugkonstrukteure erst nach vielen Überlegungen gekommen sind. Am Scheitelrand der äußerst feinen Flügel befindet sich je ein farbiges Chitinkörnchen. Wären die Körnchen nicht da, würden die Flügelspitzen während des Fluges vibrieren und den Flug stören.

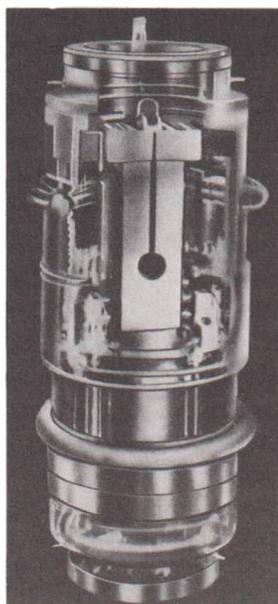
Seite des Flügels eng aufeinanderliegen, ragen sie an der oberen Seite schräg aus der Flügeloberfläche heraus, so daß über den Flügeln ein kleinerer Luftdruck entsteht als darunter, was schließlich zur Vergrößerung des Auftriebs führt. Untersuchungen von W. Nachtigall ergaben, daß sich die an den Flügeln entstehende Auftriebskraft bei Entfernung des Pigmentstaubs mindert.



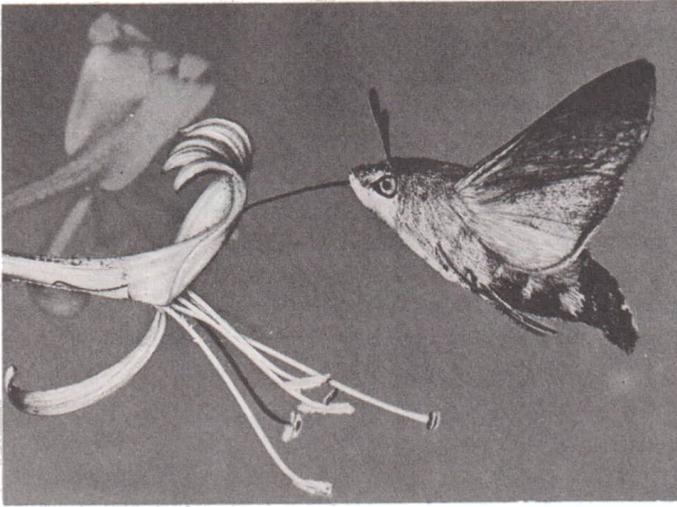
Mit bloßem Auge ist die winzige Flügelrückbildung – das Schwingkölbchen – der kleinen Insekten kaum zu sehen. Die Bezeichnung ist äußerst zutreffend, weil das Kölbchen während des Fliegens wie auf dem Bild bei einer Mücke und einer Fliege im Rhythmus der Flügelschläge unter der „Achsel“ schwingt. Ändert sich die Flugrichtung des Insekts, erhält der winzige Flugpilot durch die drehbaren Schwingkölbchen die entsprechenden Signale.

Andere Forscher weisen darauf hin, daß das Zustandekommen der besonderen „Beschleunigungswellen“ der Schmetterlingsflügel auf den Pigmentstaub zurückzuführen ist.

Bei den zu Schwingkölbchen rückgebildeten Hinterflügeln der zur Ordnung der Zweiflügler gehörenden Insekten handelt es sich gleichfalls um eine bemerkenswerte Erfindung! Wenn wir die Kölbchen beispielsweise von der Fliege entfernen, kann sie nicht auffliegen. Während des Fliegens schwingt das keulenförmige Organ im Rhythmus zu den Flügelschlägen, wobei es sich in der Sekunde bis zu 330mal bewegt. Die träge Masse der Kolbenköpfe schwingt stets in gleicher Richtung mit, die Kölbchen unterstützen dadurch das Insekt bei der Einhaltung der Flugrichtung, ähnlich wie die Achse eines Kreiselkompasses nur gewaltsam umgestoßen werden kann. Wenn das Insekt von seiner Flugrichtung abkommt, geraten die



Ein nach dem Muster des Schwingkolbens der Insekten konstruiertes Gleichgewichtsgerät. Es ist kleiner als die früheren Gyroskope, welche den Positionswechsel der Flugzeuge anzeigten. In diesem elektronischen Gerät – im Gyrotron – schwingt ein Stimmgabel ähnliches Bestandteil, das sofort reagiert, wenn das Flugzeug zu trudeln beginnt.



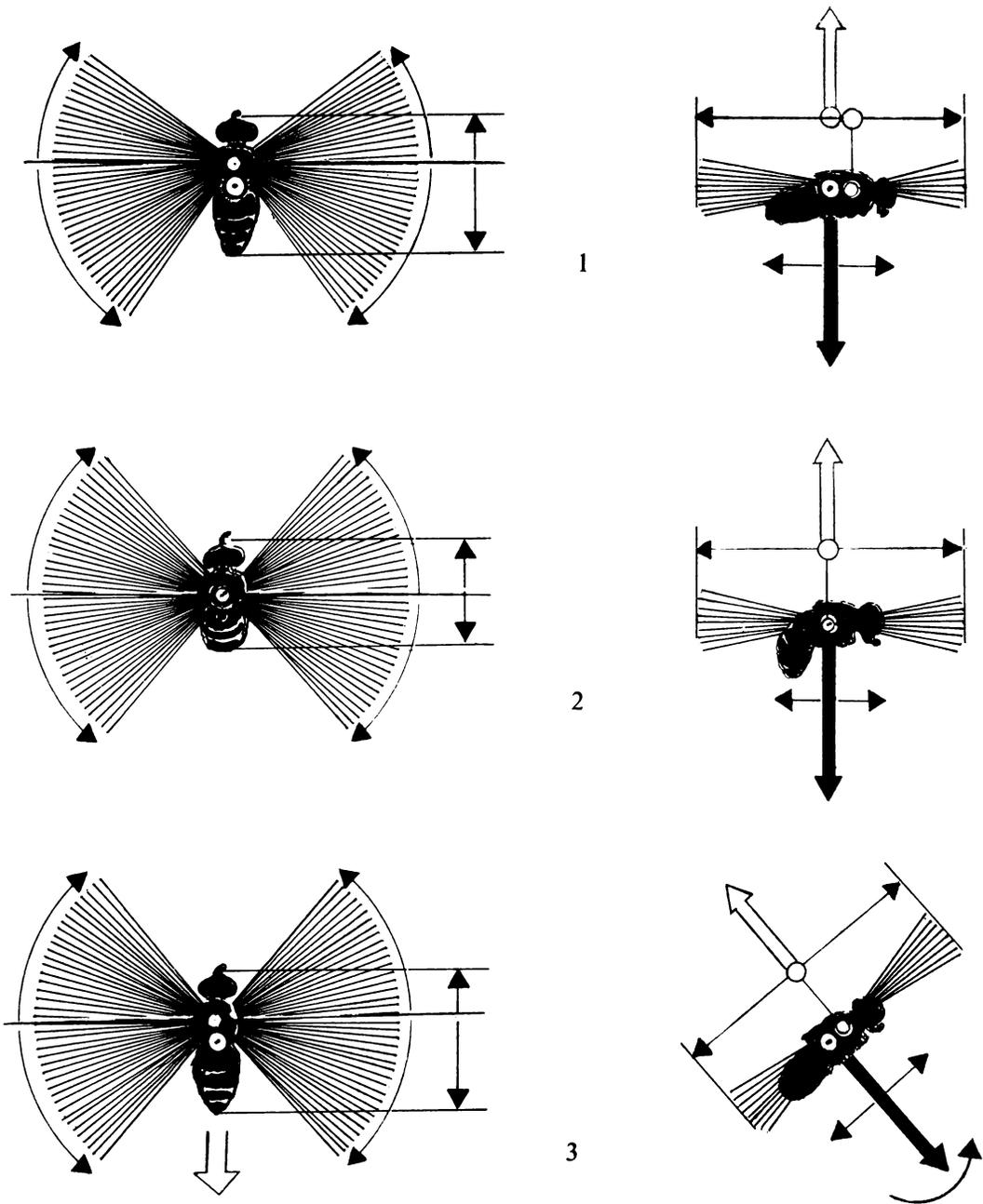
Das Taubenschwänzchen schwebt wie ein Hubschrauber vor der Blume. Der aufgeschnittene Blumenkelch läßt erkennen, wie weit sich der lange Saugrüssel ausstreckt, um den süßen Nektar zu erreichen. Die Flügel bewegen sich nicht ganz waagrecht, so daß neben der Auftriebskraft auch ausreichend Zugkraft entsteht, wodurch das Insekt gleichsam an die Blume gedrückt wird.

Schwungkölbchen aus dem Rhythmus, was vom Tier sogleich empfunden wird.

Nach dem Muster dieses besonderen Organs wurde von Ingenieuren das Gyrotron entwickelt. Auf den ersten Blick erinnert es an eine „doppelte“ Klingel: Zwischen kleinen Elektromagneten schwingt unter der Einwirkung von Wechselstrom ein stimmgabelähnliches Teil. Der gesamte Mechanismus wird so angebracht, daß er sich in jede Richtung drehen kann, die vibrierende Achse der „Stimmgabel“ hingegen zeigt stets in dieselbe Richtung des Raumes. Verändert sich die Lage des Flugzeugs, wird dies vom Gerät sogleich angezeigt. Wenn zum Beispiel das Flugzeug ins Trudeln kommt, zeigt das Gyrotron die entsprechende Richtung zum Einlenken in die waagerechte Lage an. In den letzten Jahren wurde das Gyrotron bereits so weit vervollkommnet, daß es auch zur Steuerung von Raketen eingesetzt werden kann.

Die Flügel beschreiben eine Acht

Ein für lange Zeit schwieriges Problem in der Flugtechnik bestand im Schweben an einer Stelle, was für Insekten gewissermaßen ein Kinderspiel ist. Schwebefliegen zum Beispiel schweben reglos, als wären sie in der Luft festgenagelt. Hörten wir nicht ihr Summen, würden wir nicht glauben, daß sie dabei ihre Flügel mit rasender Geschwindigkeit bewegen. Zu diesem fliegerischen Meisterstück sind selbst vorzüglich fliegende Vögel nicht imstande. Der große Schwärmer ist gleichfalls ein kleines Wunderwerk: Er schwebt ausdauernd über den Blumenkelchen und sucht mit seinem langen Saugrüssel nach Nektar. Dieser Schmetterling trug sogar zur Vervollkommnung der Hubschrauber bei. Der französische Forscher Oemichen studierte eingehend die Flügelbewegungen dieses Schmetterlings an Hand von Zeitlupenaufnahmen, wonach in Auswertung der beobachteten Gesetzmäßigkeiten die Flugstabilität der Hubschrauber verbessert werden konnte.



Müheelos schwebt die Schwebfliege an einer Stelle, wenn sie die Flügel waagrecht bewegt. Doch wegen ihres weiter hinten befindlichen Schwerpunkts muß sie irgendeinen Trick anwenden, um sich nicht zu überschlagen. Entweder schlägt sie mit den Flügeln einen größeren Bogen nach hinten als nach vorn, denn dadurch verschiebt sich die auf ihren Körper einwirkende Auftriebskraft an den Schwerpunkt (1), oder sie biegt ihren Hinterleib ein, wodurch sich der Schwerpunkt unter den normalen „Fächer“ der Flügel verschiebt (2). Macht die Schwebfliege keins von beiden, wird sie vom Eigengewicht nach hinten gezogen. Dabei überschlägt sie sich in der Luft und fliegt plötzlich nach hinten (3).



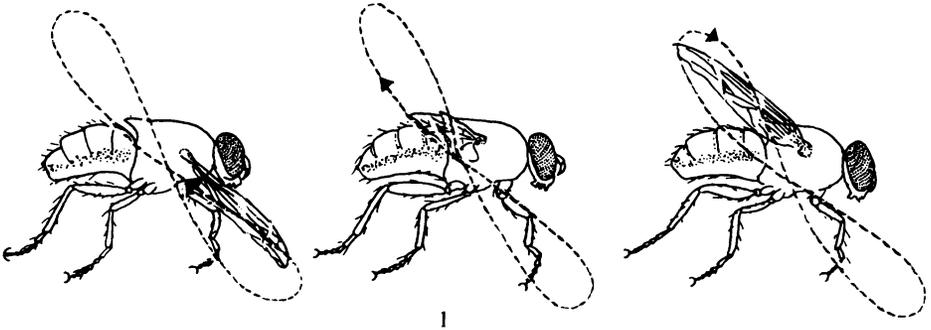
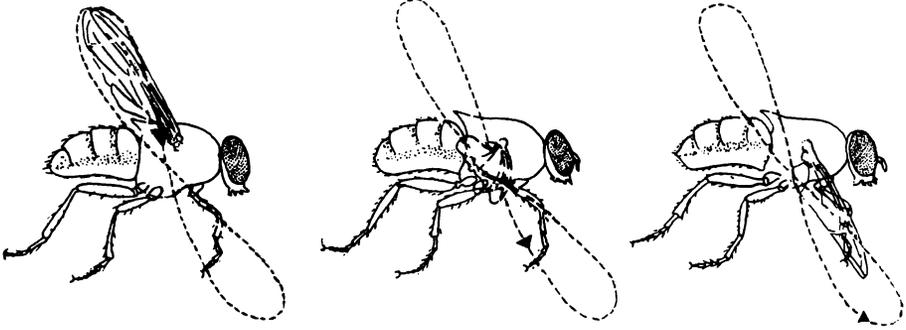
Die Hausfliege startet von einem Brotstück! Die eigenartig herausgestellten Flügel lassen vermuten, daß dieses Insekt zu jeder Glanzleistung in der Luft fähig ist.

Beim Schweben an einer Stelle bewegt die Schwebfliege ihre Flügel gleichfalls wie ein Hubschrauber in waagerechter Richtung. Dabei tritt allerdings eine Schwierigkeit ein: Der Schwerpunkt fällt auf die Grenzlinie zwischen Brust und Hinterleib, obwohl sich die Flügel mehr vorn, an der Brust, befinden. Wie schützt sich nun die Schwebfliege gegen das Nachhintenkippen? Ihr stehen zwei Methoden zur Verfügung. Entweder schiebt sich die „symmetrische Fächerung“ ihrer Flügelschwingungen etwas nach hinten, indem sie in kleinerem Bogen nach vorn als nach hinten schlägt. In der Weise überschreitet die Resultante der Auf-

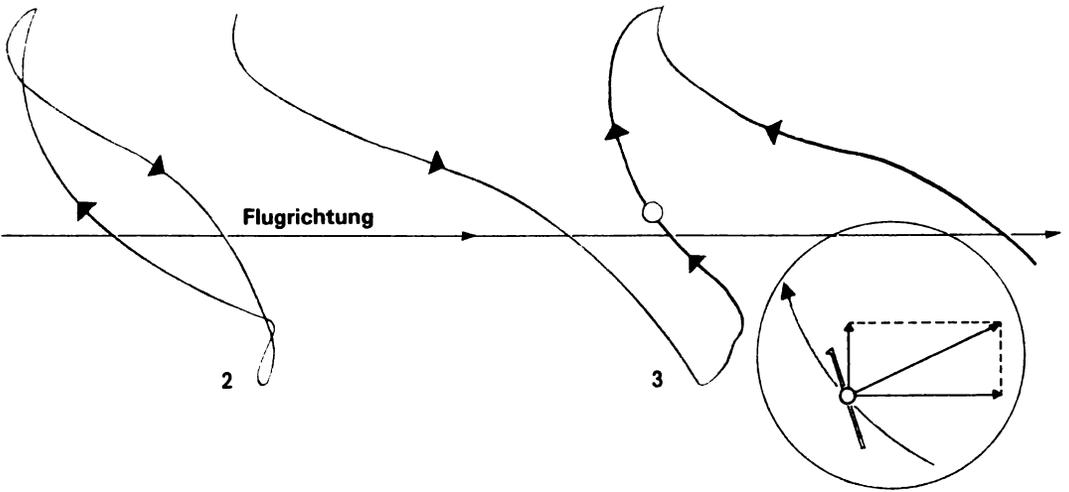
triebskraft bereits den Schwerpunkt – und die Schwebfliege vermag dadurch ausbalanciert zu schweben. Sie kann aber auch ganz einfach den Hinterleib nach unten neigen. Dabei gerät der Schwerpunkt in eine Linie mit dem Flügelansatz, und die Schwebewaage ist wiederhergestellt. Wenn sie jedoch kein einziges dieser Manöver durchführt, tritt eine erstaunliche Situation ein. Mit dem nach hinten kippenden Körper ändert sich auch die Schwingenebene der Flügel: Die Fliege fliegt nach hinten!

Kleine Insekten können ihre Flügel in jede Richtung schwingen. Entsprechend den Untersuchungen von B. Hocking und anderen Forschern bildet die Schwebenebene der Flügel beim waagerechten Flug gewöhnlich einen Winkel von 45 Grad. Warum? Mit einem in der Hand rotierenden kleinen Propeller können wir dies selbst untersuchen. Bildet die Achse des Propellers mit der Waagerechten einen Winkel von 45 Grad, zieht er unsere Hand während des Drehens mit der gleichen Kraft nach oben wie nach vorn. Der Schlüssel zu diesem Rätsel ist folgender: Das Insekt verteilt die an seinen Flügeln entstehende Luftenergie im gleichen Verhältnis zum Auftrieb und zur Fortbewegung. Die Auftriebskraft wird allerdings durch das Körpergewicht des Insekts ausgeglichen, so daß aus den Flügelschwingungen bei 45 Grad ausschließlich vorwärts treibende Kraft auftritt: Das Insekt fliegt waagerecht!

Diese Art der Fortbewegung ist keineswegs so regelmäßig wie bei Propellerflugzeugen, zumal die schwingenden Flügel bei jedem Schlag zweimal (oberhalb und unterhalb des Körpers) den toten Punkt erreichen. Das sind die kritischsten Augenblicke! Der Höhenverlust als Folge der schnellen Flügelschwin-



1



2

3

Beim waagerechten Flug beschreibt die Flügelspitze der Insekten in der Luft die Form einer schrägen Acht (1), das erste Drittel der Flügel hingegen zeichnet eine besondere Dreierschleife (2). Betrachten wir das Fliegen von einem etwas entfernteren Standpunkt, beschreibt der Querschnitt der Flügel eine Kurve, die in keiner Weise eine regelmäßige Wellenlinie darstellt (3). Doch gerade das ermöglicht es, daß auch an den nach oben schlagenden Flügeln Auftrieb entsteht.

gung ist für jeden Schlag nur in Tausendstelmillimetern meßbar. Letzten Endes besteht der waagerechte Flug des Insekts beinahe aus einer gleichmäßig schnellen Fortbewegung.

Ein nicht einfaches Problem für Konstrukteure von Propellerflugzeugen bestand schon immer darin, die relativ starren Tragflügel vor Schwingungen, verursacht durch die rotierenden Propeller, zu bewahren. Die lebende Natur überbietet hier mit Leichtigkeit die Starrheit der Maschinenwelt: Während des Schwingens sind die Spitzen der Flügel – wenn wir das fliegende Insekt von der Seite verfolgend betrachten – nicht gerade, sondern sie bewegen sich in Form einer schmalen Acht, dabei beschreibt das erste Drittel der Flügeloberfläche eine Dreifachschlinge. In dieser Weise erhöhen die Schläge der geschwungenen Flügel die an der Oberfläche entstehende Auftriebskraft.

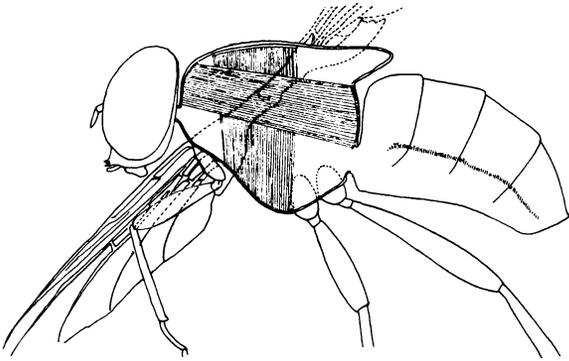
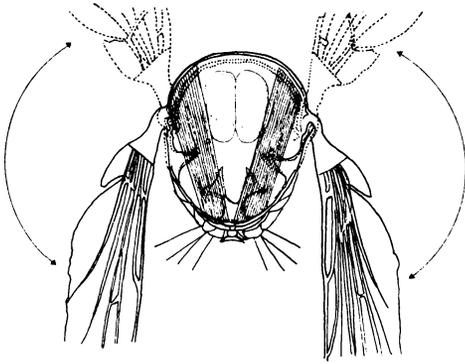
Diese kleinen Luftfahrzeuge sind während des waagerechten Flugs ebenso manövrierfähig wie beim Schweben an einer Stelle. Wenn sie den „Schwingungsfächer“ ein wenig nach unten schieben, kippt die Gleichgewichtswaage des Vorderleibs entlang der Schlagrichtung von 45 Grad sofort hoch – und das Insekt fliegt schräg nach oben. Das gleiche geschieht in umgekehrter Richtung. Durch das Nachobenschieben des Schwingungsfächers der Flügel kippt der Körper des Insekts nach vorn – und die „Maschine“ fliegt bereits schräg nach unten.

Doch wie schlagen Insekten im Flug eine seitliche Richtung ein? Sie verfügen ja über keine lotrechte Lenkeinrichtung wie Flugzeuge an ihrem Heck. Die Aufgabe wird gleichfalls von den Flügeln gelöst! Das Insekt schaltet an der Seite auf eine niedrigere Schwingungsge-

schwindigkeit um, nach der es wenden möchte. Es ist sogar imstande, während des Schwingens die Flügellebene nach Bedarf zu regulieren. Im Grunde genommen ist dies das gleiche Verfahren, mit dem aus der Führerkanzel des Hubschraubers auf mechanischem Weg die Schraubflügel während des Fluges zur Erreichung einer größeren Auftriebskraft steiler gestellt werden.

Der Bewegungsmechanismus der Flügel einschließlich des zahlreichen kleinen und feinen Zubehörs ist ein besonderes mechanisches Meisterwerk. Das „Maschinenhaus“ – das Profil des Brustkorbs – sieht wie das Innere einer antiken Rudergaleere aus, in welcher die Schaufeln nach dem Prinzip des zweiarmigen Hebels arbeiten. In den Körpern der Insekten sind ähnlich konstruktive Lösungen vorhanden, nur daß der „Schiffsrumpf“ aus zwei Teilen besteht: In der harten Chitinmulde der Bauchdecke ist die gewölbte Rückendecke des Insekts verankert, und dort, wo sich die Ränder treffen, ragen die „Ruderstiele“ der Flügel heraus. An diesen befinden sich beidseitig Spalten, über die die nötige Muskelkraft zur Bewegung der Flügel gesteuert wird. Die Flügelenden sind mit dem Rand der Rückendecke verbunden, ihr Drehpunkt hingegen befindet sich am Rand der Bauchdecke. Wenn sich die Rückendecke hebt, schlagen die Flügel nach unten. Sinkt die Rückendecke jedoch herab, bewegen sich die Flügel nach oben (indirekter Flug).

Die Anordnung der Bewegungsmuskeln stellt eine geniale mechanische Lösung dar. Während die Dorsoventralmuskeln die Rückendecke am Flügelansatz in senkrechter Richtung nach unten ziehen, schlagen die Flügel nach oben aus. Für die Bewegung der Rücken-



Die rhythmischen Flügelschläge entfalten sich aus dem Spiel der transversalen Muskelbündel. Die Muskeln des Insekts sind in der oberen Zeichnung der Darstellung im Querschnitt, unten hingegen im Längsschnitt zu sehen. Wenn sich die senkrecht ausgerichteten Rücken-Bauch-Muskeln zusammenziehen, schlagen die Flügel nach oben; ziehen sich hingegen die waagrecht längs ausgerichteten Muskeln zusammen, schlagen die Flügel nach unten.

decke nach oben bietet sich nicht mehr eine derart einfache Lösung an, denn die nach oben ziehenden senkrechten Muskeln würden dabei aus dem Insekt heraushängen. Ein nicht durchführbares Unterfangen! Die „lebenden“ Flugzeuge haben dieses Problem in einer viel einfacheren Weise durch die Gegenmuskulatur gelöst.

Stellen wir uns einen halbeingedrückten Gummiball auf einem Tisch vor – dieser soll die Rückendecke des Insekts darstellen. Drücken wir seitlich an zwei Punkten in senkrechter Richtung auf den Ball, so werden sich beide Ränder nach oben heben. So ähnlich haben auch die Insekten dieses schwierige Problem gelöst. Die beiden für das Heben der Seitenränder der Rückendecke zuständigen Muskelbündel sind in der Längsrichtung des Brustkorbs untergebracht (dorsale Längsmuskeln), sie ziehen die Rückendecke in der gleichen Weise zusammen wie wir den Rand des Gummiballs. Dabei richten sich die beiden Seiten der gelenkartig angeschlossenen Flügelansätze auf, wobei die beiden Flügel nach unten schlagen. Die Bewegungsmuskeln ziehen jetzt die Flügelenden wieder nach unten, und das vollzieht sich abwechselnd in einer unglaublichen Geschwindigkeit.

Als der englische Biologe J. W. S. Pringle die kleinen Teile der Flügelkonstruktion und die Bewegungen einer Honigbiene unter dem Mikroskop untersuchte, stellte es sich heraus, daß die Biene imstande ist, während des Auf- und Niederschlagens den Positionswinkel der Flügel „einzustellen“, wie auch Ruderer das Ruder während des Ruderns drehen können. Es ist darum nicht verwunderlich, wenn die Fliege oder die Biene mühelos in der Lage ist, ihre Flügel in der ihr genehmen Flugrichtung, dem ihr genehmen Neigungswinkel oder der ihr genehmen Schwingungszahl zu bewegen.

Einige Insekten dagegen mühen sich mit der Änderung der Schwingungszahl ihrer Flügelschläge nicht ab. So sind beispielsweise Wanderheuschrecken ausdauernde Flieger, obwohl sie offensichtlich ihren „Motor“ nur auf

einen einzigen Rhythmus einstellen können, wobei aber ihre Flügel mit unterschiedlichen Bewegungstricks manövrieren. Dies bestätigen zumindest die Messungen des dänischen Forschers M. Jensen: Im Luftkanal freigelassene Heuschrecken flogen in jede Richtung und bewegten sich ständig mit 1040 Flügelschlägen in der Minute.

Der Frack des Tanzmeisters

Mit je größerem Gesumm und Geräusch im allgemeinen ein solch winziger Hubschrauber fliegt, um so größer sind seine Schwierigkeiten in der Luft, um so mehr muß er sich abmühen. Schade, nicht jedes Insekt ist mit solch einer vorzüglichen Konstruktion ausgestattet wie die Libelle, die nach einigen Flügelschlägen 5 bis 6 Meter in der Sekunde leicht und lautlos durch die Luft schwirrt. Der Körper des schnellen Luftpiraten ist ein vorzügliches Modell für einen vom Menschen geschaffenen Doppeldecker. Der langgestreckte, meist schlanke Hinterleib verursacht einen kleineren Luftwiderstand als die gedrungenen Körper anderer Insekten. Außerdem verwenden Libellen beim Fliegen ein interessantes Grundprinzip. Ihre zwei Paar Flügel schwingen im entgegengesetzten Rhythmus auf und ab. Wäre ihr Leib auch so kurz wie der der Hummel, würde sie sich mit ihren großflächigen Flügeln beim Fliegen überschlagen: Sie würde mal nach vorn, mal nach hinten kippen. Als Folge der durch die Flügelschläge entstehenden Drehmomente würde es ihr so ergehen wie dem Clown im Zirkus, der sich sorglos auf das Ende einer Bank setzt, wodurch das andere Ende der Bank wegen der Schwerpunktverlagerung plötzlich

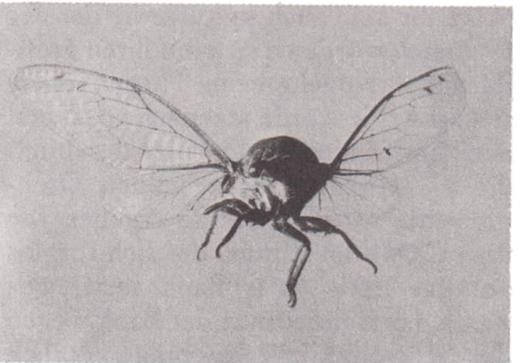
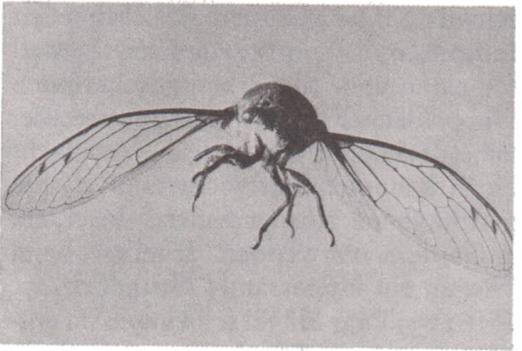
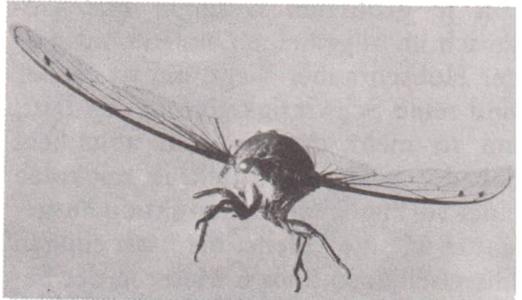
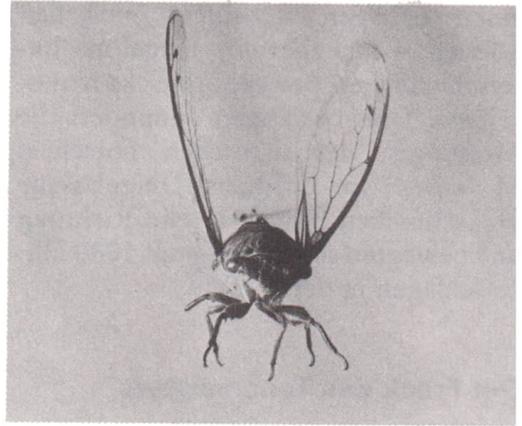
hochschnellt. Der längliche Leib verhindert dieses Umkippen, denn die träge Masse gleicht das durch die Flügel verursachte Drehmoment aus.

Das sommernächtliche Summen der Mücken vermittelt dem aufmerksamen Bioniker eine interessante Information: die Schwingungszahl der Insektenflügel. Die Luft vibriert durch die Flügelschläge wie eine Stimmgabel. Je schneller die Schwingungen, desto höher der Ton. Der Normalton a entspricht 440 Schwingungen in der Sekunde, was die meisten Mücken leicht erreichen. Messungen zufolge gibt es auch Arten, die in der Sekunde bis auf 1000 Schwingungen kommen. (Eine Schwingung bedeutet in diesem Fall, daß die Flügel je einmal nach unten und oben schlagen, also in die Ausgangsposition zurückkehren.) Das leichte Schweben der Schwebfliegen ist deshalb von hohen summenden Tönen begleitet, weil sie mit 300 bis 350 Flügelschlägen in der Sekunde in der Luft „hängen“. Die Flügel der blauen Schmeißfliege schwingen langsamer, im allgemeinen 200mal, die der Hummel 180- bis 240mal in der Sekunde.

Wie können die Flugmuskeln der Insekten in solch unglaublicher Geschwindigkeit sich straffen und wieder erschlaffen? Die Muskelfasern der Säugetiere und Vögel sind höchstens imstande, sich in der Sekunde 20mal zusammenzuziehen. Werden sie zu einer höheren Anzahl von Schwingungen benötigt, ziehen sie sich krampfhaft zusammen und versagen den Dienst. Die bisher offene Frage ist nach eingehender Untersuchung der Hummel gegenstandslos geworden. Es stellte sich nämlich heraus, daß die für die Flügelbewegung zuständigen Muskeln in der Sekunde nicht mehr als 10 Weisungen erhalten. Diese Weisungen werden je-

doch nicht nur mit je einem Zusammenziehen beantwortet, sondern mit einer ganzen Serie von Schwingungen. Aus aufeinanderfolgenden elektrischen Impulsbefehlen entsteht folglich eine fortlaufende Schwingung.

Wenn die Schwebfliege eine Stunde lang ohne Unterbrechung umherfliegt, muß sie ihre Flügel mehr als 1 Million Mal bewegen. Betrachten wir den winzigen Flugmechanismus der Insekten, so scheint es uns fast unglaublich, welch ein leistungsfähiger Motor sich darin verbirgt. Sándor Svachulay, prominenter Pionier des ungarischen Flugwesens, bemerkt hierzu in seinem Buch „Aviatiker der Natur“: „Diese kleinen und enorm schnellschwingenden Flügel lassen in unseren Gedanken einen grotesken Vergleich aufkommen, denn die Flugmembranen sind verhältnismäßig nicht größer als die flatternden Schoßflügel des Frackes eines Tanzmeisters. Wie spaßig würde es aussehen, wenn diese Frackschöße in ähnlich schnelle Schwingungen gelangten und der Tanzmeister sich mit einer wahnsinnigen Geschwindigkeit in die Luft erheben würde!“ Nicht nur ein Tanzmeister, selbst ein muskelbepackter Sportler wäre nicht imstande, sich mit der Kraftentfaltung der eigenen Muskeln in die Luft zu erheben. Einsitzige, mit Muskelkraft betriebene Flugkonstruktionen



Aufnahmefolge über den bravourösen Flug einer nordamerikanischen Zikade. Auf den beiden ersten Bildern schlagen die Flügel nach unten, auf den beiden anderen nach oben. Die besonders schnell schwingenden Insektenflügel in einer derart vollkommenen Schärfe zu fotografieren war nur dadurch möglich, daß die elektronische Belichtungseinrichtung bei jeder Aufnahme nur 1 Millionstelsekunde lang aufleuchtete.

blieben bis heute lediglich im Zustand des Experimentierens, Insekten hingegen führen uns dieses Kunststück seit eh und je jeden Tag vor. Die an einer Stelle schwirrende Schwebfliege ist sogar imstande, mit einer zweimal schwereren Last, als sie selbst wiegt, in der Luft zu schweben. In den Bewegungsmuskeln der Schmetterlingsflügel stecken noch bedeutend größere Energien: Schmetterlinge sind sogar in der Lage, mehr als das Hundertfache gegenüber ihrem eigenen Körpergewicht in die Luft zu heben.

Die chemische Energie der menschlichen Muskeln wandelt sich in Bewegungsenergie um, doch durchaus nicht in vollkommener Weise. 75 Prozent gehen im Verlauf der Umwandlung verloren, so daß der verbleibende Wirkungsgrad der Muskeln ungefähr 25 Prozent beträgt. Da der Wirkungsgrad der Kraftwagen ungefähr genauso hoch ist, brauchen wir im Vergleich hierzu nicht unzufrieden zu sein. Doch um wieviel effektiver ist der Insektenflug? Untersuchungen haben ergeben, daß eine Biene beim Rückflug mit gesammeltem Blütenstaub in ihren Bienenstock bei einer Stundengeschwindigkeit von 20 Kilometern und 260 Flügelschlägen in der Sekunde (ihr Gesamtgewicht einschließlich der Last beträgt dabei ungefähr 0,2 Gramm) einen geringeren Energieverbrauch hat, also äußerst wirtschaftlich arbeitet: Sie verbraucht lediglich 9 Prozent ihrer Nutzlast zur Betätigung ihres Motors. Die 2 Gramm schwere Heuschrecke hingegen verbraucht während eines einstündigen Fluges so viel Energie, daß man damit ein Gewicht von 1,3 Kilogramm 60 Zentimeter hochheben könnte. Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung ihrer Muskeln beträgt entsprechend unseren Berechnungen

ungefähr 20 Prozent, somit ist ihr Ausnutzungsgrad noch geringer als der des Menschen.

Die Leistung des Motors beeinflusst auch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, doch die Geschwindigkeit der im Zickzack verlaufenden Fortbewegung der Insekten ist mindestens so schwierig zu ermitteln wie die der anderen Tiere. So viele Messungen, so viele Werte. Auf der Grundlage des Vergleichs verschiedener Angaben ist es wahrscheinlich, daß zu den Rekordhaltern in der Insektenwelt die charakteristisch behaarten Nachtfalter, die Schwärmer, gehören, die sich in der abendlichen Dämmerung mit einer Geschwindigkeit von 15 Metern in der Sekunde in der Luft bewegen. Die vorzüglich fliegende Libelle erreicht selbst bei größter Eile nur 16 Meter in der Sekunde, die Geschwindigkeit der Bienen hingegen ist sogar noch geringer: Nach Messungen des Bienenforschers und Nobelpreisträgers K. Frisch beträgt sie 6,5 Meter in der Sekunde. Heuschrecken beeilen sich in keiner Weise, wenn sie sich auf ihren entsetzenerregenden, zerstörenden Feldzug begeben. Den Messungen von T. Weis-Fogh zufolge legen sie in der Sekunde 3,6 Meter zurück, sofern sie vom Rückenwind nicht unterstützt werden. Der Kohlweißling kommt in einer Sekunde auf insgesamt 2,3 Meter, womit bewiesen wird, daß er trotz seiner großen Flügel zu den am schlechtesten fliegenden Insekten zählt.

Verglichen mit dem Mauersegler, der mit einer Stundengeschwindigkeit von mindestens 150 Kilometern dahinsaut, oder einem halbwegs modernen Flugzeug, das spielend 900 Kilometer in der Stunde zurücklegt, ist die Fluggeschwindigkeit der Insekten geradezu bescheiden. Doch wenn wir die Flugme-

chanismen von dem Standpunkt aus beurteilen, welche Weite sie im Verhältnis zu ihrer eigenen Körperlänge erreichen, verändert sich mit einem Schlag die Reihenfolge der Wettbewerbsplatzierung. Selbst die mit einer Geschwindigkeit von 5 Metern in der Sekunde fliegende Hummel würde dabei als Sieger hervorgehen. Ihr folgt der Mauersegler, und das im vorherigen Beispiel erwähnte Flugzeug würde den letzten Platz einnehmen.

Diese Leistungsfähigkeit wird noch überwältigender, wenn wir dabei berücksichtigen, daß Insekten eine unglaublich weite Entfernung erreichen können. Hervorragende Weitflieger sind zum Beispiel Heuschrecken, die verschiedenartigen Wanderfalter, doch auch die zur Familie der Buckelfliegen gehörenden afrikanischen Schwarzfliegen können ohne Rast eine Strecke von 320 Kilometern zurücklegen, was im Verhältnis zu ihrer Körpergröße das Hundertmillionenfache bedeutet.

Wie großartig wäre es, ein Flugzeug zu konstruieren, das seine Flügel genauso bewegen könnte wie die Insekten und zu gleichen Bravourstücken in der Luft fähig wäre wie die Fliegen! Als erster konstruierte der griechische Erfinder A. O. Jardanoglou im Jahr 1949 eine derartige Insektenflugmaschine. Aber die Maschine wollte sich um keinen Preis in die Luft erheben. Sie war im Grunde genommen nur dafür geeignet, daß dadurch auch in der Praxis bewiesen wurde, wie wenig selbst Fachleuten vom Fliegen und von der Funktion der Insektenflügel bekannt ist. Später konstruierte der polnische Forscher O. Hawlowski den Entomopter (griech. entomon = Insekt, pteron = Flügel), doch das merkwürdige Flugzeug war nur zum Studium der physikalischen

Gesetzmäßigkeiten des Insektenflugs geeignet. Auch sowjetische Forscher experimentierten mit Konstruktionen, deren Flügel sich bewegten, und obwohl einer dieser Apparate durch einen 3-PS-Motor eine beträchtliche Auftriebskraft entwickelte, blieb es ihm doch versagt, sich in die Luft zu erheben. Man müßte vielleicht elastische Kunststoffflügel herstellen und verwenden, damit das Fluggerät mit der Leichtigkeit von Insekten in der Luft schwebt und neben dem Eigengewicht wenigstens einen Menschen transportieren könnte. Schließlich gelang es auf der Grundlage aerodynamischer Gesetze, den Hubschrauber mit seiner starren Luftschraube zu konstruieren. Das eingehende Studium des schwingenden Flügelzugs der Insekten wird vielleicht doch noch zum Bau eines idealen Einmann-Entomopters führen!

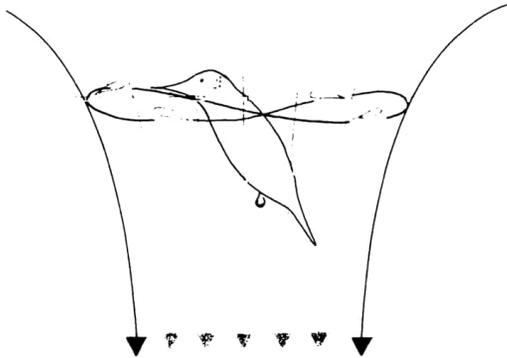
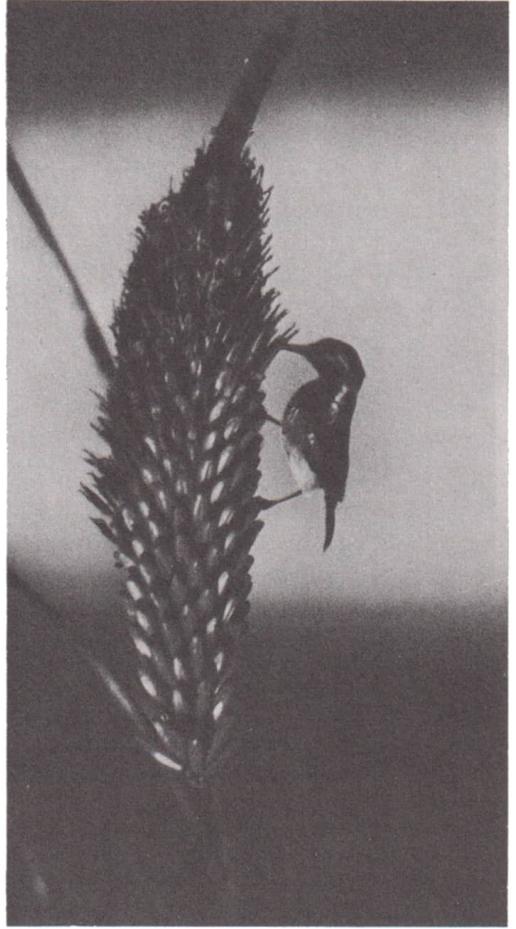
„Entzweigebrochene“ Vogelschwingen

Wenn der kleinste Vertreter der Vogelwelt, der 2 bis 3 Zentimeter große Kolibri, mit seinem langen Schnabel, in der Luft schwebend, süßen Nektar aus dem Blumenkelch saugt, muß er für dieses fliegerische Bravourstück ordentlich bezahlen. Er muß nämlich im Verhältnis zu seinem Körpergewicht jeden Tag so viel Nahrung zu sich nehmen, als wenn ein Mensch täglich fast 1 Dezitonne Kartoffeln essen würde.

Demnach bleibt der buntgefiederte Kolibri auf dem Gebiet des effektvollen und energiesparenden Fliegens im Vergleich zu anderen Vögeln weit zurück. Eins jedoch kommt ihm zugute: Er hat sich nicht nur das Prinzip des Hub-

schrauberflugs zu eigen gemacht, sondern er ist unter den Vögeln der einzige, der auch rückwärts fliegen kann. Er schlägt mit seinen Flügeln genauso im Rundbogen hin und her wie die Insekten, so daß er ähnlich wie die Hub-schrauber mit ihren waagerechten Flügelschrauben imstande ist, Auftriebskraft zu erzeugen.

Die Mehrheit der Vögel nutzt die Vorteile des bedeutend vorteilhafteren flügelschlagenden Fluges, der mit geringerem Energieeinsatz verbunden ist. Der Mensch beobachtet seit Urzeiten sehnsuchtsvoll diese besondere Fähigkeit, und es ist nicht zufällig, daß das Vorstellungsbild der schwingenden Flügel eng mit dem Begriff des Fliegens verschmolzen ist. Die ersten vagen



Der Kolibri ist der einzige Vogel, der auch waagrecht rückwärts fliegen kann.

Flugversuche begannen deshalb auch mit Modellen nach dem Muster schwingender Flügel. Sie führten jedoch zu keinem Ergebnis! Vögel bewegen nämlich nur zwangsläufig ihre Flügel, und am häufigsten jene Vögel, die am schlechtesten fliegen, da an ihren ausgebreiteten Flügeln nicht genügend Auftriebskraft entsteht. Albatrosse mit einer Flügelspannweite von 3,4 bis 4 Metern gehören zu den vorzüglichsten Segelfliegern der Meere. Obwohl sie ihre Flü-

Wenn der Kolibri an einer Stelle schwebt, leitet er die Luft wie ein Ventilator unter sich hinweg. Dabei drehen sich die Flügel nicht im Kreis, sondern das Flügelprofil wird nach jedem halbkreisförmigen Flügelschlag „umgestellt“.



Ein an der Blüte eines Mangobaums nippender Kolibri. Der Kolibri zählt zu den kleinsten Vögeln der Welt, deshalb kann er den Flugstil der Insekten leicht nachahmen. Wenn der Kolibri vor einer Blume schwebt, hält er seinen Körper beinahe senkrecht, so verlagert sich der Schwerpunkt des Körpers in den Mittelpunkt der halbkreisförmigen Flügelschläge (rechts).

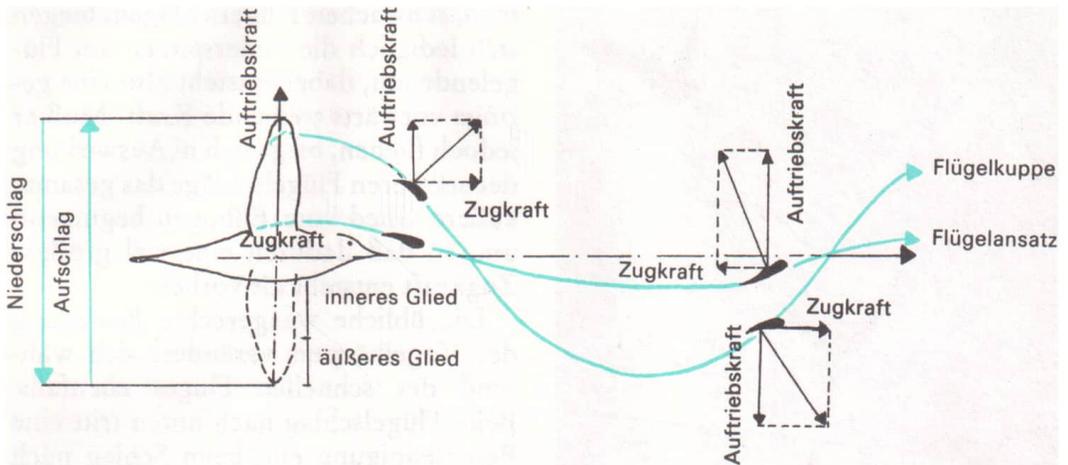
gel kaum bewegen, fliegen sie so vollkommen, daß sie anscheinend auf Bewegungen überhaupt nicht angewiesen sind. Im allgemeinen ist die Flugtechnik eines Vogels um so vollkommener, je größer er ist, so daß dadurch auch die Anzahl der Flügelschläge geringer ist.

Das Flügel skelett der Vögel weist den gleichen charakteristischen Grundbauplan auf wie die Vordergliedmaßen der übrigen vierfüßigen Wirbeltiere. Aus

dem Flügelansatz springt der Oberarm heraus, diesem schließen sich die beiden Knochen des Unterarms (die Speiche und das Ellenbein) an, schließlich etliche Handwurzel- und Mittelhandknochen, wobei die zusammengewachsenen Finger die vorderen Gliedmaßen abschließen. Dieses mit Federn ausgestattete elastische Organ ermöglicht es, daß der Vogel das grazile Flugwerkzeug im Ruhezustand an seinen Körper anschmiegt, im ausgebreiteten Flügel sich jedoch selbst der leiseste Wind fängt.

Die Auftriebskraft entsteht wie bei Flugzeugen an den ausgespannten Flügeln: Da die obere Seite des Flügels konvex, die untere jedoch konkav ist, entsteht durch die vorbeiströmende Luft oberhalb des Flügels ein geringerer Druck als unterhalb. Dieser Druckunterschied verleiht dem Vogelflügel Auftrieb, was auch Experimente im Windkanal beweisen. Auftriebskraft entsteht selbst dann, wenn der Vogel die Flügel nicht bewegt — im Gegensatz zu den Hautflüglern der Insekten, die nur in der Luft bleiben, wenn sie ihre Flügel pausenlos bewegen. Bei der Suche nach weiteren Ähnlichkeiten zwischen Motorflugzeugen und Vogelschwingen ergibt sich unwillkürlich die Frage: Wo befindet sich die Luftschaube des Vogels?

Die Vogelwelt kann sich selbstverständlich einen derartigen Luxus nicht erlauben, nämlich zwischen einem „schwebenden“ Flügelmechanismus und einer „vorwärts treibenden“ Vorrichtung zu unterscheiden. Daraus ergibt sich, daß die Funktion der Luftschaube bei den Vögeln von den Flügeln übernommen wird. Durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, daß der Flügel vom Gesichtspunkt des Fliegens in zwei



Der Vogel im Flug und jene kritischen Augenblicke, bei denen er seine Flügel nach oben schwingt. Dabei stützt er sich lediglich auf die Auftriebskraft der inneren Flügelglieder, welche die an der Flügelkuppe entstehende nach unten ziehende Kraft auszugleichen vermag. Die Zugkraft wird auch weiterhin von den äußeren Flügelgliedern produziert.

Glieder geteilt werden kann: Das innere und das äußere Glied. Das innere Glied reicht vom Flügelansatz bis zum „Ellbogen“ des Vogels und entwickelt ähnlich wie die Tragflügel der Flugzeuge Auftriebskraft, das äußere Glied hingegen ersetzt die Luftschraube.

Doch auch hier das gleiche Problem wie bei den Insektenflugzeugen: Der Natur ist der Begriff eines ständig um sich kreisenden Organbestandteils nicht bekannt, darum ist der Vogel nur imstande, den Propeller seines Flügels wechselweise hin- und herzubewegen.

Schlägt der Flügel nach unten, biegen sich die Federn am äußeren Rand aufwärts. Dabei ist die auf die Flügel einwirkende Auftriebskraft mindestens so groß wie die in waagerechter Richtung entstehende Zugkraft. (Das gleiche können wir an einem Bogen Papier feststellen, den wir an unsere schräg nach unten gehaltene Handfläche drücken, während wir gleichzeitig die Hand nach unten bewegen. Der Papierbogen wird

nicht nach unten fallen, sondern an unserer Handfläche haftenbleiben.)

Schlägt der Flügel hingegen nach oben, biegen sich die Federn des äußeren Gliedes schlagartig um, wobei die Enden nach unten zeigen. Aus dem dynamischen Luftwiderstand der Flügel entsteht abermals horizontale Zugkraft, nur daß die senkrecht ausgerichtete „Auftriebskraft“ dabei nach unten ausgerichtet ist.

Stürzen denn die Vögel in diesem Augenblick nicht herunter? Wie uns die bisherigen Erfahrungen bestätigen: Nein! Die beim Flügelschlag nach unten am inneren Flügelglied entstehende Auftriebskraft verhindert den Absturz und hält den Vogel in der Luft.

Nach unzähligen Vermutungen und Vorstellungen findet die Mechanik des Vogelflugs wohl am deutlichsten und klarsten in der eben geschilderten Theorie ihre Erklärung. Auch die bisherigen Erfahrungen bekräftigen dies. Der englische Forscher J. H. Storer stellte



Möwen veranstalten auf dem zugefrorenen Balaton Schaufliegen. Der oberste Vogel schlägt gerade nach unten, jeder der beiden Flügel nimmt die Form eines verkehrten V an. Darunter fliegt eine andere Möwe im Segelflug. Der zum Landen ansetzende Vogel bremsst gerade mit seinen Flügeln.

durch Zeitlupenaufnahmen eines niedrig über einen Strauch fliegenden Silberreihers fest, daß der innere Teil seiner Flügel das Hindernis nicht berührte, weil er sich nicht bewegte. Der Reiher schlug nur mit dem vom Ellenbogen nach außen verlaufenden Flügelteil, dem „Propeller“. Dies beweist nicht nur die zweifache Rolle des Vogelflügels, sondern auch, daß der äußere Teil imstande ist, sich eigenständig zu bewegen.

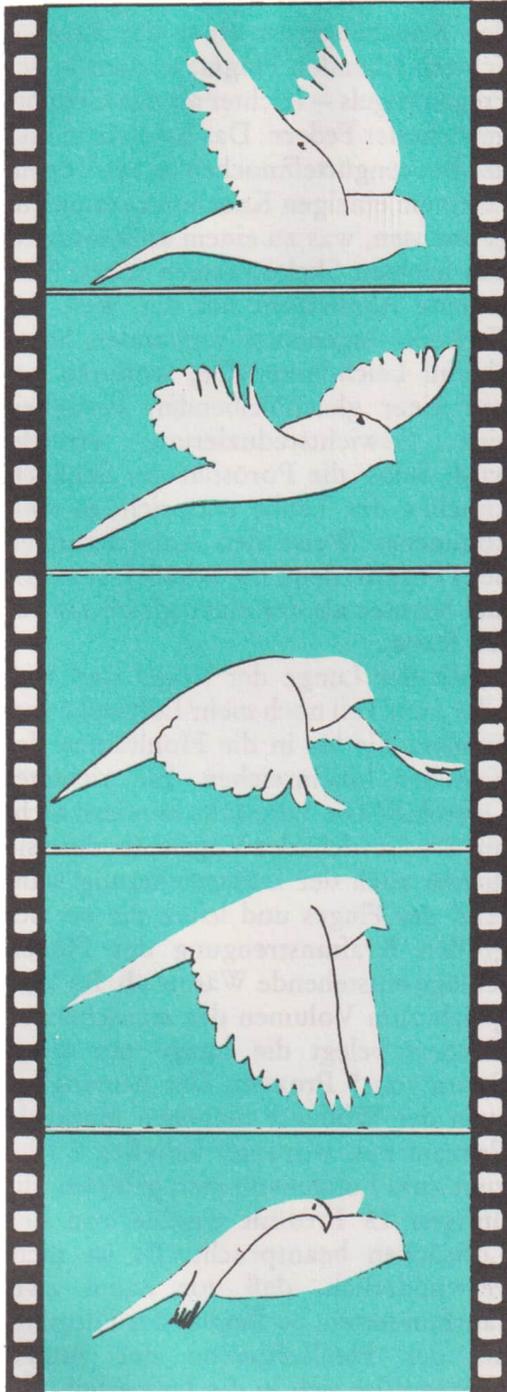
Der Neigungswinkel des Vogelflügels kann – im Gegensatz zu den Flugzeugen – während des Fluges verändert werden. Fliegt der Vogel mit langsa-

men, schwachen Flügelschlägen, biegen sich lediglich die Federspitzen am Flügelende um, dabei entsteht also eine geringe vorwärts treibende Kraft. Muß er jedoch fliehen, biegt sich in Auswirkung der stärkeren Flügelschläge das gesamte äußere Glied vom Ellbogen beginnend um, so daß dadurch eine viel größere Zugkraft entsteht als vorher.

Die übliche waagerechte Bewegung des Vogelkörpers verändert sich während des schnellen Fluges ebenfalls. Beim Flügelschlag nach unten tritt eine Beschleunigung ein, beim Schlag nach oben jedoch eine Verlangsamung, wie das auch in der aufgezeigten Aufnahme des Fluges einer Kohlmeise veranschaulicht wird. Vögel fliegen nicht gleichmäßig, sondern ruckweise, stoßweise.

Ähnlich wie den Insekten ist auch den Vögeln die Möglichkeit der Lenkung durch die Verlagerung des Schwerpunkts bekannt. Nimmt die Taube während ihres schnellen Fluges erst im letzten Augenblick einen Telegrafendraht wahr, biegt sie jählings ihre Flügel nach vorn. Dadurch verlagert sich ihr Schwerpunkt im Verhältnis zum „unterstützenden“ Punkt der Auftriebskraft etwas nach hinten, der Vogel kippt nach hinten und fliegt, in die Höhe steigend, über den Draht hinweg.

Die Verkleinerung der Flügeloberfläche kann ebenfalls mit Vorteilen verbunden sein, da sie die Segelfluggeschwindigkeit erhöht. Nachdem die Schwalbe ihre Geschwindigkeit mit ein bis zwei Flügelschlägen beschleunigt, zieht sie die Kielfedern ein, breitet die Flügel sichelförmig aus und gleitet mit einem einzigen Flügelschlag 8 bis 10 Meter weit. Durch die kleinere Flügeloberfläche entsteht ein kleinerer Widerstand, was wiederum die Gleitgeschwindigkeit erhöht. Diese Methode wird



Der schnelle Flug einer Kohlmeise, dargestellt durch fünf Filmbilder einer Aufnahmesfolge. Die Zeitdifferenz zwischen den Bildern beträgt 0,01 Sekunden.

auch beim Segelflug angewandt, allerdings mit dem Unterschied, daß mittels einer mechanischen Vorrichtung die Hinterkante der Flügelfläche nach innen eingezogen wird. Die kleinere Flügeloberfläche ermöglicht, daß die Maschine schneller in eine aufsteigende Luftströmung gleitet.

Flaumleichte Bauelemente

Von den Erfindungen der Natur tragen viele kleine Zubehörteile dazu bei, daß sich die Vögel in ihrem Lebensraum mindestens so leicht bewegen können wie die vierbeinigen Tiere auf der Erde oder die Fische im Wasser. Vom Gesichtspunkt der Fluggeschwindigkeit und der Energieeinsparung ist zum Beispiel der stromlinienförmige Körper unentbehrlich. Deshalb ist der Hals der Vögel fast verschwunden! Freilich nur scheinbar, er ist von einer dichten Federdecke bedeckt, die mit den übrigen Körperfedern eine sanft gewölbte Oberfläche bildet.

Die Feder ist das wichtigste „Bauelement“ des Vogelflügels. Die Form der Flügelfeder ist etwas geschwungen. Diesem Umstand ist die an den Vogelflügeln auftretende Auftriebskraft zu verdanken. Die Federn biegen sich leichter nach unten als nach oben, so daß an den inneren Flügelgliedern Auftriebskraft, beim Schwingen der äußeren Flügelglieder hingegen Vortriebskraft entsteht. Je gedrungener, zylindrischer der Vogel ist, in einem um so gekrümmteren Bogen schmiegt sich der Flügel im geschlossenen Zustand an den Körper. Am ausgestreckten bogenförmigen Flügel entsteht größere Auftriebskraft, und darauf sind vor allem schwere Vögel mit einem gedrungenen

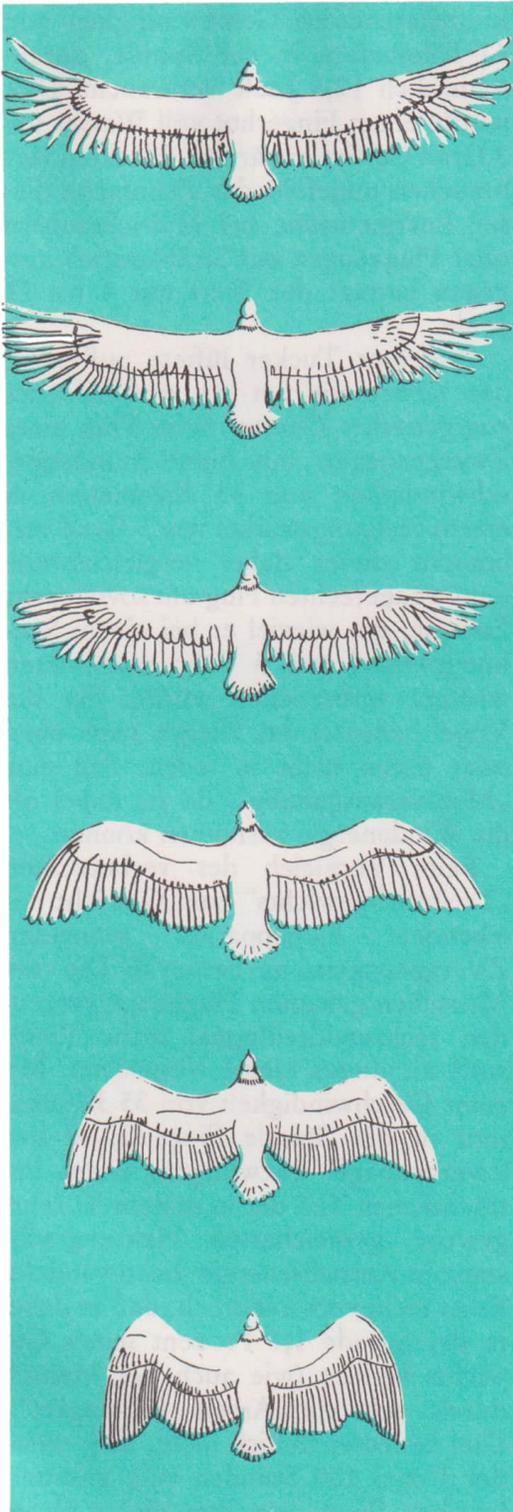
Körperbau angewiesen. Die Entwicklung der Vogelflügel ist ein mustergültiges Beispiel für selbstregulierende Methoden in der Natur: Die ideale Gestaltung des notwendigen Flugmechanismus wird von der Form des Körperbaus bestimmt.

Die Federn — insbesondere die Flaumfedern — schützen den Vogelkörper auch vor den Unbilden des Wetters. Diese von der Natur erprobte Erfindung griffen Bioniker auf, und im Laboratorium einer kalifornischen Textilfabrik wurde ein Experiment mit einem doppeltbeschichteten Gewebe durchgeführt. Die obere Schicht des Gewebes bestand aus längeren federartigen Kunststoffasern, die innere Schicht hingegen aus einem kurzen dichten Wärmeelement, an dem sich um so mehr elektrische Spannung aufstaut, je wärmer der menschliche Körper ist. Bei großer Hitze, bei der die Kleidung am stärksten mit Elektronen angespeichert wird, richten sich die Federn unter der abstoßenden Einwirkung der negativen Ladung auf und verschaffen dem Körper, wie Fenster mit Jalousien, eine angenehme Luftkühlung. Bei Kälte verhält sich diese Spezialkleidung gerade umgekehrt: Die Federn schmiegen sich fest an den Körper an und bieten einen vorzüglichen Kälteschutz.

Die übrigen Körperbauelemente der Vögel sind ebenfalls mit größter Zweckmäßigkeit dem Fliegen angepaßt. Der wichtigste Gesichtspunkt dieses Prinzips: Reduzierung des in der Luft fortzubewegenden Gewichts! Es ist kein Zufall, daß das Knochengerüst der Taube zum gesamten Körpergewicht nur 4,4 Prozent ausmacht, während es bei einer gleich schweren Ratte 5,6 Prozent beträgt. Messungen des amerikanischen Forschers R. Murphy zufolge ist

das Knochengerüst einer der vorzüglichsten lebenden Flugmaschinen — des Fregattvogels — leichter als das Gesamtgewicht der Federn. Das Kreuzbein und der Beckengürtelknochen ist bei Vögeln zu einem einzigen Knochen zusammengewachsen, was zu einem außerordentlich leichten Skelettrahmen führt. Eine erneute Ähnlichkeit mit der Welt der Technik! Ingenieure verwenden heute überall Leichtbauprofile, wodurch neben einer gleichbleibenden Festigkeit eine Gewichtsreduzierung erreicht wird. Selbst die Porösität der Schädelknochen der Taube entspricht in vollkommener Weise den Anforderungen des Fliegens, denn ihr Schädel ist sechsmal leichter als der einer gleich schweren Ratte.

Mit der Lunge der Vögel sind fünf oder zum Teil noch mehr Luftsäcke verbunden, die bis in die Hohlräume der Knochen hineinreichen. Ein richtiges Luftschiff! Die Luftsäcke mindern nicht nur das Gewicht des Vogels, sondern sie dienen auch der Luftspeicherung während des Fluges und leiten die bei der großen Kraftanstrengung der Flügelschläge entstehende Wärme ab. Im Vergleich zum Volumen des menschlichen Körpers belegt die Lunge nur einen Raum von 5 Prozent. Das Atmungssystem der Wildente hingegen macht 20 Prozent aus, worunter lediglich 2 Prozent zum Lungenvolumen gehören, die übrigen 18 Prozent werden von den Luftsäcken beansprucht. Es ist nicht verwunderlich, daß vor kaum zwei Jahrhunderten, zu Beginn der Fliegerei, als der Heißluftballon der Brüder Montgolfier sich in die Luft erhob, die Wissenschaftler glaubten, daß Vögel die Luft in ihren Luftsäcken erwärmen und daß sie dieser Umstand in der Luft hält. Heute kann man darüber nur lächeln.



Ähnlich wie bei Segelflugzeugen schweben solche Vögel am leichtesten in der Luft, deren Flügeloberfläche im Verhältnis zu ihrem Körpergewicht größer ist. Derartige Vögel können bereits die leichteste Brise ausnutzen, um sich zum Flug zu erheben. Beabsichtigen sie, schneller zu gleiten, biegen sie einfach ihre Flügelspitze ein, wodurch die Auftriebsfläche verkleinert wird. In umgekehrter Weise kann dies allerdings nicht vorgenommen werden! Deshalb besteht die Voraussetzung für ein gutes Fliegen darin, daß das Verhältnis von Körpermasse zur wirksamen Flügelfläche einen Wert von 60 bis 80 g/dm² nicht überschreitet. Schwalben bewegen sich mit einem Verhältnis von 35 g/dm² weit unter dieser Grenze. Über die leichteste Konstruktion verfügen die ausdauernd kreisenden Geier, die hinsichtlich des Verhältnisses von Körpermasse zur Flügelfläche einen Wert von 27 g/dm² erreichen.

Zweifellos fliegen solche Vögel am schwerfälligsten, deren Flügel im Verhältnis zum Körpergewicht klein sind. Bei Überprüfung zwei gleich schwerer Vögel – einer Wachtel und einer Möwe – ist der Unterschied im Flügelmaß augenfällig: Die Spannweite (Entfernung zwischen den beiden ausgespannten Flügelspitzen) der Möwe beträgt mehr als das Zweifache der Wachtel. Der dabei in Erscheinung tretende Unterschied kann bereits beim größeren Energieverbrauch und bei der Ge-

Der Geier schwebt mit ausgebreiteten Flügeln fast ohne Kraftanstrengung. Will er schneller gleiten, biegt er seine Flügel ein. Je kleiner die Flügeloberfläche, auf die sich der Vogel in der Luft „stützt“, um so schneller wird die Gleitgeschwindigkeit, wobei er aber auch schneller nach unten sinkt.

schicklichkeit beim Anflug beobachtet werden. Die Wachtel steigt mit größter Anstrengung in die Luft, während sich die Möwe selbst vom Wasser aus mit Leichtigkeit in die Luft erhebt. Je größer der Flügel – um so sicherer das Fliegen! Doch auch die Form des Flügels ist entscheidend. Der Flügel des Adlers ist acht- bis neunmal so lang wie breit: Dies ist das idealste Verhältnis. Kleinere Vögel haben „breitgezogene“ Flügel, darum sind sie zu solch bewegungslosem Kreisen wie dem des Adlers oder des „schwangroßen“ Albatros nicht fähig.

Abmagerungskur während des Fluges

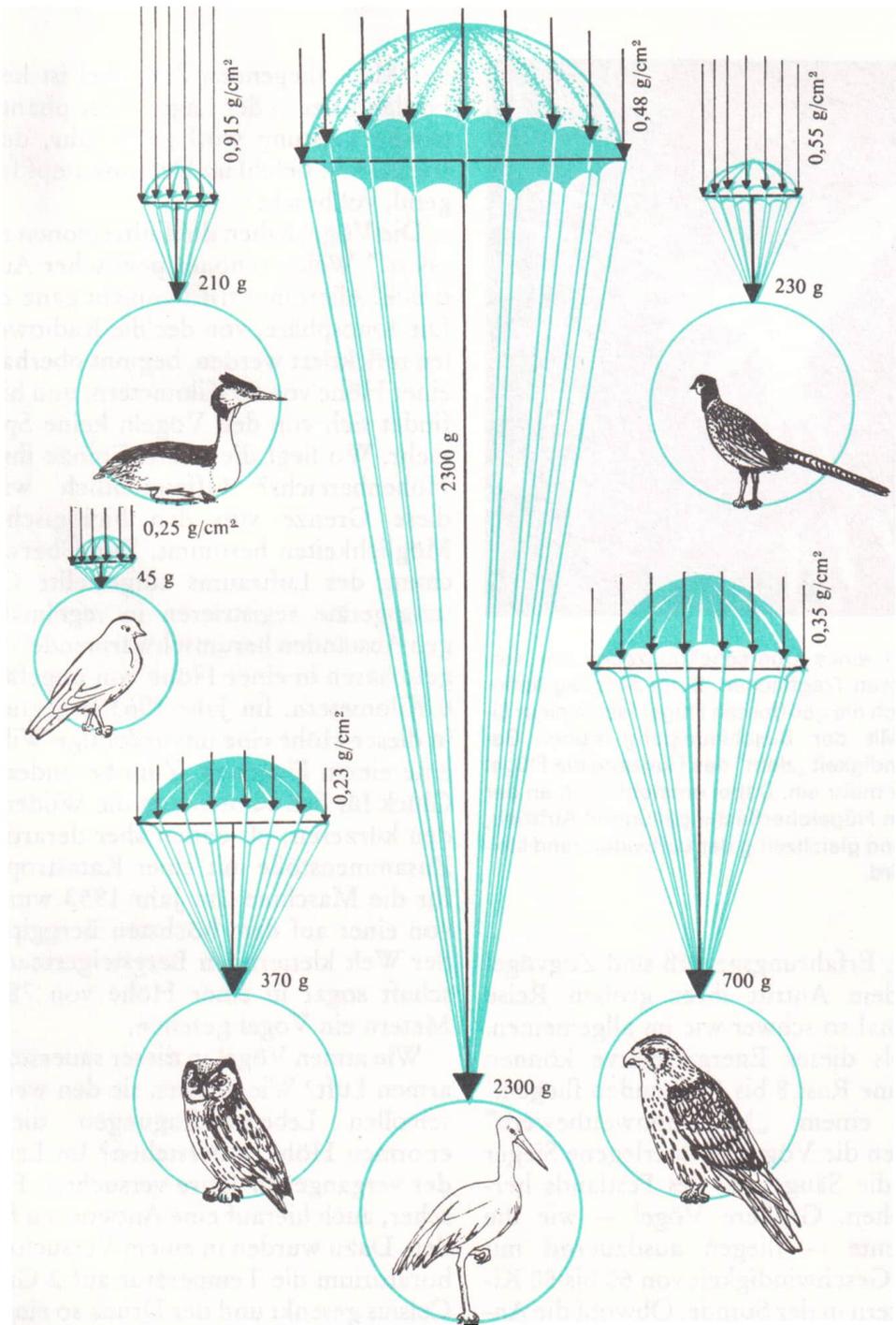
Schnelle Flügelbewegungen verbrauchen enorm viel Energie. Zeitlupenaufnahmen von C. H. Greenewalt zeigen, daß eine Kolibriart die Flügel in der Sekunde achtzigmal hin- und herbewegt. Zur Zeit ist das der Rekord der Vogelwelt im Flügelschlagen. Die Bewegungsleistung dieser Vogelmuskeln ist bewundernswert. Würde ein Mensch im Verhältnis zu seinem Gewicht die gleiche Kraft entwickeln, müßte er in jeder Sekunde eine Last von 56 Sack Zement 1 Meter hoch in die Luft heben!

Vergleichen wir den Energieverbrauch eines Vogels für den Transport 1 Gramms seines Körpergewichts auf die Entfernung von 1 Kilometer mit der Leistungsfähigkeit der verschiedenen von Menschen geschaffenen Flugzeugtypen, so schneiden die lebenden Flugzeuge schlechter ab. Messungen des amerikanischen Professors Vance A. Tucker haben ergeben, daß ein 35 Gramm schwerer Zwergpapagei beim rationellsten Fliegen, und zwar mit der

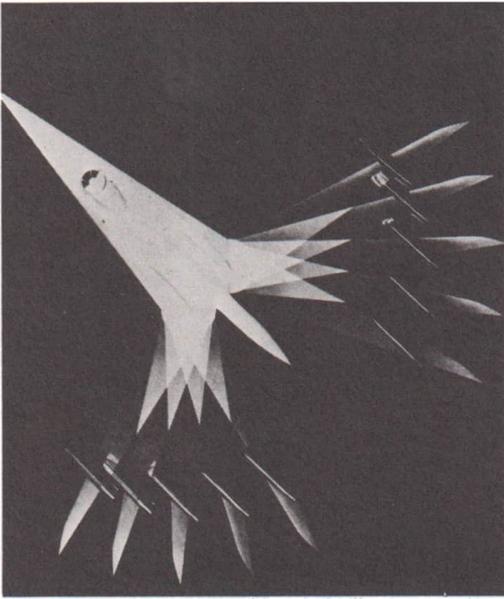
kraftsparendsten Geschwindigkeit von 42 Kilometern in der Stunde, durchschnittlich 12,5 Joule verbraucht. Dies würde einen Fingerhut voll Wasser um 3 Grad Celsius erwärmen. Insekten verbrauchen ungefähr das Zehnfache dieser Energiemasse, bei Hubschraubern oder Flugzeugen mit Strahlantrieb hingegen beträgt der Wert nur 4 bis 21 Joule.

Professor Tucker lüftete außerdem das Geheimnis um ein verblüffendes energetisches Gesetz. Beim Flug eines Zwergpapageis mit einer Stundengeschwindigkeit von 43 Kilometern in einem Steigungswinkel von 5 Grad verbraucht dieser dabei vergleichsweise zum waagerechten Flug um soviel mehr Energie, um wieviel er bei einem Senkungswinkel von 5 Grad nach unten weniger verbrauchen würde. Für die Vögel bedeutet das Fliegen nach oben oder unten nicht in jedem Fall eine „Mehrverausgabung“, da sie dabei oft die Windenergie ausnutzen können.

Beim Vergleich des verbrauchten „Treibstoffgewichts“ zum Gewicht des lebenden Flugapparats schneiden Zwergpapageien am besten ab. Die vom Menschen gebauten Flugzeuge vergeuden sechshundrdreißigmal mehr Treibstoff als dieses kleine Vögelchen. Mit einer Geschwindigkeit von 35 Kilometern in der Stunde fliegend, ist der Zwergpapagei gezwungen, einen beträchtlichen Teil der in seinem Körpergewebe gespeicherten Nahrungssubstanz in Antriebsenergie umzuwandeln. Es ist nicht verwunderlich, daß er dabei in der Stunde 1,1 Prozent seines Gewichts verliert (wie auch der Mensch durch schwere Arbeit „abmagert“). Dies bedeutet freilich nicht, daß, wenn der Vogel 100 Stunden lang ununterbrochen fliegt, von ihm nichts übrig-



Je größer die Flügeloberfläche des Vogels, um so leichter fliegt er. Ein Fallschirm sinkt gleichfalls langsamer, wenn der Durchmesser groß und das an ihm hängende Gewicht klein ist. Auf der Abbildung ist der Durchmesser des Fallschirmes jeweils proportional zur Flügelgröße, seine Länge proportional zur Körpermasse des Vogels dargestellt. Je länger die senkrechten Pfeile am Außenrand des Schirms, um so schwieriger der Verbleib des Vogels in der Luft.



Projekt eines Überschallflugzeugs mit verstellbaren Tragflächen. Beim Aufstieg befinden sich die geöffneten Flügel fast in einer Linie. Mit der Beschleunigung seiner Geschwindigkeit „zieht“ das Flugzeug die Flügel immer mehr ein. Dabei entsteht auch an der kleinen Flügeloberfläche genügend Auftrieb, während gleichzeitig der Luftwiderstand kleiner wird.

bleibt. Erfahrungsgemäß sind Zugvögel vor dem Antritt ihrer großen Reise zweimal so schwer wie im allgemeinen. Mittels dieser Energiereserve können sie ohne Rast 8 bis 10 Stunden fliegen.

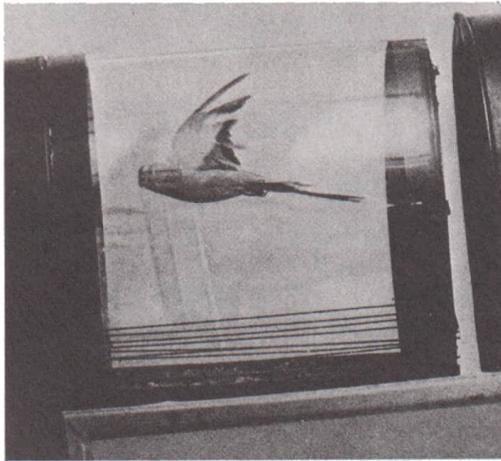
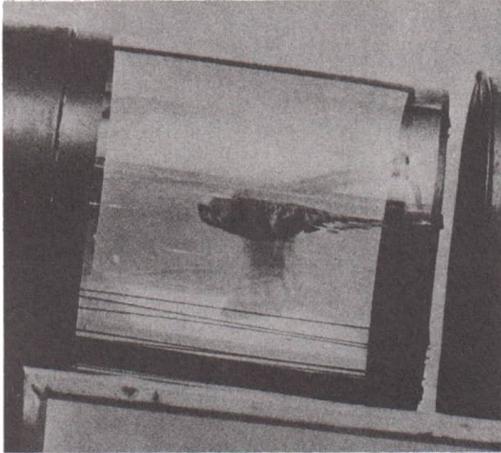
In einem „Marathonwettbewerb“ würden die Vögel als überlegene Sieger über die Säugetiere des Festlands hervorgehen. Größere Vögel — wie die Wildente — fliegen ausdauernd mit einer Geschwindigkeit von 60 bis 80 Kilometern in der Stunde. Obwohl die Antilope, der Strauß und der Gepard ebenso schnell sind, können sie dieses Tempo nicht lange halten. Eine Entfernung von 1000 bis 1500 Kilometern ohne Rast zurückzulegen wie die über

das Meer fliegenden Zugvögel ist kein Festlandstier in der Lage. Diese phantastische Leistung wird jedes Jahr, dem triebhaften Befehl im Daseinskampf folgend, vollbracht.

„Die Vögel haben die Luftregionen erobert!“ Welch schöner poetischer Ausdruck! Allerdings trifft er nicht ganz zu. Die Ionosphäre, von der die Radiowellen reflektiert werden, beginnt oberhalb einer Höhe von 80 Kilometern, und hier findet sich von den Vögeln keine Spur mehr. Wo liegt die obere Grenze ihres Höhenbereichs? Offensichtlich wird diese Grenze von den biologischen Möglichkeiten bestimmt. Zur Überwachung des Luftraums aufgestellte Ortungsgeräte registrieren in regelmäßigen Abständen herumschwärmende Vogelscharen in einer Höhe von ungefähr 6 Kilometern. Im Jahr 1963 begegnete in dieser Höhe eine unvorsichtige Wildente einem Flugzeug. Zum besonderen Glück für den Piloten zog die Wildente den kürzeren; oft enden aber derartige Zusammenstöße mit einer Katastrophe für die Maschine. Im Jahr 1953 wurde von einer auf dem höchsten Berggipfel der Welt kletternden Bergsteigermannschaft sogar in einer Höhe von 7800 Metern ein Vogel gesehen.

Wie atmen Vögel in dieser sauerstoffarmen Luft? Wie können sie den wechselvollen Lebensbedingungen dieser enormen Höhe widerstehen? Im Laufe der vergangenen Jahre versuchten Forscher, auch hierauf eine Antwort zu finden. Dazu wurden in einem Versuchslaboratorium die Temperatur auf 2 Grad Celsius gesenkt und der Druck so eingestellt, wie er in einer Höhe von 6000 Metern herrscht. Der für das Experiment verwandte Haussperling verlor in keiner Weise die Lust zum Spielen, obwohl der auf seinen Körper einwir-

kende Luftdruck kaum die Hälfte des üblich gewohnten betrug. Sein Körper glich sich der Temperatur der Umgebung an, der Sauerstoffverbrauch stieg auf das 2,2fache des normalen Ver-



Der Energieverbrauch der Vögel beim Fliegen kann nur unter Laboratoriumsbedingungen genau überprüft werden. Wenn das Ende des Windkanals ein wenig angehoben wird, beginnt der Zwergpapagei ansteigend zu fliegen. Er erhöht die an den Flügeln bestehende Zugkraft, wobei die Auftriebskraft fast beständig bleibt (oben). Zum abschüssigen Flug wird der Vogel durch das Neigen des Windkanals nach unten veranlaßt (unten).

brauchs an. In dieselbe Versuchskammer wurde vergleichsweise auch eine Maus gebracht. Dieses Versuchstier überstand das Experiment nur mit Schwierigkeiten. Bei einem einer Höhe von 3600 Metern entsprechenden Luftdruck verfiel die Maus in Schwermut, unter den Bedingungen von 6000 Metern fiel sie in einen scheinodartigen Zustand. Dem Haussperling war nicht das geringste anzumerken. Mit jedem Atemzug „pumpte“ er um 74 Prozent mehr Sauerstoff in jene Teile seiner Lunge, in denen das kreisende Blut imstande ist, den meisten Sauerstoff aufzunehmen. Solche Höhen können also von Vögeln leicht erreicht und gut überstanden werden.

Das Fliegen selbst beschleunigt gleichfalls den gesamten Lebensrhythmus des Organismus – dies ergab sich aus den Untersuchungen zweier kanadischer Forscher. Messungen an Tauben zufolge erhöhen sich die Herzschläge in der Minute von 166 auf 560. Im Atmungsvorgang tritt ein noch erstaunlicherer Wandel ein. Die Anzahl der Atemzüge im Ruhestand von 26 in der Minute erhöhen sich beim Fliegen auf 490. Diese Zahl ist besonders interessant, denn nach früheren Messungen beträgt die Anzahl der Flügelschläge der Taube in der Minute ebenfalls 490.

Die Atmungsuntersuchungen der Kanadier J. S. Hart und O. Z. Roy haben somit die alte Vermutung bestätigt, daß der Flügelschlag der Vögel mit ihrer Atmung „synchron“ verläuft. Da die Flugmuskeln ein Viertel des Körpergewichts ausmachen, wurde schon lange angenommen, daß dieser riesige „Muskelmotor“ auch das rhythmische Zusammendrücken des Brustkorbs, das heißt die Atmung, beeinflusst. Dieser Zusammenhang war sozusagen vorauszuse-

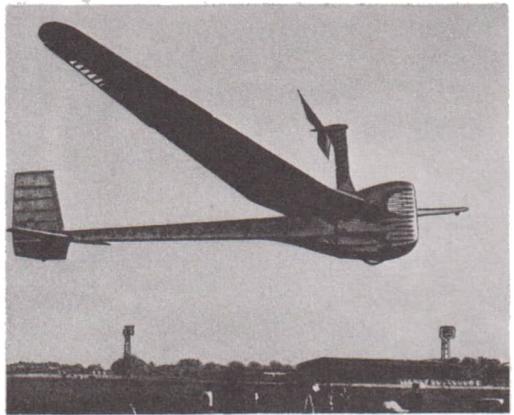
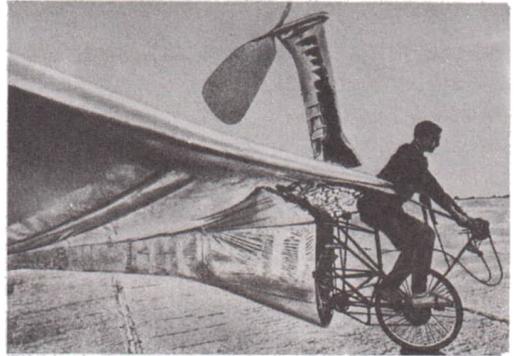
hen. Die an Zwergpapageien durchgeführten Messungen haben allerdings die allgemeine Gültigkeit dieser Regel nicht bestätigt. Bei der Geschwindigkeit eines konstanten Fluges, bei 840 Flügelschlägen in der Minute, liegt der Atmungsrythmus zwischen 175 und 300. Dies ist verständlich, wenn wir dabei berücksichtigen, daß es physisch unmöglich wäre, in der Minute 840mal zu atmen. Die schnellflatternden Vögel sind dazu also nicht in der Lage, die hervorragenden Flieger sind jedoch darauf nicht angewiesen. Diese Synchronisierung beim Fliegen ist offensichtlich nur für die Muskelleistung von Vögeln mit mittelgroßen Flügeln charakteristisch.

Menschenmuskeln und Vogelschnelligkeit

Hätte der Mensch so lange gewartet, bis er sich wie die Vögel aus eigener Muskelkraft in die Luft erheben könnte, müßte er auch heute noch sehnsuchtsvoll den vorbeifliegenden und in der Höhe kreisenden Vögeln zusehen. Die Flugzeugkonstrukteure waren sich in den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts über die Bedeutung der Flügelschläge nicht einig. Es wurden zahlreiche Versuchsmaschinen gebaut, die von vornherein zum Scheitern verurteilt waren. Später ging man vom Prinzip der schwingenden Flügel ab, doch man glaubte noch immer, auf die menschliche Muskelkraft bauen zu müssen. Die starren Flügel dienten der Auftriebskraft, und für die Schubkraft sollte eine Luftschaube erhalten, die von Piloten durch irgendeine konstruktive Transmission betrieben werden sollte. Das erfolgreichste Beispiel der dreißiger Jahre unseres Jahrhunderts war die Flugma-

schine von Haessler-Willinger. Allerdings mußte der Pilot nach einem Gleitflug von 712 Metern ohnmächtig aus der Maschine gehoben werden. Er war der ungeheuerlichen Kraftanstrengung nicht gewachsen!

Heute ist bereits allgemein bekannt, daß das Verhältnis der Muskelkraft des Menschen im Vergleich zu seinem eigenen Gewicht bedeutend kleiner ist als bei den Vögeln. So fand der stattliche



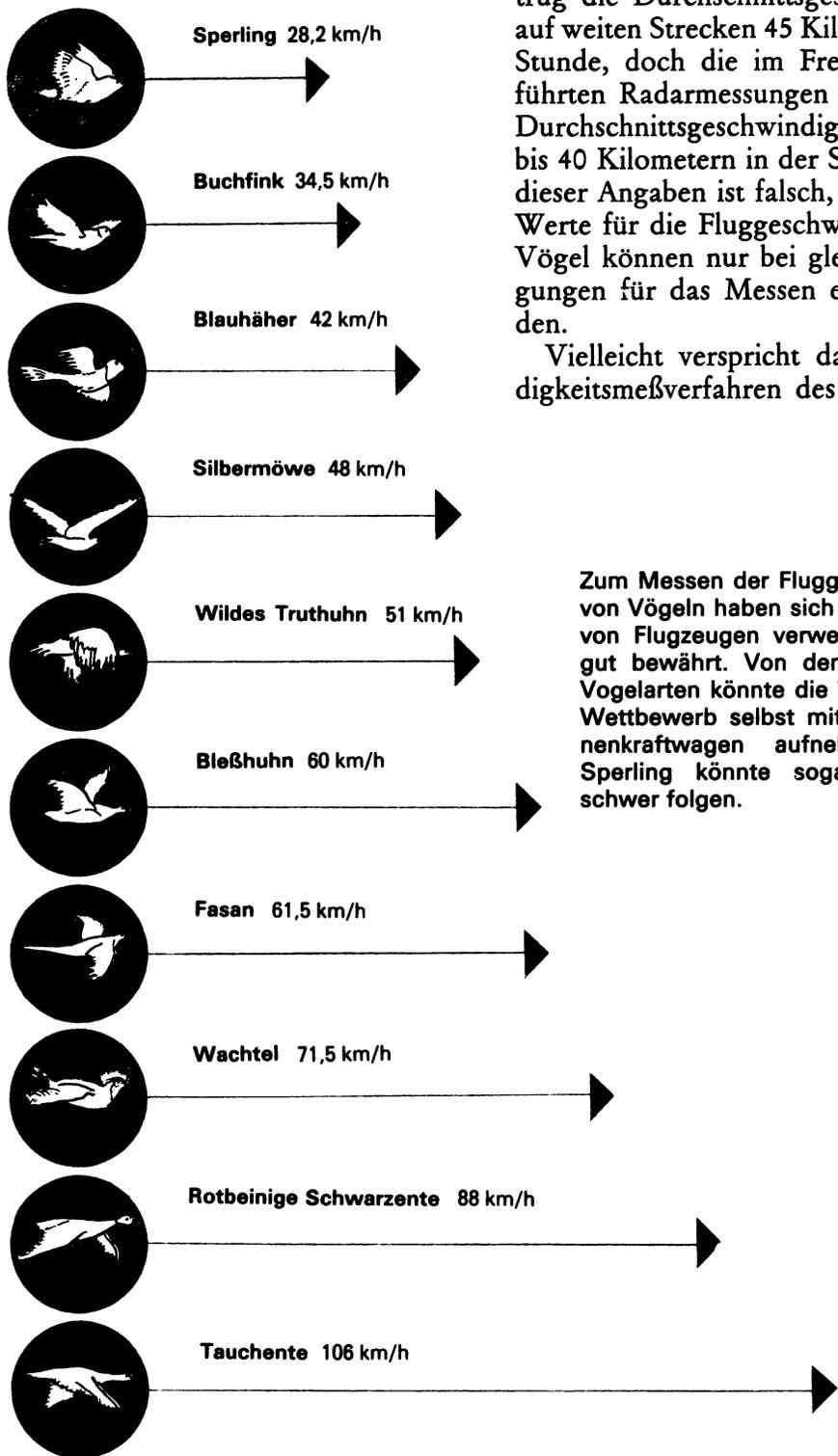
Der Pilot John Potter erhob sich mit einer 73 Kilogramm schweren Konstruktion in die Luft (oben). Potter betätigte im Grunde genommen lediglich ein einrädiges Fahrrad. Beim Aufstieg beschleunigt der Fahrradtrieb die Maschine, um dann in der Luft über eine entsprechende Transmission die Luftschaube mittels eines Fußpedals (unten) in Bewegung zu setzen.

Preis von 10 000 Pfund, der von der Königlichen Englischen Gesellschaft für Luftfahrt demjenigen zugesprochen wurde, der mit einer von Menschenkraft betriebenen Flugmaschinenkonstruktion 1 englische Meile weit (1605 Meter) fliegt und dabei in der Luft eine Acht beschreibt, lange keinen Gewinner. Doch viele unermüdliche Erfinder gaben die Hoffnung nicht auf. Im März des Jahres 1972 erhob sich die in England gebaute Jupiter-Flugmaschine bereits in eine Höhe von 8 Metern und legte eine Entfernung von 1171 Metern zurück. Im Januar 1977 überbot die durch Muskelkraft angetriebene Maschine des japanischen Erfinders Kato Takasi diesen Rekord: Sie flog 2093 Meter, doch dem Japaner gelang es nicht, die ersehnte Acht in der Luft nachzuzeichnen. Der Preis wurde erst im Sommer 1977 vergeben.

Im Nachahmen des Vogelflugs erwies sich ein anderer Weg gangbarer, obwohl die Erfinder auch hier nicht viel Ruhm ernteten. Die schwingende Flügelbewegung sollte mit einer motorgetriebenen Vorrichtung erreicht werden, wodurch man auf einen Propeller verzichten wollte. Derartig flügelschwingende Modelle wurden bereits in aller Welt angefertigt. Der sowjetische Jagdflieger D. W. Oljin experimentierte mit seinem Ornitopter (Vogelflugmaschine), der den Berechnungen nach mit seinem Motor von 3 Pferdestärken eine Stundengeschwindigkeit von 100 Kilometern erreichen sollte; doch die Praxis hat die Theorie nicht bestätigt. Sollte in naher Zukunft wieder einmal die Nachricht über irgendein flügelschwingendes Flugmodell auftauchen, genügt es, einen Blick auf die Flügel zu werfen, um zu entscheiden, ob es zum Fliegen tatsächlich fähig ist. Falls aus dem Flug-

zeugrumpf nur zwei elastische oder starre Flügel herausragen, gleich wie sie auch schwingen mögen, wird die Maschine sicherlich nicht fliegen können. Die Grundvoraussetzung für das Nachahmen des Vogelflugs ist nämlich, daß der Maschinenflügel im „Ellbogen“ beweglich sein muß, damit sich das innere und äußere Flügelglied voneinander unabhängig bewegen können. Im Jahr 1958 wurde zum Beispiel in Hannover ein erfolgreich aussehendes Modell gezeigt: Die Tragflügel des „Schwans“ waren ungefähr in der Mitte tatsächlich mit einem beweglichen Gelenk versehen. Ein 100-PS-Motor sorgte für die erforderliche Energie zur Bewegung der Flügel, doch seither ist es auch um diese Erfindung still geworden. Die Hoffnung lebt allerdings weiter, und genauere Kenntnisse über den Vogelflug werden sicherlich einmal zur erfolgreichen Konstruktion von Schwingflügelflugzeugen führen.

Vom Gesichtspunkt der Geschwindigkeit hingegen haben die von Menschen geschaffenen Konstruktionen bereits längst die Vogelwelt überflügelt. Allerdings ist es äußerst schwierig, die Fluggeschwindigkeit der Vögel zu messen, denn sie hängt von vielen Faktoren und Umständen ab, die während des Fluges auf den Vogel einwirken. Die Geschwindigkeit, mit der er flieht, ist eine andere als die, mit der er herumstreift. Professor Tucker untersuchte in einem Windkanal die Fluggeschwindigkeit eines Zwergpapageis und einer Lachmöwe. War die Geschwindigkeit der fliegenden Vögel in der entgegenströmenden Luft so langsam, daß sie keinen Zentimeter weiterkamen, entsprach ihre Fluggeschwindigkeit der Windgeschwindigkeit im Kanal. Auf der Grundlage dieser Messungen be-



trug die Durchschnittsgeschwindigkeit auf weiten Strecken 45 Kilometer in der Stunde, doch die im Freien durchgeführten Radarmessungen ergaben eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 37 bis 40 Kilometern in der Stunde. Keine dieser Angaben ist falsch, denn genaue Werte für die Fluggeschwindigkeit der Vögel können nur bei gleichen Bedingungen für das Messen ermittelt werden.

Vielleicht verspricht das Geschwindigkeitsmeßverfahren des Elektroinge-

Zum Messen der Fluggeschwindigkeit von Vögeln haben sich die zur Ortung von Flugzeugen verwendeten Geräte gut bewährt. Von den untersuchten Vogelarten könnte die Tauchente den Wettbewerb selbst mit einem Personenkraftwagen aufnehmen. Einem Sperling könnte sogar ein Läufer schwer folgen.

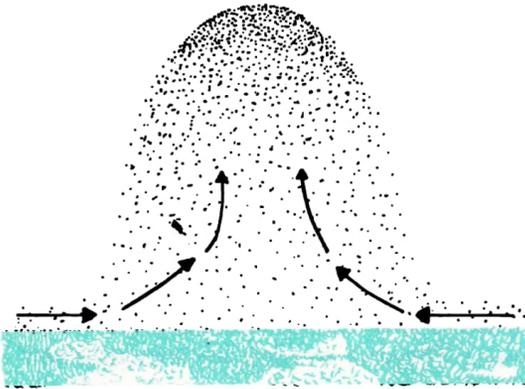
nieurs O. Dunning zuverlässigere Ergebnisse. Er konstruierte ein Radargerät, das mit einer Frequenz von 9600 Megahertz elektromagnetische Wellen ausstrahlt. Aus den reflektierten Wellen kann festgestellt werden, wie groß die Geschwindigkeit der Vögel ist. Das Grundprinzip dieses aufschlußreichen Meßverfahrens besteht darin, daß der Vogel um so schneller fliegt, je kleiner die Schwingungszahl der rückkehrenden Strahlen zur Empfängerantenne ist. Da die Tiere unmittelbar vor der Radarantenne freigelassen wurden, konnte die Geschwindigkeit der sich geradlinig entfernenden Vögel sehr günstig gemessen werden. Der Forscher führte die Messungen bei verschiedenen Vögeln durch. Unter den „Wettbewerbsteilnehmern“ ging die Moorente mit einer Geschwindigkeit von 106 Kilometern in der Stunde als Siegerin hervor, die Kohlmeise hätte mit 27,4 Kilometern in der Stunde als letzte das Ziel erreicht, wenn alle Vögel zur selben Zeit gestartet wären.

C. H. Greenewalt gelang es, natürliche Bedingungen zum Messen der Fluggeschwindigkeit von Kolibris zu schaffen. Er maß die Geschwindigkeit, als die Kolibris in Richtung ihrer Futterplätze flogen. So erhielt er die als amtlich zu bezeichnende Geschwindigkeit von 43 Kilometern in der Stunde, doch entsprechend seiner Vermutung können diese kleinen Vögel beim Fliegen im Freien eine Stundengeschwindigkeit bis zu 48 Kilometern erreichen. Rekordhalter in der Vogelwelt ist nach einer Tabelle von J. H. Storer zur Zeit ein von einem Flugzeug verfolgter Falke: Dem Tachometer am Armaturenbrett zufolge erreichte der Falke eine Geschwindigkeit von 280 bis 290 Kilometern.

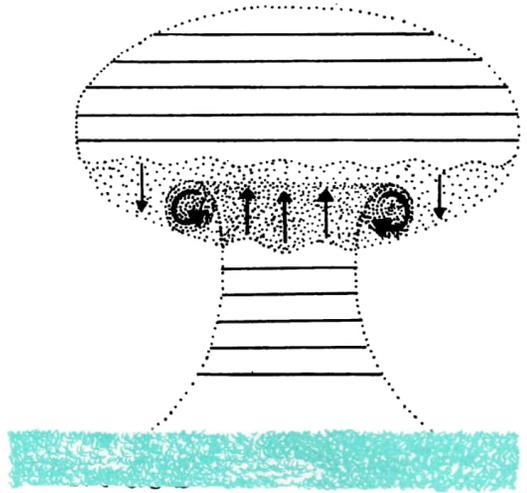
Achterbahn in der Luft

Schwebende Vögel haben beim Menschen schon immer Bewunderung erregt. Es erscheint fast unglaublich, ohne einen einzigen Flügelschlag stundenlang in der Luft zu kreisen. Diese besondere Fähigkeit ist in erster Linie atmosphärischen Strömungen zu verdanken, die auch vor der Zeit der Segelflugzeuge allgemein bekannt waren. Die Weiten- und Höhenrekorde des motorlosen Fliegens werden im wesentlichen als Ergebnis einer guten und geschickten Ausnutzung der aufsteigenden Luftströmungen erzielt. Wenn der Wind vom Meer weht, stößt die Luftströmung an die Küste, von wo aus sie ihren Weg fortsetzt. Doch auf dem Festland können die Luftmassen durch einen größeren Hügel oder Laubwald in eine andere Richtung gelenkt werden. Solch aufsteigende Strömungen ziehen Vögel mit ausgebreiteten Flügeln mit in die Höhe, selbst wenn sie sich dabei nicht bewegen.

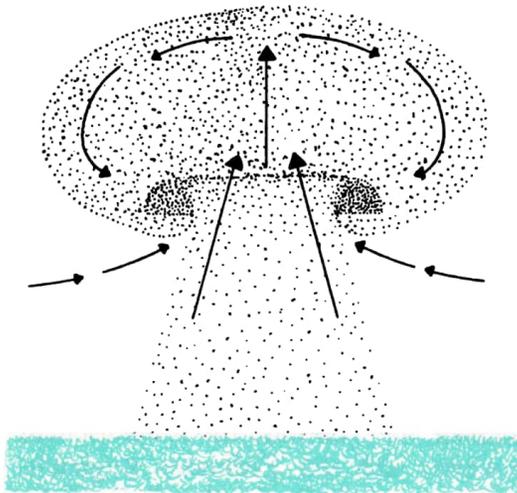
Am merkwürdigsten jedoch sind die von allein aufsteigenden warmen Luftmassen, die Thermik. Im Sonnenschein erwärmt sich der Erdboden ungleichmäßig, so daß die darüber befindliche Luft davon nicht unbeeinflusst bleibt. Je mehr sie angewärmt wird, um so mehr dehnt sie sich aus, und um so höher steigt sie. Zunächst entsteht lediglich ein riesiger „Luftschacht“, darum wurde von Forschern lange Zeit angenommen, daß durch die Einwirkung der darin nach oben ziehenden Luft, des „Zuges“, die an einer Stelle schwebenden Vögel nach oben gezogen würden. Der amerikanische Forscher C. Cone und sein Arbeitsteam ermittelten außerdem, daß die von der Sonne erwärmten Luftmassen, wenn sie vom Erdboden aufsteigen,



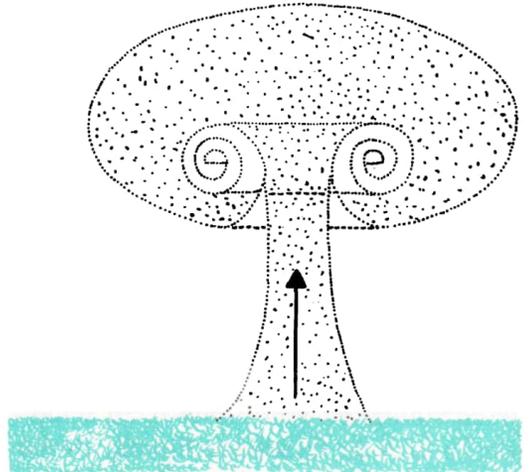
1



3

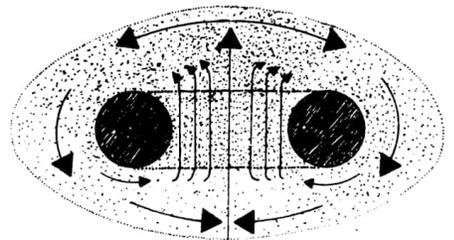


2



4

Der Entstehungsvorgang eines unsichtbaren Thermikrings. Die Luft steigt von den wärmeren Teilen der Erdoberfläche nach oben (1) und bildet eine riesengroße Blase (2). Die laufende Abkühlung ruft eine Strudelbewegung in der Blase hervor (3), währenddessen weiter Warmluftnachschub herangeführt wird. Die Blase „rollt“ sich schließlich ein (4), wobei sich innen ein Ring bildet. Hier strömt die Luft von innen nach außen (5). Wenn der Vogel innerhalb des Thermikrings mit der gleichen Geschwindigkeit sinkt, wie die Luft in die Höhe steigt, sieht es von weitem so aus, als kreise das lebende Flugzeug an einer Stelle, ohne einen einzigen Flügelschlag zu tun.

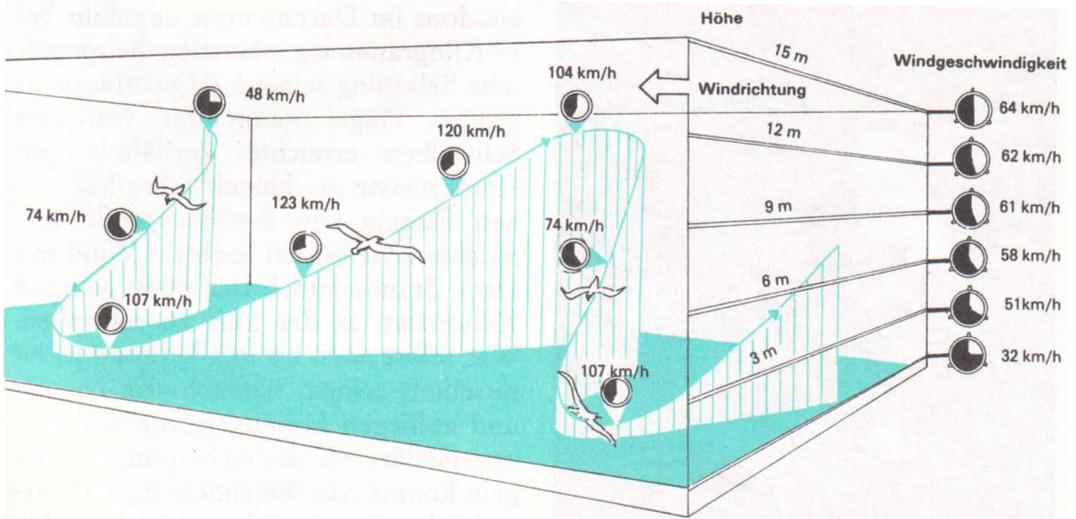


5

die Form eines riesigen Autoreifens annehmen. Der waagrecht schwebende warme Ring ist von kalten Lufthüllen umgeben, und diese umkreisen ständig den Ring: Die Luft steigt an der inneren Seite des Ringes hoch, an der äußeren Seite jedoch nach unten. Der ganze Luftring erhebt sich so, durch unsichtbare Kräfte zusammengehalten, als steige er aus der paffenden Pfeife eines liegenden Riesen hoch.

In diesem Luftring kreisen die Vögel. Obwohl sie infolge des Gleitflugs auf einer schraubenförmigen Bahn immer tiefer sinken, hat es trotzdem, vom Boden aus gesehen, den Anschein, als erhebe sich der Vogel ohne einen einzigen Flügelschlag in die Höhe. Hinter dieser Erscheinung verbirgt sich kein Geheimnis: Der Luftring steigt schneller nach oben, als der Vogel nach unten gleitet.

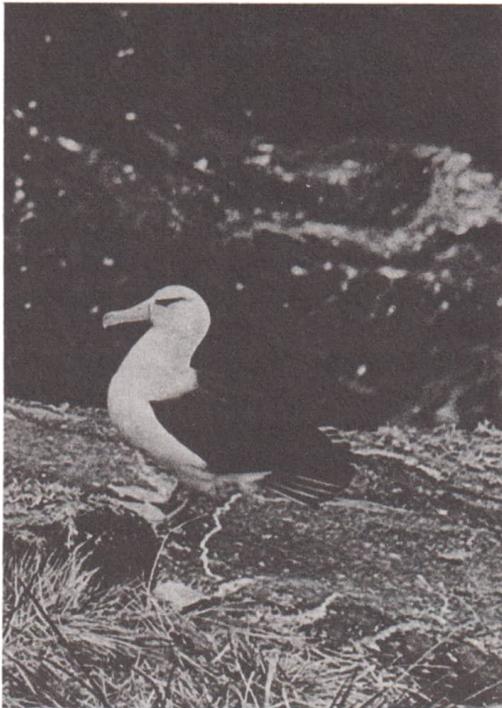
Die großartig segelnden Vögel der Meere, die Albatrosse, können, ohne zu landen, tagelang über dem Ozean schweben. Diese bewundernswürdige Fähigkeit wurde von W. Jameson eingehend untersucht, wobei er aufschlußreiche Gesetzmäßigkeiten feststellte. Da sich die Meereswinde fast immer in der Nähe der Wasseroberfläche infolge des Reibungswiderstands der Wellen verlangsamen, werden diese „Geschwindigkeitsstufen“ von den Albatrossen genutzt, um ohne eine einzige überflüssige Bewegung in der Luft zu segeln. Der Albatros beginnt im allgemeinen seinen Abwärtsflug, in dem er den Rückenwind ausnutzt und jählings steil absinkt. Die dabei in der Nähe des Wassers entstehende Gleitgeschwindigkeit ist außerordentlich hoch. Diese Bewegungsenergie nutzt der Vogel aus, um, auf die Seite gedreht, im Wind einen weniger



Der Albatros nutzt den Windgang am Meer geschickt aus. Nachdem er von der Wasseroberfläche aufgefliegen ist, läßt er sich auf einer „Achterbahn“ treiben, da die immer schnelleren Windströmungen seine Bewegungsenergie steigern. Durch diese Methode kann er stundenlang über dem Wasser kreisen, ohne daß er dabei Energie für seinen Segelflug vergeuden muß.

steilen „Aufflug“ zu unternehmen. Je höher er kommt, auf um so schnellere Luftschichten stößt er, die ihn „aufgreifen“ und hochtragen; durch diese Methode gelangt er nicht nur höher, sondern er erreicht auch eine höhere Geschwindigkeit. Danach kann er das Spiel auf der unsichtbaren Achterbahn, zu der die ständige Luftströmung des Meeres die Triebkraft liefert, von neuem beginnen. Mit einem ebenso vorzüglichen Sinn nutzt auch der Fregattvogel den Geschwindigkeitsunterschied der Luftschichten.

Nach neuesten Untersuchungen existierte bereits im Mittelalter der Erdgeschichte, etwa vor 100 Millionen Jahren, ein perfektes lebendes Segelflug-



Niemand würde bei diesem Vogel vermuten, daß die Weite zwischen den beiden ausgebreiteten Flügelspitzen beinahe 4 Meter erreicht.

zeug, der Pteranodon, mit einer Flügelspannweite von 8 Metern. Die hervorragenden Gleitflugfähigkeiten des Pteranodons gelten auch heute noch als außergewöhnlich. Das zur Gattung der fliegenden Urreptilien gehörende langschnabelige Tier hatte hautdünne elastische Flügel, die Beschaffenheit des Flugmechanismus war dadurch unglaublich leicht. Cherrie D. Bramwell, Mitarbeiterin der englischen Universität von Reading, entdeckte an Hand einiger paläontologischer Funde auffallende Ähnlichkeiten zwischen den „leblosen“ Segelflugzeugen unserer Zeit und den „lebenden“ der Urzeit. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden auf der Grundlage eines Programms zahlreiche Daten aus diesen Funden in einer EDV-Anlage gespeichert. Hieraus abgeleitete vergleichende Untersuchungen führten zu einer Rekonstruktion der wahrscheinlichen Flugfähigkeit des Pteranodons. Da die Körpermasse des Pteranodons im Durchschnitt ungefähr bei 18 Kilogramm lag, überstieg die spezifische Belastung seiner 5,6 Quadratmeter großen Flügel kaum das von den Schwalben erreichte Verhältnis von Körpermasse zu Flügelfläche. Mit seinen Flügeln von Bettlakengröße vermochte er selbst bei leichtem Wind mit einer Stundengeschwindigkeit von 24 Kilometern in der Luft zu schweben. Was selbst noch bis in allerjüngste Zeit rätselhaft schien, nämlich wie er auf- und abfliegen konnte, wurde vor kurzem geklärt. Mit seinen besonderen Flügeln konnte das Weichtiere jagende urweltliche Reptil sich sogar von den Meereswellen erheben.

Gelangte der Pteranodon in eine aufsteigende Luftströmung, bog er die Flügel waagrecht ein, so daß die elastische Hautoberfläche auf 4,3 Quadratmeter

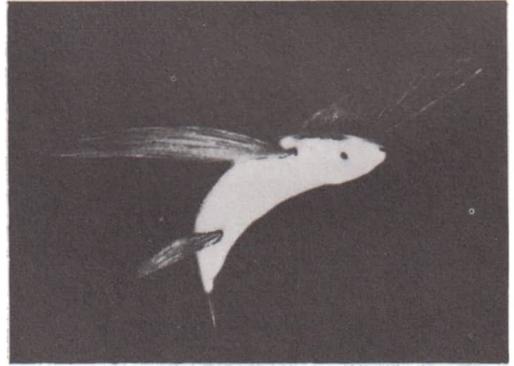
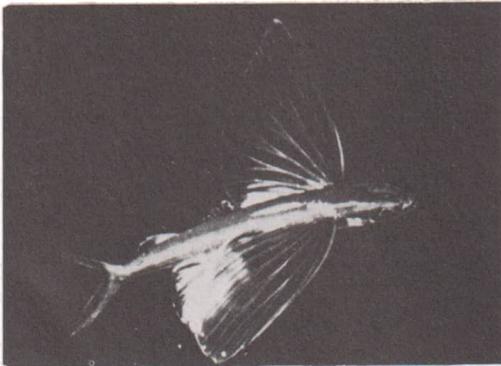
zusammenschrumpfte, wodurch die Oberflächenbelastung und dadurch auch die Gleitgeschwindigkeit zunahm. In dieser Weise kreiste der Pter-

anodon, ähnlich wie die heutigen Meeresvögel, stundenlang ohne einen einzigen Flügelschlag.

Der Pteranodon hatte seinen ganzen



Dieser Flugsaurier war sicherlich ein schreckenerregender Anblick. Der Pteranodon mit einer Flügelspannweite von 8 Metern war vor 100 Millionen Jahren der hervorragendste Vertreter des Segelflugs. Sein organischer Aufbau dürfte nicht ganz vollkommen gewesen sein, denn im Laufe des Kampfes ums Dasein konnte er sich nicht behaupten.



Lange wurde geglaubt, daß der Flugfisch sich, mit der Brustflosse schlagend, in die Luft erhebt. Laboratoriumsversuche haben jedoch ergeben, daß er mit den Schwanzschlägen lediglich seine Geschwindigkeit beschleunigt, während er aus dem Wasser steigt. Nach dem Erreichen der Anfangsgeschwindigkeit gleitet er auf der großflächigen Brustflosse in der Art eines kleinen Segelflugzeugs in die Luft. Dabei schwingt der Flugfisch kräftig mit den „Flügeln“, worauf sicherlich sein Name zurückzuführen ist.

Organismus auf das Fliegen umgestellt: Er war nicht wechselwarmblütig wie die Reptilien, sondern Warmblüter und neuesten Funden zufolge mit Haaren bedeckt. Doch er blieb in Fachkreisen nicht allzu lange urweltlicher Rekordhalter im Fliegen, denn im Jahr 1975 stieß der amerikanische Forscher D. Lawson in Texas auf das Skelett eines anderen Flugtiers. Dieses als Quetzalcoatlus bezeichnete Tier war wahrscheinlich Aasfresser, denn in sei-

nem ungefähr 1 Meter langen Kiefer befanden sich Zähne. Die Spannweite der Flügel erreichte annähernd 21 Meter.

Selbst heute ist es noch rätselhaft, weshalb diese Urreptilien vor etwa 65 Millionen Jahren ausgestorben sind. Im Laufe der Stammesentwicklung gelang es den Vögeln, sich gleichfalls in die Luft zu erheben, wodurch sie den Bereich der Luft für immer für sich erobert haben.

Es fliegt . . . , es fliegt . . . der Fisch

Die Suche nach der Möglichkeit des Fliegens begleitet die Entwicklung der Tierwelt auf Schritt und Tritt. Einzelne Arten nicht besonders erfolgreicher „Experimentierexemplare“ gleiten mit Fallschirmen über kurze Entfernungen. Eine besondere Sehenswürdigkeit ist der auf Kalimantan und Java lebende Flugfrosch, der mit Hilfe seiner ausgespannten Schwimmhäute 30 bis 35 Meter weit fliegt, oder der kleine „fliegende Drachen“, die Flugechse, die 18 Meter lange Luftbrücken fliegend überquert. Unter den Säugetieren erreicht der Flattermaki bereits eine Entfernung von 60 bis 70 Metern; doch der Rekord wird vom Flughörnchen gehalten, das mit seinem Gleitflug angeblich eine Entfernung von 80 Metern überwinden kann.

Von den „Experimentierfliegern“ zählen die 15 bis 25 Zentimeter langen Flugfische zu den sonderbarsten. Aus dem Wasser herausschießend, sind sie in der Lage, 200 bis 400 Meter weit zu fliegen, wobei sie oft auf das Deck im Mittelmeer fahrender Schiffe fallen. Von diesen merkwürdigen Tieren, bei denen sich die Brustflossen zu geeigneten Flügeln für den Gleitflug entwickelt haben, nahmen Forscher früher an, daß sie aus dem Wasser wie eine aus einem Unterseeboot senkrecht herausgeschossene Rakete aufsteigen. Untersuchungen des sowjetischen Wissenschaftlers W. W. Schulejkin bestätigen jedoch, daß der Flugfisch dazu nicht in der Lage ist.

Erreicht der Flugfisch eine Geschwindigkeit von ungefähr 30 Kilometern in der Stunde, stützt er sich mit der typisch herausragenden Kante seines Körpers — der „Gleitstufe“ — auf die

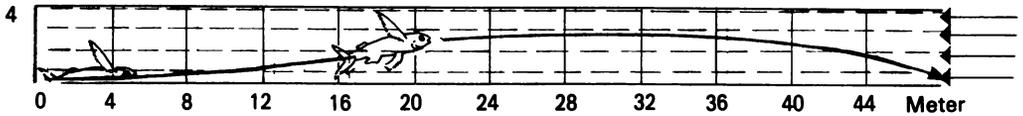
Wasseroberfläche. Dabei bewegt er sich bereits so schnell, daß nur noch die untere Hälfte der Schwanzflosse wie eine Schiffsschraube arbeitet, worauf er sich im nächsten Augenblick aus dem Wasser in die Höhe drückt, nachdem er eine Geschwindigkeit von 18 Metern in der Sekunde erreicht hat. Ein unwahrscheinliches Tempo! Mit einer Stunden- geschwindigkeit von 65 Kilometern erhebt er sich unter einem Winkel von etwa 10 Grad aus dem Wasser und erreicht dabei eine Höhe von 0,5 bis 5 Metern.

Eine weitere erstaunliche Feststellung. Im atemberaubenden Kampf, in der Regel vor einer Goldmakrele flüchtend, gleitet der Flugfisch wieder auf die Wasseroberfläche zurück und steckt dabei nur die Schwanzflosse ins Wasser. Durch ungewöhnlich schnelles Schwingen des Schwanzes beschleunigt er sich von neuem, dabei entsteht so viel Auftriebskraft an den Flugflossen, daß er sich wieder in die Luft erhebt. Während der Flucht wendet er diesen Trick dreibis viermal an und fliegt ähnlich wie ein auf die Oberfläche eines Teiches geworfener flacher Kieselstein mehrmals über die glitzernde Wasseroberfläche.

Welche Weite der Flugfisch erreicht, hängt von vielerlei ab. Je bewegter die Wasseroberfläche, um so schwieriger ist für ihn das Erreichen der Anfangsgeschwindigkeit, da sein Körper in der „Aufstiegsbahn“ oft im Wasser versinkt. Steigende Wellen und erhöhter Strömungswiderstand mindern das Flugvermögen und die Geschwindigkeit. Die Windgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche übt gleichfalls einen wesentlichen Einfluß aus. Professor H. Hertel hat in diesem Zusammenhang interessante Berechnungen durchgeführt. Dabei ergab sich natürlicherweise, daß der Flugfisch bei schwachem Gegenwind

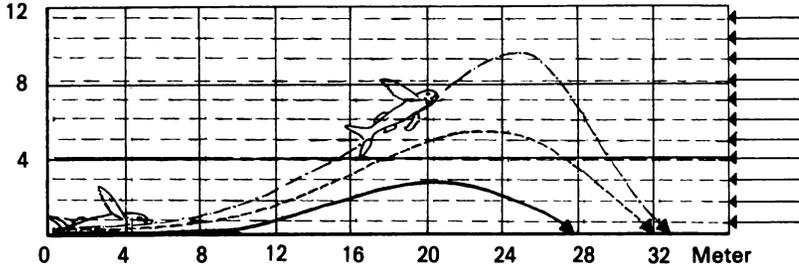
Bei schwachem Wind

Meter



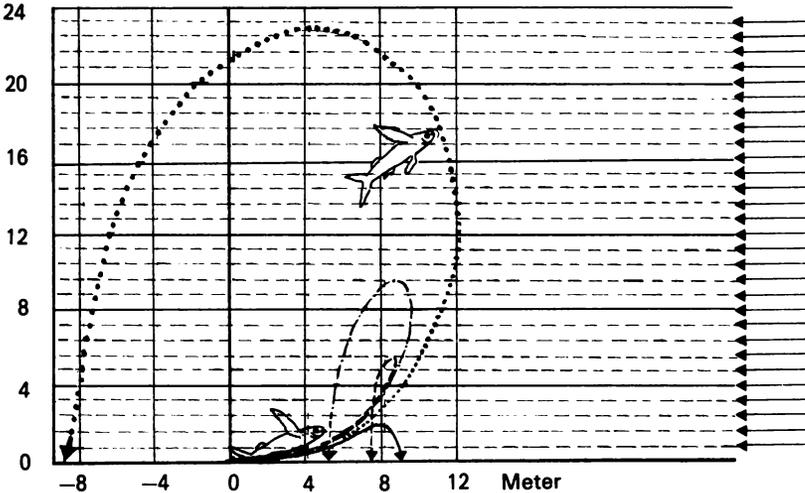
Bei stärkerem Wind

Meter



Bei starkem Wind

Meter



Flugfische, die vor ihren Verfolgern, zeitweise in der Luft fliegend, fliehen, sind sonderbare Akrobaten der Wasserwelt. Die Gleitbahn des Fisches hängt von der Anfangsgeschwindigkeit des Fluges und der Stärke des Gegenwinds ab. Die auf der Grundlage physikalischer Koeffizienten errechneten Flugbahnen verändern sich in Wirklichkeit etwas, weil sich die Auftriebskraft an den Flügeln beziehungsweise Flossen des Fisches gleichfalls verändert. Die Pfeile an der rechten Seite kennzeichnen die Windrichtung.

die weitesten Entfernungen erreicht. Bei starkem Wind kann es durchaus vorkommen, daß der Fisch rückwärts fliegt, weil er wie ein leichtes Blatt fortgetrieben wird. Doch wahrscheinlicher

ist, daß er gar nicht erst versuchen würde zu fliegen, da er kaum über seinen Startpunkt hinaus käme und er außerdem seine Energie unnötigerweise verschwenden würde.

In der Welt der Technik sind erst vor einigen Jahren Nachahmungen von Flugfischen – Fahrzeuge, die sich aus dem Wasser erheben – aufgetaucht. Das wohl erfolgreichste Versuchsexemplar dieser Art ist mit dem Namen des Elektroingenieurs Donald Rein verbunden.

Die 7 Meter lange, mit deltaförmigen Tragflächen ausgestattete Konstruktion mit einem 65-PS-Motor erinnert an eine Flugmaschine. Das Fahrzeug kann sich nicht nur auf dem Wasser bewegen,

sondern es verfügt durch seinen Antriebsmotor über genügend Schubkraft zum Fliegen. Die Maschine hebt sich genauso aus dem Wasser wie der Flugfisch. Bei einer bestimmten Geschwindigkeit an der Oberfläche gleitet ein mit Fußsteuerung zu betreibendes Gestell aus dem Boden heraus. Auf dieser „Gleitstufe“ tritt eine derartige Beschleunigung ein, daß die an den Flügeln entstehende Auftriebskraft das Fahrzeug tatsächlich von der Wasseroberfläche hochreißt.



Das neueste Amphibienfahrzeug verfügt noch nicht über die Fähigkeiten der Flugfische. Normalerweise schwimmt es auf der Wasseroberfläche, doch bei Beschleunigung der Luftschrauben kann es sich in die Luft erheben. Das aus Kunststoff hergestellte „Flugboot“ fliegt unmittelbar über der Wasseroberfläche und kann eine Stundengeschwindigkeit von 100 Kilometern erreichen.



In der Stammesentwicklung führt ein langer Weg von den lichtempfindlichen Zellen bis zu den komplizierten Augen. Doch es stand ja genügend Zeit zur Verfügung. So besitzt beispielsweise die durch ihre Nachtjagd bekannte Eule vorzügliche Augen.

Auge in Auge mit dem Licht

Johannes Kepler, der berühmte deutsche Astronom, saß müde in seinem Zelt. Während draußen die Sonne brennend heiß strahlte, tanzte im schwülen Halbdunkel des Zeltes ein handbreiter heller Fleck an der Wand: Vorn, durch einen kleinen Spalt, fiel etwas Licht ein. Nach den langen Nächten in der Sternwarte tat diese kleine Ruhepause hier im Freien, wo er jetzt Hand in Hand mit den Landvermessern arbeitete, gut; die Methoden der Landvermessung standen nämlich in enger Beziehung zu den astronomischen Messungen. Kepler betrachtete, in Gedanken versunken, den Lichtfleck, plötzlich jedoch fiel ihm etwas Merkwürdiges auf. An der Innenseite des Zeltes bewegten sich zwei kleine Gestalten mit dem Kopf nach unten. Das sonderbare Spiel des Lichts überraschte den Astronomen, doch die Erklärung ließ nicht lange auf sich warten. Da sich Lichtstrahlen stets in einer geraden Linie ausbreiten, wurden sie durch die kleine Öffnung der Zeltplane ausschließlich in einem Punkt „zusammengefaßt“, die von unten eintreffenden nach oben und die von oben ankommenden nach unten, so daß dadurch ein auf dem Kopf stehendes, seitenverkehrtes Bild auf der gegenüberliegenden Wand erschien.

Vielleicht hat Kepler damals das Prinzip der Camera obscura erkannt, doch es ist auch möglich, daß er im Buch von Alhazen etwas darüber gelesen hatte. Der große arabische Wissen-

schaftler erwähnte nämlich bereits um das 10. Jahrhundert in seinem zusammenfassenden Werk „Die Gesetze der Optik“ den Mechanismus des Dunkelraums. Soviel ist jedoch sicher, daß Kepler auf Grund der scharfen Konturen der Camera obscura in seinem Zelt zwar auf dem Kopf stehende und seitenverkehrte, aber erstaunlich genaue Bilder von der Außenwelt wahrnahm.

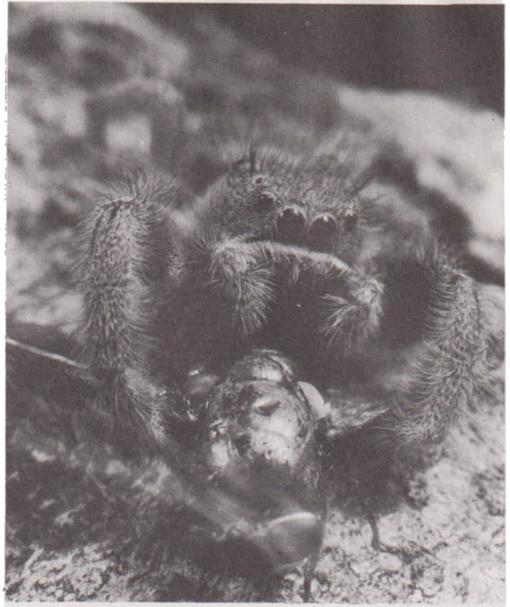
Licht und Leben sind im Entwicklungsverlauf der Tierwelt eng miteinander verbunden. Es wäre deshalb verwunderlich, wenn die Camera obscura bei den lebenden Lichtmessern und fotografischen Geräten nicht zu finden wäre. Sie wurde allerdings nicht besonders populär. Allein der Schneckenpolyp (Nautilus) hält heute noch daran fest. Die anderen Tiere hingegen waren bemüht, eine möglichst geschlossene Hülle um ihren Körper gegen die Umwelt zu bilden. Die Weichtiere haben ihre kleine Dunkelkammer mit durchsichtigen Kristallkörnern verschlossen, und das schuf die Möglichkeit einer Weiterentwicklung des Auges.

Diese festen, linsenförmigen Organe – die Punktaugen – bilden gewissermaßen den Übergang zwischen einem Lichtmesser und einer Fotokamera. Der Lichtmesser zeigt lediglich an, wie stark ein Gegenstand die Sonnenstrahlen reflektiert; die Fotokamera hingegen zeichnet bereits Bilder auf der Grundlage der Lichtabstufungen. Je mehr lichtempfindliche Nervenzellen

sich hinter der durchsichtigen Linse des tierischen Punktauges befinden, in um so mehr Details kann das Bild der Umgebung zerlegt werden. Im Laufe der Stammesgeschichte wurde auf diese Weise der verschwommene Bildfleck der Umwelt ständig reicher an Details und in der Welt der Technik der Lichtmesser nach und nach zur Fotokamera, genauer ausgedrückt, zur Fernsehkamera.

Wenn jemand einige tausend Lichtmesser nebeneinanderlegen und der Reihe nach den Stand des Instrumentenzeigers ablesen, dabei die entsprechend getönten grauen Punkte dieser Werte nebeneinander aufzeichnen würde, könnte er aus diesen Elementen ein unscharfes, grobes Bild zusammensetzen. In der Natur gibt es für die Verwirklichung dieser Idee genügend Beispiele: Ein Uferbewohner des Stillen Ozeans von Amerika, die „blauäugige“ Muschel, erweckt zunächst den Anschein, als würde er zu einem Fest eilen; denn an dem aus der Muschelschale herausquellenden Körper funkelt eine Perlenreihe von Punktaugen. Die Kamm-muschel beobachtet bereits mit einigen hundert Punktaugen die Umgebung unter Wasser. Bei einigen gepanzerten, walzenförmigen Meeresweichtieren kann der geduldige Biologe sogar 12 000 Punktaugen zählen. Doch diese winzigen Augen sind nicht ungeordnet, sondern in einer bestimmten Reihenfolge aneinandergereiht, wobei von jedem Auge eine Sehnervzelle durch den Panzer in den weichen Körper der Muschel führt.

Die Anzahl der kleinen Kameras weiter zu vermehren hätte keinen großen Sinn gehabt. Die als Copilia bekannte Meereskrebsart entschied sich deshalb für eine neue Konstruktion. Sie benutzt

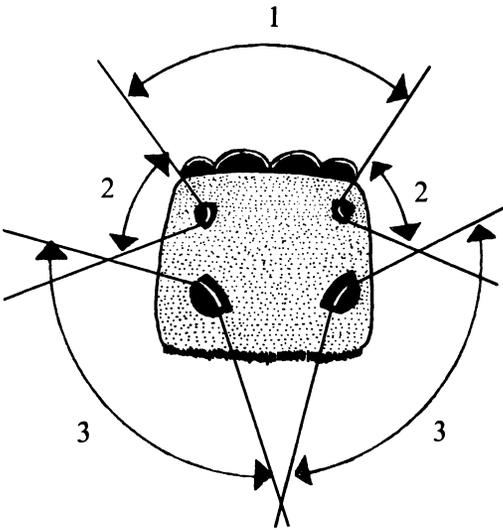


Das Schicksal der Fliege ist besiegelt! Die behaarte Springspinne fällt blitzschnell über sie her. Zur genauen Orientierung stehen ihr acht Augen zur Verfügung, und mindestens mit vier Augen fixiert sie ihre Beute.

insgesamt nur zwei Punktaugen, die ähnlich wie die Scheinwerfer beim Auto an beiden Seiten ihres Panzers untergebracht sind, das mit den Linsen ermittelte einzelne Bild hingegen wird durch von Muskeln betätigte Sehnervzellen „abgetastet“. In der Tat, ein primitiver Vorfahre der Fernsehkamera! Die Nervenzelle tastet das gesamte Bild in gleicher Weise ab, wie bei der Fernsehkamera der Elektronenstrahl von Punkt zu Punkt läuft, nur daß die Copilia ein wesentlich schlechteres Bild sieht: Ihre Augenlinse ist unvollkommen, und die Abtastgeschwindigkeit ist gleichfalls gering.

Von den Punktaugen der Gliederfüßer gibt vor allem das Auge der Spinnen Ursache zu vielen Rätseln. Unter mehr als zwanzig Familien gibt es nur vier

sechssäugige, während bei den restlichen Familien stets acht Augen vorzufinden sind. Diese kleinen Periskope sind am Körper des Tieres derart unterschiedlich verteilt, daß die Biologen am leichtesten durch „Kartographieaufnahmen“ Ordnung in den zahlreichen Klassen der Spinnen schaffen konnten. Von ihren Augen sind im allgemeinen vier nach oben, zwei zur Seite, zwei hingegen nach vorn oder, besser gesagt, nach unten ausgerichtet. Wie sieht die Spinne wohl die Welt? Sich dies vorzustellen ist schwierig. Vielleicht vereinigen sich die Details im winzigen Nervenknoten (Ganglion) zu einem einzigen „Rundbild“? Doch darüber ist uns wenig be-

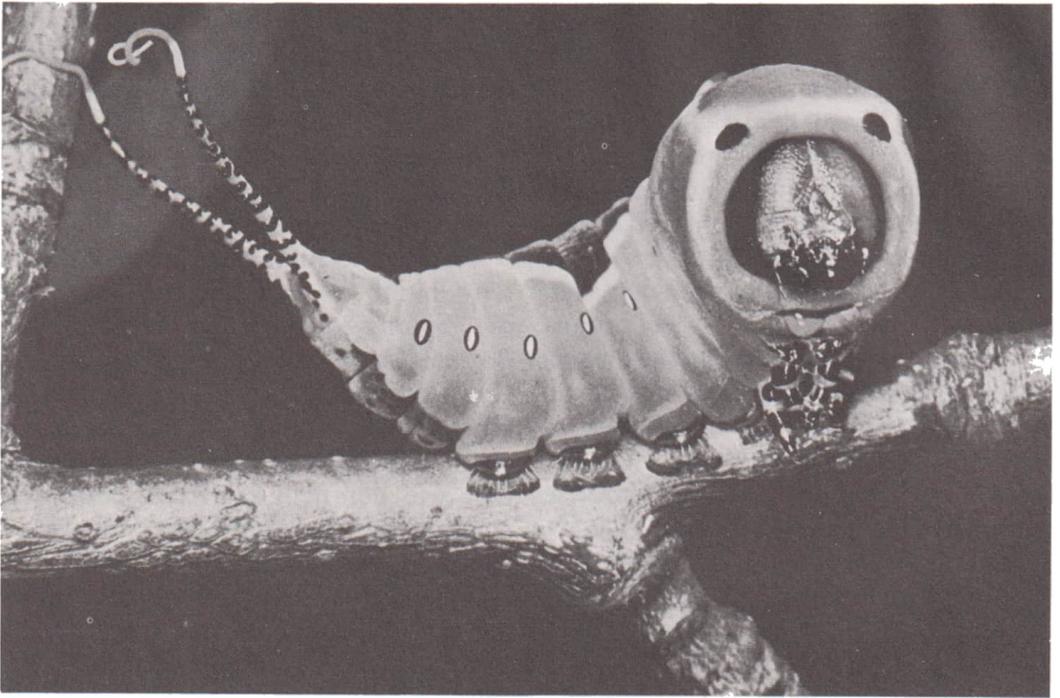


Die Springspinne späht mit acht Augen auf ihre Beute. Mit ihren Parietalaugen beobachtet sie wahrscheinlich die entfernteren Gegenstände (1). Mit ihren beiden Stirnaugen sieht sie nach vorn und seitlich und verfügt dadurch über ein dreidimensionales Sehvermögen (2). Ihre Nebenaugen erfassen einen großen Blickwinkel und können so auf einmal ein weites Feld überblicken.

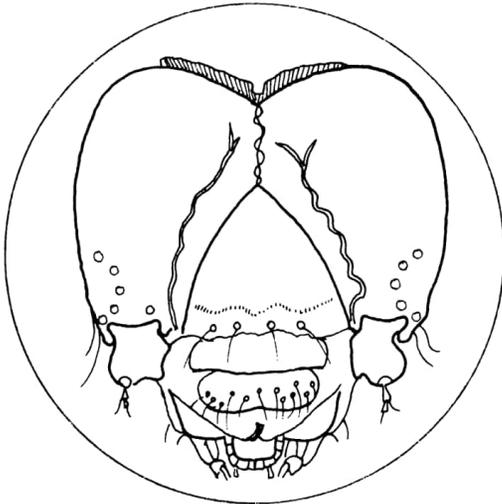
kannt. Gutes Sehvermögen ist wahrscheinlich nur für die ohne Netz jagenden Spinnen wichtig, denn jene Arten, die im Netz auf gutes Jagdglück warten, trauen mehr ihrem empfindlichen Tastsinn, indem sie auf die feinen Regungen des Netzes achten.

Da sich die Augenlinsen aus der harten Chitinhülle entwickelt haben, wirft die Spinne die oberste Schicht der Augen (Cornea) bei jeder Häutung ab. Ihre acht Linsen gebraucht sie wahrscheinlich in der Weise, daß sie dann und wann mit einer von ihnen Ausschau hält wie der neugierige Reisende aus einem der runden Fenster des Flugzeugs. Da sie ihre Augenlinse nicht verschieben kann, erhält sie von nahe liegenden Objekten dadurch ein scharfes Bild, indem sie ihre lichtempfindliche Netzhaut etwas hinter die Linse schiebt. Im Gegensatz hierzu verfügen die verschiedenen Springspinnenarten über ein ausgezeichnetes Sehvermögen. Kriecht die Spinne behutsam über einen Tisch, kann man gut beobachten, daß einzelne Augen dunkelfarbig, andere hingegen weiß sind. Einer aufschlußreichen Theorie entsprechend, benutzt sie die dunklen (also lichtabsorbierenden) Augen am Tag, die hellen (also lichtvervielfältigenden) Augen hingegen in der Dämmerung. Wenn sie sich an ihre Opfer heranschleicht, leuchten die Farben in ihren Augen hell auf. Dem englischen Forscher L. H. Matthews zufolge stellt sie dabei das Bild ihres ahnungslosen Opfers scharf auf ihrer Netzhaut ein. Im allgemeinen bemerkt sie ihre Beute bereits bei einem Abstand von 20 bis 25 Zentimetern, bei 8 bis 10 Zentimetern ergreift die Spinne ihre Beute mit einem Sprung.

Im Gegensatz zu den Schmetterlingen, deren Facettenaugen eher einem



Es sieht so aus, als begebe sich die Raupe des Großen Gabelschwanzes auf einen Fa- schingsball. Auf der farbigen „Gesichtslarve“ vermuten wir in den zwei schwarzen Punkten die Augen, obwohl sich, wie es unsere Zeichnung zeigt, je fünf Punktaugen seitlich in den schwarzen Streifen befinden.



Die Gruppierung der Punktaugen an den bei- den Kopfseiten der Raupe sieht wie Putzwerk aus, obwohl die doppellinsigen Augen die Wahrnehmung eines recht guten Bildes er- möglichen.

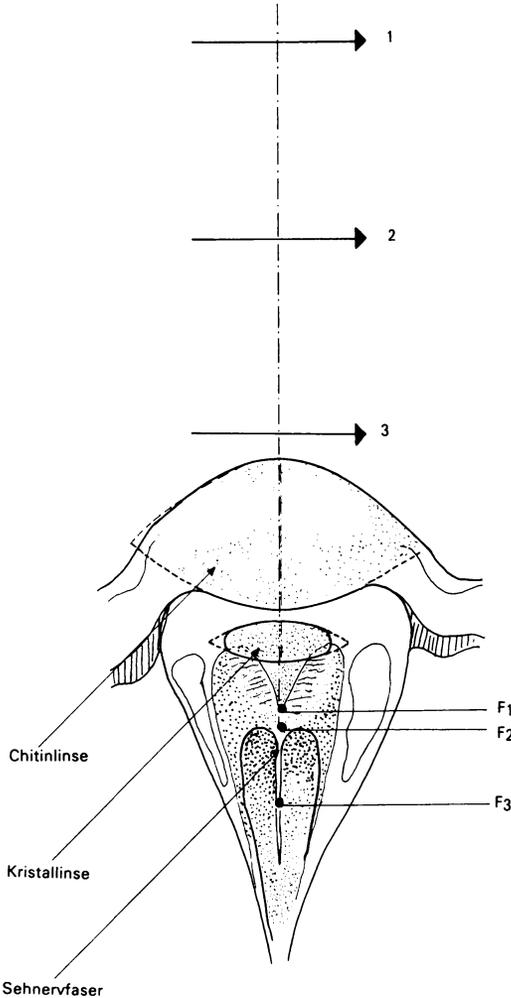
wertvollen Fotoapparat entsprechen, besitzt die Schmetterlingsraupe nur einige Punktaugen (Stemmata), deren Leistungsfähigkeit mit einer einfachen Boxkamera vergleichbar ist. Die Raupe ist halbblind, und sie kann vor allem deshalb nicht scharf sehen, weil sich nur wenige lichtempfindliche Zellen hinter ihrer Augenlinse befinden, obwohl die Linsen selbst eine außerordentlich gute optische Eigenschaft besitzen, wie von dem amerikanischen Forscher V. G. Dethier festgestellt wurde. Die Brechkraft der sechs Punktaugen der Raupe des Schmetterlings *Isia isabella* beträgt, entsprechend den Messungen, im Durchschnitt 14 Dioptrien. Obgleich diese Augenlinsen nicht beweglich sind, ist es der Raupe doch möglich, die Un-

schärfe im wesentlichen auszuschalten: Die lichtempfindliche Nervenzellenhaut ist trichterförmig gestaltet, so daß die Raupe innerhalb einer bestimmten Entfernung verhältnismäßig alles scharf sehen kann.

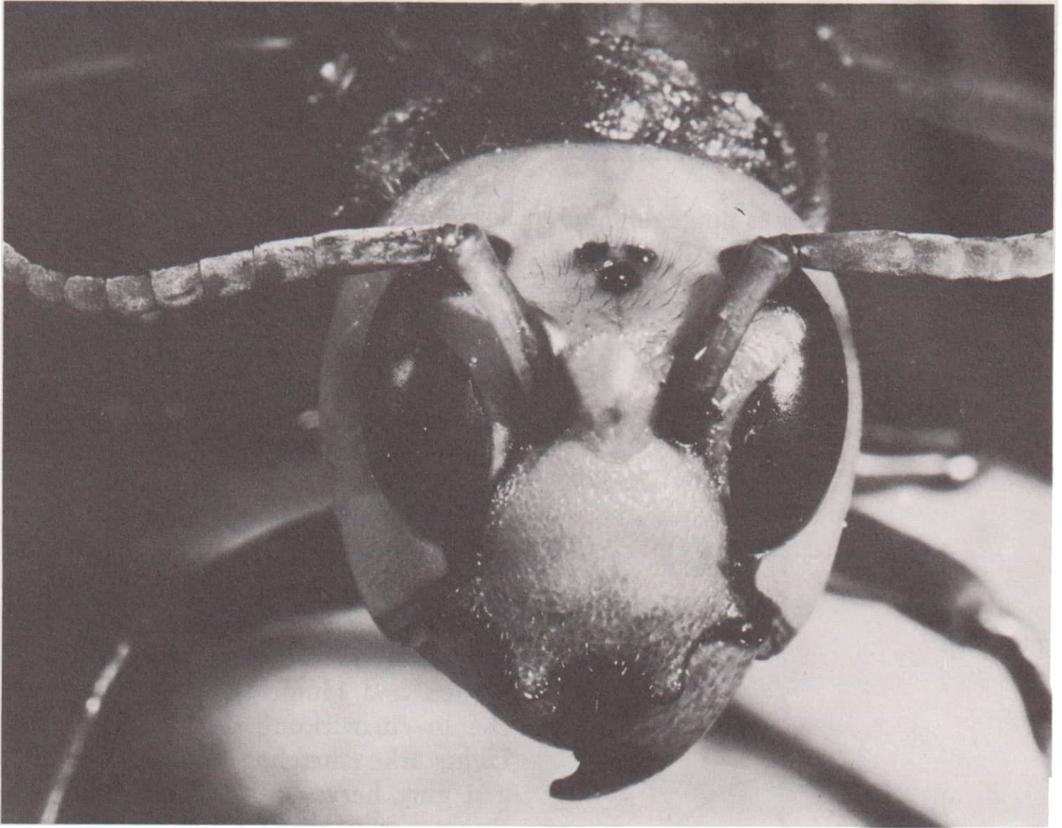
Für die Forscher ist es hingegen auch heute noch rätselhaft, weshalb fertig entwickelte Insekten (Imagines) an der

Stirn über drei Punktaugen verfügen. Hinter der festen Chitinlinse befinden sich zwei übereinandergelagerte Sehzellschichten, wodurch von fern gelegenen Objekten auf der zur Linse näheren Schicht, hingegen von näheren Objekten auf der von der Linse entfernter gelegenen Schicht ein scharfes Bild entsteht. Es kann angenommen werden, daß zum Beispiel Libellen scharf sehen können, doch viele der anderen Insektenarten benutzen ihre Punktaugen wahrscheinlich nur zur Bestimmung der Lichtstärke, wie auch ein versierter Fotograf außer dem Fotoapparat über einen Belichtungsmesser verfügt.

Zur Bestätigung dieser Annahme wurden von einigen unermüdlichen Forschern jene winzigen elektrischen Spannungen aus den Sehnervzellen von Bienen und Hummeln abgeleitet, welche in Auswirkung des Wechsels der Lichtstärke entstehen. Aus den Messungen ging hervor, daß es sich bei dem Punktauge in der Tat um ein außerordentlich feines Lichtmeßgerät handelt. Aus der Entfernung von 1 Meter kann es bereits den Lichtstärkeunterschied wahrnehmen, wenn neben einer grellbrennenden, 40 Watt starken Glühbirne eine brennende Kerze gestellt wird. Im Freien durchgeführte Untersuchungen ergaben, daß es von der Lichtstärke des Firmaments abhängt, wann Bienen am Morgen zu ihrem Sammelweg aufbrechen und zu welchem Zeitpunkt sie am Abend zurückkehren. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache wurde einigen Versuchsbienen ein Punktauge zugeklebt. Diese Bienen „verschliefen“ und flogen erst später zur Arbeit, abends hingegen kamen sie um die gleiche Zeit früher nach Hause. Wurden ihnen zwei Punktaugen zugeklebt, flogen sie erst zur Arbeit, wenn das mor-



Im Auge der Raupe des Schmetterlings *Isia isabella* erscheinen die Bilder auf der senkrechten Sehnervfaser. Dadurch sieht sie innerhalb einer bestimmten Entfernung alles scharf wie eine einfache Boxkamera. Der Gegenstand 1 wird auf F_1 gesehen und so weiter.



Zwischen den beiden Fühlern am Kopf der Hornisse sind gut wahrnehmbar drei Punktaugen zu sehen. Im Laufe der Stammesentwicklung hat sich jede Tierart so viele Augen angeeignet, wie für die Aufrechterhaltung ihres Lebens notwendig waren. Die Punktaugen der Insekten sind unter anderem auch für das Messen der Lichtstärke geeignet.

gendliche Licht bereits 3,3mal stärker war als gewöhnlich.

Das lichtmessende Punktauge harmoniert in idealer Weise mit irgendeiner unergründlichen inneren Uhr. Je weiter die Bienen zum Sammeln ausgeflogen sind, um so früher fliegen sie am Abend zu ihrem Bienenstock zurück, als zeigte ihnen ihr Lichtmesser sogar an, bei welcher Helligkeit sie sich auf den Weg machen müssen, um im gleichen Halbdunkel ihren Bienenstock zu erreichen, wie es am Morgen beim Aufbruch der Fall war.

Im Wasser versunkene Glaskugeln

Wenn jemand mit geöffneten Augen in das Wasser eines Schwimmbeckens taucht, kann er ein seltsames Schauspiel erleben. Nicht nur, daß vor ihm körperlose Arme und Beine auftauchen, sondern alles sieht entfernter und kleiner aus, als es in Wirklichkeit ist. Hinzu kommt noch, daß das gesamte Bild unklar und verschwommen erscheint. Das Spiel der Lichtstrahlen hält den Menschen zum Narren, er wird unter Was-

ser hoffnungslos weitsichtig! Wenn wir uns mit einer Verkleinerungsbrille in unserem Zimmer umsehen, können wir das gleiche auf dem „Trockenen“ erleben.

Großvater hält die Zeitung weit von seinen Augen entfernt, sonst kann er die kleinen Buchstaben schlecht lesen. Auch

er ist weitsichtig. Setzt er jedoch seine Brille mit den konvex geschliffenen Gläsern auf, fühlt er sich wieder jung, denn er kann aus einer Entfernung von 25 Zentimetern, also von der Grenze des normalen Sehens, leicht und gut lesen. Im wesentlichen haben sich die Fische auch in dieser Weise geholfen, als sie

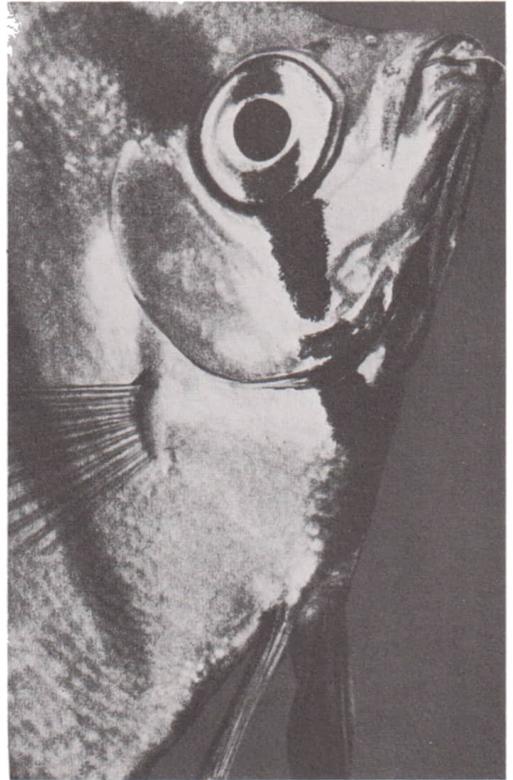


Mit seiner kugelförmigen Augenlinse sieht der Fisch von der Welt nur halbrunde Formen. Dieses Blickwinkelobjektiv von 180 Grad gab Ingenieuren den Anstoß, einen Fotoapparat zu konstruieren, der mit seiner Linse den gleichen Raum erfaßt. Diese Aufnahme wurde mit einer solchen Fischaugenoptik von einer meteorologischen Beobachtungsstation angefertigt.

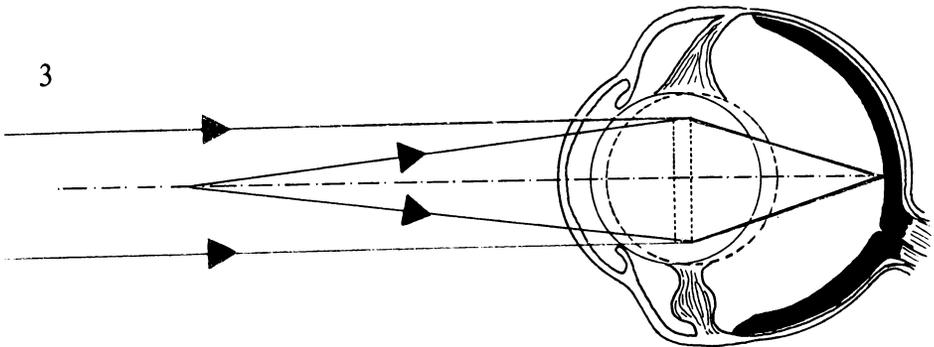
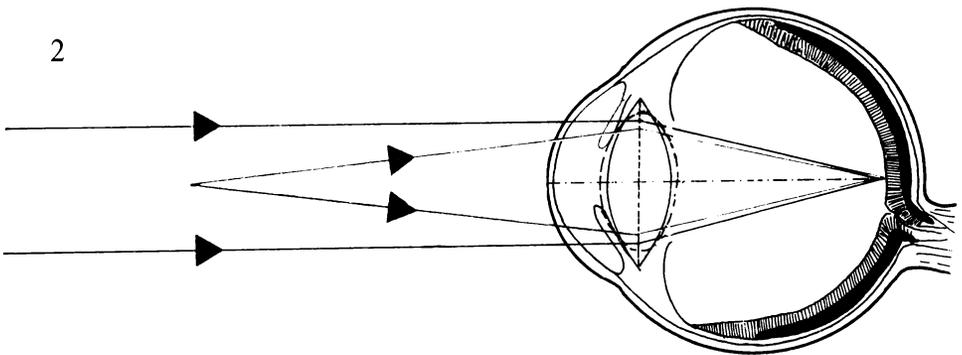
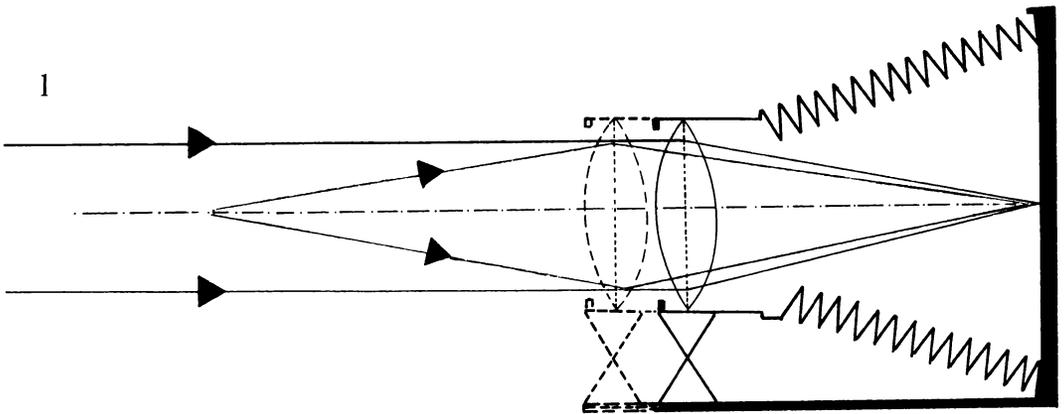
sich während ihrer Stammesentwicklung der Lichtbrechung des Wassers angepaßt haben. Ihre Augenlinse wurde immer erhabener, schließlich gelangten sie zu einer Kugellinse und haben sich damit vollkommen den Lichtverhältnissen der Wasserwelt angepaßt. Dem auf das Trockene geworfenen Fisch geht es umgekehrt wie dem unter Wasser getauchten Menschen. Er wird hochgradig kurzsichtig, weil die in seine Augen fallenden Lichtstrahlen einer stärkeren Brechung ausgesetzt sind, als würden sie durch das Wasser in das Auge fallen. Der Fisch könnte nur dann wieder scharf sehen, wenn er eine Verkleinerungsbrille aufsetzen würde . . .

Im Wasser braucht der Fisch freilich kein Augenglas, weil mit Hilfe der kugelförmigen Augenlinse ein vollkommenes Bild auf seine Netzhaut gezeichnet wird. Eine Glaskugel ist bloß eine klägliche Nachahmung einer solchen optischen Linse. Wenn wir mit einer kleinen Spielkugel die Umrisse einer Tischlampe auf die Wand projizieren, zeichnet sich ein ziemlich unscharfes Bild auf dem hellen Hintergrund ab. Die unklaren Konturen sind auf die sogenannte sphärische Aberration zurückzuführen. Die den Rand durchdringenden Strahlen werden in einem größeren Winkel gebrochen als die mittleren, so daß das Bild nicht genau in einer Ebene entsteht. Die Augenlinse der Fische gleicht diesen Fehler aus. Messungen des englischen Forschers R. J. Pumphrey zufolge ist der Brechungsindex in der Mitte der Kugellinse (1,53) größer als am Rand (1,33), die Strahlen können sich dahinter besser und exakter verbinden. Eine ähnlich vollkommene Linse mit dem gleichen Brechungsindex kann selbst die moderne Technik unserer Tage nicht herstellen.

In der Unterwasserwelt fehlt die „Objektivkappe“ an den Augen der lebenden Fotoapparate. Darum ist der Blick der Fische so kalt, so stumpfsinnig. Sie können ihre Augen nicht schließen, da sie keine Augenlider haben. Die Hornhaut der Tiere des Festlands wird nach jedem Augenschlag benetzt, Fische hingegen sind darauf nicht angewiesen, denn schließlich sind sie ja im Wasser. Doch wenn die an die Luft gewöhnten Tiere ins Wasser tauchen, be-



Es ist durchaus kein rühmliches Attribut, wenn man jemandem nachsagt, er hätte „Fischaugen“. Doch Fische können im Grunde genommen nichts dafür. Sie schließen ihre Augen nicht, denn im Wasser sind sie auf das schützende und befeuchtende „Rollfenster“ nicht angewiesen. Sie sind nur imstande, ihre Augen in einem kleinen Winkel zu bewegen, deshalb ist ihr Blick so starr.



Zwischen dem Aufbau des menschlichen Auges und dem der Fische gibt es einen entscheidenden Unterschied. Jede optische Linse vereint in ihrem Brennpunkt die aus dem Unendlichen (in der Praxis: von sehr weit her) eintreffenden Strahlen. Wenn sich beispielsweise das Objekt der Linse nähert, muß das Objektiv im Fotoapparat zum Objekt hingeschoben werden, um ein scharfes Bild zu erhalten (1). Im menschlichen Auge wölbt sich in diesem Fall nur die Linse etwas mehr (2). Fische, die in der Ruhelage nur nahe Objekte sehen, ziehen ihre kugelförmige Augenlinse etwas nach hinten, um dadurch weiter sehen zu können (3).

nutzen sie eine besondere Schutzvorrichtung wie ein Sporttaucher, der eine Tauchermaske aus Gummi überzieht. Die durchsichtige Nickhaut der Echsen und Krokodile schiebt sich zum Beispiel als drittes Augenlid über den Augapfel. Auch der Pinguin überzieht sein Auge innerhalb eines einzigen Augenblicks mit einem ähnlichen Schutzfenster. Spuren des dritten Augenlids sind selbst im Augenwinkel des Menschen in Form eines rosafarbenen sichelförmigen Lappchens vorzufinden.

In modernen Fotoapparaten sind nicht nur Belichtungsmesser eingebaut, sondern auch automatische Mechanismen, die nach Einstellung der Belichtungszeit, entsprechend der elektrischen Einstellmarkierung am Belichtungsmesser, die Blendenöffnung des Objektivs verringern oder vergrößern. Bei herrlichem Sonnenschein lassen sie die Strahlen bei kleinerer, bei bewölktem Wetter hingegen bei größerer Öffnung durch. In den Augen der Wasserbewohner ersetzt die Pupille die Lichtblende, ihre runde Form verengt oder erweitert sich ebenso wie die Blende der Fotoapparate. Trifft viel Licht auf das Auge, zieht es sich zusammen, bei wenig Licht weitet es sich aus. Das menschliche Auge paßt sich innerhalb einiger Sekunden den Lichtverhältnissen an, die Pupille der Fische hingegen ist ein viel schwerfälligeres Organ. Messungen haben ergeben, daß sich beispielsweise die Lichtblende der Haie innerhalb von 2 bis 15 Minuten zusammenzieht; und sie erweitert sich im allgemeinen erst nach einer halben Stunde. Unter Wasser sind Fische im übrigen auch in Anbetracht des gleichmäßigen Halbdunkels auf keine schnellere Anpassung angewiesen.

Eine scharfe Einstellung des Bildes

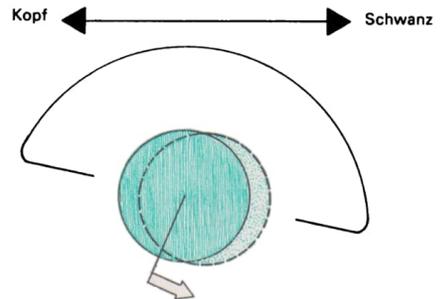
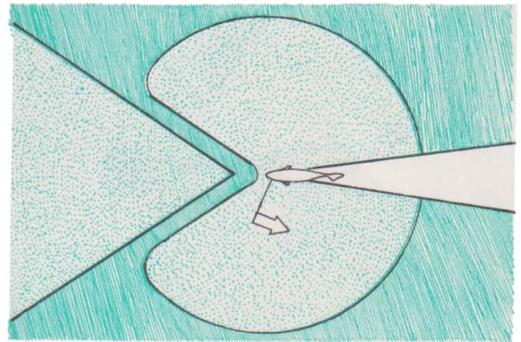
hingegen ist für jeden lebenden und leblosen Fotoapparat von ausschlaggebender Bedeutung. Guter Fotoapparat — gutes Foto! Die optischen Regeln des Fotografierens sind verhältnismäßig einfach: Die aus dem Unendlichen eintreffenden Strahlen vereinen sich im Brennpunkt der Linse. Befindet sich das Objekt näher zur Linse, entsteht ein nach hinten gelagertes Bild, das heißt, je näher das Objekt ist, um so mehr entfernt sich das Bild von der Linse. An den Fotoapparaten kann der Film nicht weiter nach hinten geschoben werden, deshalb muß das Objektiv weiter nach vorn gestellt werden, je näher die aufzunehmenden Objekte liegen. Die lichtempfindliche Netzhaut der Säugetiere ist weder beweglich, noch kann ihre Augenlinse verschoben werden. Sie verfügen aber dafür über eine besondere „Gummioptik“: Sie sind imstande, die Wölbung ihrer Augenlinse zu verändern. Im Ruhezustand blickt ihr Auge ins Unendliche. Hierbei ist die Augenlinse flach und die Wölbung am geringsten. Erblickt das Auge jedoch eine sich nähernde Gestalt, zieht sich die Linse immer mehr zusammen, der Krümmungsradius erhöht sich, so daß das Bild auf der Netzhaut ständig scharf bleibt.

Was soll jedoch der Fisch tun? Versuchte er, seine Augenlinse zusammenzudrücken, wäre das vergebliche Mühe. Die Wölbung würde dadurch nicht runder! Deshalb mußte er sich für eine andere technische Lösung entscheiden: die bewegliche Augenlinse. Aus diesem Grund sind Fische in zwei Hauptgruppen einzuordnen. Zur ersten Gruppe gehören die auf dem Meeresgrund und in Nähe von Korallenriffen friedlich umherziehenden Fische, die im Ruhezustand kaum weiter als bis zu ihrer

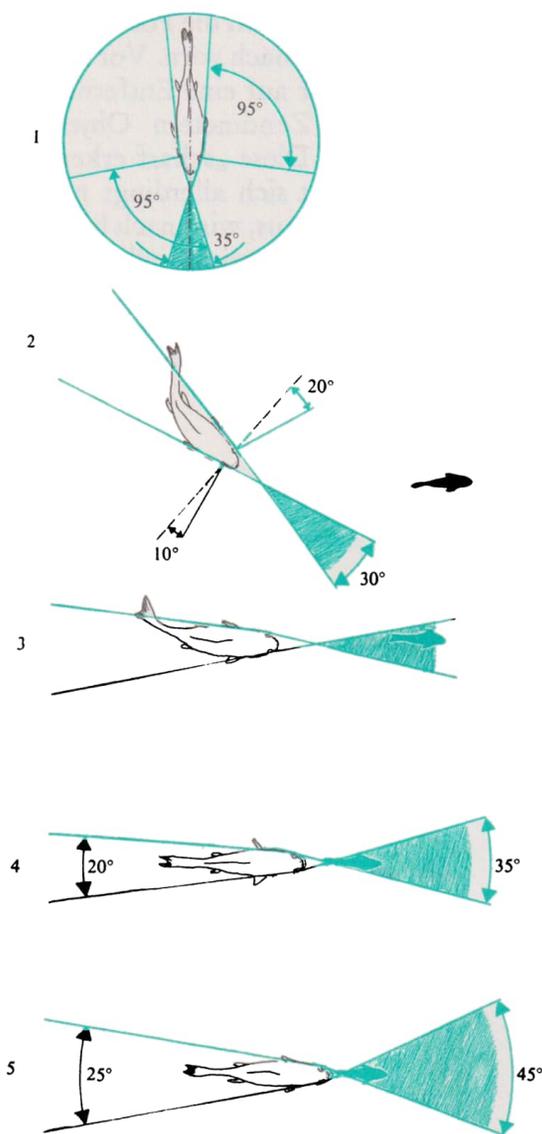
Nase sehen können. Allerdings sind sie auf ein besseres Sehen auch nicht angewiesen, denn das Auffinden der Nahrung ist bei ihnen in erster Linie nicht auf ihr Sehvermögen zurückzuführen. Nach Messungen des sowjetischen Forschers P. B. Bogatirjew sehen bestimmte Karpfenarten, Karauschen und Weißfische kaum weiter als 1 bis 5 Zentimeter scharf. Im Gegensatz zum Menschen, der, in Gedanken versunken, ins Unendliche blickt, sind unbekümmerte Fische in ihrem Ruhezustand am kurz-sichtigsten. Ungeachtet dessen kommen sie nicht in Schwierigkeiten, wenn sie entferntere Dinge genauer beobachten wollen. Hierbei ziehen sie die Augenlinsen reflexartig weiter zurück, diese geraten dadurch näher an die Netzhaut, wodurch die entfernteren Objekte schärfer gesehen werden. Merkwürdig dabei ist, daß sie nur nach vorn scharf sehen können, als blickten sie an zwei unsichtbaren Scheinwerferstrahlen entlang. Um sie herum bleibt der größte Teil des Wassers in Dunkel gehüllt.

Die zweite Gruppe der Fische hat noch merkwürdigere Augen. Ihre Augenlinsen bewegen sich nicht vor- und rückwärts wie das Objektiv einer Fotokamera, sondern mehr in seitlicher Richtung, senkrecht zur Augenachse. Die Untersuchung der Augen von Forellen führte erstmalig zu der erstaunlichen Erkenntnis, daß die Augennetzhaut der schnell beweglichen, jagenden und sich gut orientierenden Fische nicht hablkugelförmig ist, wie zu erwarten wäre, sondern sie erinnert vielmehr an eine ausgehöhlte Kürbishälfte, genauer ausgedrückt: Sie hat die Form eines Ellipsoids. Daraus ergibt sich das eigentümliche Spiel sowie die Methode der ungewöhnlich scharfen Einstellung der Augenlinse.

Im Ruhezustand sieht die Forelle besser nach hinten als nach vorn. Vor ihrer Nase kann sie nur auf eine Entfernung von 10 bis 20 Zentimetern Objekte scharf erkennen. Diese „scharf erkennbare“ Zone dehnt sich allerdings nach beiden Seiten weit aus, wird nach hinten immer breiter und ist prinzipiell auf das Unendliche ausgerichtet: Bei einer kurzen Betrachtung des Querschnitts eines Fischeauges wird uns dies verständlich.



Im Ruhezustand vermag die Forelle die entferntere Umgebung scharf zu sehen, nur unmittelbar vor sich blickend, ist sie kurzsichtig (schraffierte Fläche). Dabei ist die Augenlinse auf der Mitte der elliptischen Netzhaut plziert. Wenn jedoch der Fisch die Linse seitlich ein wenig verschiebt, schränkt er zwar seine Sehschärfe ein, in Richtung des Körpers nach vorn hingegen sieht er dadurch weiter als früher (punktierter Fläche). Hinter seinem Schwanz (im weißen fächerförmigen Streifen) sieht er jedoch gar nichts.



Die Goldkarausche vermag, im durchsichtigen Wasser schwimmend, ein wenig vorauszublicken, da das Blickfeld ihrer beiden Augen überlappt ist, so daß sie innerhalb eines Winkels von 35 Grad dreidimensional sehen kann (1). Wenn sie ihre Beute erblickt und zur Verfolgung ansetzt, richtet sie ihr linkes Auge in Richtung des Ziels (2). Der kleine Beutefisch gelangt in die Zone des plastischen Sehens der Goldkarausche (3). Jetzt kann er nicht mehr flüchten! Beide Augen des Raubfisches sind auf ihn geheftet (4).

Für die von vorn eintreffenden Lichtstrahlen liegt die Netzhaut von der Augenlinse etwas weit entfernt, demnach zeichnet sich nur das Bild der näher liegenden Objekte scharf ab. Die von der Seite eintreffenden entfernteren Lichtstrahlen hingegen zeichnen jedoch ein scharfes Bild auf die näher liegende Netzhaut.

Fische bewegen ihre Augenlinse nur, wenn sie weit nach vorn scharf sehen wollen. Dabei wird der Augapfel aus dem Mittelpunkt des Ellipsoids ein wenig seitwärts gedreht. Der Einstellungsablauf des Scharfsehens beeinflusst in keiner Weise das räumliche Sehen der Fische. Messungen des amerikanischen Forschers G. Walls zufolge, nehmen sie lediglich in einem Strahlungskegel von 15 bis 25 Grad Objekte in dem vor ihnen liegenden Raum wahr, sind also bedeutend „engsichtiger“ als der mit beiden Augen vorwärts blickende Mensch.

Die Einstellung des Fischauges hängt demnach davon ab, in welcher Richtung das Tier seine Umgebung erfassen will. Nach Angaben des sowjetischen Forschers P. B. Bogatirjew funktioniert dieses erstaunliche System ausgezeichnet: Die meisten Fische erhalten innerhalb einer beliebigen Entfernung, von 5 Zentimetern bis unendlich, ein scharfes Bild. Sie sind sogar in der Lage, ihren Augapfel äußerst geringfügig zu drehen, was vor allem bei der Verfolgung der Beute von Nutzen ist. Untersuchungen des englischen Forschers K. Trevarthen ergaben, daß die räuberische Goldkarausche in einem Winkel von 35 Grad „fächerförmig“ mit zwei Augen vor sich blickt. Wenn sie ihre Beute von der Seite beobachtet, bewegt sie ein Auge unabhängig vom anderen, wobei sie mit einem Auge ständig den kleineren Fisch verfolgt. Greift die Goldka-



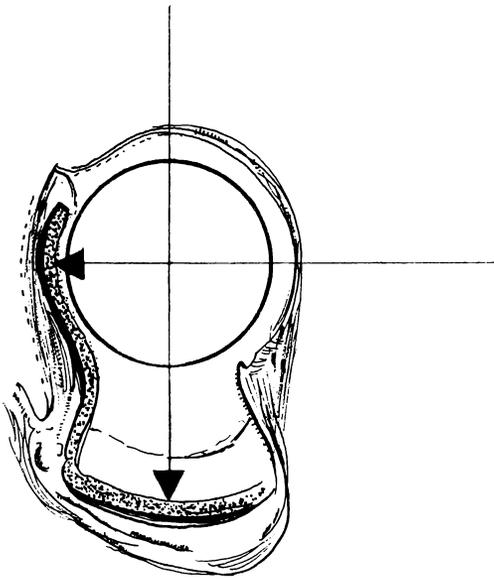
Amphibien und Reptilien haben sich nur schwer an das Sehen außerhalb des Wassers gewöhnt, seit die Ahnen der Fische sich auf das Festland gewagt haben. Wenn sich nichts um sie herum bewegt, erkennen sie kaum ihre Umgebung. Ein im Wasser liegendes Krokodil nimmt nur verschwommene Flecke um sich wahr.

rausche an, schwimmt sie geradewegs auf ihr Opfer zu: Dabei drehen sich ihre Augen immer mehr nach innen, sie haften sozusagen schielend an ihrer Beute. Schließlich, auf dem Höhepunkt ihres räumlichen Sehens, braucht sie nur noch ihr Maul aufzusperren, um den Happen zu verschlingen.

Fische und Reptilien sehen schlechter als der Mensch, die Sehschärfe hängt nämlich nicht nur davon ab, inwieweit das optische System des Auges vollkommen ist. Es wird auch dadurch bestimmt, wie dicht die lichtempfindlichen

Nervenzellen auf der Netzhaut verteilt sind. Auch der beste Fotoapparat kann nicht verhindern, daß von einem groben, körnigen Negativ jedes Bild unscharf wird. Messungen von I. J. Weiler zufolge sieht der *Astronotus ocellatus* im Vergleich zur Durchschnittssehkraft des Menschen fünfmal schlechter. Das Auflösungsvermögen seiner Augen beträgt 5,3 Winkelminuten, er sieht demnach im Verhältnis zu seiner Größe im Wasser so wie eine Katze auf dem Trockenen. Diese experimentellen Feststellungen werden auch durch die mikroskopischen Untersuchungen von G. Brunner bestätigt: In den Augen der Fische sind die Sehnerven ungefähr in gleichen Abständen verteilt wie bei den Katzen. Alligatoren verfügen nicht einmal über eine solche Sehschärfe: Sie sind nicht in der Lage, aus einer Entfernung von 10 Metern einen Gewehrlauf auf einer Decke mit 3 Zentimeter breiten schwarzweißen Streifen wahrzunehmen, weil sie das Ganze für einen schwarzen Fleck halten.

Meeresfische, welche ihre Augenlinse nicht bewegen können, sehen je nachdem, aus welcher Richtung das Licht einbricht, ein scharfes Bild. Vor allem Tiefseefische bevorzugen diese sonderbaren Kameras. Unter der Augenlinse des zur Ordnung der Leuchtsardinen gehörenden teleskopaugigen Scopelarchus — eines Knochenfisches der Tiefsee — verläuft beispielsweise die Sehnervhaut in Form eines Sackes. Wenn er während des Schwimmens nach vorn blickt, sieht er nur ein unklares Bild, weil sich an dieser Stelle seiner Netzhaut viel weniger Sehnerven befinden als etwas tiefer. Dabei reflektiert seine Augenlinse von entfernteren Objekten ein relativ scharfes Bild, was ihm wahrscheinlich zur Rekognoszierung aus-



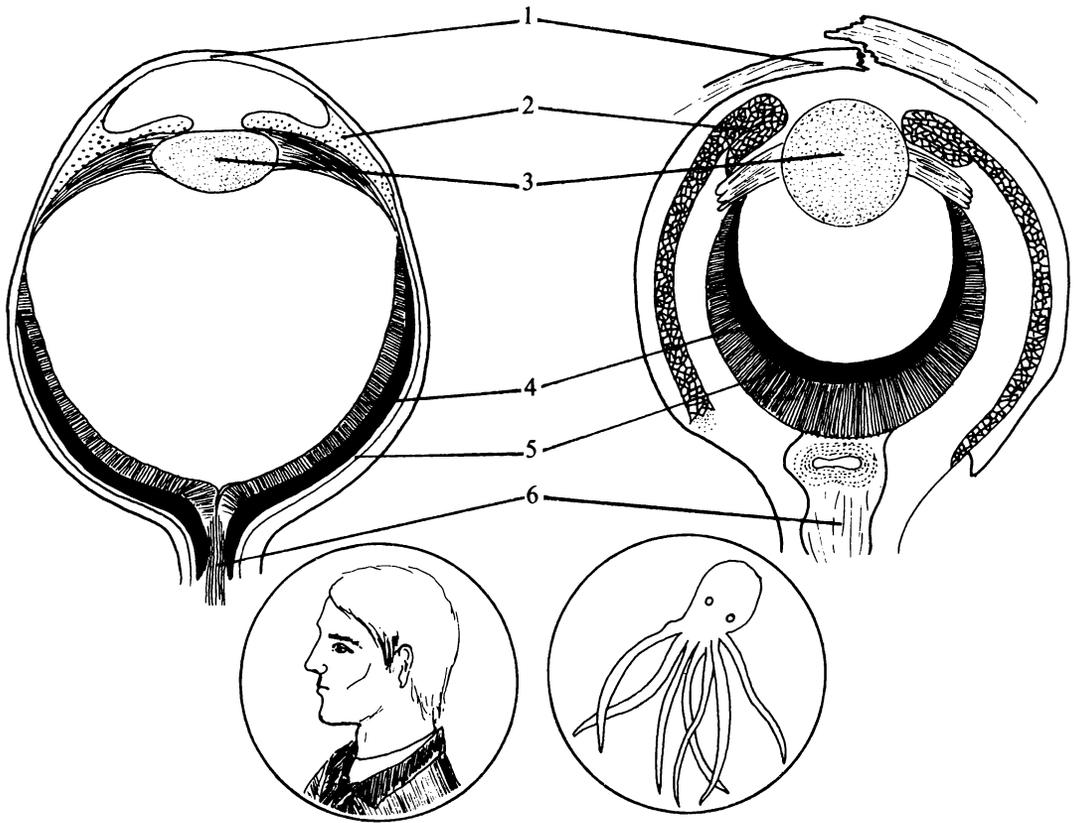
Tiefseefische haben sich ein besonderes Teleskopauge zugelegt. Der Scopelarchus sieht die etwas weiter entfernten Fische auf seiner Nebennethzhaut nur unklar. Will er wissen, ob sich ein Freund oder Feind nähert, schwimmt er unter sie. Im Fokus seiner Kugellinse auf der Hauptnetzhaut entsteht jetzt bereits ein scharfes Bild.

reicht. Wenn jedoch der Scopelarchus die im Wasser unklar aufgetauchten Formen gründlicher betrachten will, schwimmt er unter sie. Das Bild erscheint dann auf dem Unterteil des „Sackes“, und jetzt ist es bereits hinreichend scharf, um zu entscheiden, ob er angreifen oder die Flucht wählen soll.

Soviel ist gewiß, daß diese als kurios scheinende Kamera während der Jahrmillionen der stammesgeschichtlichen Entwicklung eine wichtige Aufgabe in jenem Kampf erfüllt hat, welchen die Tiefseefische um die Erhaltung ihres Lebens geführt haben. Der Notwendigkeit folgend, hat sich diese Lösung un-

ter zahlreichen möglichen anderen Varianten herausgebildet. In einer Wassertiefe von einigen tausend Metern werden Fische nicht von der Seite, sondern im allgemeinen von oben überrascht und angegriffen, auch ihre Beute befindet sich meistens über ihnen. Darum sehen sie nach oben am schärfsten. Die Pupille fehlt ebenfalls in den Augen der Tiefseefische, denn ihre Linse muß im Halbdunkel des Meeres möglichst viel Licht sammeln. Für den Scopelarchus ist demnach dieses „Teleskop“ das vollkommenste Auge, und genauso verhält es sich mit der „Erfindung“ anderer Tiere. Im Vergleich zu ihren Möglichkeiten ist es stets die beste, nur vom Standpunkt des Menschen gibt es darunter „primitive“ oder „vollkommene“ Konstruktionen.

Mit den Augen eines Ingenieurs betrachtet, ist die „Kugelkamera“ der Polypen und Tintenfische vollkommener als das menschliche Auge. Auf ihrer Netzhaut sind nämlich die Sehnerven entgegengesetzt ausgerichtet im Unterschied zum menschlichen Auge. Dazu muß man wissen, daß in den Augen des Menschen sonderbarerweise die Sehnerven dem Licht „den Rücken kehren“. Das lichtempfindliche Ende der 0,06 Millimeter langen Stäbchen (und Zapfen) ist in die Netzhaut eingebettet, so daß das daran anschließende Netz der Sehnervenzellen darüber eine gesonderte Schicht im Innern des Auges bildet. Irgendwo allerdings muß das aus 7 Millionen Fasern bestehende Nervenfaserbündel den Augapfel verlassen, damit die elektrischen Signale der Sehnerven in das Gehirn gelangen. Dort, wo das Bündel die lichtempfindliche Schicht und die Gefäßhaut durchbricht, dort befindet sich in unseren Augen der blinde Fleck. Wenn zum Beispiel auf



Dort, wo das Sehnervfaserbündel die Augennetzhaut durchdringt, entsteht im menschlichen Auge der blinde Fleck. Fällt ein Bild auf ihn, sehen wir gar nichts. Der Polyp ist dieser Gefahr nicht ausgesetzt. Seine Netzhaut befindet sich hinter der Sehzellschicht. 1 – Hornhaut; 2 – Regenbogenhaut; 3 – Augenlinse; 4 – Netzhaut; 5 – Sehzellenhaut; 6 – Sehnervfaserbündel.

diesen das Bild des Vollmonds fällt, nehmen wir davon überhaupt nichts wahr. Den Polypen kann so etwas nicht passieren. Da in ihren Augen die Sehnerven zum Licht hin ausgerichtet sind, sind die Nerven gerade in umgekehrter Richtung aneinandergereiht. Ihre Netzhaut erstreckt sich hinter den Sehnerven, das Nervenfaserbündel kann somit das Auge verlassen, ohne daß ein blinder Fleck entsteht. Die im Wasser herumschwärmenden Kopffüßer kön-

nen diesem Umstand oft ihr Leben verdanken: Der Angreifer verschwindet keinen Augenblick aus ihrem Gesichtskreis.

An der Grenze zwischen Luft und Wasser

In einem Experiment haben englische Forscher die Fähigkeit des menschlichen Auges zum Erkennen von Formen untersucht. Im Halbdunkel waren auf einem quadratnetzartigen Gitterwerk

undeutlich und verschwommen Mosaikwürfelfelder zu sehen, deren einzelne Details wie Farbflecke eines projizierten Farbbildes aussahen. Die Teilnehmer des Experiments saßen schweigend da. Keiner vermochte zu erkennen, was die einzelnen Bilder darstellen sollten. Als allerdings am Ende des bisher ergebnislos verlaufenden Experiments der Vorführer die Bilder des Vorführapparats laufen ließ, rief jemand angesichts des sich bewegenden Bildes aus: „Auf dem Bild springt ein Pferd mit einem Reiter über ein Hindernis.“

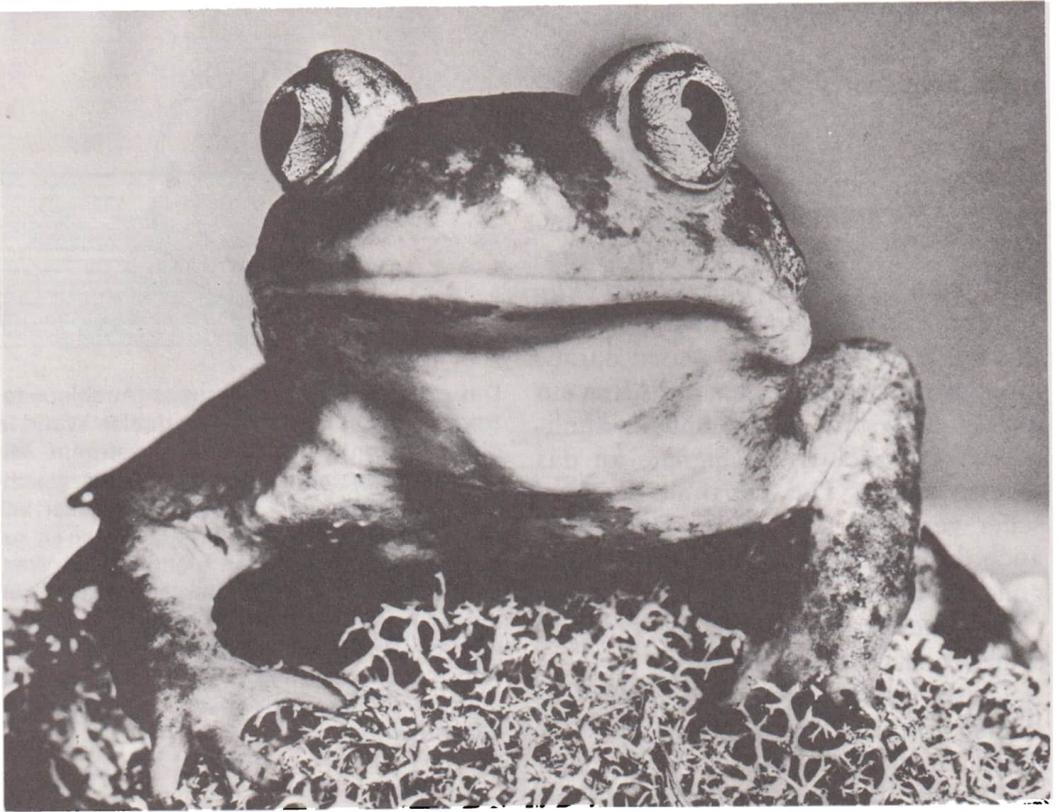
Dieses Experiment beweist in anschaulicher Weise, daß sich bewegende Formen und Figuren leichter erkennen lassen als unbewegliche. Dies gilt jedoch nicht nur für den Menschen. Es ist allgemein bekannt, daß Frösche überhaupt schlecht sehen können. Beobachtungen von L. H. Matthews zufolge sind sie nur imstande, bis zu einer Entfernung von 90 Zentimetern etwas deutlich zu erkennen. So kann man beispielsweise vergeblich in den Behälter eines gefangenen Frosches frisch getötete Insekten legen, der Frosch stirbt eher vor Hunger, doch er wird sie nicht anrühren. Er nimmt die für ihn sonst begehrten Leckerbissen einfach nicht wahr, denn er sieht nur das, was sich bewegt!

Eine erstaunliche Mutmaßung? Nein! In einem amerikanischen Forschungslaboratorium haben J. Lettvin, H. Maturana sowie ihre Mitarbeiter – später auch Forscher anderer Länder – diese Theorie mit konkreten Beweisen erhärtet. Auf der Grundlage ihrer Untersuchungen stellte sich heraus, daß Frösche über ein Organ zum Erkennen von Formen verfügen, von dessen erstaunlicher Vollkommenheit und rationellem Aufbau selbst Fachleute der Elektronik lernen könnten. In diesem

Zusammenhang haben Forscher die elektrischen Signale der Netzhaut eines Leopardsfrosches näher untersucht. Sie steckten zehnmal dünnere Platinnadeln als das menschliche Haar in das Sehfeld des Froschgehirns und zeichneten auf Grund der elektrischen Zeichen dieser Elektroden den Sehmechanismus des Frosches auf.

Dabei wurde der Frosch vor einen konkaven Aluminiumspiegel gesetzt, die elektrischen Leitungen seiner abgesteckten Nervenfasern hingegen an einen Fernsehbildschirm und einen Lautsprecher angeschlossen. Danach wurden unterschiedliche kleine Formen – Dreiecke und Vierecke – auf die Spiegelplatte gelegt. Auf dem Bildschirm zeigte sich kein elektrisches Signal, auch der Lautsprecher blieb ruhig. „Der Frosch sieht die Formen nicht“, stellten übereinstimmend die Forscher fest. Schließlich kam eine runde Scheibe an die Reihe. Im Raum blieb es noch immer still. Als man allerdings die Scheibe zu bewegen begann, brach plötzlich lautes Geknatter aus dem Lautsprecher hervor, und auch auf dem Bildschirm waren im gleichen Rhythmus springende Lichtzacken wahrzunehmen.

Nun, was erscheint im allgemeinen in solch runden Konturen auf der Netzhaut des Frosches? In der Regel ein Käfer, eine zukünftige Beute! Das ist also das Geheimnis des Rätsels um das Auge des Frosches. Er nimmt nur das sich bewegende Insekt, den sich bewegenden Käfer wahr! Lettvin und Maturana bezeichneten diesen Nervenfasertyp als „käferempfindlich“. Die weiteren Experimente gaben über ein noch interessanteres System Aufschluß. Außer diesen Nervenfasern wurden noch solche entdeckt, die auf der Netzhaut des Frosches nur die Konturen eines Objekts



Der Krötenfrosch betrachtet die Welt mit heiterer Ruhe. Wenn um ihn kein Windhauch das Röhricht bewegt, erscheint ihm die Luft vor seinen Augen wie ein blaugrauer Nebel, als säße er in der Tiefe des Sumpfes. Dagegen nimmt er um so leichter einen vor ihm fliegenden Käfer wahr. Etwas anderes als die bewegliche Lockspeise sieht er dabei kaum vor sich.

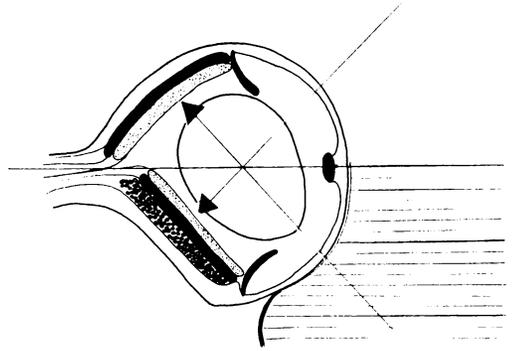
registrieren. Diese „Konturenfühler“ senden je Sekunde 30 bis 40 kleine elektrische Signale über jene Punkte in das Gehirn des Frosches, bei denen die „Stetigkeit“ des Objektbildes aussetzt. Ferner gibt es Nervenzellen, welche nur über die Veränderung der Lichtverhältnisse der einzelnen Sehzellen Aufschluß geben. Diese „Fall-zu-Fall-Fühler“ der Nervenfasern sind also für Bewegungen zuständig. Und schließlich bilden bestimmte Nervenfasern ein Notsignalgebendes System, von dem erst dann elektrische Signale in das Gehirn gelangen, wenn sich das gesamte Gesichtsfeld plötzlich verdunkelt. Der Frosch kann

also in aller Ruhe seine Aufmerksamkeit einem sich bewegenden Käfer widmen, denn sein „Verdunklungsfühler“ signalisiert sogleich, wenn beispielsweise ein Storch über ihm schwebt und sich für ihn interessiert.

Am eindrucksvollsten von alledem ist, daß im Gehirn des Frosches in vier Schichten verschiedene „Mosaikbilder“ übereinander erscheinen, und zwar von unten nach oben in folgender Reihenfolge: die Konturenkarte, die käferempfindliche Karte, die Fall-zu-Fall-Fühler-Karte und die Verdunklungskarte. Alle Karten passen mit wunderbarer Genauigkeit übereinander, wie die

Grundfarben auf einem gedruckten Farbbild. Auf der Grundlage dieses Systems kann der Frosch sicher entscheiden, ob sich vor ihm eine lohnende Beute oder ein gefährlicher Gegner bewegt. Wenn sich beispielsweise aus den vier Bildern das Porträt eines ungefährlichen Käfers ergibt, setzt er den „Kata-pult“ zum Sprung in Bereitschaft. Die an der Harvard-Universität durchgeführten Untersuchungen weisen darauf hin, daß die Sehnervzellen der Affen ein ähnliches System bilden und in ähnlicher Weise elektrische Signale an das Gehirn senden. Die Annahme der Forscher verstärkt sich immer mehr, daß auch das menschliche Auge im Grunde genommen auf der Grundlage solcher „zusammengesetzter“ Details die verschiedenen Formen erkennt.

Diese Forschungen sind vom Gesichtspunkt des Baus elektronischer Anlagen zum Erkennen von Formen außerordentlich wichtig, denn diese seit Jahr-millions erprobten und bewährten lebenden Erfindungen können auch in der Technik verwandt werden. Im amerikanischen Forschungslaboratorium Bell wurden bereits die ersten künstlichen „käferempfindlichen“ Apparate hergestellt. Auf der ansichtskartengroßen „Nervenzelle“ befinden sich fünf Transistoren und sonstige elektronische Einheiten. Mit sechs Fozellen verbunden — die wie sechs künstliche Sehzellen die Lichtstärkenveränderung registrieren —, gibt die Anlage erst dann elektrische Signale, wenn ein rundes bewegliches Objekt vor ihr erscheint. Bald werden elektronische Rechenmaschinen mit solchen Augen selbst Konstruktionszeichnungen lesen können und selbständig kleinere Montagearbeiten mit den mit ihnen verbundenen geschickten Manipulatorhänden ausfüh-



Das große Auge des Vierauges (*Anableps tetraophthalmus*) ist durch eine dunkle Wand in einen oberen und unteren Teil getrennt. Mit seinen Doppelaugen beobachtet er gleichzeitig, was auf und unter dem Wasser vor sich geht. Die vorstehende Augenlinse ist kugelförmig, nach unten in Richtung des Wassers dicker und gekrümmter, so daß dadurch die eintreffenden Strahlen besser gebrochen werden. Das Auge der jungen Fische ist anfangs noch ungeteilt. Dieser Fisch lebt an den mittelamerikanischen und brasilianischen Küsten.

ren, während sie mit dem „kontinuierlichen“ Auge das entstehende Arbeitsstück überwachen.

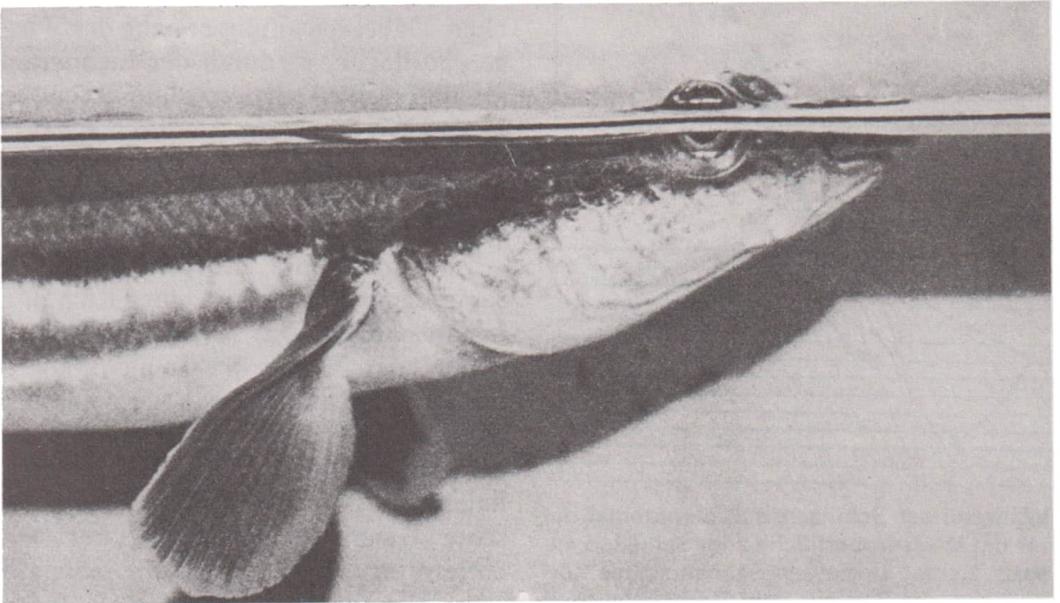
Das Bewegungsempfinden der Reptilien ist dem der Amphibien ähnlich. So wird es verständlich, weshalb die Schlange mit ihrem Kopf hin- und herpendelt, sobald sie ihre Beute wittert. Dabei bewegt sich auf der Netzhaut ihrer Augen das Bild der Umgebung, so erkennt sie besser das sich vor ihr dukende Opfer. Daß der der Schlange gegenüberstehende Nager unwillkürlich erstarrt, wird nicht nur von der Angst diktiert. Seine seit Urzeiten gesammelten Erfahrungen lehrten ihn, daß die Schlange ihn schlechter wahrnimmt, wenn er sich unbeweglich verhält, als würde er zu fliehen versuchen.

Doch über das Sehvermögen der Amphibien unter Wasser ist uns selbst

heute noch nicht viel bekannt. Die unterschiedliche Lichtbrechung des Wassers und der Luft stellt ihre Augen in jeder Weise auf eine harte Probe. Wie uns bekannt ist, versagt das Sehvermögen der Fische an der Luft vollkommen. Lediglich dem sogenannten Vierauge, dem *Anableps tetraphthalmus*, gelang es, ein solches Auge zu entwickeln, das sowohl im Wasser als auch an der Luft gleichermaßen gut sieht. Die Lösung ist im Grunde genommen einfach: Er benutzt vier Augen! Da er sich gewöhnlich an der Wasseroberfläche aufhält, verfolgt er aufmerksam die Ereignisse unter und über dem Wasser. Er hat nur zwei Augenlinsen, obwohl er im Grunde genommen vieräugig ist, weil seine zweiseitige Netzhaut ständig bereit ist, die aus der Luft und unter dem Wasser eintreffenden Bilder zu registrieren. Der

unter Wasser befindliche Teil der Augenlinse ist stärker, demnach ist die Brennweite unter Wasser fast so stark wie der mit der Luft in Verbindung stehende dünnere Teil der Linse. Darauf ist es also zurückzuführen, daß auf alle Fälle ein deutliches Bild auf der Netzhaut erscheint.

Für den Flugfisch ist es eine Existenzfrage, daß er, in der Luft schwebend, genau sieht, wie hoch er über dem Wasser fliegt, denn davon hängt im Grunde genommen die erfolgreiche Flucht vor seinen Verfolgern ab. Nach Untersuchungen des englischen Forschers E. R. Baylor ist die Augenhornhaut des Flugfisches stark gewölbt, doch das untere Drittel ist dagegen abgeflacht. Dieser merkwürdige Fisch trägt also ständig sein „Augenglas“ mit sich herum, das ihn vor der Kurzsichtigkeit schützt.



Der *Anableps* jagt auf über dem Wasser sorglos schwebende Insekten. Er entwickelte dafür ein besonderes Auge, mit dem er zugleich über und unter dem Wasser sehen kann. In der Luft beobachtet er die Insekten, um im geeigneten Augenblick aus dem Wasser zu schnellen, im Wasser jedoch achtet er darauf, daß er nicht Beute eines Raubfisches wird.

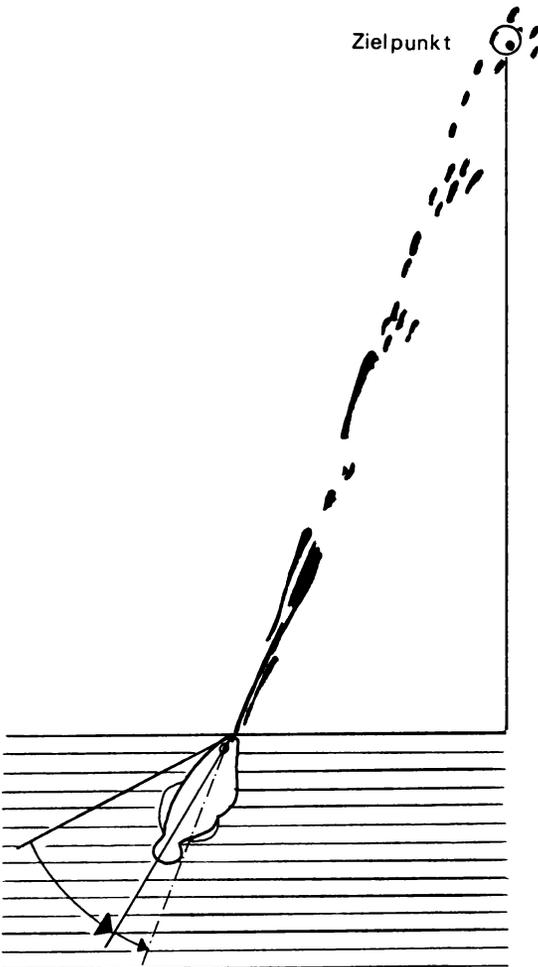
Aus der Luft herabblickend, kann er die bis zur Wasseroberfläche liegende Entfernung genau einschätzen.

Dem Schützenfisch ginge es schlecht, wenn ihm die Regeln der Lichtbrechung nicht geläufig wären. Dabei handelt es sich selbstverständlich nicht um Gesetze

aus dem Physikbuch, sondern um Erfahrungen aus Jahrmillionen. Auf Grund dieser Erfahrungen ist er in der Lage, mit einem aus dem Wasser herausgeschossenen Wasserstrahl einen arglos schwebenden Schmetterling oder einen auf einem Baumast sitzenden Käfer zu treffen.

Die Forscher waren lange Zeit der Meinung, daß dem *Toxotes jaculator* instinktmäßig die Regeln der Lichtbrechung bekannt sind, doch später stellte sich auf Grund durchgeführter Untersuchungen heraus, daß es sich bei der Treffsicherheit nur um einen guten Nervenreflex handelt, zu dem das ausgezeichnete räumliche Sehen des Fisches beiträgt. In der Regel schwimmt er in der Weise unter seiner Beute, daß er einen Winkel von 140 bis 170 Grad zur Senkrechten bildet. In dieser Richtung wird der in das Wasser eintreffende Lichtstrahl kaum noch gebrochen. Dabei schwimmt er nahe der Wasseroberfläche, wodurch der Lichtstrahl im allgemeinen sowieso ohne Brechung in das Auge gelangt. Dadurch schaltet er jedes optische Problem aus. Er braucht nur dorthin zu schießen, wohin er sieht!

Zum Zeitpunkt des Abschusses ist seine Längsachse fast in einer Richtung mit dem Zielpunkt, so daß der Schußwinkel des Wasserstrahls nicht korrigiert werden muß. Dies könnte er auch nicht, genauso wie er seine Schußkraft nicht zu regulieren vermag. Dem amerikanischen Forscher Lüling zufolge ist seine „Feuerkraft“, ungeachtet der Zielentfernung, immer gleich. Er trifft aus einer Entfernung von 40 bis 60 Zentimetern überraschend genau, doch selbst aus 90 bis 120 Zentimeter Entfernung vermag er Insekten noch gut zu erreichen. F. D. Ommaney stellt in seinem



Während der Schützenfisch unmittelbar unter der Wasseroberfläche zum Schießen ansetzt, richtet er die Längsachse seines Körpers auf das Ziel aus. Die Geschwindigkeit des Wasserstrahls beträgt 4 Meter in der Sekunde. Das ist im Vergleich zur Geschwindigkeit einer Revolverkugel von 700 Metern in der Sekunde äußerst wenig, doch dem Schützenfisch genügt sie.

Buch fest, daß einzelne Exemplare dieser Fischart sogar aus einer Entfernung von 4 bis 5 Metern treffen können. Doch inwieweit es sich dabei um keine bewußte Tätigkeit handelt, zeigt folgendes Beispiel: Der Biologieprofessor Hediger besaß einen schiefmäuligen Schützenfisch, der ständig danebenschuß. Er erlernte das zielgerechte Schießen nie, denn seine instinktmäßige Treffertigkeit war nur ererbt.

Zwei Augen sehen in drei Richtungen

Die Figuren ägyptischer Reliefkunstwerke und Wandmalereien blicken aus jahrtausendealter Entfernung mit fast zeitlosem Blick auf uns. Dabei handelt es sich nicht um irgendein rätselhaftes Empfinden, das den Betrachter bemächtigt, sondern um eine durch den Künstler bewußt gewählte psychologische Wirkung. Jede Figur wurde von den Ägyptern in der Wandfläche „erfaßt“ und die einzelnen Details teils von vorn, teils von der Seite dargestellt. So erscheint das Gesicht im Profil, die Augen hingegen blicken den Betrachter direkt an. Darum ist der Ausdruck der Augen an ägyptischen Figuren so beeindruckend. Die gleiche Anordnung ist auch in der Tierwelt anzutreffen, doch sie dient einem viel praktischeren Zweck. Die Achsen der Hasenaugen stehen beispielsweise in einem Winkel von 180 Grad zueinander, sie haben folglich einen effektvollen „Rundblick“; die Achsenstellung der Giraffenaugen von 140 Grad oder der Hirsche von mehr als 100 Grad macht es möglich, daß sie fast den gesamten Horizont beobachten können. Obwohl das Sehvermögen der Pflanzenfresser nicht so gut ist wie das

der Menschen, nehmen sie Bewegungen sofort wahr. Die erste Warnung erhalten sie über die Augen, worauf sie ihr verfeinertes Gehör und ihren Geruchssinn „einschalten“, um genauere Informationen zu bekommen, ob sich ihnen ein Freund oder Feind nähert.

Die Augenachse der Hunde und Wölfe steht in einem Winkel von 30 bis 50 Grad zueinander, der Löwe hingegen blickt mit einem noch „stechenderen“ Blick nach vorn: Sein Augenachsenwinkel beträgt insgesamt nur 10 Grad. Die Anordnung der Augen glich sich der Lebensweise an, und sie hat sich im Verlauf der Stammesentwicklung herausgebildet. Im allgemeinen genügt es, einen Blick auf irgendein Säugetier zu werfen, um mit großer Wahrscheinlichkeit sagen zu können, wo es in der Entwicklungsreihe von den Pflanzenfressern bis zu den Raubtieren steht. (Freilich ist nicht nur dies von Bedeutung in der Beurteilung der Lebensweise.) Soviel jedoch ist sicher, je mehr das Auge eines Tieres nach vorn ausgerichtet ist, um so kleiner ist sein Blickfeld. Das reduzierte Blickfeld wird jedoch durch das räumliche Sehen ersetzt.

Beim Sehen mit zwei Augen auf dasselbe Objekt kann die Entfernung eingeschätzt werden. Auf Grund von Luftaufnahmen stellen auf diese Weise Fachleute die Höhe der Erhebungen auf der Erde fest. An Stereofotoapparaten verlaufen die Achsen der Objektive parallel, die Augenachsen Vorwärtsblickender hingegen kreuzen einander immer in dem Punkt, wohin sie die Aufmerksamkeit lenkt. Sich abwendende Augen funktionieren so wie ein eingebauter Entfernungsmesser. Das Gehirn erhält entsprechende Informationen über die Stellung der Augen durch die Anpas-

sung der augenbewegenden Muskeln, worauf auf Grund dieser Information die Entfernung bestimmt wird.

Doch in den Augen sind auch noch andere sinnreiche technische Lösungen zu finden. Das Innere einer Fotokamera ist bekanntlich vollkommen schwarz, damit in Anbetracht der reflektierenden Lichtstrahlen kein „Geisterbild“ auf dem Negativ entsteht. Selbst die Rückseite der lichtempfindlichen Filme wird fabrikmäßig mit einer lichtabsorbierenden Schicht versehen, damit nicht die ungehindert durchziehenden Lichtstrahlen zwischen den Körnchen aus Silberbromid zurückstrahlen. In den Augen der Tiere befinden sich gleichfalls lichtabsorbierende Farbschichten, die es verhindern, daß die zwischen den Sehzellen vorbeihuschenden reflektierenden Lichtstrahlen ein Geisterbild hervorrufen.

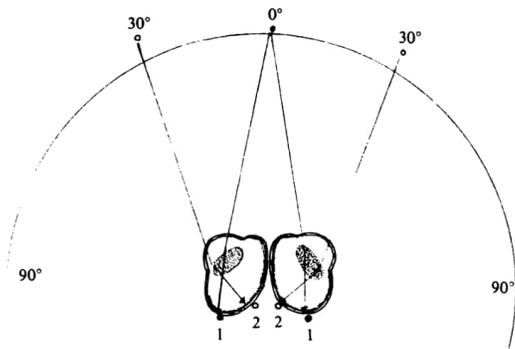
Selbst bei modernsten Fotoapparaten muß die Filmkassette ausgewechselt werden, wenn man anstatt schwarzweiß farbig fotografieren will. In den lebenden Kameras stehen jedoch zugleich beide „Rohstoffe“ zur Verfügung. So nehmen beispielsweise im menschlichen Auge 125 Millionen als Stäbchen benannte winzige Sehzellen die Veränderung der Lichtstärke wahr und 5 Millionen als Zapfen bezeichnete, ganz anders geformte Sehzellen erfassen die verschiedenen Wellenlängen der farbigen Strahlen. Mit den Stäbchen sehen wir in der Dämmerung, mit den Zapfen am Tag. Doch das „Negativ“ der Netzhaut ist nicht überall gleichmäßig „körnig“. An den zur Augenlinse gegenüberliegenden Stückchen mit einem Durchmesser von 0,6 bis 0,7 Millimetern haben sich nur Zäpfchen zusammengedrängt. Hier ist die Netzhaut tieferliegend, und an der Oberfläche, auf dem

sogenannten gelben Fleck, trifft das Licht auf die Zapfen, ohne dabei an Stärke zu verlieren.

Beim Blick auf ein Bücherregal vermögen wir den Titel des Buches zu lesen, dessen Rücken gerade auf den gelben Fleck unseres Auges fällt. Über diese Fläche erhält nämlich unser Gehirn das schärfste und farbenreichste Bild, obwohl auch die anderen Bücher in unserem Blickfeld enthalten sind. Da sich der gelbe Fleck stets gegenüber der Augenlinse befindet, sehen wir immer das am schärfsten, was wir vor unseren Augäpfel halten oder was sich davor bewegt oder befindet. Deshalb verfolgen unsere Augen den Tennisball im Flug, obwohl wir ihn auch sehen würden, wenn sich unsere Augäpfel nicht bewegten. So aber bleibt das Bild des Balles ständig auf dem gelben Fleck, folglich entsteht ununterbrochen ein scharfes Bild.

Dies sollte man vor allem deshalb wissen, weil in den Augen der Tiere, die den Luftraum „überwachen“, zum größten Teil lichtempfindliche Stäbchen vorhanden sind. In Ermangelung von Zapfen sehen sie dadurch ein farbloses und nicht so scharfes Bild, bei einer Verstärkung der Belichtung können sie jedoch selbst die kleinste Bewegung wahrnehmen. In den Augen nach vorn blickender Tiere sind mehr Zapfen als Stäbchen vorhanden; dank dem farbigen Sehen können sie folglich genauere Details unterscheiden.

In der Vogelwelt sind eigenartige Luft-Fotoapparate anzutreffen. Am Tag ist ihr Sehvermögen wahrscheinlich das vollkommenste unter den Tieren. Auf der Netzhaut der Vögel befinden sich nur Zapfen, und die meisten haben in den Augen zwei gelbe Flecke. Dadurch sind sie imstande, auf einmal drei



Waagerechter Querschnitt der beiden Augen des Turmfalken. Der doppelte gelbe Fleck (1 und 2) macht es möglich, daß der Vogel zugleich in drei Richtungen blicken kann. Mit den zentralen Flecken (2) kann er von der Seite zwei Objekte unabhängig voneinander scharf erkennen. Das auf beiden seitlichen Flecken (1) erscheinende Bild ermöglicht das dreidimensionale Sehen.

Objekte aus drei verschiedenen Richtungen scharf zu sehen: Entferntere Bilder fallen auf den zentralen gelben Fleck eines jeden Auges, gleichzeitig sieht der Vogel auch vor sich ein deutliches Bild. Dabei treffen die Lichtstrahlen auf den seitlichen gelben Fleck, folglich entsteht im Gehirn ein räumliches Bild. In den Augen des Haus- oder Trutuhns hingegen fehlt der seitliche gelbe Fleck. Deshalb dreht das Huhn seinen Kopf in belustigender Weise, als würde es über irgendein Problem nachdenken, wenn es nach einem Korn auf dem Boden sucht. In seinem Auge entsteht nämlich erst auf diese Weise ein klares Bild auf dem zentralen gelben Fleck. Der Falke dagegen nimmt mit seinem seitlichen „Scharfblick“ eine Maus bereits aus einer Höhe von 1 Kilometer wahr, was gegenüber dem Menschen ein Vielfaches der Leistungsfähigkeit seiner Augen bedeutet.

Die Eule hat sich vollkommen auf das räumliche Sehen eingestellt. Sie kann ihre vorwärts blickenden Augen gar nicht mehr drehen, weil die Bewegungsmuskeln der Augen verkümmert sind. Verfolgt sie scharfblickend ihre Beute oder einen sonstigen Vorgang, muß sie ihren Kopf drehen, wobei sie sich so geschickt anstellt, daß sie mehr als einen Kreis beschreibt. Daher stammt auch die scherzhafte amerikanische Redens-

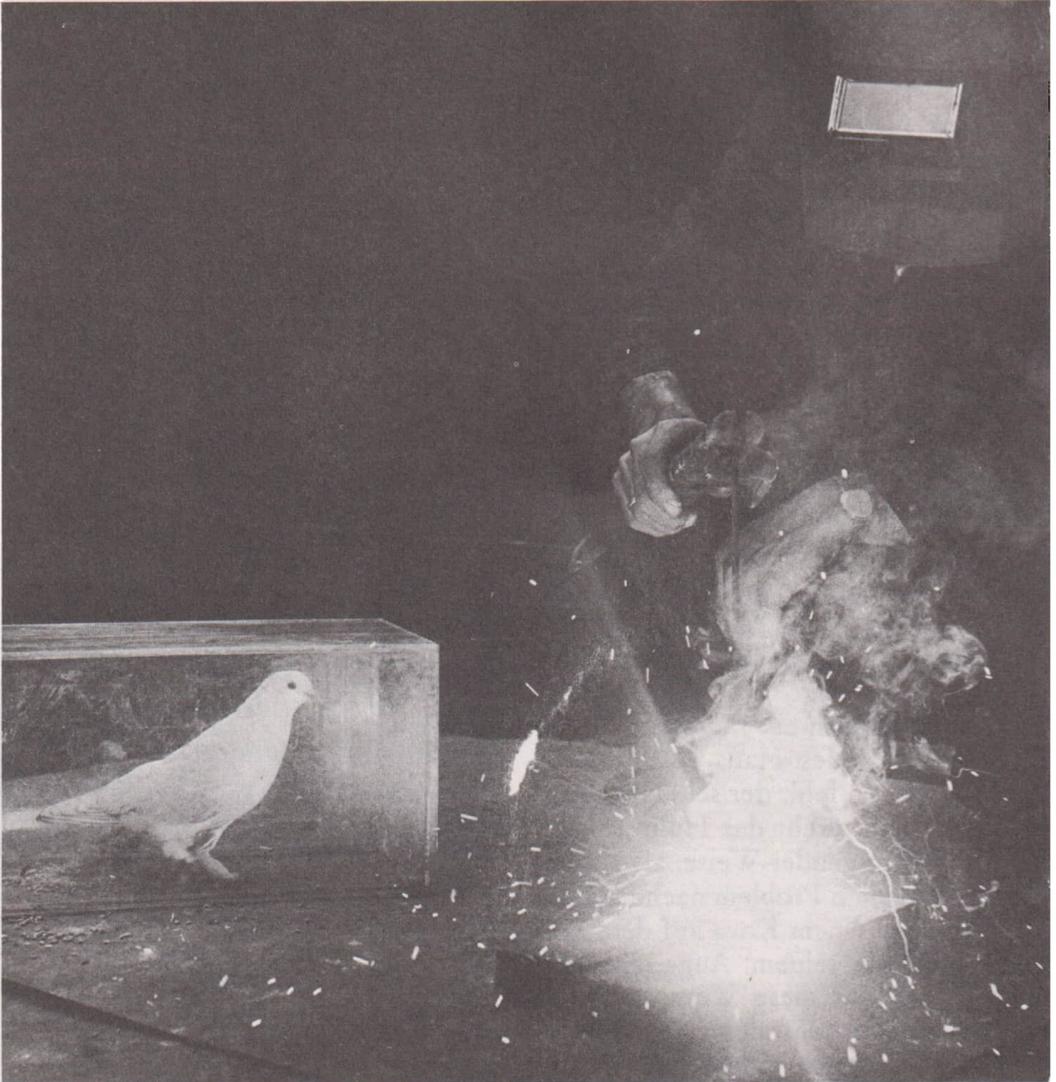


Im Auge des Falken erscheint an zwei Punkten ein scharfes Bild, so daß er prinzipiell zugleich in drei Richtungen blicken kann. Wir wissen nicht, wie er tatsächlich sieht, doch vermutlich blickt er auf einmal nur in eine Richtung. Kreist der Falke in großer Höhe und richtet er dabei ein Auge seitlich aus, nimmt er die Landschaft mit seiner auf „unendlich“ eingestellten Augenlinse wie eine Landkarte wahr. Wenn er hingegen auf seine Beute hinabstürzt, nutzt er für das plastische Sehen auf kurzen Strecken beide Augen zugleich.

art, wie man Eulen fangen soll: „Gehe dreimal um sie herum, sie verfolgt dich dabei mit den Augen, bis sie sich ihren Hals bricht und in deine Hand fällt!“

Vögel sind darauf angewiesen, schnelle Bewegungen genau wahrzunehmen und einzuschätzen. Wenn sich

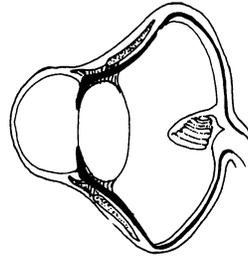
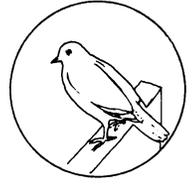
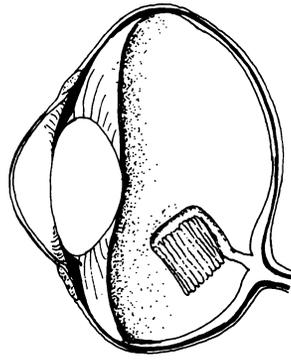
ein Sperling auf einen Ast niederläßt, ist dies mit der Geschwindigkeit eines strahlgetriebenen Flugzeugs zu vergleichen, welches seine Tragflächen zusammenklappt und auf einem flachen Hausdach landet. Dabei verfolgt das Auge des Vogels mit einem aufschlußreichen



Ruhig blickt die Taube in das grelle Bogenlicht des elektrischen Schweißdrahts. Dies ist für sie kaum schlimmer, als stundenlang in die Sonne zu sehen. Neuesten Untersuchungen zufolge bildet der gezackte Kammfortsatz (Pecten) eine „Schutzbrille“. Nach Feststellungen sowjetischer Forscher reagiert die Sehnethaut der Taube bei Sonneneinstrahlung oberhalb der Schnabellinie mit kleineren Reizen, als fiele das Licht unterhalb des Schnabels ein.

verzögernden System die vorbeihuschenden Bilder. Auf der Netzhaut sind auseinanderliegende Sehzellen mit der gleichen Nervenzelle verbunden, so daß die elektrischen Signale etappenweise das Gehirn erreichen. Auf Grund dieses Tricks bleibt mehr Zeit zum Erkennen von einzelnen Details übrig. Der Scharfblick der Vögel wird wahrscheinlich auch dadurch gefördert, daß sich auf der Netzhaut ihrer Augen nicht die gleichen Blutgefäßnetze befinden wie in den Augen der Säugetiere. Das Licht gelangt folglich ungehinderter bis zur Sehzelle. Die Blutadern sind in einer dünnen Membrane – dem Pecten – zusammengedrängt, und die Netzhautzellen werden von hier ernährt. Dieses kammförmige Organ ist fast vollkommen durchsichtig, und welchen Zweck es erfüllt, darüber streiten sich selbst heute noch die Gelehrten. Einzelne Forscher sind der Meinung, daß der Vogel mit ihm die magnetischen Kraftlinien der Erde wahrnimmt, wodurch er sich zur Zeit des großen Vogelzugs orientieren kann.

Im Jahr 1972 wurde auf Grund von Untersuchungen zweier Forscher der California-Universität eine neue Theorie über dieses Organ entwickelt, die auf der Vorstellung beruht, daß die besondere Form des Kammorgans einem optischen Ziel diene. Den Forschern zufolge benutzen die Vögel den Pecten während der ständigen Sonnenbestrahlung wie eine „Augenblende“. Sie stellten ferner fest, daß das Kammorgan der Taube widerspiegelnde starke Lichtreflexe von verschiedenen Punkten der Netzhaut auffängt. So spiegelt sich das Bild der Sonne fast ständig auf der Netzhaut wider. Dabei ist das Licht derart stark, daß die von der Netzhaut reflektierten Strahlen das Innere der



Der rätselhafte Kammfortsatz im Vogelaugensorgt für die Blutversorgung der Netzhautzellen. Er nimmt jedoch auch eine optische Aufgabe wahr: Ablendung des grellen Lichts im Auge des Vogels. Oben der senkrechte Schnitt des Auges der Taube, unten der der Eule.

gesamten Augenkugel erhellen. Das Kammorgan wölbt sich wie ein Sonnenschirm über der Sehgrube. Dadurch mindert es den grellen Gegensatz zwischen Licht und Schatten.

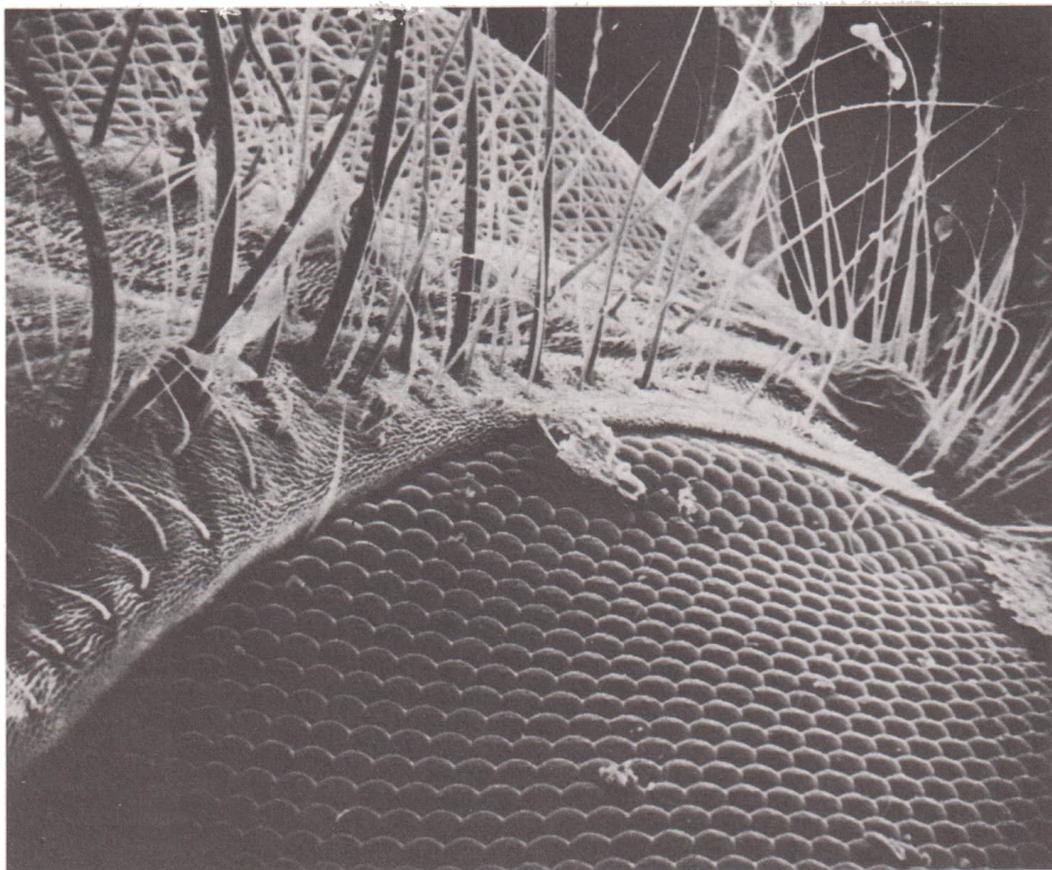
Tausendäugige Insekten

Wer besonders zudringlich ist, dem wird nachgesagt: „Unverschämt wie eine Marktliege.“ Dieser Vergleich entspricht wirklich den Tatsachen, denn Fliegen beweisen es uns tagtäglich. Doch weshalb sind Fliegen so unver-

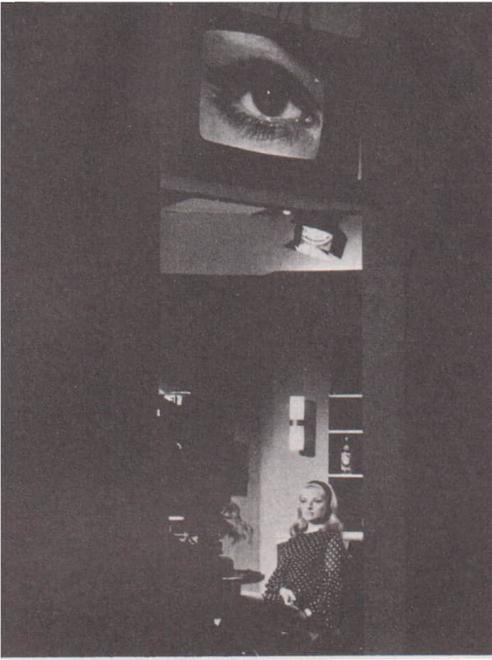
schämt? Offensichtlich halten sie es für selbstverständlich, daß sie nicht zu erwischen sind. Vergeblich versuchen wir, schnell zuzuschlagen, im letzten Augenblick fliegt die Fliege doch mit Windeseile davon. Selbst von hinten ist nicht an sie heranzukommen: Sie nimmt die vorsichtige, aber doch verdächtige Handbewegung sofort wahr. Die Fliege hat es freilich leicht, denn sie verfügt über ein Patent, das sich seit Millionen Jahren in immer verfeinerter Form in den entsprechenden Arten vererbt hat. Das Facet-

tenauge zählt zu den erstaunlichsten Sehorganen in der Tierwelt.

In der Fernsehkamera wird das Bild durch ein optisches Linsensystem auf die lichtempfindliche Platte projiziert. Auf der Platte löst sich das Bild in mehr als eine halbe Million winziger Punkte auf, um sich dann auf einem Bildschirm wieder als einheitliches Ganzes zusammenzufügen. Theoretisch hätte man auch eine Fernsehkamera konstruieren können, in der mit einer Reihe kleiner Kollektorenlinsen das Bild aufgelöst



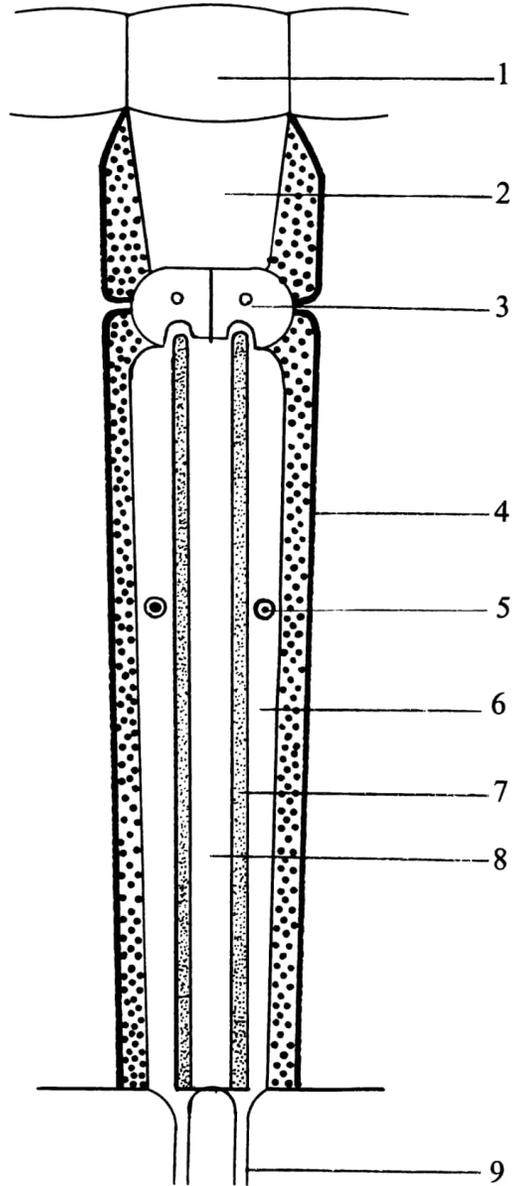
Das Facettenauge der Stubenfliege besteht aus einer Vielzahl einfacher Linsen. Auf der mittleren V-förmigen Zone, die die beiden halbkugelförmigen Augen voneinander trennt, befinden sich Tasthaare. Die Aufnahme erfolgte mit einem Rasterelektronenmikroskop bei 210facher Vergrößerung.



Die Vielzahl der Elementaraugen der Insekten zerlegt das Bild der Umgebung ebenso in Punkte wie eine Fernsehkamera. Schließlich sieht das Insekt auf Grund der unterschiedlichen Lichtstärke der Punkte ein einziges Bild, wie sich auch auf dem Bildschirm des Fernsehers das Bild aus einer Vielzahl von Lichtpunkten zusammensetzt.

wird. Das wäre allerdings vom technischen Standpunkt eine überaus komplizierte Lösung. Die Insekten haben sich trotzdem für diese Lösung entschieden.

Ihre beiden halbkugelförmigen Augen bestehen aus einer Vielzahl winziger Augen. Im Vergleich zu einer theoretisch möglichen Fernsehkamera bewegen sich Insekten allerdings im Rahmen bescheidener Mittel: Sie begnügen sich mit einer Anzahl von mehreren tausend Linsen. Bei diesen sogenannten Elementaraugen handelt es sich um feinmechanische Meisterwerke, die selbst von Fachexperten unseres technischen Zeitalters anerkennend be-

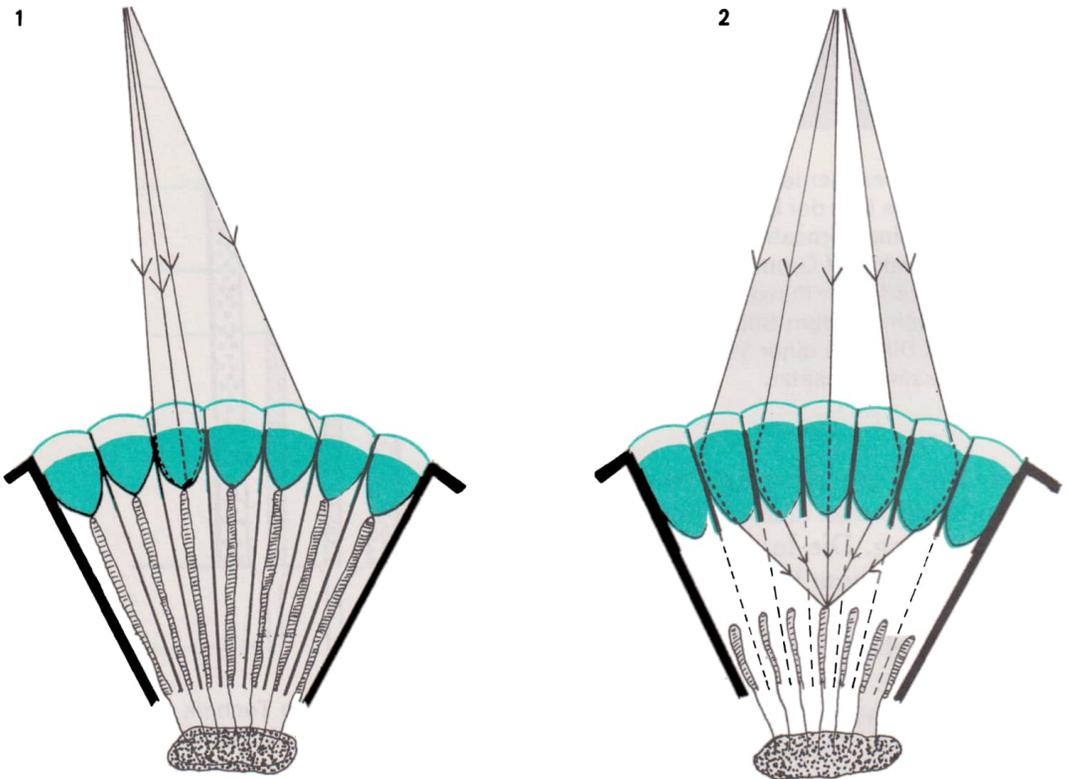


Selbst die moderne Technik unserer Zeit ist nicht in der Lage, solch winzige optische Gefüge zu konstruieren, wie es die Einheit eines Facettenauges der Insekten darstellt. Ein Bündel von hundert dieser winzigen Elementaraugen ist nicht größer als eine Stecknadelspitze. 1 – Chitinlinse; 2 – Kristallkegel; 3 – lichtleitende Zelle; 4 – Pigmentzelle; 5 – Zellkern der Sehzelle; 6 – Sehzelle; 7 – lichtempfindlicher Stäbchensaum (Rhabdom); 8 – Achsenaußenhöhlung; 9 – Sehnerv.

wundert werden. Auf je einem lichtisolierten Röhrchen von 15 bis 40 Mikrometer Durchmesser befindet sich die aus der Chitinhülle herausgebildete optische Linse. Darunter liegt ein kondensierender Kristallkegel, am unteren Teil des Röhrchens hingegen ein lichtempfindlicher Sehzellenkomplex, der über bestimmte Nervenfasern elektrische Signale in das zentrale Nervensystem der Insekten sendet. In der Halbkugel des Fliegenauges sind 4000 bis 5000 solcher Einzelaugen (Omatidien) vorhanden, im Auge der Libelle sind es

12 000 bis 13 000 — andere Autoren nennen bis zu 30 000 —, den bisher bekannt gewordenen Rekord hält der Totengräber mit rund 30 000 Einzelaugen innerhalb des Facettenauges.

In Zeitschriften werden mitunter bemerkenswerte Fotos mit folgender Erläuterung veröffentlicht: „So wird die Welt von der Fliege gesehen.“ Auf der Darstellung reihen sich kleine Einzelbilder aneinander, wobei in jedem das gleich scharfe Bild zu sehen ist — zum Beispiel eine blühende Blume vor dem Pariser Eiffelturm. Solche Bilder sind



Die zweierlei Arten von Facettenaugen der Insekten. Tagesinsekten verfügen über Appositionsaugen. In den Appositionsaugen erhält jeder lichtempfindliche Stäbchensaum (Rhabdom) nur aus dem darüber befindlichen Kristallkegel Licht (1). In den Superpositionsaugen der Nachtinsekten ist der Stäbchenbereich tiefer plaziert, darum bekommt er aus mehreren Richtungen Licht, wodurch das Insekt ein helleres Bild wahrnimmt (2).

ganz und gar irreführend. Kein einziges Insekt sieht die Welt so. Das Facettenauge der Insekten läßt keine Vielzahl kleiner Bilder entstehen, die für sich einzeln erkennbar sind. Obwohl jedes Ommatidium, das heißt jedes Einzelauge, über eine eigene Linse verfügt, sieht das Insekt nur ein Bild, und auch dies ziemlich unklar und verschwommen. Jede einzelne Röhrchenkamera nimmt nur die mittlere Helle eines ganz kleinen Details wahr, und aus diesen Bildpunkten setzt sich wie auf dem Fernsehschirm das einheitliche Bild zusammen.

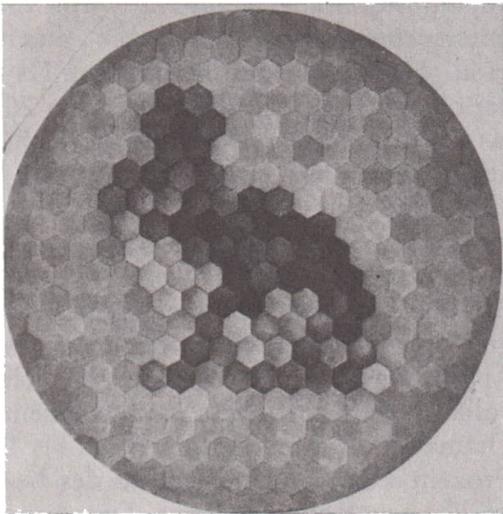
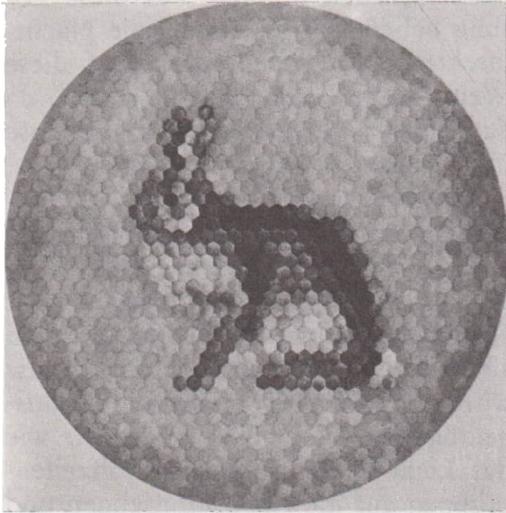
Nach Meinung einiger Forscher erscheint in jedem einzelnen Ommatidium ein umgekehrtes Bild über ein winziges Detail der Umgebung, wie üblicherweise jede einfache Glaslinse das Bild umgekehrt darstellt. Bemerkenswert ist, daß der optische Strahlenablauf der Linse und des Kristallkegels bis heute noch nicht genau bekannt sind. Doch alles, was recht ist, es ist außerordentlich schwierig, das Linsensystem des Facettenauges eines Insekts zu „enthüllen“. Einigen Forschern ist dieses erstaunliche Kunststück zwar geglückt, doch selbst mikroskopische Untersuchungen geben keine eindeutige Antwort. Nur soviel konnten sie immerhin bestätigen, daß trotz einer Vielzahl von Linsen von einer entfernt befindlichen Glühlampe tatsächlich nur ein einziges Bild entsteht. Hinsichtlich der Bildpunkte ist es im Grunde genommen einerlei, wie sie stehen, denn das Bild einer grauen Scheibe verändert sich auch nicht, wenn sie auf dem Kopf steht.

Die lichtempfindlichen Sehnerven des Facettenauges sind zweifach angeordnet. Im sogenannten Appositionsauge harrt jede einzelne Sehzellen-

gruppe unmittelbar unter dem Kristallkegel auf das Licht, so daß jede Gruppe für die „eigene“ Belichtung ihrer Augenlinse zuständig ist. Im Superpositionsauge liegt die Schicht der Sehnerven von den Kristallkegeln etwas weiter entfernt. Aus einer einzelnen Rohrkamera kann demnach das Licht in die Nachbarzellen dringen. Für diese Lösung haben sich in erster Linie Nachtinsekten entschieden, denn auf diese Weise „sehen mehr Augen mehr“, da das schwache Licht einer einzigen Linse mehr Sehzellen auf einmal anregt.

Mit dem Appositionsfacettenauge erkennen Insekten ein verhältnismäßig scharfes, doch lichtschwaches Bild, das Superpositionsauge hingegen sieht ein helles, aber unscharfes Bild. Von dem amerikanischen Forscher S. R. Shaw wurde im Jahr 1969 mit erstaunlich ausgeklügelten Methoden gemessen, wie das Licht in den einzelnen Sehzellengruppen auf die Appositionsaugen und Superpositionsaugen verteilt wird. Er untersuchte das Facettenauge einer Honigbiene und eines Flußkrebsses. Dabei führte er mit einer Glasfaser von 20 bis 30 Mikrometer Durchmesser Licht auf die einzelnen Linsen des Facettenauges und leitete mit winzigen Nadel Elektroden die elektrischen Signale von den entsprechenden Sehzellen weiter. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, daß das Appositionsauge der Biene tatsächlich vollkommen lichtisoliert ist. Aus einem Ommatidium dringt lediglich 0,1 bis 1 Prozent Licht in die Sehzelle des benachbarten Röhrchenauges. Das Auge des Krebses hat sich im Laufe der Untersuchungen als eine Art lebender Fotoapparat erwiesen, der selbst im Halbdunkel noch gute Bilder machen kann. Der Lichtstrahl einer einzigen Chitin-

linse verteilt sich auf den Sehzellenkomplex von 8 benachbarten Ommatidien, so daß fast die Hälfte der eintreffenden Lichtmenge die peripheren Sehzellen erreicht. Vom Superpositionsauge gelangen demnach stärkere elektrische Signale in das Nervenzentrum, was dem



Aus einer Entfernung von 130 Zentimetern sieht die Biene einen sitzenden Hasen (oben). Aus einer Entfernung von 200 Zentimetern erkennt sie den Hasen unklarer, weil das Licht auf noch weniger Elementarlinen fällt (unten).

Tier vor allem in der Dämmerung gute Möglichkeiten der Orientierung bietet.

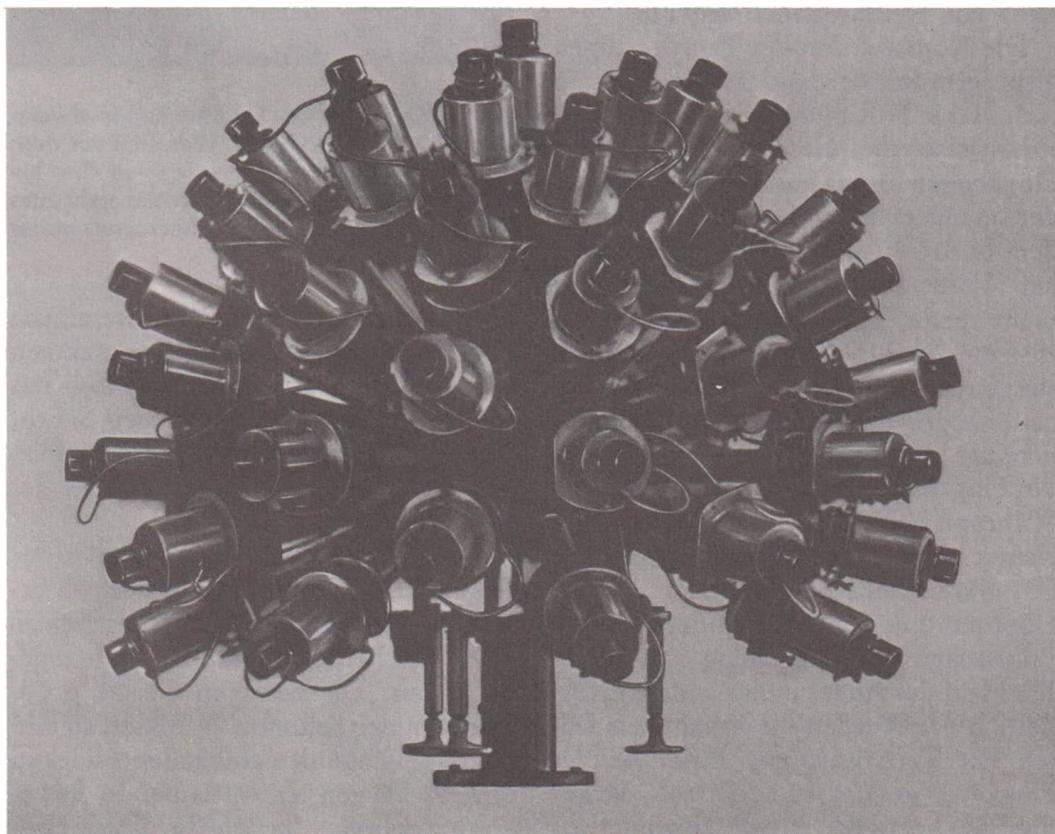
Die Schärfe des Sehvermögens der Insekten hängt eng mit der Struktur ihrer Augen zusammen. Das Mosaikbild ist offenbar um so schärfer, je kleiner der Winkel zwischen zwei benachbarten Elementaraugen ist, wobei klarere Details im Sehfeld unterschieden werden. Der deutsche Forscher H. Baumgärtner nahm bereits im Jahr 1928 entsprechende Messungen dieses kleinsten Winkels des Bienenauges vor und ermittelte dabei Werte von 0,9 bis 1 Grad. Auf Grund der neuesten Sehschärfeuntersuchungen, die an Bienen und Fliegen vor flatternden Bändern durchgeführt wurden, ergaben sich genau die gleichen Werte. Es gibt deshalb keinen Zweifel: Bienen sehen erstaunlich schlecht! Während vom Menschen eine Blume im Gelände aus einer Entfernung von 6 Metern erkannt wird, muß sich die Biene auf 10 Zentimeter nähern, damit sie wahrnimmt, um welche Blume es sich handelt. Weiter davon entfernt nimmt sie nur einen verschwommenen Farbfleck wahr. Auch Fliegen können sich wegen ihres scharfen Sehens nicht rühmen; in Anbetracht der Anordnung ihrer Ommatidien sehen sie sogar noch schlechter. Das Facettenauge ist nämlich nicht genau kugelförmig. An den Augen der Bienen gibt es beispielsweise Partien, in denen die Elementaraugen in einem Winkel zueinander stehen, der größer als 4 Grad ist.

Wäre der Fotoapparat nicht vom Menschen erfunden worden, hätte er ihn auch nach dem Muster der Tieraugen konstruieren können. Im Reich der Tierwelt funktioniert aber nur das Auge jeder 17. Tierart nach dem Muster des Fotoapparats. Die überwiegende Mehr-

heit benutzt Facettenaugen! Weshalb haben sich die Insekten im Laufe ihrer Stammesgeschichtlichen Entwicklung hierfür entschieden? Offensichtlich ist es für sie vorteilhafter. Wenn wir unsere Umgebung durch ein dünnes, durchsichtiges Kunststoffgewebe betrachten, können wir erproben, wie sie die Welt sehen. Das Bild wird zunächst ziemlich verschwommen sein. Wenn wir allerdings das Gewebe hin- und herbewegen, wird es auf einmal scharf und erkennbar. Darin besteht also das Geheimnis des Facettenauges: Es ist vor allem während der Bewegung tauglich

und effektiv. Dabei ist es ganz gleich, ob die Biene selbst fliegt oder das Objekt sich bewegt.

Auch Amphibien, Reptilien und Vögel können schnelle Bewegungen gut wahrnehmen, doch ihr Blickfeld ist nicht so groß wie das der Insekten. Würden wir eine Biene in die Mitte eines Planetariums setzen, brauchte sie ihren Kopf nicht zu drehen, um sich auf dem künstlichen Himmelsgewölbe der Reihe nach die Sterne anzusehen. Sie würde auf einmal das gesamte Himmelsgewölbe überblicken können. Und erschiene plötzlich eine Sternschnuppe,



Dieses sonderbare Filmaufnahmegerät, das nach dem Muster des Insektenauges aus 57 Einzelkameras konstruiert wurde, erfaßt mit allen Linsen zugleich das gesamte Himmelsgewölbe und den Horizont. Ein entsprechendes Polyvision-Rundkino wurde im Jahr 1964 in Lausanne in der Schweiz eingerichtet.

würde sie diese viel schärfer als die Fixsterne wahrnehmen.

Die englischen Forscher E. T. Burt und W. T. Catton haben dies auch durch unmittelbare Messungen bestätigt. Sie haben elektrische Signale der Sehnervenzellen einer Heuschrecke abgeleitet, während das Insekt verschiedene sich bewegende Objekte betrachtete. Die Heuschrecke nahm die sich bewegenden Objekte aus einer sechsmal weiteren Entfernung als die stehenden wahr. Demnach sieht die Biene während des Fluges Blumen sechsmal schärfer als aus stehender Position, was zweifellos für sie eine Hilfe bei der Aufdeckung von Nektarquellen bedeutet.

Die Konstruktion der Facettenaugen inspirierte selbstredend auch schon die technische Forschung. So konnte beispielsweise die Geschwindigkeit von Flugzeugen bisher nur im Verhältnis zu der sie umgebenden Luft gemessen werden. In Anbetracht unterschiedlich starker Winde sind jedoch die Ergebnisse nicht genau. Ein neuartig konstruiertes Instrument für Geschwindigkeitsmessungen arbeitet nach dem Muster des Facettenauges der Bienen. Ein „Maschinenauge“ befindet sich an der Stirnseite des Flugzeugs, das andere am Schwanz. Während beide Augen auf die Erde gerichtet sind, wird durch elektronische Stromkreise jene Zeit registriert, die zur Überquerung von hellen oder dunklen Bildflecken der Umgebung von einem Blickfeld des Auges in das andere erforderlich ist. Werden die erhaltenen Daten ins Verhältnis zur Lufthöhe des Flugzeugs gesetzt, ist es einfach, die auf die Erde bezogene Fluggeschwindigkeit zu ermitteln. Auch Insekten wenden diese Methode an; sie wissen auf diese Weise immer, in welche Windrichtung es sich noch zu fliegen lohnt. Falls entge-



Der große Vorteil des Facettenauges erweist sich während des Fluges. Was sich vor dem Insekt bewegt, ist viel besser erkennbar als im Ruhezustand. Die Heuschrecke sieht zum Beispiel in der Luft fliegend sechsmal weiter als im Ruhezustand.

genkommene Windwehen ihre eigene Fluggeschwindigkeit erreichen, nehmen sie es insofern gut wahr, weil sich das Bild in ihren Augen um keinen Schritt bewegt. Dann setzen sie mit dem Fliegen lieber aus und warten ab, bis der Wind nachläßt.

Zur Zeit des alten Kinos rollten in der Sekunde 16 Filmbilder ab, deshalb sehen die Bewegungen der Menschen in alten Wochenschauen so komisch abgehackt aus. Die heutigen Geräte projizieren in der Sekunde 24 Bilder, so daß die aufleuchtenden stehenden Bilder in unseren Augen als fortlaufende Bewegung zusammenfließen. In dieser Hinsicht verfügen Insekten über eine aufschlußreiche Fähigkeit. Ginge ein Insekt ins Kino, langweilte es sich sicherlich sehr, denn es würde nur eine Viel-

zahl von stehenden Bildern sehen. Die am Abend beim elektrischen Licht umherfliegende Fliege wundert sich vielleicht auch darüber, weshalb die Glühlampe in einer Sekunde ungefähr fünfzigmal erlischt. Abgeleitete elektrische Ströme von Sehzellen der Facettenaugen haben nämlich gezeigt, daß Insekten über eine außergewöhnlich „zeitaufteilende“ Fähigkeit verfügen. Messungen von H. Autrum haben ergeben, daß die Schmeißfliege in der Lage ist, in der Sekunde 300 Lichtblitze zu unterscheiden, doch auch die Honigbiene steht dem mit 250 bis 265 Lichtempfindungen in der Sekunde nicht viel nach, die Libelle unterscheidet 220 Bilder in der Sekunde. Nach anderen Messungen zählen Schaben mit ihren 45 bis 60 Empfindungen in der Sekunde bereits zu den „Langsamäugigen“. Für sie müßte ein Film mit 65 Bildern in der Sekunde abrollen, denn nur so wäre es ihnen möglich, eine kontinuierliche Bewegung wahrzunehmen.

Manchmal ist das Erkennen langsamer Bewegungen für das Tier von lebensentscheidender Bedeutung, denn der Feind nähert sich häufig in schleicher Weise. Das Facettenauge steht den Gliederfüßern auch in dieser Hinsicht zur Seite. Messungen haben ergeben, daß die Facettenaugen von Krabben an einer Wanduhr nicht nur die Bewegung des großen Zeigers, sondern auch den Gang des kleinen Zeigers wahrnehmen. Sie sind sogar in der Lage, eine viermal langsamere Bewegung zu erkennen.

Wo ist die Rote?

Wie wunderschön sind rote Tropenblumen! Sie ziehen unter Tausenden von Farben den Blick der Menschen auf

sich. Bienen hingegen nehmen keine Notiz von ihnen! Wenn diese Blumen nicht von den leicht dahinschwebenden Kolibris besucht würden, kämen sie nicht zu dem lebensnotwendigen befruchtenden Blütenstaub. Doch warum interessieren sich Bienen nicht für diese herrlich aussehenden roten Blumen? Weil sie die rote Farbe nicht sehen! Ihr Auge ist für Lichtstrahlen mit einer höheren Wellenlänge als 600 Nanometer* unempfindlich.

Der Mensch kann sogar rote Strahlen mit einer Länge von 760 Nanometern wahrnehmen. Doch was bei Bienen auf der einen Seite im Spektralbereich verlorengeht, holen sie auf der anderen auf. Sie nehmen nicht nur violette Farben wahr, sondern auch ultraviolette Strahlen, die für das menschliche Auge unsichtbar sind.

So bleibt beispielsweise roter Klatschmohn trotzdem nicht unbestäubt, da das regenbogenfarbige Gemisch des Sonnenlichts außer roten auch ultraviolette Strahlen reflektiert, wodurch Bienen angezogen werden. Die gelbschimmernde Dotterblume spielt sozusagen mit dem Licht: Ihr Kelchblatt absorbiert, ihre Staubgefäße hingegen reflektieren die ultravioletten Strahlen des Sonnenlichts. Wenn die Biene auf die Dotterblume fliegt, sieht sie einen glänzenden ultravioletten Ring in der Mitte der Blume.

Selbst in der Liebeswerbung der Insekten spielt das Farbsehen eine besondere Rolle. Es gibt eine Schmetterlingsart, bei der das Männchen und das Weibchen in unseren Augen gleichfarbig grün aussehen. Doch in den Augen der Schmetterlinge ist dies nicht der Fall! Im ultravioletten Licht werden

* 1 Nanometer = 0,000000001 Meter



So sehen Menschen die Blüten der Dotterblume (links) und so Insekten (rechts) entsprechend Fotoaufnahmen des amerikanischen Professors T. Eisner. Das zweite Bild wurde mit einem für ultraviolette Strahlen empfindlichen Filmmaterial aufgenommen. Das eigenartige Aussehen der Blumen auf dem rechten Bild ist auf die Einwirkung der Kurzwellenstrahlen zurückzuführen.

beide in unterschiedlichen Farben gesehen, wir könnten sogar sagen, das Weibchen sei grau, das Männchen braun, so daß sie einander bereits von weitem erkennen. Auf Grund der auffallend hellen Flügel weißer Schmetterlingsarten kann nicht mal von erfahrenen Biologen festgestellt werden, welches das Männchen und welches das Weibchen ist. Den neuesten Forschungen zufolge reflektiert der obere Teil der Flügel des Männchens die ultravioletten Strahlen des Sonnenlichts, der des Weibchens hingegen nicht. Ein Weibchen kann folglich beim Anblick eines heranflatternden Schmetterlings

bereits von weitem erkennen, ob ihr eine Freundin oder ein Liebhaber entgegenfliegt.

Da im hellen Licht der Sonne die grüngelbfarbigen Strahlen mit größter Energie auf die Erde fallen, hat sich das Farbempfinden des Menschen in der Weise herausgebildet, daß er bei einer grüngelben Farbe mit einer Wellenlänge von 560 Nanometern die feinsten Schattierungsunterschiede feststellt. Der Bereich unserer Farbempfindlichkeit beginnt übrigens bei violetten Strahlen mit einer Wellenlänge von 360 Nanometern und hält über die blaue, grüne und gelbe bis zur roten Farbe mit einer Wellen-

länge von 720 Nanometern an. Obwohl wir ultraviolette Strahlen nicht zu sehen vermögen, wird unsere Haut durch diese unsichtbaren Strahlen gebräunt.

Waldameisen erkennen die Welt in etwas dunkleren Farben als wir. Auf Grund der vom Karl-Marx-Städter Forscher W. Treen durchgeführten Messungen mit unglaublich feinen Elektroden wurde bekannt, daß die Ameisen auf die 510 Nanometer lange reingrüne Farbe am sensibelsten reagieren. Rote Farbschattierungen nehmen sie wie die übrigen Insekten nicht wahr.

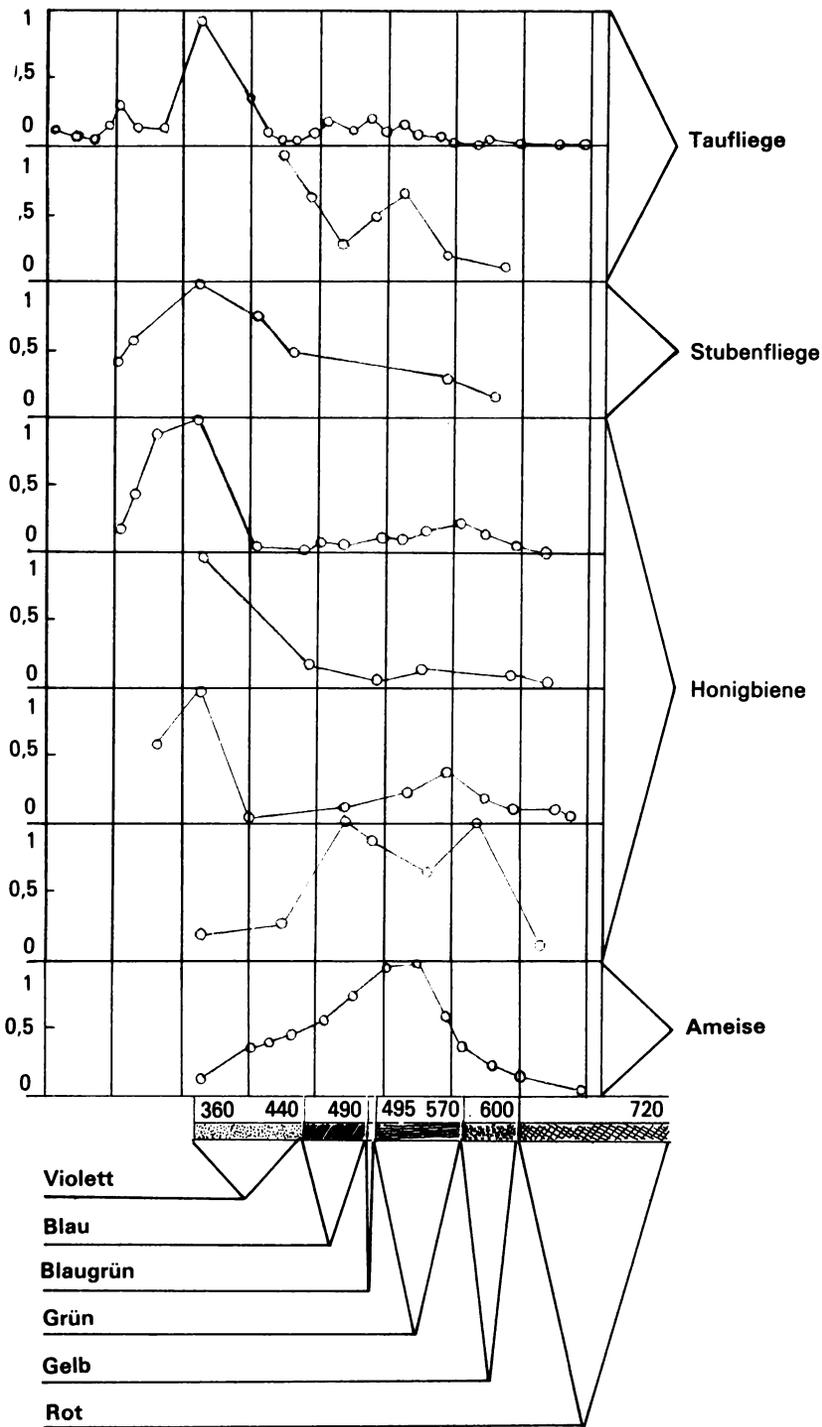
Elektrische Messungen des amerikanischen Forschers J. J. Goldsmith zeigten, daß das farbpfindliche Maximum der Honigbienen in einem Nuancenbereich der dunkelvioletten Farbe bei einer Wellenlänge von 400 Nanometern liegt. Untersuchungen von K. Däumler und E. Heintz hingegen beweisen, daß dieses Maximum gerade noch an der Grenze der für die Bienen wahrnehmbaren violetten Farbe liegt. Wir



Das Porträt einer Ameise in 179facher Vergrößerung. Das Insekt orientiert sich hauptsächlich durch Tasten und Riechen, darum ist sein Facettenauge verhältnismäßig klein. Wie auch andere Insekten, kann die Ameise rote Farben nicht erkennen.

können es uns kaum vorstellen, in welcher sonderbarer Weise Bienen die Welt sehen! Sie erkennen die bei 320 bis 340 Nanometer liegenden ultravioletten Strahlen zwei- bis dreimal besser als hellere Farben. Wahrscheinlich ist eine brennende Quarzlampe für sie ein viel anziehenderes Objekt als die strahlendste rote Tulpe.

Am Farbsehen der Fische kann gleichfalls nicht gezweifelt werden, denn zur Zeit der Paarung ziehen sie unter anderem durch prachtvolle Farben die Aufmerksamkeit des anderen Geschlechts auf sich. Ebenso entfalten auch Vögel ihre Pracht. Der Meinung der Forscher zufolge ist es sogar unbestritten, daß sich die Augennetzhaut der Vögel nur aus farbpfindlichen Zapfen zusammensetzt, wahrscheinlich spielt bei ihnen die Unterscheidung der farbigen Details bei der Einschätzung der Entfernung und dem Scharfsehen eine wesentliche Rolle. Nach neuesten Untersuchungen können auch Frösche und Molche Farben unterscheiden, wobei für sie die grüne Farbe besser erkennbar ist als die blaue. Die gelbe und rote Farbe wird von ihnen überhaupt nicht wahrgenommen, da sie für diese Wellenlänge nicht empfindlich sind. Auch Säugetiere können zwischen bestimmten Farbschattierungen unterscheiden, doch lediglich Affen verfügen über ein ausgesprochen gutes Farbsehen. Merkwürdig in diesem Zusammenhang ist, daß die „Sonnenbrille“ auch kein unbekanntes Patent in der Tierwelt ist. Auf der Netzhaut von Vogelaugen sind Farbfilter in Form von Öltropfen zu finden, die wahrscheinlich das grelle Blau des Firmaments abschwächen und andere Farben hervorheben, so daß sie die Welt bunter und detaillierter sehen als der Mensch.



Merkwürdigerweise nehmen Insekten die rote Farbe nicht wahr, ultraviolette Strahlen hingegen – die für uns unsichtbar sind – erkennen sie genauso gut wie die anderen Farben des Regenbogens. Auf den senkrechten Achsen der einzelnen Diagramme ist das durch Experimente ermittelte Wahrnehmungsvermögen der Insekten (Bewertung von 0 bis 1) für die jeweiligen Farben (Angabe der Wellenlänge in Nanometern) aufgetragen.

Maxwell, der große Physiker, setzte die Mitglieder der englischen Akademie der Wissenschaften im Jahr 1859 mit einer bemerkenswerten Vorführung in Erstaunen. Sein Experiment veranschaulichte, daß die drei Farben Rot, Grün und Blau aufeinanderprojiziert, eine weiße Farbe ergeben und in dieser sämtliche Regenbogenfarben zu finden sind. Ebenso kann aus den drei Grundfarben jede Farbe gewonnen werden, wobei nur auf das Mischverhältnis zu achten ist. Eigentlich schuf diese Erkenntnis die Grundlage für die Farb fotografie. Heutzutage ist der lichtempfindliche 0,2 Millimeter starke Farbfilmüberzug bereits mit 5 Schichten überzogen: Zuoberst die auf die blaue Farbe reagierende Kornschicht, darunter befindet sich der Farbfilter für die gelbe Farbe, die aus dem weiter durchdringenden Licht die überschüssigen blauen Strahlen absorbiert, es folgen die für die grüne Farbe zuständige Schicht, darunter die empfindliche Schicht für die rote Farbe. Die letzte Schicht absorbiert schließlich das noch verbleibende Licht. Nach dem Entwickeln des Films, wobei die Farbschichten fixiert werden, ist das leuchtende Farbdia positiv fertig.

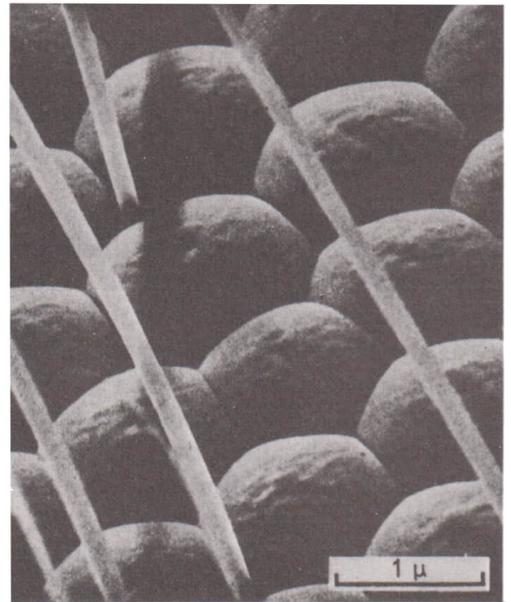
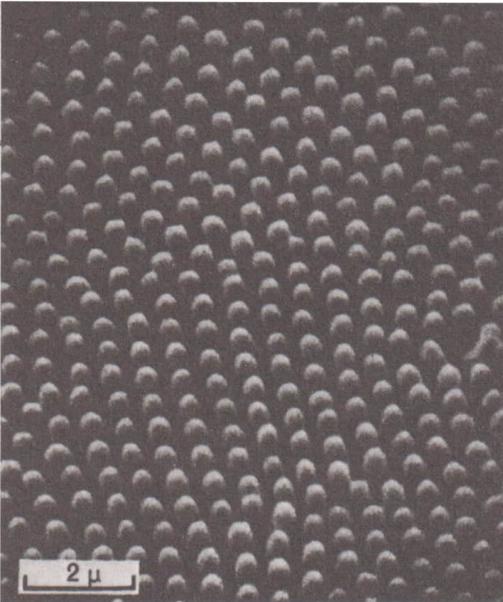
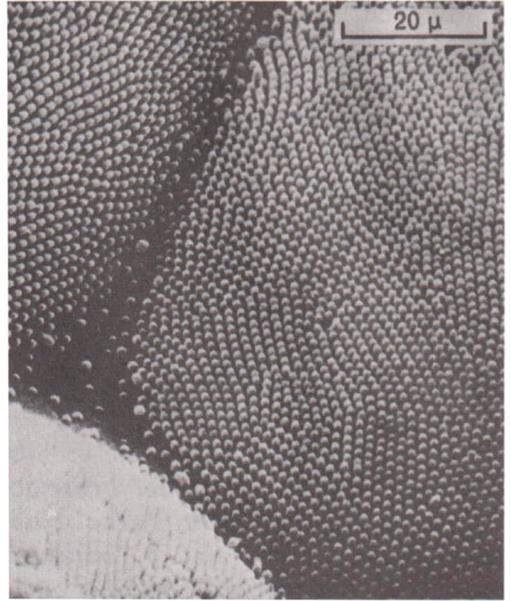
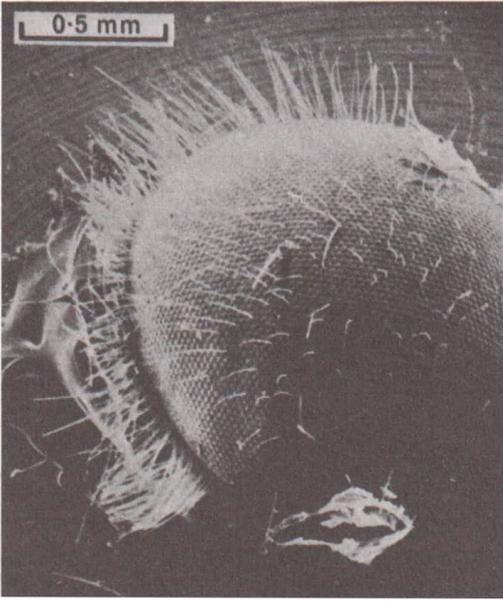
Von anerkannten Forschern wird unter Bezugnahme auf immer mehr Beweismaterial darauf hingewiesen, daß Tiere ihr Farbempfinden im Rahmen des gesamten Farbspektrums in ähnlicher Weise der lichtabsorbierenden Wirkung der drei Farben verdanken. Der amerikanische Forscher W. B. Marks hat zum Beispiel in der Augennetzhaut von Goldfischen dreierlei Arten von lichtempfindlichen Zapfen entdeckt. Diese sind jeweils getrennt für die rote, die grüne und die blaue Farbe zuständig, obwohl sie nicht in der gleichen Menge auf der Netzhaut vorzufin-

den sind, sondern im Verhältnis 2 : 4 : 1, so daß zwei rot empfindliche Zapfen vier grün empfindlichen und einem blau empfindlichen gegenüberstehen. So ist es verständlich, daß das Auge des Goldfisches auf die entsprechenden Wellenbereiche der grünen Farben am empfindlichsten reagiert. D. Burkhardt und H. Autrum hingegen haben die Facettenaugen der zur Familie der Schmeißfliegen gehörenden Insekten untersucht und fanden in je einer Rohrkammer fünf grün empfindliche Sehzellen sowie eine blau- und eine gelbgrün empfindliche Sehzelle. Das steht zwar nicht im Zusammenhang mit dem bekannten farbempfindlichen Wellenbereich der Fliegen, doch es weist darauf hin, daß in den Augen der Tiere alle wahrgenommenen Farben auf das Zusammenspiel der drei Grundfarben in den Sehzellen zurückzuführen sind.

Wenn die Nacht herniedersinkt

Weder der Mensch noch das Tier sehen bei vollkommener Dunkelheit. Selbst Nachttiere nicht. Doch wo herrscht in der Natur vollkommene Dunkelheit? Der Mond leuchtet ständig, sein Licht dringt selbst durch die Wolken. Jene Tiere, welche nach dem Schwinden des Sonnenlichts noch nicht zur Ruhe gekommen sind oder zu dieser Zeit gerade munter werden, legten sich in den Jahrmillionen ihrer Stammesgeschichte einen besonderen „Fotoapparat“ zu, bei dem der schwächste Lichtstrahl nicht verlorengelht, um in ihren Augen ein möglichst helles Bild entstehen zu lassen.

In der Dämmerung öffnet man beim Fotografieren die Blende am Fotoapparat weit. In gleicher Weise öffnen sich



Die Jahrmillionen anhaltende Entwicklung der Nachtfalter führte zu einem einzigartigen optischen Meisterwerk. Im Laufe ihrer Stammesgeschichte hat sich auf jeder Elementarlinse des Facettenauges eine Vielzahl durchsichtiger „Nadeln“ herausgebildet. Mit ihrer Hilfe werden selbst die schwächsten Lichtstrahlen vom Auge erfaßt, wenn die Dunkelheit hereinbricht.

die Pupillen der Tiere. Am Tage bei Sonnenschein steigt demgegenüber die Lichtstärke auf das Tausend-, Zehntausend-, ja Millionenfache an. Entsprechend muß man bei seiner Kamera den Blendendurchmesser verkleinern und eine kürzere Belichtungszeit wählen. Ähnliches bewirken die Pupillen. Den Nachttieren stehen besonders wirkungsvolle Blenden zur Verfügung. Diese können aus der weiten Rundform zum schmalen Schlitz verengt, ja, das Licht kann sogar ganz abgeblendet werden. Die Lebensweise hinterläßt ihre Spuren auch auf der Pupille: In den Augen der Raubtiere schließt sie sich senkrecht zusammen, in den Augen der Pflanzenfresser und Huftiere bildet sie einen waagerechten Schlitz, so beeinträchtigt sie nicht das lebenswichtige große Blickfeld.

Raubtierjäger berichten mitunter grauenvolle Geschichten über funkelnde Nachtaugen. Es ist tatsächlich kein angenehmes Gefühl, wenn in einer Entfernung von einigen Schritt grünleuchtende geisterhafte Augenpaare auftauchen. Doch wegen dieses Anblicks braucht man nicht in den Dschungel zu gehen. Die Augen der Katzen leuchten gelegentlich ebenso wie die der Raubtiere. Leuchten sie tatsächlich? Nein, dies ist nur eine dichterische Übertreibung. Sie reflektieren nur das darauffallende Licht wie die an Schlagbäumen montierten „Katzenaugen“. Das Auge der Nachttiere nutzt nämlich das Licht zweimal aus. Wenn das Licht an den Sehzellen vorbeistrahlt, wird es in der Farbschicht der Netzhaut nicht absorbiert, sondern es prallt auf eine reflektierende Schicht. Dieser Spiegel (Tapetum lucidum) wirft die Strahlen wieder zu den Sehzellen zurück, so sieht das Tier ein helleres

Bild, als es in Wirklichkeit ist, denn jede Sehzelle erhält eine doppelt so starke Belichtung.

Das Sehvermögen des Menschen und der Tiere in der Dämmerung hängt sehr davon ab, wie viele schwarz-weiß-empfindliche Sehzellenstäbchen in ihren Augen enthalten sind. Die meisten Vögel nehmen beispielsweise nur farbige Bilder wahr, da auf ihrer Netzhaut nur farbempfindliche Zäpfchen vorhanden sind. Darum können sie im Dunkeln nicht sehen. Der Lebensrhythmus dieser Vögel ist auf das Tageslicht abgestimmt, sie warten nicht erst die Nacht ab, sondern gehen sehr zeitig bei Sonnenuntergang schlafen. Die Eule jedoch beginnt erst in der abendlichen Dämmerung mit der Jagd. Im Verlaufe der stammesgeschichtlichen Entwicklung erreichten die stäbchenförmigen Sehzellen in ihren Augen die Überzahl. Deshalb sind die Augen der Eulen in der Dämmerung hundertmal lichtempfindlicher als die Augen des Menschen.

Die des Nachts in den Wäldern auf Pirsch befindlichen Jäger wissen, daß man etwas danebenschaun muß, wenn man in der Dämmerung ein Objekt gründlich ins Auge fassen will. Bei dem gewohnten üblichen Blick fällt das Bild nämlich auf den scharfblickenden Bereich der Augennetzhaut, auf den gelben Fleck. Doch hier fehlen die lichtempfindlichen Stäbchen; es sind nur farbempfindliche Zapfen vorhanden. Im Dunkeln entsteht folglich im menschlichen Auge ein weiterer blinder Fleck. Der Eule droht diese peinliche Überraschung nicht. Aus ihrem Blickfeld schwindet das Bild des ausgemachten Opfers deshalb nicht, sie kann, wohin auch immer, schauen: In ihren Augen fehlt der durch die Zapfen verursachte farbempfindliche gelbe Fleck.

Die im Wasser lebenden Tiere wechseln in bemerkenswerter Weise vom farbigen auf das schwarzweiße Sehen um. Nimmt die Lichtintensität ab, ziehen sich die Zapfen in der Netzhaut nach hinten, die Stäbchenzellen hingegen drängen nach vorn. Über ähnliche lichtempfindliche Methoden verfügen auch Nachtinsekten. Am Tag sind die Sehzellen in jeder kleinen Röhrchenkammer des Superpositionsauges unmittelbar unter dem Kristallkegel plaziert. Nachdem jedoch der Abend hereingebrochen ist, schieben sich die lichtempfindlichen Zellen zurück. So gelangt aus jedem Ommatidium Licht auf die umliegenden Sehzellen.

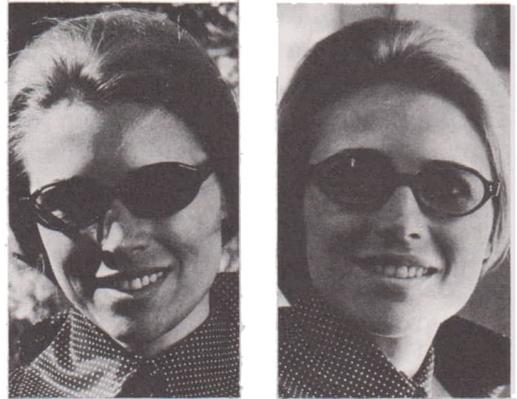
In Auswertung neuester elektronenmikroskopischer Aufnahmen ergab sich eine weitere bemerkenswerte Erkenntnis über die Chitinlinsen von Nachtinsekten in der Größe von 15 bis 40 Mikrometer Durchmesser. Ihre Oberfläche ist nämlich nicht so glatt, wie dies von einer optischen Linse zu erwarten ist! Sie ist mit winzigen Beulen bedeckt, mit kleinen Cornea-Nadeln, wie sie von ihrem Entdecker, dem schwedischen Forscher C. G. Bernhard, benannt wurden. Es handelt sich um 0,1 Mikrometer starke und 0,2 Mikrometer hohe durchsichtige Erhöhungen. Die Chitinlinse eines Ommatidiums am Facettenauge ist kaum größer als der Durchmesser eines Haares; würden wir sie aber millionenfach vergrößern, so entstünde eine riesige Glaslinse mit einem Durchmesser von 15 bis 40 Metern. Jetzt müssen wir uns noch vorstellen, daß man auf diese Linse 10 Zentimeter hohe Trinkgläser aus massivem Glas klebt, dann hätten wir die Cornea-Nadeln in einer überdimensionalen Vergrößerung vor uns.

* 1 Mikrometer = 0,000001 Meter

In der Augenlinse von Taginsekten sind keine Cornea-Nadeln zu finden. Die Oberfläche der Chitinlinse von Libellen, von Bienen, ja sogar von Käfern ist stets vollkommen glatt.

Weshalb sind Nachtinsekten auf diese besonders „geriffelten“ Linsen angewiesen? Forscher vermuten, daß dieses besondere Relief mit dem Kondensationsvermögen der Chitinlinse zusammenhängt. Da es unmöglich gewesen wäre, die Erhöhungen „abzufeilen“, um mit einer glattflächigen Linse vergleichende Messungen durchzuführen, wurde aus Bienenwachs und Paraffin ein vergrößertes Modell konstruiert, und im Verhältnis dazu ersetzte man die Lichtwellen durch Mikrowellen.

Die Bestrahlungsexperimente führten zu einem erstaunlichen Ergebnis: Die Cornea-Nadeln erhöhen das lichtabsorbierende Vermögen der Chitinlinsen! Der große Mangel einer jeden opti-



Je schwächer das Licht auf diese neuartige Sonnenbrille trifft, um so heller werden die Brillengläser, wodurch sie stets eine unveränderlich starke Lichtmenge durchlassen. Ähnlich wie die Linsen der Heliomaticbrillen passen sich auch die Augen der Nachtinsekten der Lichtstärke an.

schen Linse besteht darin, daß sie einen Teil des Lichtes reflektiert! Die Objektive der Fotoapparate werden aus diesem Grund mit einer hauchdünnen Schicht überzogen, weil diese Schicht einen Übergang zwischen dem Brechungsindex der Luft und dem der Linse bildet. So reflektiert die Oberfläche weniger Licht, wodurch mehr Licht durch die Linse dringen kann.

Für Nachtinsekten gilt eine andere Lösung. Mathematische Berechnungen haben ergeben, daß die Maße der Nadeln, ihre Entfernung voneinander in überraschender Weise mit den theoretisch errechneten idealen Werten übereinstimmen. Von diesen Linsen wird das geringstmögliche Licht widergespiegelt und zugleich aber das größtmögliche Licht durchgelassen. Auf diese Weise sammeln Nachtfalter, Netzflügler und einige andere nachtaktive Insekten um ungefähr 5 Prozent mehr Licht in ihren Augen als andere Insekten. Dieses Patent erhöht gleichfalls ihr Sehvermögen in der Dämmerung.

Mikroskopische Kontrolluntersuchungen überzeugten die Forscher davon, daß beispielsweise das Auge der Honigbiene bedeutend mehr Licht reflektiert als das eines Nachtinsekts. Und dies spielt nicht nur beim Sehen, sondern auch beim Verstecken eine wesentliche Rolle. Die am Tag schlafenden Falter würden sich einer großen Gefahr aussetzen, wenn in ihren Augen das Licht aufleuchtete. Die Cornea-Nadeln in ihren Augenlinsen tragen in erheblichem Maße zum Unentdecktbleiben bei, denn sie absorbieren selbst den schwächsten verräterischen Lichtstrahl.

Diese Erfindung der Insekten wurde bis heute von der Technik noch nicht übernommen, doch mit Hilfe moderner Fernsehkameras gelang es bereits,



In mond hellen Nächten ist eine Menschengestalt in einer Entfernung von 500 Metern nicht mehr erkennbar. Ein Nachtfernrohr macht dies aber möglich, denn die eingebaute elektronische Optik verstärkt das Licht auf das 45 000fache.

Nachtsichtgeräte zu bauen, welche selbst die schwächsten Lichtstrahlen in Form von elektrischen Signalen so verstärken, daß im Sucher des Geräts bereits ein taghelles Bild erscheint. Die Technik unserer Tage nutzt sogar schon Wärmestrahlen. Derartige Kameras können selbst im Stockdunkeln vorzüglich sehen, denn in ihnen entstehen um so hellere Bilder, je mehr Wärme das Objekt oder der lebende Körper ausstrahlt. Zur Beobachtung des nächtlichen Verhaltens der Tiere ist jedoch der Einsatz solch komplizierter Geräte nicht erforderlich. Eine rote Lampe genügt auch.

Licht mit Luziferin

In warmen Sommernächten ziehen die vornehmen japanischen Restaurants die Aufmerksamkeit ihrer Gäste dadurch auf sich, daß ihre Besitzer Tausende von Glühwürmchen austreuen, um mit den in der Luft leuchtenden kleinen Laternen eine eigenartig romantische Stimmung hervorzurufen. Der östliche Volksglaube geht nämlich auch heute noch davon aus, daß es sich bei diesen Laternen um kleine Nachlichter armer Studenten handelt. In der Tat, es sind billige Lichtlein, doch vom Standpunkt der Bionik sind sie außerordentlich aufschlußreich, denn sie bewahren das Geheimnis eines nützlichen Patents: die vollkommenste Methode der Herstellung kalten Lichts. Die Glühwürmchen sind freilich in der Tierwelt nicht die einzigen Produzenten von solchem Licht.

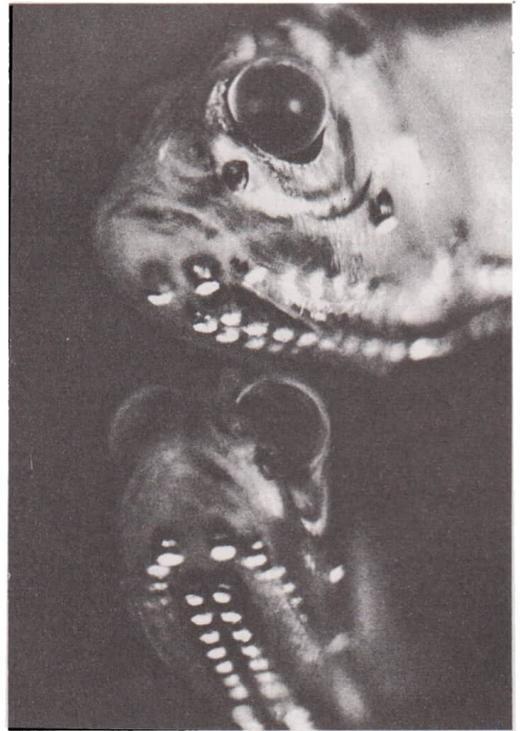
Im vergangenen Jahrhundert schrieb Charles Darwin bei der Umschiffung der südamerikanischen Ostküste in sein Tagebuch: „In der Nähe des La Plata . . . bot uns die See in einer sehr dunklen Nacht ein wundervolles Schauspiel. In dem frischen Wind glühte jeder Teil der wogenden Meeresfläche, den man am Tage als Schaumkrone sah, in einem fahlen Lichte. Das Schiff trieb vor seinem Bug zwei Wogen flüssigen Phosphors her, und sein Kielwasser folgte ihm wie eine Milchstraße. So weit das Auge reichte, leuchtete jeder Wogenkamm erhellt, und der Widerschein dieser blassen Lichte ließ den Horizont heller erscheinen als das übrige Firmament.“*

Dieses Meeresleuchten wird gewöhnlich von winzigen Ur tierchen, den Gei-

* Charles Darwin, Ein Naturforscher reist um die Erde, Leipzig 1957, S. 146

beltierchen, hervorgerufen, doch es gibt in der Tierwelt noch viele verschiedenartige lebende Lichtquellen, die eine gemeinsame Eigenschaft haben, sie strahlen nämlich ohne Wärmeentwicklung Licht aus. Da gerät unsere gute alte Glühlampe weit ins Hintertreffen! Von der verbrauchten elektrischen Energie wandelt sie lediglich 2 Prozent in Licht um, und den größten Teil, 65 Prozent, verschwendet sie in Form unsichtbarer Wärmeausstrahlung, mit dem verbleibenden Rest von 33 Prozent hingegen wird das Glas der Glühlampe erwärmt.

Es ist deshalb verständlich, daß sich Wissenschaftler seit geraumer Zeit für das Problem des von Tieren erzeugten kalten Lichts – der Biolumineszenz –



Der Vinciguerria, eine Tiefseefischart, trägt an der Bauchseite ein Leuchtzeichen. Das in einer Punktreihe auftretende kalte Licht entsteht auf dem Wege einer chemischen Reaktion, der Biolumineszenz.

interessieren. Merkwürdigerweise sind schon einzelne Zellen zur Lichtabgabe in der Lage, was übrigens die weitverbreitetste Beleuchtungsmethode in der Tierwelt ist. Derartige Leuchtstoffe befinden sich zum Beispiel in der Haut von Fischen, und sie führen zu einer besonders charakteristischen Illumination, als handle es sich um einen in der Nacht fahrenden Vergnügungsdampfer. In anderen Fällen trägt dieses Licht zur Nahrungsbeschaffung bei. Im Oberkiefer eines zur Gattung der Schwertfische gehörenden Raubfisches befinden sich beispielsweise rund 350 winzige Lämpchen, und da die Fische – auch heute noch in unergründlicher Weise – sich zum Licht hingezogen fühlen, braucht dieser Fisch nur sein Maul zu öffnen, damit die neugierigen Opfer hineinspazieren.

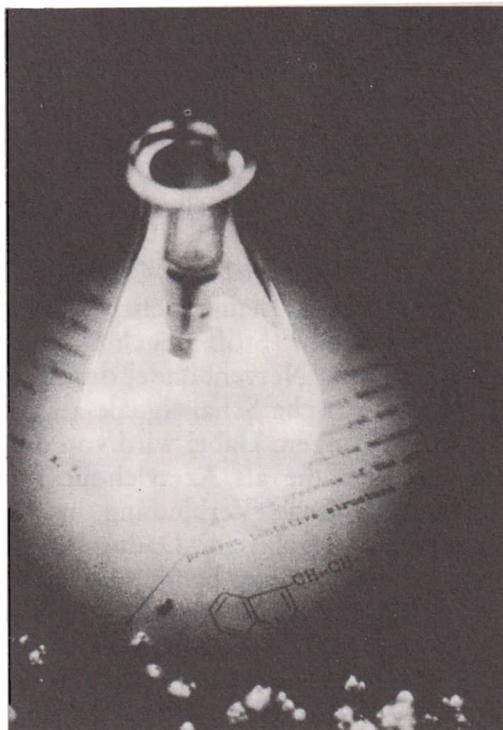
Andere Wassertiere führen wahrhaftig eine Art Taschenlampe mit sich, in der sich hinter den Leuchtzellen eine lichtreflektierende Fläche, davor jedoch ein Farbfilter und eine Kristalllinse befinden.

Einzelne Sepia- und Seemuschelarten suchen hinter Leuchtwolken, die sie ausstoßen, Schutz vor angreifenden Feinden. Bestimmte Fische hingegen dulden symbiotische Leuchtbakterien auf ihrem Körper, wodurch ihnen entsprechende Lichtquellen zur Verfügung stehen.

Diese kaum 1 Mikrometer großen Bakterien strahlen nur wenig Licht aus, zur Lichtstärke einer Kerze müßten vergleichsweise 50 Millionen Tierchen beitragen. Die im Süßwasser lebenden Tiere leuchten bis auf einige Ausnahmen nicht, obwohl sie oft in enger Verwandtschaft zu jenen Arten stehen, die, im Meer lebend, kaltes Licht ausstrahlen.

Zur Enträtselung des Geheimnisses um die Biolumineszenz wurden von dem französischen Professor R. Dubois im vergangenen Jahrhundert die ersten Experimente unternommen. Er wies nach, daß nicht nur Bohrmuscheln, sondern auch einfache Kaltwasserextrakte von ihnen einige Minuten leuchten. Den besonderen Stoff, der dieses Licht aussendet, benannte er nach dem biblischen Boten des Lichts, Luzifer, Luziferin.

Da eine chemische Lichtbildung stets die Folge einer Oxydation ist, strahlt auch das Luziferin, mit Sauerstoff vermischt, Licht aus. Das Luziferin ist jedoch



Der Kolben leuchtet wie eine Glühlampe, obwohl sich darin kein Glühfaden befindet. Chemiker haben darin lediglich Luziferin und Luziferase zusammengeschüttet. Diese Methode der Herstellung von kaltem Licht haben sie von der Natur übernommen.

nicht bereit, sich mit Sauerstoff, Wasser oder Luft sofort zu vereinigen, dies erfolgt erst, wenn ein anderer Stoff in Form eines Katalysators vorhanden ist, der dann schließlich die chemische Reaktion hervorruft. Dieses Ferment, obwohl Professor Dubois seine Zusammensetzung nicht kannte, benannte er Luziferase.

Untersuchungen von Biochemikern zufolge gibt es vielerlei Arten von Luziferin. Jede einzelne Art hat eine andere chemische Zusammensetzung, was auch auf Grund der Spektralanalyse des ausgestrahlten Lichts ermittelt werden kann.

Anfang der sechziger Jahre gelang es zwei japanischen Forschern erstmalig auf der Welt, Luziferin in chemisch reiner Kristallform herzustellen. Um eine Nadelspitze dieses Stoffes zu erhalten, mußten mehr als 4000 Leuchtfische verarbeitet werden. Dadurch konnte Luziferin gründlicher und zielbewußter analysiert werden.

Die Strukturformel des Glühwürmchenluziferins ist heute bereits genau bekannt. Dieser Stoff leuchtet erst, wenn von dem Nervenbündel des Hinterleibs elektrische Schaltsignale an die „Lampe“ erfolgen. Dabei wird von den Nervenenden die als Azetylcholin bekannte chemische Verbindung in die Lichtzellen eingelassen. Dadurch tritt das Luziferin, von der hemmenden Einwirkung anderer chemischer Verbindungen befreit, in eine Reaktion mit dem durch die Luftröhren beförderten Sauerstoff und beginnt dann zu leuchten.

Mit Hilfe dieser Leuchtsignale können sich die auf Paarungssuche befindlichen Insekten im nächtlichen Dunkel leicht erkennen.

Die Oxydation des Luziferins ist die

wirtschaftlichste lichterzeugende Methode in der lebenden Natur: Bei jedem Zerfall eines Luziferinmoleküls entsteht 1 Photon*. Danach setzt das Glühwürmchen die chemische Energie mit dem höchstmöglichen Wirkungsgrad in Lichtenergie um. Doch in den letzten Jahren blieben auch die Chemiker nicht untätig. Nach sechsjähriger Forschungsarbeit haben Experten des amerikanischen Chemiekonzerns Du Pont im Jahr 1968 unter der Bezeichnung PR-155 eine chemische Verbindung hergestellt, die unter Einwirkung von Sauerstoff gleichfalls kaltes Licht ausstrahlt. Mit dieser Lösung durchtränkte Textilstreifen leuchten 2 bis 3 Stunden lang.

Die im Handel angebotene Ware ist luftdicht in Päckchen verpackt und in Form von einzelnen Streifen herausnehmbar. Ihre Lichtstärke ist übrigens gar nicht so gering: Ein Streifen leuchtet mit dem Licht von 4 Kerzen. Die neue Substanz ist nicht nur flüssig erhältlich, sondern auch in Tuben und Spraydosen, so daß damit jedes Material zum Leuchten gebracht werden kann. Wenn es beispielsweise in Tinte aufgelöst wird, kann man damit im Dunkeln schreiben.

Im Grunde genommen übermittelt das kalte Licht in der Tierwelt auch Nachrichten, natürlich nur in einer viel einfacheren „Sprache“. Die Enträtselung der Bedeutung dieser Signale gehört bereits zu einem anderen Forschungszweig.

Tanzende Aufklärer

Erfahrenen Elefantenjägern ist bekannt, daß es nichts Gutes bedeutet,

* kleinstes Energieteilchen einer elektromagnetischen Strahlung

wenn der behäbige Fleischklotz seinen Rüssel waagrecht oder etwas schräg nach oben hält. Das Tier ist furchtbar erregt, und es kann jeden Augenblick angreifen. Wenn der Elefant jedoch seinen Rüssel herunterhängen läßt oder, ein wenig zusammengerollt, mit ihm spielt, ist er befangen oder gar ängstlich.

Der englische Forscher Tinberg hat auf Grund seiner eigenen Beobachtungen ein Miniwörterbuch über die „Zeichensprache“ der Elefanten zusammengestellt, worin er unter anderem bestätigt, daß auch das Sehen Möglichkeiten zum „Sprechen“ der Tiere bietet, freilich nur in begrenztem Rahmen. Mit ihren Bewegungen sagen sie eher etwas über sich selbst aus. Im allgemeinen drücken sie damit mehr ihre Stimmung aus, als daß sie eine für andere verständliche Information weiterleiten möchten. Bewegungen sind in erster Linie bei der Liebeswerbung von Bedeutung. Fische und Vögel bewegen sich hierbei auf der Grundlage einer wahrhaft uralten Choreographie.

Den merkwürdigsten Tanz veranstalten jedoch Bienen. Und nicht einmal während der Paarungszeit, sondern während der Arbeit! Bei den Bienen fand man zuerst heraus, daß durch die Zeichensprache ihrer Bewegungen eine Information weitergeleitet wird. Professor K. Frisch untersuchte die Tanzsprache der Bienen und entdeckte dabei immer neue Einzelheiten.

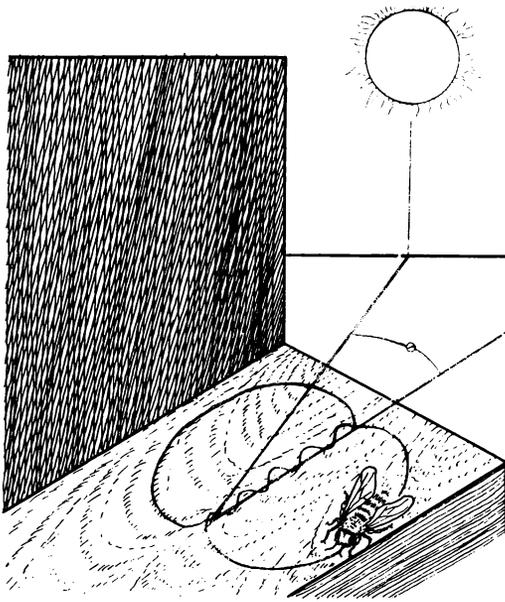
Diesen Untersuchungen zufolge bleibt ein mit Zuckerwasser gefüllter Behälter unberührt, wenn er in einer größeren Entfernung vom Bienenstock aufgestellt wird. Stößt jedoch eine Biene zufällig darauf, kehrt sie in den Bienenstock zurück, worauf innerhalb kurzer Zeit mehrere hundert Bienen fleißig um die Süßigkeit schwärmen.

Werden drei Zuckergefäße zugleich aufgestellt und nimmt die Entdeckerin nur das dem Bienenstock am nächsten liegende wahr, fliegen die anderen Bienen, die sich später auf den Weg begeben, ebenfalls zum nächsten Gefäß. All dies beweist, daß die entdeckende Biene auf irgendeine Weise ihre Gefährtinnen über die neue Nahrungsquelle informiert. Doch wie vermittelt sie Richtung und Entfernung?

Wie beobachtet wurde, veranstaltet sie auf dem vor dem Eingang zum Bienenstock befindlichen Flugbrett einen Tanz. Sie zeichnet, mit ihrem Hinterleib schwänzelnd, in der Weise eine Schleife in Form einer Acht, daß der mittlere Teil der Acht in Richtung des Fundorts weist.

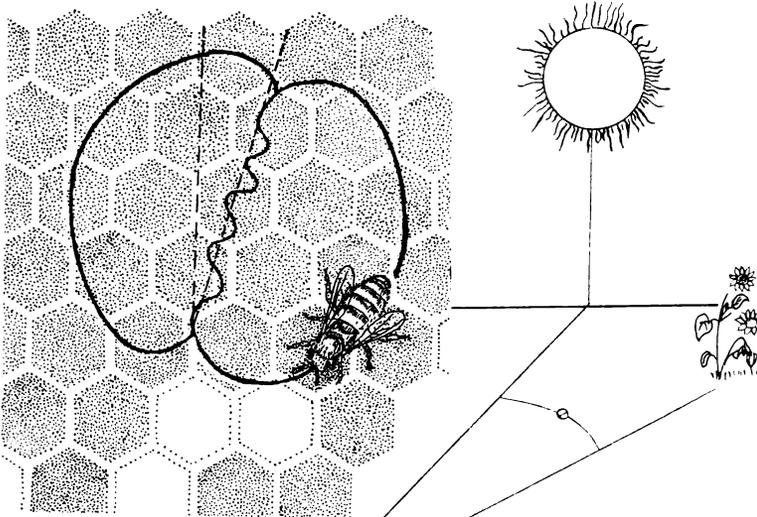
Die Richtungweisung wird allerdings mitunter auch in einer komplizierteren Variante vollzogen. Bei kühlem Wetter zieht sich die Entdeckerin in das Halbdunkel des Bienenstocks zurück und führt den gleichen Tanz an der senkrechten Wand auf. Dabei weicht der mittlere wellenförmige Teil der Acht im gleich großen Winkel von der Senkrechten ab wie der in waagerechter Richtung, vom Bienenstock aus betrachtet, liegende Winkel zwischen dem Nektar und der Richtung der Sonne. Wenn zum Beispiel der Fundort in einem Winkel von 60 Grad links von den Sonnenstrahlen liegt, befindet sich auch der mittlere Teil des eine Acht tänzelnden Hinterleibs in einem Winkel von 60 Grad zur Senkrechten.

Eingehende Analysen von Filmaufnahmen über den Tanzflug der Bienen gaben Aufschluß über diese merkwürdige Nachrichtenübermittlungsmethode. Später haben Professor Frisch und seine Mitarbeiter sogar die Bienen mit einer kleinen Konstruktion in Form



Die am Eingang vor dem Bienenstock tanzende Biene weist mit der mittleren Wellenlinie in Richtung des Nektarfundorts (1). Bei kühler Witterung tanzt die Entdeckerin ihren Tanz auf der Wabe in senkrechter Richtung. Hierbei weist der zur senkrechten Geraden gebildete Winkel in Richtung des Nahrungsfundes (2).

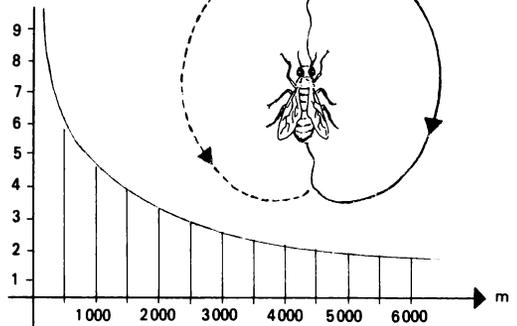
1



2

Im Verlauf des Schwänzeltanzes beschreibt die entdeckende Biene in der Mitte der Doppelschleifen Wellen, indem sie mit ihrem Hinterleib hin- und herschwenkt. Je schneller ihr Hinterleib sich bewegt, um so näher liegt das Blumenfeld. Die Anzahl der Wellen (innerhalb von 15 Sekunden) signalisiert den übrigen Bienen die voraussichtliche Entfernung des Weges.

Welle/15 Sekunden



einer Bienenimitation betrogen. Die Konstruktion vollführte den Schwänzeltanz im Bienenstock, und die Bienen gingen auf die Information ein. Sie entschieden sich beim Starten auf dem vor dem Bienenstock befindlichen Flugbrett für die Richtung, die sie von der Maschinen-Biene „erfahren“ hatten.

Doch der Schwänzeltanz avisiert nicht nur die Richtung des Fundorts, sondern auch die Entfernung. Je näher sich die blühende Wiese befindet, um so schneller bewegt die Entdeckerin ihren Hinterleib. Ihr Körper zeichnet Wellen im mittleren Teil der Acht, wobei aus der dabei angewandten Schnelligkeit die Entfernung hervorgeht.

Entsprechend den Messungen von Professor Karl von Frisch bedeutet es für die anderen Honigbienen, daß die Nektarquelle ungefähr 100 Meter entfernt liegt, wenn die entdeckende Biene mit ihrem Hinterleib in 15 Sekunden 9,5 Wellen beschreibt. Schwingt sie in der gleichen Zeit nur 4,8mal ihren Hinterleib, bedeutet dies eine Entfernung von 1 Kilometer, eine Entfernung von 11 Kilometern hingegen wird mit insgesamt 1,4 Wellenbewegungen angekündigt.

Als die Experimente an einem Bergkamm in der Nähe von Salzburg durchgeführt und das Nektar enthaltende Gefäß an der anderen Seite des Berges aufgestellt wurde, konnte eine noch merkwürdigere Erkenntnis gewonnen werden.

Die Entdeckerin kehrte in den Bienenstock zurück und wies auf Grund ihres Schwänzeltanzes zur größten Überraschung der Biologen in die Richtung über den Berg hin, als würde sie auf irgendeine unsichtbare Landkarte weisen.

Noch erstaunlicher war es jedoch, daß sie nicht jene Entfernung anzeigte, die sie durch das Umfliegen des Berges zurücklegen mußte, sondern sie signalisierte die Entfernung entsprechend der Luftlinie. Nach der „Informationsübermittlung“ der Entdeckerin flogen die anderen Bienen sofort aus. In waagerechter Richtung fliegend, wichen sie dem Berg aus und stießen ohne Bedenken und Zeitverlust auf das Nektargefäß.

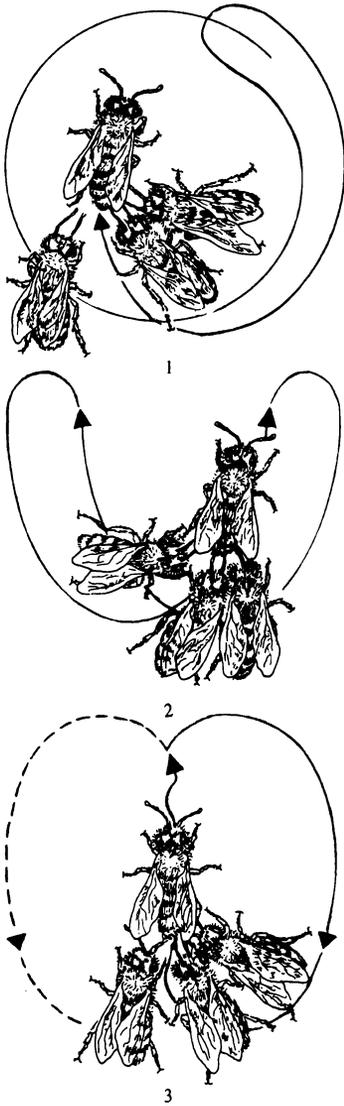
Die Information war so verlässlich und genau, daß die Bienen insgesamt nur um 2,5 Grad vom richtigen Weg zur Nektarquelle abwichen.

Im Rahmen der Versuchsreihe wurden die anlockenden Gefäße an verschiedenen Stellen aufgestellt, wobei sich eine neue Überraschung ergab. Durch die Informationen der Entdeckerin inspiriert, machten sich die Bienen wieder auf den Weg, doch jetzt flogen sie über den Berg hinweg. Auf Grund der darauffolgenden Messungen stellte es sich heraus, daß der waagerechte Flug um den Berg weiter war als der steile Flug über den Berg. Sie entschieden sich deshalb für den senkrechten Weg. Wie haben sich die Bienen diese minimale Differenz errechnet?

Das ist bis heute noch ihr Geheimnis geblieben.

Bienen ist nicht nur der Schwänzeltanz bekannt. Liegt die Nektarquelle sehr nahe am Bienenkorb, veranstalten sie nur einen glatten Rundtanz, wobei sich die Richtung des Kreises oft ändert. Befindet sich jedoch der Nektar in einer Entfernung von 10 bis 100 Metern, führen sie einen Sichelanz auf, was als Übergang vom Rundtanz zum achtförmigen Schwänzeltanz anzusehen ist.

Anfangs experimentierte Professor Frisch nur mit schwarzen österreichi-



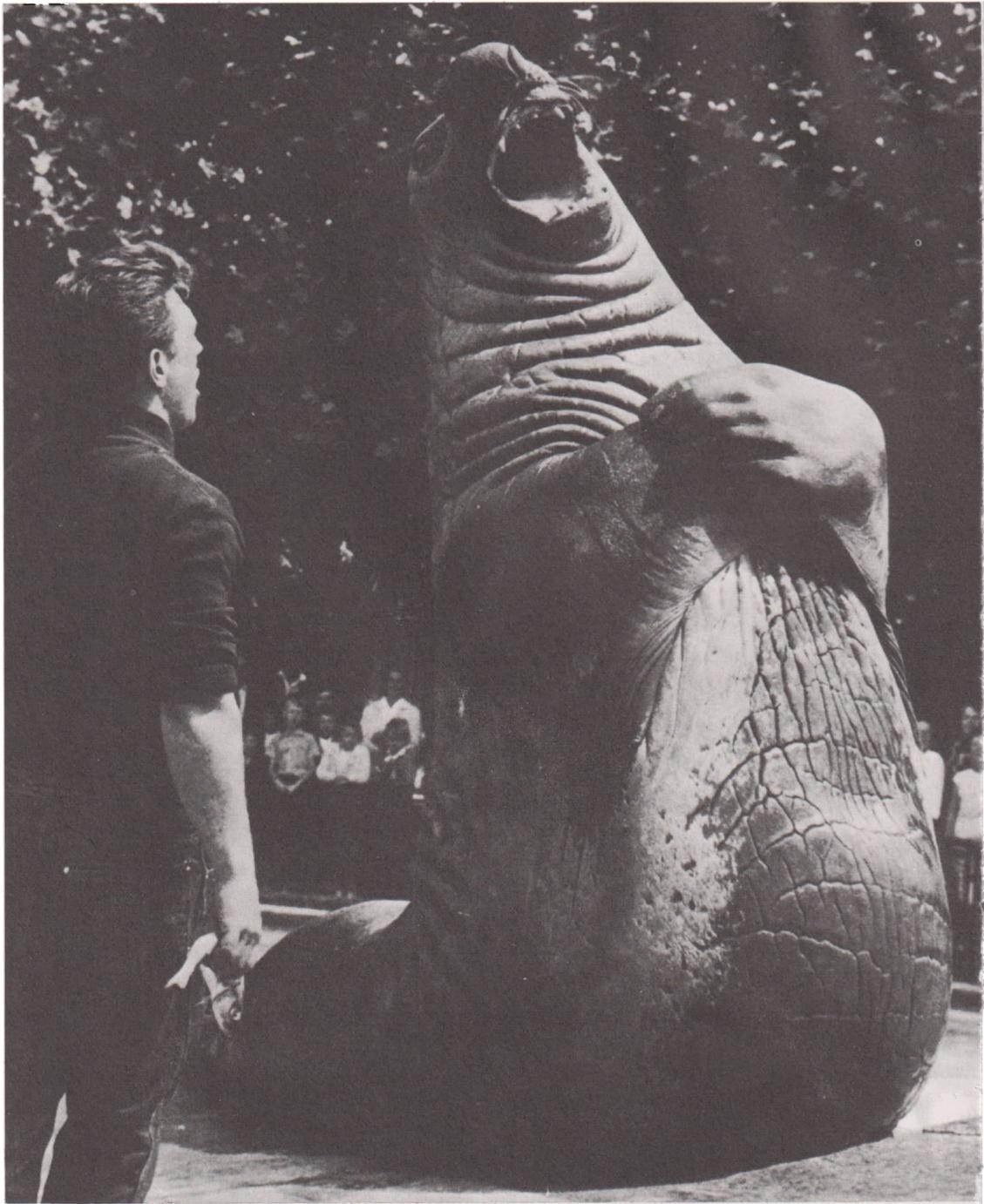
schen Honigbienen. Diese Bienen wechseln vom Rundtanz schnell zum Schwänzeltanz über, wenn die Nahrungsquelle weiter als 86 Meter vom Bienenstock entfernt ist.

Im Laufe der späteren Untersuchungen mit anderen Bienen wurden die bereits erwähnten drei Tanzformen ebenfalls beobachtet, wobei es sich jedoch herausstellte, daß Bienen über keine gemeinsame „Weltsprache“ verfügen, sondern landschaftsweise verschiedene „Dialekte“ sprechen. Italienische Arten der europäischen Honigbienen tanzen den Rundtanz bis zu einem 9 Meter entfernten Fundort. Bei einer Entfernung bis zu 36 Metern entscheidet man sich für den Sichelanz, liegt jedoch der Fundort noch weiter, dann gehen sie zum Schwänzeltanz über. Für die indischen Honigbienen scheint die genaue Kenntnis der Entfernung lebenswichtig zu sein, denn sie können sich nicht mal in unmittelbarer Nähe von Blumen durch den Duft von Blütenstaub und Nektar orientieren; sie signalisieren bereits einen über 3 Meter entfernten Fundort durch den Schwänzeltanz, während die südostasiatischen Riesenbienen erst bei einem 4,5 Meter entfernten Fundort mit ihren Tanzbewegungen beginnen.

Zwergbienen, die so klein sind, daß sie leicht mit Flugameisen zu verwechseln sind, nutzen nur primitivste Varianten der Nachrichtenübermittlung: Sie sind nur auf einer waagerechten Oberfläche imstande, Informationstänze durchzuführen. Wird jede waagerechte Fläche aus der Nähe ihres Stockes entfernt, sind sie nicht in der Lage, Informationen über das Auffinden von Nektarquellen weiterzugeben. Ihnen ist die Methode des senkrechten Tanzes noch nicht bekannt. Vielleicht machen sie

Liegt die Nektarquelle nahe am Bienenstock, wird dies von der Entdeckerin durch einen einfachen Rundtanz signalisiert, in dem sie die entsprechende Richtung im Kreis anzeigt. Dabei finden die anderen Bienen durch den Duft des Blütenstaubes leicht dorthin (1). Der Sichelanz bedeutet, daß sich der Nektar bis zu einer Entfernung von 100 Metern befindet (2). Ist die Entfernung noch größer, gibt der Schwänzeltanz Aufschluß über Richtung und Entfernung des Nektars (3). Inzwischen machen die anderen Bienen die Bewegungen der nachrichtenübermittelnden Biene nach und kosten an dem ihr anhaftenden Blütenstaub.

sich in einigen Millionen Jahren auch kompliziertere Methoden zu eigen, wenn sie der Kampf ums Dasein dazu zwingt.



Der See-Elefant des Stuttgarter Tierparks „singt“ mit voller Inbrunst. Tiere geben Laute von sich, für die auch ihre eigenen Ohren empfindsam sind. Vermutlich haben sich die stimmbildenden und klangempfindlichen Organe im Laufe der Stammesgeschichte parallel entwickelt.

Klänge um die Erde

Nicht selten dröhnen auch noch in unseren Tagen in den Dörfern am oberen Kongo die Trommeln wie vor einem Jahrhundert, als H. M. Stanley auf die Suche nach dem verschollenen Afrikaforscher Livingstone aufbrach. Stanley vermerkte damals in seinem Tagebuch, daß sein Weg am Kongofluß entlang vom Klang der Trommeln begleitet wurde. Die benachbarten Stämme verständigten sich mit Hilfe der Trommelsprache über den jeweiligen Aufenthalt des Forschers und darüber, wann er seinen Weg fortsetzte. Der „Trommeltelegraf“ ertönt jetzt zwar seltener, doch die Eingeborenen kennen die einzelnen Signale heute noch genausogut wie den Wortschatz ihrer eigenen Sprache.

Auch in der Tierwelt ist der Laut eine wichtige Quelle der Nachrichtenübermittlung. Beim Aufschrei eines Raben bei Gefahr erhebt sich die ganze Schar wie aufgeschreckt in die Luft, das Krokodilweibchen hingegen befreit sein Junges selbst aus einer Falle, wenn es die hilfeheischende Stimme hört. Doch die Tiere nutzen ihre Stimme nicht nur zur Nachrichtenübermittlung, sondern auch zur Orientierung, wenn die übrigen Sinnesorgane bereits versagt haben. Ihr sensibles „Mikrofon“ ist vielseitig: Einzelne Arten nehmen nur Zeichen und Laute von Artgenossen der eigenen Gemeinschaft wahr, andere hingegen informieren sich über die unsichtbar vor sich gehenden Ereignisse in der Umgebung. Das Gehör der Vögel und Säuge-

tiere ist das einzige Sinnesorgan, das selbst in der Nacht, im Schlaf, auf „Alarmbereitschaft“ geschaltet ist. Die Katze richtet ihr Ohr im Schlaf sofort in die Richtung aus, aus der ein Geräusch kommt.

Eine große Anzahl der Tiere beschafft sich zu 99 Prozent mit Hilfe des Lichts ihre Informationen, doch oft leisten auch Stimmen beziehungsweise Geräusche gute Dienste. Das Licht kann beispielsweise sehr leicht durch ein Hindernis unterbrochen werden, der Schall hingegen vermag mühelos Steinen oder Pflanzen auszuweichen, deshalb kommt er zuweilen weiter als das Licht. Der Schall ist im Grunde genommen nichts anderes als die wellenförmige, rhythmische Bewegung sehr kleiner Teile der Materie, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit davon abhängt, in welchem Medium sie fortschreitet. Im Wasser bewegt sich der Schall fast fünfmal schneller fort als in der Luft. Dadurch erhalten Wasserbewohner ihre Informationen schneller, doch unter gewissen Umständen auch schwieriger. Der Erdboden ist für Schallschwingungen ebenfalls ein gutes Medium. Es ist kein Zufall, daß einst Indianer den Boden abhorchten, um das Pferdegetrappel ihrer Verfolger wahrzunehmen.

Im Verlauf der Stammesentwicklung haben sich die verschiedenen „Hörapparate“ immer mehr verfeinert und vervollkommenet; es wurden ständig neue Abstufungen im Rahmen der Lautzei-

chen entwickelt. Primitive Tiere können im Grunde genommen keine Laute hören, sie nehmen lediglich Schwingungen wahr. Dafür sind sie in dieser Hinsicht jedoch derart sensibel, daß sie sich zum Beispiel beim Klopfen an einem Glasbehälter, in dem sie untergebracht sind, sofort in ihre „Diogenes-Röhre“ zurückziehen.

Für uns zählt nur eine Schwingung als Laut, wenn wir sie hören. Bis zum Alter von 20 Jahren reicht der Hörbereich beim Menschen im allgemeinen von 16 bis 20 000 Hertz*. Im späteren Alter sinkt die Sensibilität gegenüber hohen Tönen, deshalb trifft die Annahme zu, daß als Wert des menschlichen Hörvermögens im Greisenalter im allgemeinen die Frequenz von 16 bis 16 000 Hertz zutrifft.

In Wirklichkeit treten freilich auch Töne auf, deren Frequenz kleiner als 16 und größer als 20 000 Hertz ist. Physiker bezeichnen die unterhalb der unteren Grenze des menschlichen Hörbereichs liegenden Töne als Infraschall, die über dem oberen Bereich liegenden Töne hingegen als Ultraschall. Doch der Tierwelt gelang es mit zahlreichen Erfindungen, auch in den sich im Unendlichen verlierenden Schwingungsbereich einzudringen!

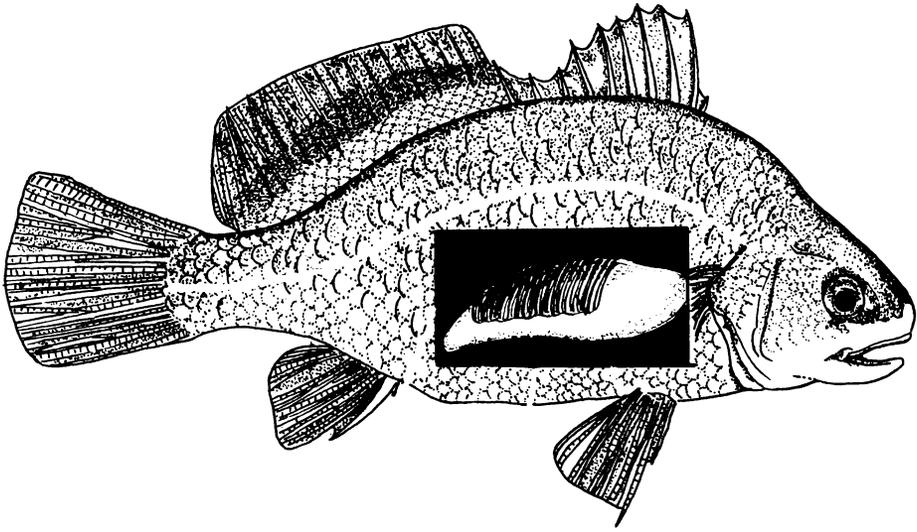
Schwimmende Raspeln und Trommeln

Im Frühjahr des Jahres 1942 wurden am Eingang der amerikanischen Chesapeakebay Unterwassermikrofone von technischen Truppenverbänden zur Ortung feindlicher Unterseeboote montiert.

* 1 Hertz = 1 Schwingung je Sekunde

Die sogenannten Hydrophone sind hauptsächlich gegenüber dem sich im Wasser ausbreitenden Schall sensibel, so daß sie die Dieselmotoren der Unterseeboote, die ein lautes Geräusch hervorrufen, leicht wahrnehmen, obwohl davon über der Wasseroberfläche kaum etwas zu hören ist. Der Wachdienst des Küstenschutzes richtete von diesem Zeitpunkt sein Augenmerk gespannt auf jedes geringste Geräusch aus der Tiefe der Bucht. Es waren jedoch keine Signale zu hören! Eines Tages dagegen drangen merkwürdige Geräusche aus der Tiefe des Meeres. Es wurde sofort Alarmbereitschaft ausgelöst. Aufmerksam wartete man auf auftauchende Unterseeboote, doch um Mitternacht verstummten die geheimnisvollen Geräusche. Was konnte in der Tiefe der Bucht geschehen sein? Taucher stiegen ins Wasser hinab und versuchten vorsichtig, den Dingen auf den Grund zu gehen. Doch sie konnten nichts feststellen. Am nächsten Tag war das merkwürdige Geräusch wieder zu hören. Es folgte eine noch eingehendere Untersuchung, doch ohne Ergebnis! Schließlich wurde das Rätsel von Biologen gelöst: In der Bucht befindet sich der Laichplatz der Trommelfische, die alljährlich zum Laichen hierherziehen. Es fanden sich an die 300 Millionen Tiere ein, die mit ihren schwingenden Schwimmblasen die verdächtigen Geräusche auslösten. Damit wurde zum erstenmal bewiesen, daß die Welt der Stille doch nicht so still ist, wie man bisher angenommen hatte.

Die akustischen Unterwasserminen des zweiten Weltkriegs, welche durch das Motorengeräusch der über sie hinwegfahrenden Wasserfahrzeuge explodierten, waren gegenüber den Geräuschen der über sie hinwegschwimmenden Fische genauso empfindlich.



Der Trommelfisch zieht seine Schwimmblase in der Sekunde zweimal zusammen. Dadurch verbreiten sich Geräusche im Wasser, als klopfe jemand ohne Unterlaß. Die auf die Schwimmblase drückenden Muskeln reagieren auf entsprechende elektrische Nervenbefehle.

Manchmal explodierten sie vermeintlich ohne Ursache. Erst später stellte es sich heraus, daß der zerstörende Mechanismus der Minen durch die Schallgeräusche der Fische getäuscht wurde. Seither haben bereits unzählige Tonbandaufnahmen und Versuche gezeigt, daß die Bewohner der Gewässer keinesfalls stumm sind.

Es stimmt zwar, daß Fische keine Stimmbänder haben, das hindert sie jedoch nicht daran, Laute in unterschiedlichen Frequenzen von sich zu geben. Man kann sogar sagen, daß sie mit „Sang und Klang“ musizieren. Der Teufelsfisch beispielsweise bringt die seitliche Membrane der Schwimmblase mit Hilfe seiner Muskeln in Schwingungen, wodurch gleichzeitig die gasgefüllten Moleküle zu vibrieren beginnen und der Fisch surrende Laute wie das Nebelhorn eines nahenden Schiffes ausstößt. Wenn

die herausoperierte Schwimmblase des Teufelsfisches in ein mit Meerwasser gefülltes Gefäß getan und das Gefäß unter elektrischen Strom gesetzt wird, kann man die gleiche Reaktion registrieren. Die Muskeln ziehen sich rhythmisch zusammen, und es entstehen die gleichen Geräusche wie beim Fisch im Wasser.

Könnte jemand in einer Sekunde zweihundertmal einen Trommelschlegel rühren, gelänge es ihm, die Stimme der Rotbrasse nachzuahmen. Dieser Fisch bedient sich freilich anstatt der Trommelschlegel der dünnen Trennwand seiner Schwimmblase, an der sich ein kleines Loch befindet. Mit der Bewegung des Schwimmblasenmuskels wird die Luft zweihundertmal in der Sekunde durch dieses Loch ein- und ausgepreßt. Die Membrantrennwand beginnt dadurch zu vibrieren, wobei der

Ton durch die Resonanz der Schwimmblase noch verstärkt wird. Der europäische Bogenflosser ist auf Trommelschlegel gar nicht angewiesen. Ein „Fenster“ seiner Schwimmblase befindet sich nämlich genau unter der Brustflosse. Sobald er mit der Brustflosse darauflschlägt, sind dumpfe Schläge im Wasser zu hören. Umberfische hingegen bedienen sich ihrer „Saiteninstrumente“: Sie bringen straffgezogene Muskelfäden zwischen Schädel und Rückgrat zum Schwingen.



Als die Redewendung „stumm wie ein Fisch“ entstand, glaubten die Menschen tatsächlich noch, daß im Wasser absolute Stille herrsche. Hydrophonische Messungen ergaben jedoch, daß auch Fische zu „lärmern“ imstande sind. Der Papageifisch beispielsweise löst mit seinen aufeinander reibenden Zahnreihen knirschend-schnarrende Laute aus.

Eine andere Gruppe der Wasserbewohner gibt knarrende Laute von sich. So reiben Stachelfische im allgemeinen ihre parallel verlaufenden Schlundzähne aneinander, was etwa in der Weise wie das Hin- und Herziehen eines straffen Reißverschlusses vor sich geht. Durch Schallübertragung auf die Schwimmblase entsteht im Wasser ein starkes Getöse, als würden Schiffstrümmere aufeinanderreiben. Die knirschend-schnarrende Stimme des Papageifisches entsteht durch das Aneinanderreiben der Zahnknochen, der Bogenfisch hingegen gibt durch das Knirschen seiner scharfen Schneidezähne Laute von sich.

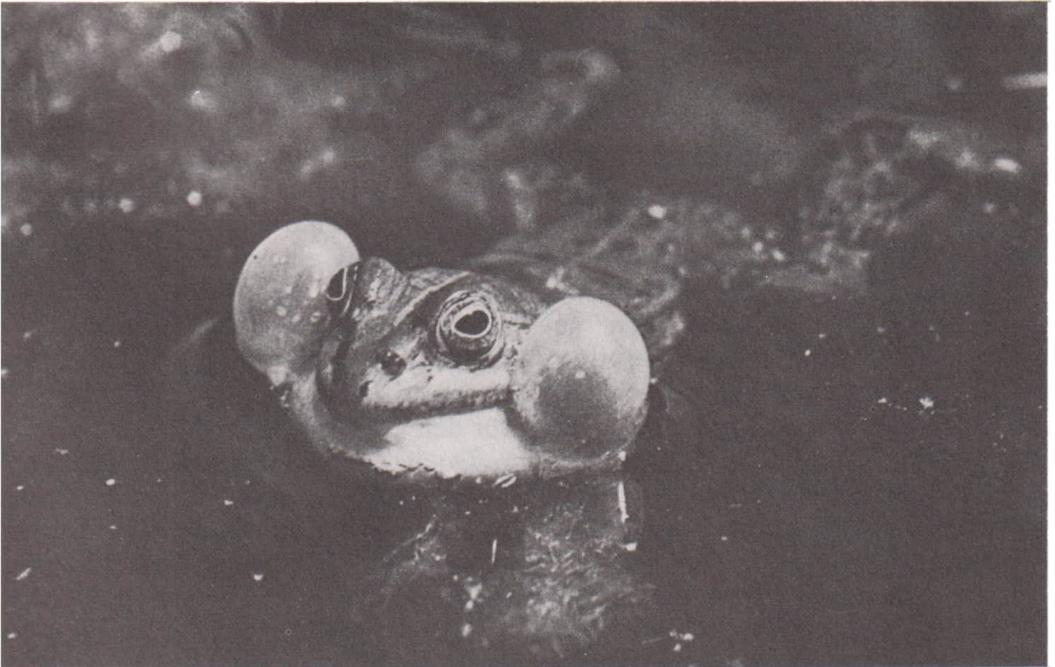
Die verschiedenen im Wasser vor sich gehenden Bewegungen sind gleichfalls mit Geräuschen verbunden. Eine Krebsart gibt beispielsweise beim Nahen einer Gefahr ein Gedröhn wie ein unter Wasser arbeitender Kesselschmied von sich. Die kleineren Muscheln begnügen sich mit dem Geräusch einer zuschlagenden Tür. Das Tierstimmenarchiv der Berliner Humboldt-Universität verfügt sogar über die Stimme eines Walroßmännchens, die an den Gongschlag zu Beginn einer Theatervorstellung erinnert. Auf ein noch merkwürdigeres Geräusch sind Forscher vor einigen Jahren aufmerksam geworden. Die Riesen der Ozeane, die Blauwale, geben zeitweise im Abstand von 20 Sekunden ein dumpfes Gedröhn von sich. Wie entstehen diese Laute? Ein amerikanischer Biologe konnte dieses Geheimnis lüften: Es sind die Herzschläge des Wals. Das 2,5 Dezitonnen schwere Herz dieses Säugetiers hat fast 8 Tonnen Blut zu befördern, so daß es vergleichsweise die Leistung eines 7,5-Kilowatt-Motors vollbringen muß. Das Dröhnen des „Motors“ ist stets dann zu hören, wenn der Wal sein Maul aufreißt, um in den

2000 Liter fassenden Magen die aus Plankton bestehenden Massen an kleinen lebenden Organismen einzusaugen.

In der Welt des Wassers bevorzugen die Meister der musizierenden Raspeln tiefere Töne, wobei es sich dabei eher um lärmende Geräusche als um Töne handelt. In der Regel werden mit dem Knirschen der Zähne und dem Aneinanderreiben der Brustflossen Laute erzeugt, die zwischen 100 und 8000 Hertz liegen. Fische, die zur Verstärkung ihrer Laute die Schwimmblase benutzen, rattern innerhalb eines Klangbereichs von 1000 und 8000 Hertz. Durch das unmittelbare Vibrieren der Schwimmblase kommt ein noch tieferer

Klang zustande. Der Rote Stachelhais zum Beispiel strafft und entspannt die Schwimmblase bei jedem „Schrei“ innerhalb von 5 Hundertstelsekunden fünfmal, so daß dadurch ein Ton mit einer Frequenz von ungefähr 100 Hertz entsteht. Eine bestimmte Art der Stachelwelse bringt ihre Schwimmblase in noch schnellere Schwingungen: Dabei ist ein 150 Hertz starkes eigenartiges „Knurren“ zu hören, das sogar 12 Sekunden lang anhalten kann. Dorsche hingegen sind die Bassisten der Wasserwelt: Ihre Schwimmblase vibriert in der Sekunde vierzig- bis fünfzigmal.

Der Teufelsfisch unterscheidet sich mit einer erstaunlichen Lautstärke in



Die Stimme der Amphibien spielt vor allem bei der Paarung eine wichtige Rolle. Selbst miteinander verwandte Arten ziehen die Aufmerksamkeit durch verschiedene Rufe in unterschiedlichen Frequenzen auf sich. An diesem schwimmenden Frosch befinden sich beidseitig die charakteristischen Schallblasen, welche die aus der Kehle hervordringenden Töne durch rhythmische Schwingungen verstärken.

dem lärmenden Meereschor. Seine an ein brummendes Nebelhorn erinnernde Stimme ist im Wasser selbst in einer Entfernung von 5 Metern in einer Lautstärke zu hören, die der eines angeworfenen Propellers eines Flugzeugs ähnelt. Die Tonhöhe bewegt sich im allgemeinen von 75 bis 300 Hertz, bestimmte Ruflaute können sogar 4800 Hertz erreichen. Auf den Bahamas jedoch erschrecken selbst die Eingeborenen, wenn der furchterregende Schrei des Teufelsfisches mit einer Frequenz von 6000 Hertz über das Wasser hinwegfegt.

Vor Millionen Jahren haben vermutlich Frösche erstmals die Stille des Festlands unterbrochen. Sie verfügen wahrlich über keine schöne Stimme! Sie lassen aber in jedem Frühling die Froschserenaden auf ihren Stimmbändern erklingen. Dabei werden die rhythmischen Schwingungen der aus der Lunge vordringenden Luft durch die Schallblase verstärkt. Bei der Schallblase handelt es sich um den umgestülpten Teil der Schleimhaut des Rachens, welcher gut zu sehen ist, wenn sich der Frosch „aufbläst“. Wie beobachtet wurde, singen Froschmännchen gewöhnlich nicht allein, sondern sie bilden ein Gesangstrio. Sie setzen abwechselnd mit ihrem Konzert ein, so daß sich das vom Gesang faszinierte Weibchen gleichzeitig für den geschicktesten Sänger unter den drei Kavalieren entscheiden kann.

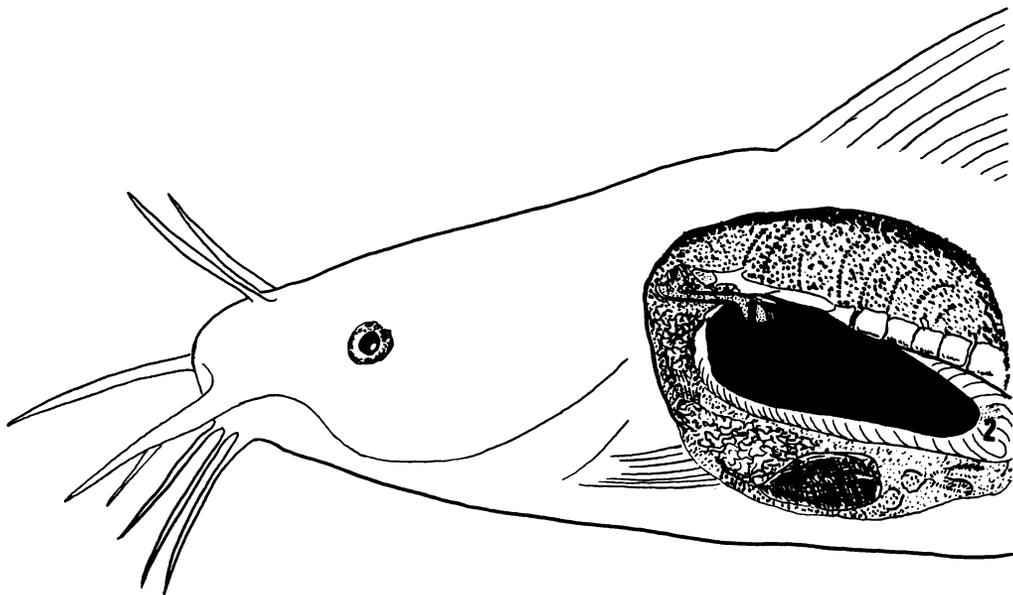
Die Frequenz der sich in die Luft erhebenden „Froschserenade“ variiert innerhalb einer ziemlich engen Grenze. Kröten quaken normalerweise mit Lauten, die sich in einer Frequenz zwischen 2510 bis 2700 oder 2000 bis 2300 Hertz bewegen. Krötenfrösche hingegen geben Laute von sich, die dem Knallen

eines Tischtennisballs beim Aufschlag auf der Platte ähneln. Obwohl bei diesem Geräusch die Schwingung von 1500 Hertz am lautesten zu hören ist, was sogar die Stimme einer Sopranistin übertrifft, klingt das Quaken dennoch unmusikalisch, da darin die gesamten übrigen höheren Frequenzen bis 7000 Hertz vorzufinden sind. Selbst die als stumm bekannten Salamander sind ab und zu imstande, bellende Töne von sich zu geben. Der kalifornische Salamander versucht, nahende Feinde mit 0,3 Sekunden anhaltenden, bei ungefähr 3100 Hertz liegenden Schreien Angst einzujagen. Welchen Erfolg er dabei hat, konnten die Wissenschaftler bisher noch nicht eindeutig feststellen.

Was hört der Fisch?

Es gibt keinen Biologen, dem nicht bestimmte Tiere besonders ans Herz gewachsen sind. Konrad Lorenz schloß enge Freundschaft mit Gänsen; Karl von Frisch, Entdecker des Bienentanzes, gelang es, einen Zwergwels zu zähmen. Wenn er am Ufer eines Teiches spazierenging, erschien der Fisch bereits wie ein treuer Hund auf einen einzigen Pfiff. Sind da noch mehr Beweise für den Gehörsinn der Fische nötig?

Doch, das ist erforderlich, denn der anatomische Aufbau der Fische verrät nicht viel darüber, wie sich die Schwingungen in Form von Tönen in den Druckwellen des Wassers verbreiten. Das Innenohr der Fische ist nämlich nicht so weit entwickelt wie das der Säugetiere. Der übliche Schneckengang des Ohres, in dem durch die besondere, dem Meereswasser ähnelnde Flüssigkeit die Schallschwingungen mit Hilfe winziger Empfindungsnerven in elektrische



Der Zwergwels, ein „Abhorch“experte der Wasserwelt. Aus der in einzelne Kammern geteilten Schwimmlase (2) werden die Schallschwingungen durch das Webersche Gefüge (1) weitergeleitet, das aus einem größeren und drei kleinen Knöchelchen besteht.

Signale umgewandelt werden, besteht bei Fischen lediglich aus einem verlängerten Säckchen. Darin befinden sich kleine Steinchen (Otolithen). Geraten diese Hörsteinchen in Schwingungen, übt dies auf die sich an der Seite des Säckchens befindlichen Empfindungsnerven einen Reiz aus, so daß der Fisch über die Schwingungen Kenntnis erhält.

Doch wie gerät der Schall in das Innenohr des Fisches? Da der Körper des Fisches im Verhältnis zu den sich im Wasser ausbreitenden Schwingungen fast vollkommen „transparent“ ist, wurde von Forschern im vergangenen Jahrhundert noch angenommen, daß der Fisch überhaupt nicht hören könne. Man meinte, daß die Schwingungen den Fischkörper offensichtlich durchdringen, ohne daß er davon etwas

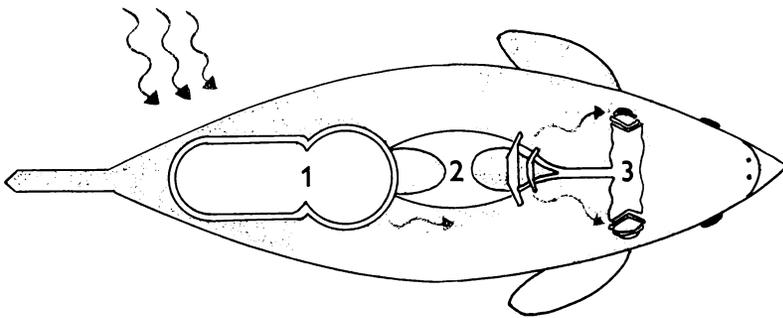
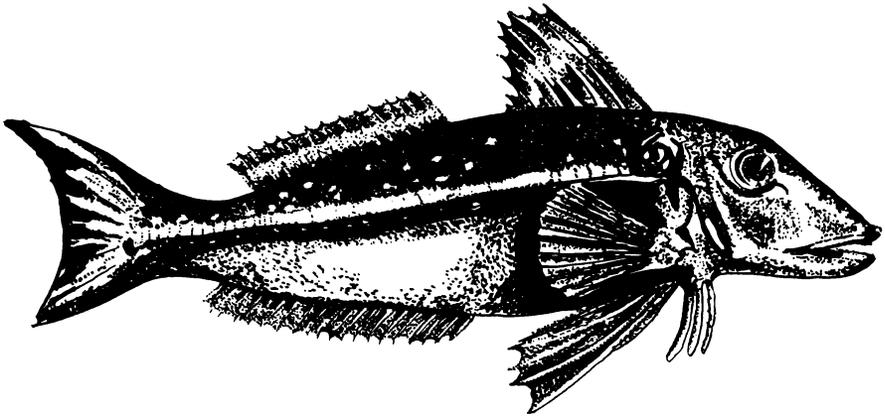
merkt. Zum Aufhalten des Schalls sei vom physikalischen Standpunkt eine Stoffsubstanz notwendig, deren Dichte und akustische Eigenschaften vom umgebenden Medium stark abweichen. Im Gegensatz hierzu seien beispielsweise Luftblasen im Wasser ausgezeichnete Widerhallträger und Schwingungsverstärker.

Die Aufmerksamkeit konzentrierte sich deshalb in der Folgezeit auf die Schwimmlase der Fische, da diese mit Gas gefüllt ist und sich daher vortrefflich eignet, die sich im Wasser ausbreitenden Schwingungen wahrzunehmen. Der deutsche Forscher E. H. Weber, seiner Zeit anscheinend um einiges voraus, kam auf Grund seiner anatomischen Untersuchungen bereits im Jahr 1820 zu der Überzeugung, daß die

Schallenergie wahrscheinlich von der Schwimmblase der Fische aufgefangen und in Form von Schwingungen an das Innenohr weitergeleitet wird. Jene Knöchelchen, welche die Schwimmblase mit dem Innenohr verbinden, werden auch heute noch nach Weber benannt, und die neuesten Forschungen haben ergeben, daß die Schallschwingungen in der Tat durch diese Organe in das Innenohr der Fische weitergeleitet werden.

Die Messung des Hörbereichs bei Fischen ist keine einfache Aufgabe, da es

äußerst schwierig ist, Reflexe zu ermitteln, die eindeutig beweisen, ob der Fisch den Schall gehört hat oder nicht. Vor einigen Jahren wurde in Amerika ein recht aufschlußreicher Versuch durchgeführt. Im großen Aquarium eines Versuchslaboratoriums schwamm in aller Ruhe ein einziger Fisch. Plötzlich zuckte der Fisch, scheinbar ohne irgendeine Ursache, zusammen und glitt, von Schrecken gepackt, an den Rand des Glasbehälters. Als er dann nach einiger Zeit erneut zu schwimmen



Vergeblich suchen wir bei Fischen nach Ohren, äußerlich ist nichts zu sehen. Im Körper versteckt befindet sich ein sensibles Mikrofon — die Schwimmblase (1). Am Schema des schallempfangenden Organs eines Knurrhahns ist der Weg des Schalls zu verfolgen. Die Schwingungen der Wände der Schwimmblase werden von den Weberschen Knöchelchen (2) an das Innenohr (3) weitergeleitet. Hier wird der Schall in elektrische Signale umgewandelt.

begann, ergriff er in der Mitte des Aquariums wieder wie besessen die Flucht, als hätte ihn ein Stromschlag getroffen.

Der Fisch wurde tatsächlich von einem elektrischen Stromschlag erwischt. Der amerikanische Forscher W. N. Tavolga saß aufmerksam vor dem Aquarium und drückte ab und zu auf einen Knopf. Dadurch schaltete sich elektrischer Strom ein. Jenes Aquarium stand nicht als Symbol der Ruhe und Stille im Laboratorium, sondern es gehörte zu einem wichtigen Experiment. In der Mitte des Behälters erhob sich eine Kiesbank, darüber war das Wasser so seicht, daß der Fisch gerade noch auf die andere Seite schwimmen konnte. Im Wasser des Behälters waren zwei Elektroden untergebracht, unter der Kiesbank hingegen befand sich eine akustische Anlage, mit der der amerikanische Wissenschaftler Schallschwingungen im Wasser erzeugte. Dabei hatte der Fisch zu lernen, daß er beim Ertönen eines Schalls sofort über die Kiesbank auf die andere Seite schwimmen mußte, wollte er nicht von einem elektrischen Schlag getroffen werden. Durch diese Methode gelang es Tavolga und seiner Forschungsgruppe, das Hörvermögen der Fische eindeutig nachzuweisen.

Aus den Untersuchungen ging hervor, daß die obere Hörgrenze der Meeresfische bei 1500 bis 2000 Hertz liegt, also um einundeinhalb Oktaven höher als der normale a-Ton des Klaviers. In Auswertung der Untersuchungen stellte es sich heraus, daß die Fische in zwei Gruppen einzuteilen sind. Die Mehrheit der Fische nimmt keine höheren Schwingungen als 2000 bis 2500 Hertz wahr, so daß diese Fische von den Tönen der höchsten Oktave des Klaviers völlig unbeeindruckt bleiben. Zur zwei-

ten, kleineren Gruppe gehören die Karpfenartigen. Die zu ihnen zählenden Karpfen, Elritzen und Karauschen können als Meister des „Horchens“ unter Wasser bezeichnet werden: Sie nehmen sogar Töne mit einer Frequenz von 4000 Hertz wahr. Zwergwelse empfinden selbst Töne, welche um eine Oktave höher sind, als sie auf dem Klavier angeschlagen werden können, die also bei einer Frequenz von 8000 Hertz liegen. Der sowjetische Forscher W. R. Protasow traf sogar auf Exemplare, die Frequenzen von 13 139 Hertz wahrnehmen. Nach dem heutigen Stand der Forschung haben diese Fische das beste Hörvermögen unter Wasser.

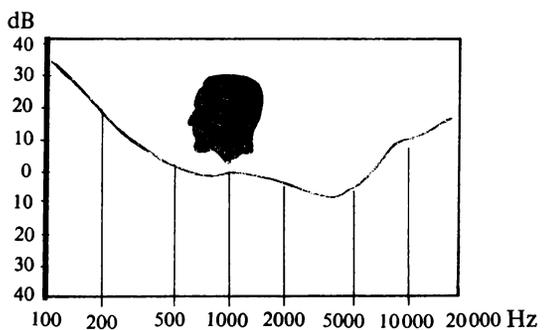
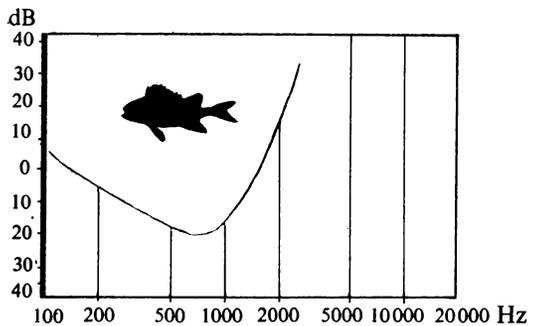
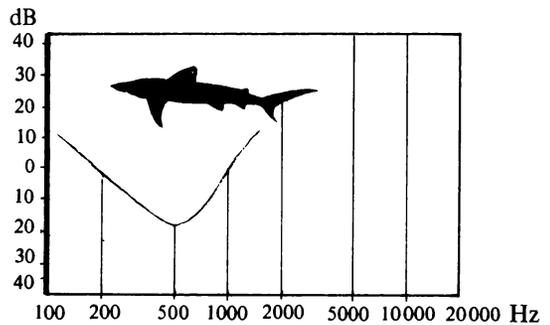
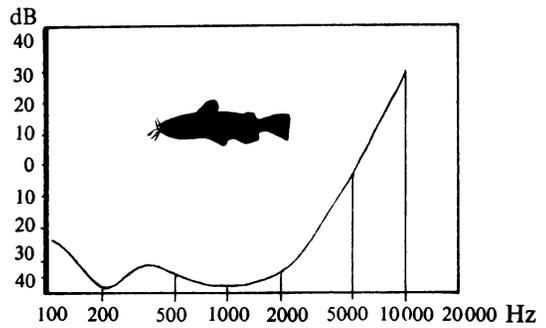
Die Sensibilität der Hörorgane drückt sich aber nicht nur darin aus, welchen Schallfrequenzbereich sie wahrzunehmen imstande sind. Genauso wichtig ist auch die Klang- oder Schallstärke. Das menschliche Ohr ist beispielsweise gegenüber Schallschwingungen von 2734 Hertz am empfindlichsten, was dem höchsten Oktavenbereich des Klaviers, der Frequenz zwischen dem e- und f-Ton, entspricht. Im Vergleich dazu muß eine Schallfrequenz von 1000 Hertz bereits zehnmal stärker erklingen, damit sie vom Menschen gerade noch wahrgenommen werden kann. Die Empfindsamkeit der Fische ist tieferen Tönen gegenüber stärker. Untersuchungen zufolge nimmt der Stachelfisch Töne, die bei einer Frequenz von 800 Hertz liegen, aus weitester Entfernung im Wasser wahr, der Menschenhai ist vor allem für Töne im Frequenzbereich von 500 Hertz empfindsam, der Zwergwels hingegen ist besonders gegenüber schwachen Tönen im Frequenzbereich von 200 Hertz sensibel, während ihn andere Frequenzen kaum erreichen, obwohl er Frequenzen,

die bei 1000 Hertz liegen, wieder sehr gut wahrnimmt. Er ist demnach hinsichtlich der Schallstärke innerhalb zweier Bereiche sensibel.

Tiefere Töne sind für den Orientierungssinn der Fische zweifellos geeigneter, weil ihre Schwingungsenergie im Verhältnis zur Entfernung weniger abnimmt als die der höheren Töne. Im allgemeinen verbreitet sich der Schall im Wasser fünfmal schneller als in der Luft, wobei jedoch mehr Energien verbraucht werden, so daß sich die Wassermoleküle „schwerfälliger“ bewegen. Hohe Töne müssen deshalb mit mehr Energie auf den Weg gebracht werden, damit sie die gleiche Entfernung erreichen wie die tieferen Töne.

Physiker haben sich zum Vergleichen der unterschiedlich starken Schallwellen für einen Grenzwert entschieden, bei dem wir gerade noch einen bei 1000 Hertz liegenden Ton wahrnehmen. Dieser Punkt wird als Null Dezibel bezeichnet. Wenn der Ton zehnmal stärker ist, so ist die Stärke 10 Dezibel (dB), ist er hundertmal stärker, sind es 20 Dezibel, wenn tausendmal stärker, dann 30 Dezibel, und so weiter.

All dies bezieht sich auf den in der Luft übertragenen Schall. Ein um achthundertmal dichteres Medium, das nicht komprimierbare Wasser, bietet gegenüber den Schwingungen einen größeren Widerstand und erfordert deshalb eine größere Energie. Will man im Wasser einen gleich starken Ton wahr-



Der Hörschwingungsbereich des Menschen und einiger Fische. Die gleiche Schallquelle ist im Wasser aus viel weiterer Entfernung zu hören als in der Luft. Mit dem Hörvermögen eines in das Wasser getauchten Menschen kann nur der Zwergwels wetteifern.

nehmen wie in der Luft, so muß die Schallquelle im Wasser um 36 Dezibel stärker sein. Biologen haben diese Abweichung in der Weise ermittelt, daß im Rahmen ihrer Experimente von den Messungsergebnissen 36 Dezibel abgezogen wurden, so daß das Wahrnehmungsvermögen des Fischohrs mit dem Gehör des Menschen verglichen werden konnte.

Man stellte unter anderem fest, daß einige Arten (zum Beispiel der Zwergwels) im Wasser mindestens so gut hören wie der Mensch an der Luft. Vergleiche von Schallschwingungen, die bei einer Frequenz von 1000 Hertz lagen, ergaben jedoch, daß der Stachelfisch im Verhältnis zum Zwergwels bereits etwas „schwerhörig“ ist. Um den gleichen Schall wahrzunehmen, müssen die Schallwellen das Ohr des Stachelfisches mit größerer Schallenergie erreichen. Bekanntlich werden beim Ticken einer Uhr in einem stillen Zimmer auch nur stärkere Laute eindeutig wahrgenommen. Der Menschenhai ist sogar im Vergleich zum Menschen auf eine hundertmal stärkere Schallenergie angewiesen, um einen bei einer Frequenz von 1000 Hertz liegenden Ton wirklich zu erkennen.

Der sich im Wasser verbreitende Schall verfügt über eine weitere merkwürdige Eigenschaft: Die Energie der niedrigen Frequenzen und die der an den Schallquellen nahe liegenden Wellen ist in zweifacher Weise wahrzunehmen: einerseits als Druck und andererseits als Bewegung (Vibration) der Wasserpartikel. Welche von beiden werden von den Fischen bemerkt? Die Forscher sind der Meinung, daß bei höher als 800 Hertz liegenden Schallschwingungen Fische lediglich die Druckunterschiede bemerken. Im Fall von Schallschwin-

gungen niedrigerer Frequenz sowie innerhalb einer Entfernung von 6 bis 9 Metern sind für Fische immer noch die Druckwellen ausschlaggebend, doch es ist anzunehmen, daß sie dabei bereits die Veränderung, die rhythmischen Schwingungen der Wasserpartikelchen, gleichfalls wahrnehmen.

Aus alledem ergibt sich von selbst die Frage, wo nun die untere Grenze des Hörvermögens der Fische liegt. Dazu muß man zunächst klären, was als Schall beziehungsweise als Ton bezeichnet werden kann. Schwingt beispielsweise eine Stahlklinge in 1 Sekunde zwanzigmal oder weniger, so nehmen wir diesen Ton nicht mehr wahr. Dies fällt bereits in den Bereich des Infraschalls. Dem Wesen nach ist dies aber auch als Schall zu betrachten, denn es handelt sich dabei ja um Schwingungen. Wir können sagen, daß in der Luft oder im Wasser lediglich Stoßwellen in Bewegung geraten, die weniger als zwanzigmal in der Sekunde schwingen. Nimmt ein Gehörorgan den Stoßwellendruck einer entfernteren Schallquelle auf, dann ist es natürlich auch für Infraschall sensibel.

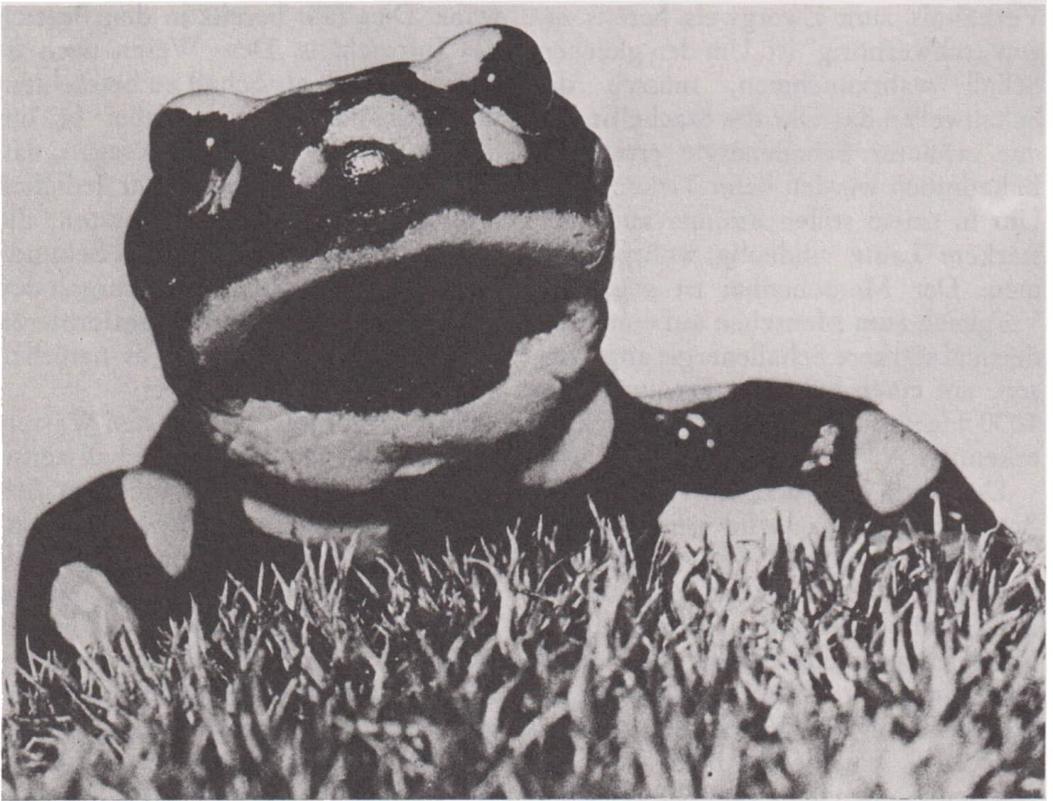
Soviel steht fest: Die meisten Wassertiere sind gegenüber Infraschall sensibel. Ein solcher Schall kann zum Beispiel im Meer entstehen, wenn irgendwo ein fernes Gewitter tobt, Erdbeben oder Springflut wüten. Medusen ziehen sich bereits 10 bis 15 Stunden vor Ausbruch eines Sturms in die Tiefe des Meeres zurück, denn niedrigfrequenziger Infraschall macht sie lange vorher auf die Gefahr aufmerksam. Ebenso verrät auch das Verhalten der Delphine das Nahen des Sturms, und bestimmte Fischarten „ahnen“ sogar Erdbeben voraus.

Da die Schwimmblase beim Hörvor-

gang der Fische eine entscheidende Rolle spielt, wurde im geophysikalischen Institut der Akademie der Wissenschaften der UdSSR unter Mitwirkung von Biologen ein äußerst empfindliches Hydrophon konstruiert, welches Infraschalltöne anzuzeigen vermag und dadurch das Nahen eines Sturms signalisiert. Außerdem wurden mit Gas gefüllte Ballons in die Tiefe versenkt und die Schwingungen dieser „Schwimmbase“ durch elektrischen Strom verstärkt. Diese Methode bestätigte die bisherigen Vorstellungen der Biophysiker. Die Schwimmbasen sind gegenüber In-

fraschallschwingungen tatsächlich viel empfindlicher als die konventionellen Hydrophone und Druckmesser.

Das Ohr der Amphibien und Reptilien ist nicht so weit entwickelt wie das des Menschen, bei dem ja die Schwingungen mittels der kleinen Knöchelchen des Mittelohrs – des Hammers, des Amboß und des Steigbügels – in den Schneckengang des Innenohrs weitergeleitet werden. Im Ohr der Amphibien und Reptilien befindet sich zwischen dem Trommelfell und dem ovalen Fenster des Innenohrs lediglich ein einziges Gehörknöchelchen. Dieser einfa-



Der Gefleckte Feuersalamander lauscht vielleicht gerade auf eine weitentfernte Stimme. Das Gehörorgan des schwerfälligen Tieres ist ziemlich primitiv. Sein Hörvermögen erstreckt sich insgesamt auf die drei tiefsten Oktaven des Klaviers, doch davon erkennt er auch nur jeden fünften Ton der Tonleiter.

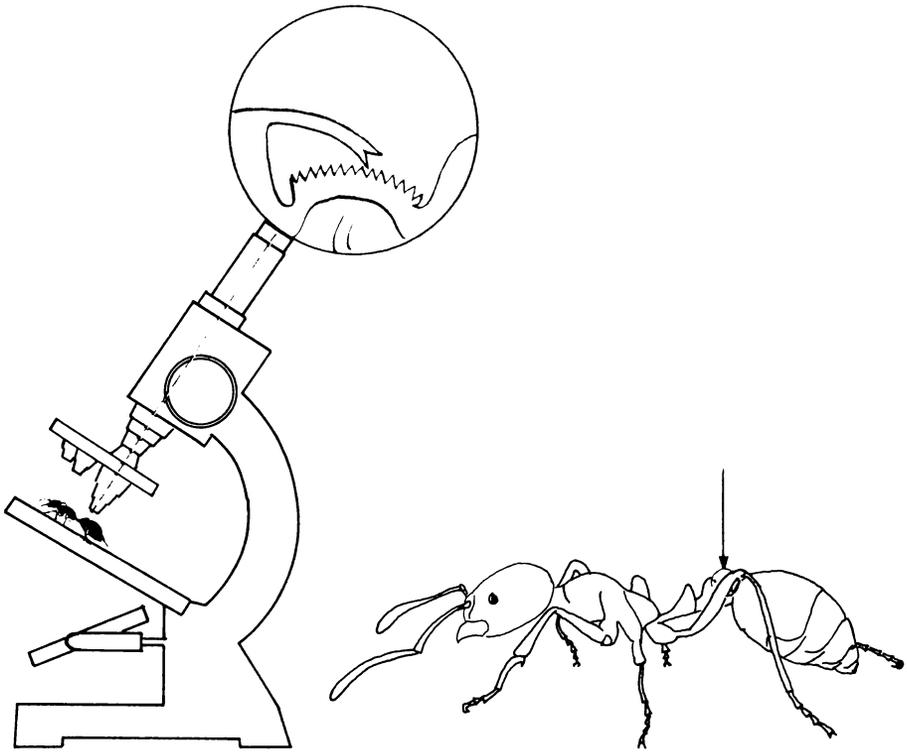
che Knochen ist mehr oder minder eben und elastisch wie die Gehörknöchelchen im menschlichen Ohr. Schwache Schwingungen werden zwar verstärkt, doch beim Eindringen zu starker Schwingungen in das Ohr verbiegt sich das Knöchelchen wie ein Gummistab. Dadurch wird der Schall „abgeblockt“ und nicht zum Innenohr weitergeleitet. Obwohl das Ohr der Frösche von außen kaum zu sehen ist, befindet sich das Trommelfell in einer Vertiefung von einigen Millimetern an beiden Seiten des Kopfes. Das Hörvermögen der Frösche erreicht beinahe das des Menschen. Durchgeführte Messungen um die Jahrhundertwende haben ergeben, daß Frösche Töne von 50 bis 10 000 Hertz wahrnehmen, doch neuesten Messungen zufolge soll sich ihr Hörbereich von 30 bis 15 000 Hertz erstrecken. Für den Bereich der Salamander nahmen die Forscher lange Zeit an, daß diese Tiere beispielsweise überhaupt nicht hören können. Neueste Untersuchungen beweisen jedoch, daß auch Salamander Schallschwingungen bis zu 244 Hertz bemerken. Dies aber nur unvollständig, weil sie lediglich den anderthalbfachen Frequenzunterschied einer Quint im Schallbereich wahrnehmen, wenn verschiedene Schwingungen zugleich ihr Ohr erreichen. Für sie ist anscheinend das Hören lediglich eine Ergänzung zu den übrigen Sinnesorganen. Im Kampf um das Dasein waren sie offensichtlich nicht darauf angewiesen, ihren Gehörsinn übermäßig zu vervollkommen.

Sechsbeinige Geiger

Am 29. Februar des Jahres 1832 schrieb Charles Darwin, der große englische

Naturforscher, über den merkwürdigen Gegensatz von Stille und Lärm im brasilianischen Urwald in sein Tagebuch, daß der Lärm der Insekten so laut sei, daß er selbst auf dem mehrere hundert Yards entfernt ankernden Schiff zu hören wäre. Und die Insekten haben sich seither nicht um das Geringste geändert. Ihr buntes Treiben bestätigt uns Tag für Tag, daß in ihrem Nachrichtenübermittlungssystem die Töne einen wesentlichen Platz einnehmen. Selbst die winzigen Ameisen werden zuweilen „vorlaut“. Untersuchungen des sowjetischen Forschers J. J. Marikowski zufolge signalisieren beispielsweise die Soldaten der schwarzen Waldameise, welche den Eingang des Ameisennestes bewachen, sofort die Gefahr, wenn ihnen der Wind einen fremden Geruch entgegenweht. Der wachsame Soldat schlägt mit der Kinnlade an die Außenwand des Ameisenhaufens, wobei diese Schwingung für die im Nest befindlichen Ameisen wahrscheinlich so klingt, als würde eine Alarmglocke läuten. Dieses dumpfe Klopfen kann sogar vom Menschen beim Beobachten des Treibens am Ameisenhaufen wahrgenommen werden.

Mehr als die Hälfte der etwa 6000 Ameisenarten – hauptsächlich in den Tropen – sind mit einem Mechanismus ausgestattet, von dem die Biologen bereits vor 100 Jahren feststellten, daß er in der Lage sei, Schallschwingungen zu erzeugen. An Hand von Aufnahmen mit dem Elektronenmikroskop konnte bei Blattschneiderameisen dieser Mechanismus besonders gut und deutlich nachgewiesen werden: An der gelenkartigen Verzahnung des letzten Segments des Hinterleibstiels befindet sich ein winziger Stachel, der sich zum Leib hinzieht, am Rand des ersten Gastersegments



Das schallbildende Organ der Blattschneiderameise ist derart klein, daß es nur mit dem Mikroskop wahrgenommen werden kann. Der am Ende des Hinterleibstiels vorstehende Stift fährt auf den Chitinrillen des Leibes entlang. Die Ameise entwickelt dadurch ein Geräusch, wie es beim Entlangziehen mit dem Fingernagel am Rand einer Geldmünze zu hören ist.

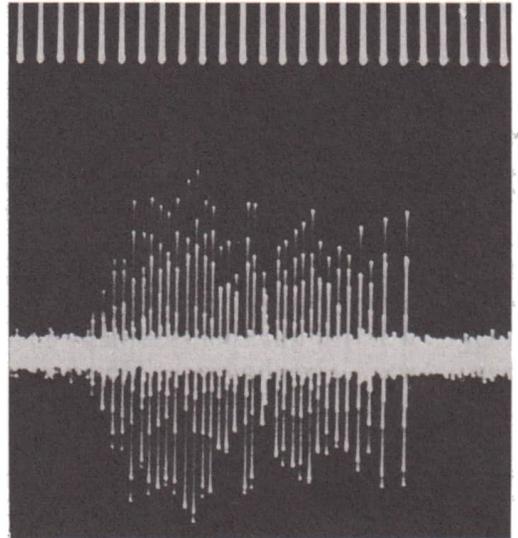
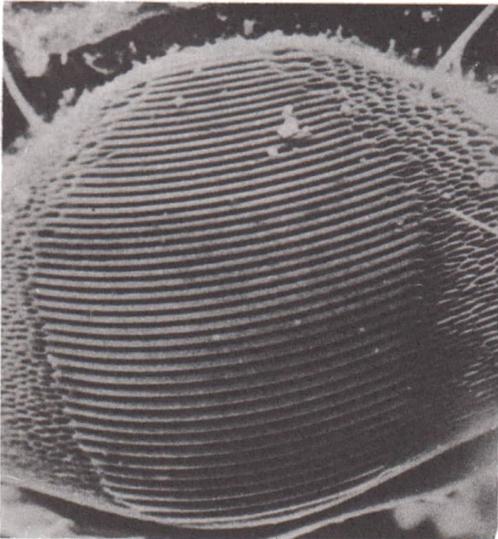
hingegen breiten sich winzige Rillen aus. Beim Beugen des Hinterleibs der Ameise gelangt der dünne Stachel wie die Nadel einer Schallplatte in die Rillen und kratzt in der Weise, als wäre die Schallplattennadel zufälligerweise aus der Rille gestoßen worden. Diese Rillen bestehen aus einem außergewöhnlich harten Material, aus Chitin, so daß sie sich nicht abnutzen, selbst wenn die Ameise während ihres ganzen Lebens die „Grammophonnadel“ darüberzieht. Der sonderbare Schall entsteht durch die Vibration und das gleichzeitige Mitschwingen des Ameisenkörpers.

Geradflügler musizieren mit einem noch vollkommeneren Instrument. Der Grashüpfer hebt die Deckflügel etwas in die Höhe und bewegt sie scherenförmig, als hielte jemand die Geige verkehrt herum unter der Achsel. Am Unterteil des linken Flügels befindet sich die Zirpleiste, am Oberteil des rechten Flügels hingegen der Fiedelbogen. Beim Aneinanderreiben der beiden Flügel wird der Bogen am Zirpmechanismus von unten entlanggezogen, wodurch Schallschwingungen entstehen. Die Grillenserenade kommt auf ähnliche Weise zustande. Am Unterteil des rech-

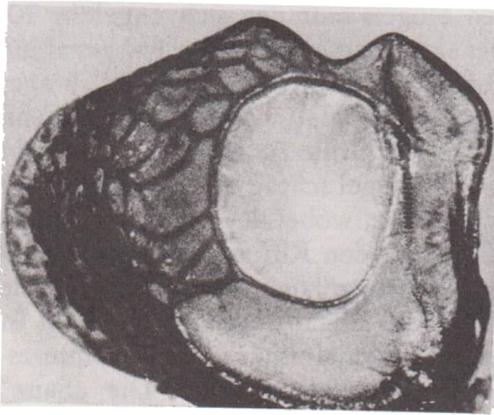


ten Flügels befinden sich ungefähr 20, bei einzelnen Arten bis zu 150 gezahnte Riffel, auf dem anderen Flügel hingegen ist ein glatter Bogen angebracht. Wenn die Grille zu zirpen beginnt, hebt sie die Flügel schräg oder fast senkrecht nach oben, wobei der Bogen am linken Flügel an den Riffeln des rechten Flügels entlanggezogen wird. Die gewölbte Form des Bogens sowie der Riffeln ist auch in mechanischer Hinsicht interessant und beachtenswert. Die „Saite“ und der „Bogen“ berühren sich auf den sich reibenden Flügeln stets im rechten Winkel, was für die Schwingungen der Membranenflügel die geringste Kraftanstrengung erfordert.

Heuschrecken geigen in belustigen-



Die Blattschneiderameise bei der Arbeit. Die abgeschnittenen Blattstückchen werden in das Nest geschleppt, wo die zu Brei verarbeiteten Pflanzenteile aufbewahrt werden. Auf diesem Nährboden züchten die Ameisen Pilzsporen, deren Pilzfäden ihnen als Nahrung dienen (oben). Das winzige „Musikinstrument“ trägt die Ameise auf ihrem Rücken. Die Rillen, in denen der „kratzend-klingende“ Stift des Hinterleibstiels entlangschleift, befinden sich am ersten Leibsegment (unten links, vierhundertfache Vergrößerung). Auf dem mit einem elektronischen Tonfrequenzverstärker aufgenommenen „Schalldiagramm“ ist die grafische Kurve der knackenden Geräusche einer Blattschneiderameise zu sehen (unten rechts).



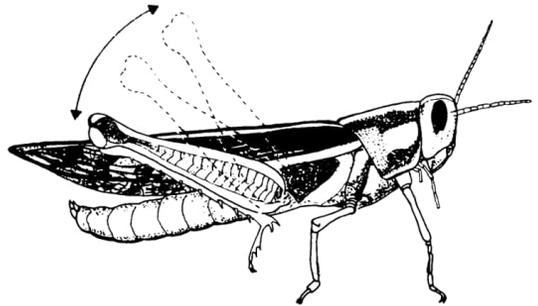
Der ovale Spiegel am rechten Deckflügel des Grashüpfers besteht aus einer hauchdünnen Membrane, die im Rhythmus des Zirpens mitschwingt. Die große Oberfläche des Spiegels bringt zugleich viel Luft in Bewegung, worauf im wesentlichen der laute Schall zurückzuführen ist. Auf dem Flügeldeckel befindet sich eine „Saite“ und ein „Bogen“. Die „Zirpleiste“ zieht sich am linken Rand des Flügels, der Bogen neben dem Spiegel entlang.

der Weise mit den Beinen. An der inneren Seite der beiden Hinterschenkel befinden sich geriffelte Schalleisten, die an längsseitig hervorstehenden Flügeladern gerieben werden. Der Ton entsteht im wesentlichen so wie auf einer echten Geige. Wie der mit Kolophonium eingestrichene Geigenbogen im Rhythmus der Schwingungen an der Saite haftet und an ihr entlanggleitet, ebenso gerät auch der Flügel der Heuschrecke in Schwingungen. Nur daß beim Geigen-spiel der Geigenkörper die schallverstärkende Funktion ausübt, während diese Aufgabe bei der Heuschrecke durch die großflächigen Flügel erfüllt wird. Je großflächiger die Flügel, um so größere Luftmassen werden durch sie in Schwingungen versetzt. Die musizierende Heuschrecke vollführt im Grunde

genommen eine erstaunliche Darbietung: Während sie sich mit vier Beinen festhält, bewegt sie zugleich die beiden hinteren angezogenen Füße. Ihr es auf zwei Geigen, mit zwei Bogen, nachzumachen wäre schwierig . . .

Bockkäfer hingegen halten die Musikinstrumente der Ameisen für besser, sie erzeugen deshalb Schwingungen mit einem ähnlichen Mechanismus. Ihr knarrender Schall ist allerdings weiter zu hören als die Musik der Ameisen. Die Schwingungen werden zwischen dem ersten und zweiten Rumpfglied erzeugt. Wenn der Bockkäfer zu musizieren beginnt, streicht er seinen geriffelten Kragen am 1,5 Millimeter breiten Streifen des zweiten Rumpfglieds entlang, auf dem sich kleine, quer ausgerichtete Furchen befinden.

Sicherlich hat jeder schon entdeckt, daß selbst eine leere Konservendose zum „Musikinstrument“ taugt: Der Dose kann durch seitliches Drücken ein starkes Knallen oder Plumpsen entlockt



Die Heuschrecke musiziert mit angezogenen Hinterbeinen. An der Innenseite ihrer Oberschenkel befinden sich winzige Riffeln, welche an den hervorstehenden Faserrippen der Flügel gerieben werden. Mit ihrer eigenartigen Geige kann sie höhere Töne als die kürzeste Saite des Klaviers erzeugen.



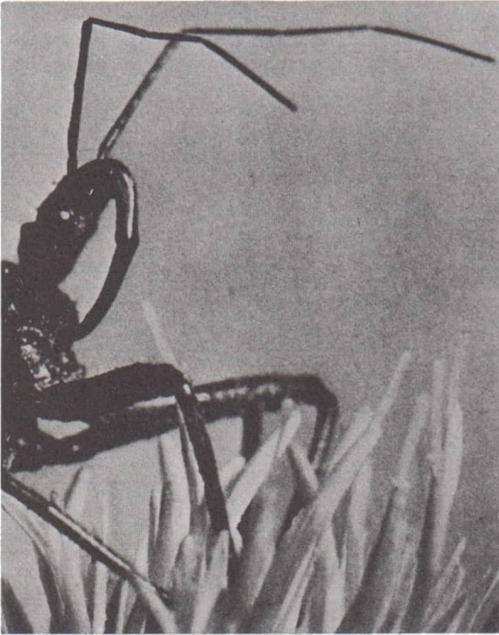
Zu den zirpenden Insekten gehört auch der Eichenbockkäfer. Wenn er seinen Kopf hin- und herbewegt, reiben sich die zwischen dem ersten und dem zweiten Rumpsegment befindlichen kleinen Riffeln wie zwei Feilen aufeinander. Neben dem Käfer ist eine Vergrößerung der Riffelleiste zu sehen.

werden. Bei den Zikaden hat sich gerade dieses Prinzip im Verlauf der stammesgeschichtlichen Entwicklung herausgebildet. Auf der Bauchseite des ersten Rumpfglieds der Zikade befinden sich zwei halbkreisförmige Platten. Durch Anspannung der Muskeln werden die harten Chitinplatten des Tieres eingedrückt und schnellen dann beim Nachlassen der Spannung plötzlich wieder zurück. Der eigenartige Charakter dieses sonderbaren Geräusches wird von der Stärke, der Elastizität und der Wölbung der Chitinplatten bestimmt.

Wie auch ein auf dem Erdboden ent-

langgezogenes Gießkannenrohr einen charakteristischen Scheuertönen von sich gibt, haben sich jene Wanzenarten eine ähnliche Methode angeeignet, die im Verlauf ihrer Stammesgeschichte den langen Saugrüssel wie eine Injektionsnadel in die Pflanze oder ein Tier stecken. Im Ruhezustand machen sich diese Wanzen in der Weise bemerkbar, daß sie ihren Saugrüssel umbiegen, um ihn in einer geriffelten Furche an der Bauchseite entlangzuziehen. Dieses surrende Geräusch ist ziemlich leise und nur in unmittelbarer Nähe zu hören.

Krebse verfügen über keinen besonderen Mechanismus zur Erzeugung von Tönen. Da sich ihr erstes Paar Beine im Lauf von Jahrtausenden zur Schere entwickelt hat, reiben sie die Schere einfach an ihrer gerippten Kopfbrustschale. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß dabei ein Geräusch entsteht wie beim Anheben eines Armes einer rostigen Ritterrüstung. Garnelen wenden



Nach dem Muster der Streichinstrumente zieht die Raubwanze ihren Rüssel an den sich an der Bauchseite befindlichen winzigen Chitinleisten entlang. Dadurch gerät der Körper des Insekts in Schwingungen, obwohl der surrende Schall so leise ist, daß er nur von einer benachbarten Wanze gehört werden kann.

einen noch wirksameren Trick an: Sie schlagen ihre Schere zusammen, aber nicht in der üblichen Art. In der Mitte des Schnittpunkts der beiden Scherenbügel, am unteren festen Teil des Bügels, befindet sich nämlich eine kleine Vertiefung, in welche die gezahnte Wulst des oberen Bügels genau hineinpaßt. Schließt der Garnelenkrebs die Schere, passen die beiden Teile genau ineinander, beim plötzlichen Öffnen jedoch ist ein Knallen wie beim Öffnen einer Sektflasche zu hören.

Hautflügler benötigen keine besonderen Instrumente, denn die erforderlichen

chen Schallschwingungen entstehen während des Fluges mit den Flügeln. Im Ruhezustand, wenn sie also nicht fliegen, können sie mit dem schnellen Schwingen ihrer Flügel gleichfalls Töne erzeugen. Der Münchener Forscher A. Haas konnte beobachten, daß jeden Morgen ein besonderer „Muezzin“ auf das Dach des Bienenkorbs stieg. Er erhob die Brust und den Leib, lehnte den Kopf an die Bretterwand und begann dann mit den Flügeln zu schwingen. Der vibrierende Ton verbreitete sich allmählich über den gesamten Bienenkorb. Danach wachten die Bienen auf wie einst die strenggläubigen Türken bei dem frühen Morgengebet des Muezzins. In der riesengroßen Bienenfamilie ist dies wahrscheinlich eine „Rentnertätigkeit“: Während der einmonatigen Beobachtung wurde das morgendliche Wecken immer von derselben Biene vorgenommen.

Sie übertreffen das Klavier

Wenn die Sopranistin das hohe C „ausstößt“, klatscht hingerissen das gesamte Publikum. Das ist sicherlich eine Spitzenleistung der menschlichen Stimmbänder: Sie schwingen dabei 1046,5mal in der Sekunde. Aber Applaus erntet auch der Sänger, der mit einer klangvollen Baßstimme den im Frequenzbereich von 73,58 Hertz liegenden d-Ton erreicht. Hier liegt die unterste Grenze der menschlichen Stimme.

Die Tierwelt gibt sich mit einem derart engen Klangbereich nicht zufrieden. Sie hat beinahe sämtliche Möglichkeiten der Entwicklung von Lauten ausprobiert. Man könnte aus den verschiedenen Frequenzwerten lückenlos eine fast ins Unendliche gehende Reihe stets

höherer Töne zusammenstellen. Die Unbegrenztheit ist freilich nur theoretisch möglich. In Wirklichkeit sind gegenwärtig Forschern höhere Töne als das nicht wahrnehmbare Pfeifen der Delphine unbekannt. Elektronischen Frequenzmessungen zufolge konnten aber sogar bei Blattschneiderameisen merkwürdig hohe Töne nachgewiesen werden. Bei jedem Heben des Hinterleibs läuft der Petiolusstachel 30 bis 40 Rillen der Leibsegmente entlang. Dabei entsteht ein Knacken von 10 Tausendstelsekunden, wobei die Pause bis zum darauffolgenden Knacken 1 bis 1,5 Tausendstelsekunden anhält. Dabei erzeugen die Ameisen in der Sekunde 4 bis 7 Geräuschserien in solch hohen Tönen, daß sie vom menschlichen Ohr kaum wahrgenommen werden können. Unter den verschiedenen hohen Frequenzen befinden sich auch Ultraschalltöne mit einer Frequenz von 20 000 bis 60 000 Hertz.

Grillen sind in der Lage, im Frequenzbereich von 2000 bis 6000 Hertz zu musizieren; folglich lassen sie ihre winzigen Geigen in viel höheren Tönen als das C der vierten Oktave des Klaviers erklingen. Heuschrecken erreichen Tonfrequenzen bis zu 12 000 Hertz, wobei sie immerhin noch den höchst liegenden Ton des Klaviers von 4186 Hertz bei weitem überschreiten. Doch am liebsten musizieren sie im Frequenzbereich von 4000 bis 8000 Hertz. Grashüpfer sind nicht nur in der Lage, wahrnehmbare Töne für das menschliche Ohr zu erzeugen. Ihre Musik kann sogar den Frequenzbereich des Ultraschalls bis zu 100 000 Hertz erreichen, was ungefähr dem nichtwahrnehmbaren Schreien der Fledermäuse oder Delphine entspricht.

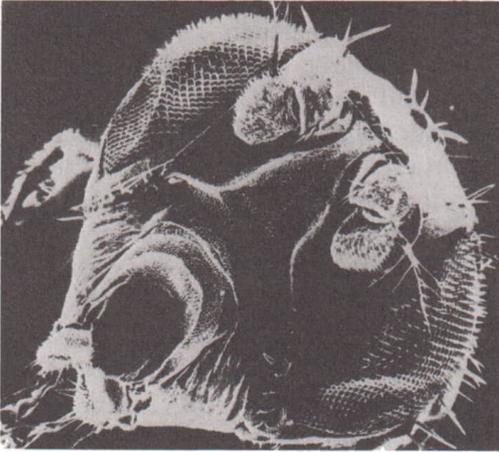
Die an den schwingenden Flügeln

entstehenden „Weisen“ hängen in erster Linie von dem schnellen Rhythmus der hin- und herschlagenden Flügel in der Luft ab. Je schneller die Vibration, desto höher der Ton. Stechmücken können mit Hilfe ihrer besonderen Muskeln die Flügel in der Sekunde dreihundert- bis fünfhundertmal in Schwingungen versetzen, so daß sie auf der C-Dur-Skala zwischen dem e- und h-Ton summen. Die verliebten Männchen der Taufliegen machen ihren auserwählten Weibchen im gleichen Tonbereich den Hof. Messungen von Dr. H. C. Bennet-Clark und seinen Mitarbeitern zufolge schwingen sie ihre Flügel im allgemeinen im Frequenzbereich von 330 Hertz. Einzelne Arten haben sich jedoch für Töne von 575 Hertz entschieden, andere hingegen musizieren mit Vorliebe in Frequenzen von 225 Hertz. Es gibt allerdings auch erfinderische Troubadoure, die zum Teil in anderen Frequenzen musizieren. So summt das Männchen einer anderen Taufliegenart, der *Drosophila paramelanica*, wenn es einem Weibchen in einem Glasbehälter hinterherläuft, mehrere Sekunden hintereinander; in der ersten Zehntelsekunde beginnt es in einer Frequenz von 440 Hertz (im Normalton a!), wechselt dann auf die tiefere Frequenz von 265 Hertz, um danach zwischen diesen beiden Frequenzen einige Sekunden lang zu variieren.

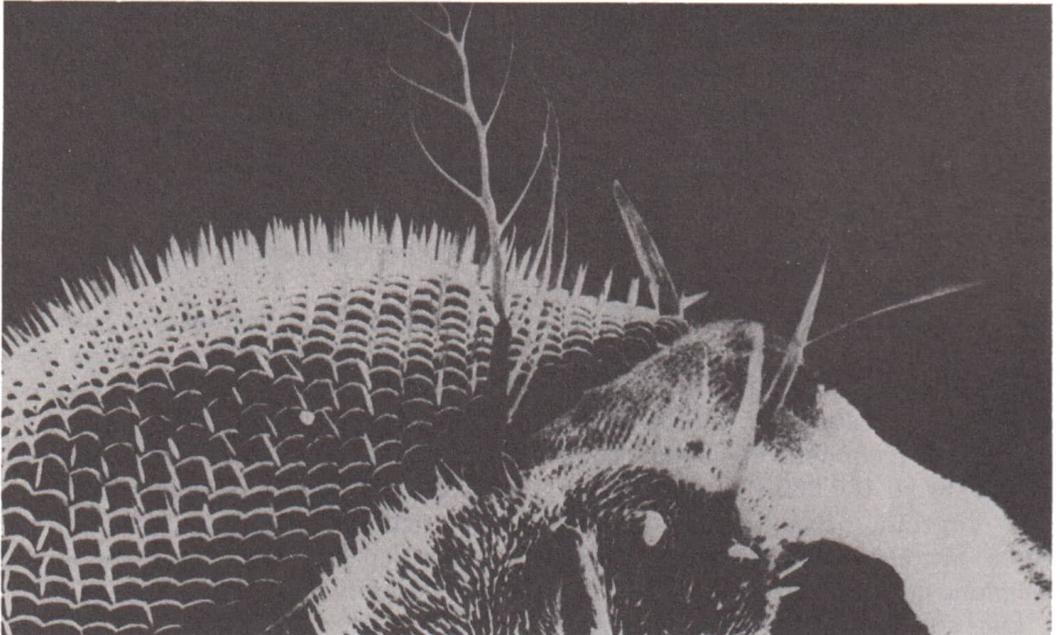
Je stärkere Luftmassen die Schwingungen in Bewegung setzen, um so lautere Töne entstehen. Insekten haben verschiedene konstruktive Lösungen zur Erhöhung der Lautstärke entwickelt. Darwin hat im Urwald von Brasilien bereits aus einer Entfernung von 18 Metern den Ruf des Tropenschmetterlings *Ageronia* wahrgenommen. Das Weibchen der Laubheuschrecke hört

die Stimme ihres stürmischen Verehrers sogar aus einer Entfernung von 38 Metern. Die eigenartige Stimme der Maulwurfgrille kann man sogar in 300 bis 350 Meter Entfernung vernehmen. Selbst die kleinen Blattschneiderameisen knistern nicht nur für sich. In einer Entfernung von 1 Zentimeter ist es vergleichsweise so laut wie in einer mit Fahrzeugen voll-

gestopften, verkehrsreichen Straße. Die Stimme der Maulwurfgrille verursacht aus einer Entfernung von 10 bis 20 Zentimetern bei ungefähr 130 Dezibel bereits ein Schmerzgefühl. Die Italienische Grille erreicht mit ihrem Musikmechanismus den Anschein einer außerordentlichen Beweglichkeit. Ihre Stimme erklingt mal hier und mal dort aus dem

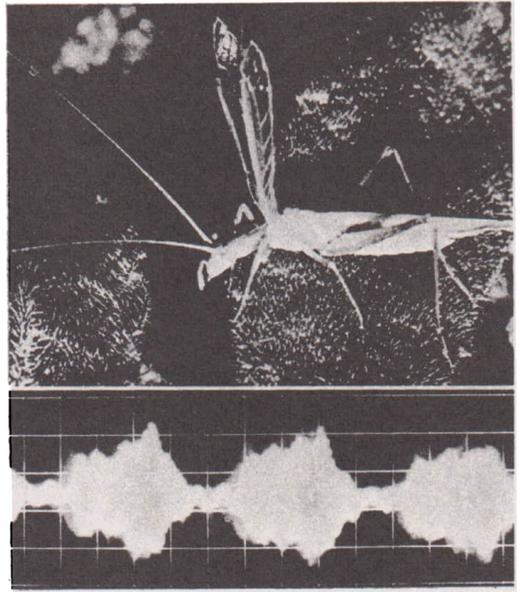


Es ist nicht verwunderlich, daß die Aufmerksamkeit des Taufliegenweibchens mit einer summenden Serenade schwer auf sich zu lenken ist, denn sie ist ein wenig schwerhörig! Sie nimmt nur Töne wahr, die wir als Kesselschmiedegedröhn bezeichnen würden. Diese Schwingungen fängt sie mit einer aus dem kurzen kolbenförmigen Fühler herausstehenden Fühlerborste auf, die auf der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme an einen kleinen Baumzweig erinnert. Die Fühlerborste schwingt im Rhythmus mit der Stimme des Männchens (unten).

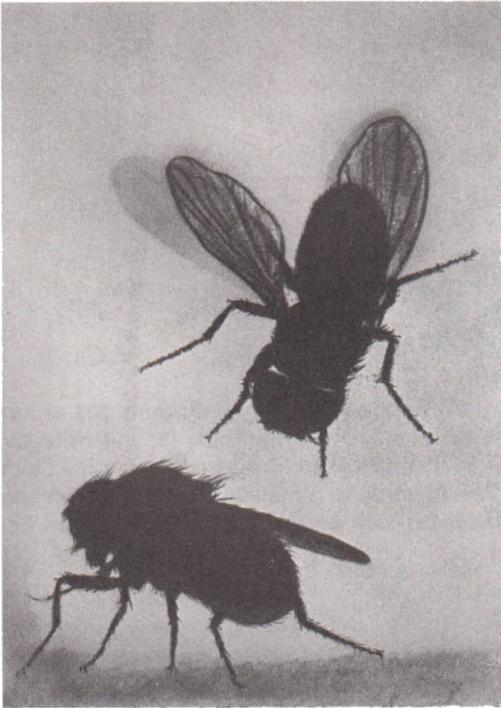


Gras, obwohl sie sich nicht von der Stelle rührt. Sie stellt ihre Flügel in unterschiedliche Richtung wie den Deckel eines Konzertflügels auf, so daß sie dadurch Richtung und Lautstärke ihres Zirpens bestimmt.

Die an Baumstümpfen „paukenschlagende“ Zikade nimmt im Lautstärkewettbewerb der musizierenden Insekten



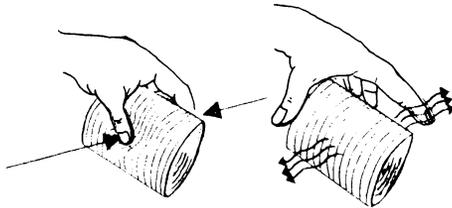
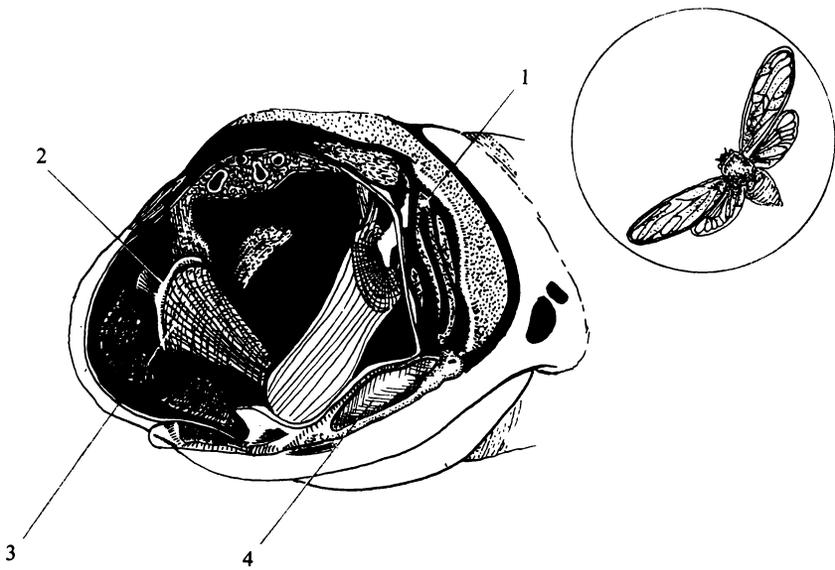
Die Italienische Grille reibt die beiden Flügel bei ihrer zirpenden nächtlichen Serenade. Die Töne wurden auf dem Schirm eines elektronischen Geräts optisch sichtbar gemacht. Die Stärke der Schallschwankungen ist durch weiße Flecken gekennzeichnet.



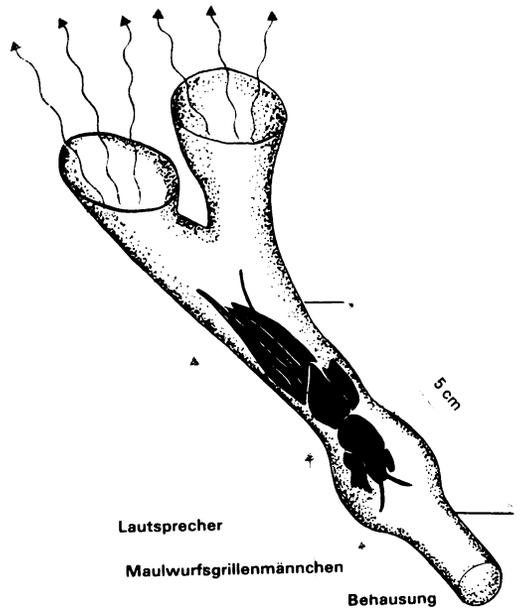
Eine seltene Aufnahme von einem buhlenden Taufliiegenmännchen. Auf der Glaswand eines Behälters schwingt das Männchen der *Drosophila melanogaster* beharrlich den rechten Flügel, wobei in der Sekunde 330 Schwingungen entstehen. Das Weibchen hört sich dies am Boden des Gefäßes ziemlich gleichgültig an. Die Aufnahme ist mit Blitzlicht entstanden, der sich weg bewegende Flügel ist durch den entstehenden Schatten kenntlich gemacht. Der Zeitunterschied zwischen den einzelnen Bewegungen betrug 0,002 Sekunden.

den ersten Platz ein. Die Töne werden durch drei an ihrem Leib befindlichen Hohlresonatoren verstärkt. Sticht man in die mit dünnen Schwinghäutchen überzogenen Hohlresonatoren, verstummt die Musik der Zikade. Das Volumen des mittleren „Musikkörpers“ beträgt 1 Kubikzentimeter, was vom Standpunkt der Raumaussnutzung für ein Insekt bereits ein großes Opfer bedeutet. Mit Hilfe dieser konstruktiven Lösung kann aber beispielsweise die Stimme der indischen Zikade sogar auf eine Entfernung von 1 Kilometer gehört werden.

Es ist nicht zufällig, daß eine Art der durchsichtigen Garnelenkrebse von den Küstenbewohnern auch als Pistolenkrebse bezeichnet wird. Der „Flaschen-



Der „Ratter“mechanismus der Zikade (Tymbalorgan) befindet sich im Hohlraum des ersten Leibsegments. Das dicke Muskelbündel (3) zieht die elastische Chitinhülle (1) mit Hilfe der Sehne zusammen (2) und läßt sie sodann wieder zurückschnellen. Dieser Vorgang hört sich so an, als würde eine mit dem Finger eingedrückte Blechdose plötzlich wieder losgelassen. Das Gehörorgan (Tympanalorgan) des Insekts befindet sich an der unteren Hälfte des Leibes (4).



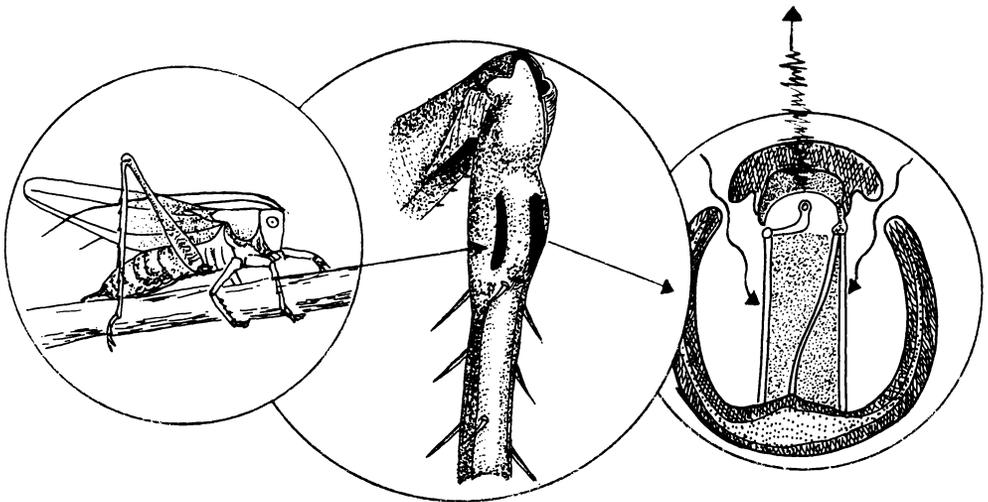
Das Männchen der Maulwurfgrille gräbt einen doppelgängigen Stollen in die Erde, worauf es dann, um sich aufzuwärmen, nach Sonnenuntergang mindestens eine halbe Stunde lang „das Instrument stimmt“. Danach strahlt es sein „Programm“ auf einer Frequenz von 3500 Hertz mit einer Lautstärke aus, daß es bei ruhigem Wetter bis zu einer Entfernung von 600 Metern zu hören ist.

kork“mechanismus knallt wie eine Luftpistole, und wenn der Pistolenkreb in eine mit Meereswasser gefüllte Flasche getan wird, zertrümmert er die Flasche mit einem einzigen Knall. Eine Art der Maulwurfsgrille, die *Gryllotalpa vinosa*, hat einen noch interessanteren Lautverstärker im Laufe der Stammgeschichte entwickelt. Dem englischen Forscher H. C. Bennet-Clark zufolge baut sie einen Tunnel unter dem Erdboden, welcher in zwei Gängen zur Oberfläche führt. Das Insekt nutzt die Verzweigung des Doppelingangs als besonderes akustisches Lautverstärkersystem. In einer Entfernung von 1 Zentimeter ist durch den unterirdischen Lautverstärker ein derart starker Schall zu hören, als führe eine Untergrundbahn in eine Bahnstation ein (90 Dezibel). Wenn jedoch die lärmende Grille aus ihrem Tunnel geholt wird, vermindert sich ihre Lautstärke auf ein kaum wahrnehmbares Minimum.

Die Botschaft des „magischen Auges“

Einige Insekten tragen ihr Ohr an den Beingelenken. So befinden sich an den vorderen Unterschenkeln der Grashüpfer und Grillen zwei winzige Fugen. Durch diese Fugen gelangt der Schall in jene doppelten Aushöhlungen, die das Luftröhrensystem der Insekten mit der dünnen Tracheenhaut auskleidet. Das Doppelhäutchen (Tympanum), welches die beiden Aushöhlungen teilt, ist dünner als Zigarettenpapier, insgesamt 2 bis 3 Mikrometer stark. Wenn es infolge der Schallschwingung zu vibrieren beginnt, biegen sich die zwischen der Doppelhaut befindlichen Fühlhärchen im rhythmischen Takt und leiten so, in elektrische Signale umgewandelt, die Schwingungen an die zentralen Nervenknoten des Tieres.

Diese winzigen Ohren sind solch vollkommene technische Meisterwerke,



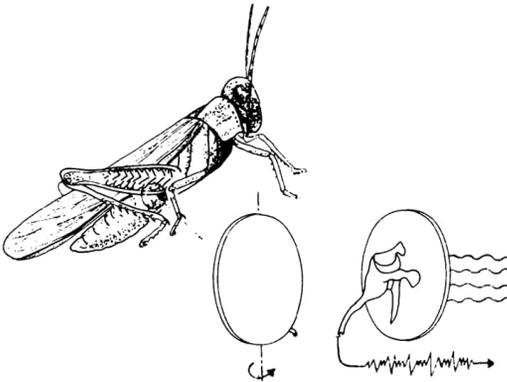
An beiden Beinen des grünen Grashüpfer befinden sich zwei parallel liegende Spalten. Im Grunde genommen sind das die Ohröffnungen des Insekts, die in die Doppelluftkammern führen. Die Luftkammern sind durch zwei Röhren miteinander verbunden. Die hauchdünnen Wände der Luftkammern geraten durch die Einwirkung der Schallwellen in Schwingungen. Die Schwingungen werden durch eine Anzahl gekrümmter Fühlhaare in elektrische Signale umgewandelt.

daß mit ihrer Sensibilität nur die technisch vollkommensten Mikrofone wett-eifern können. Das stecknadelkopf-große Organ nimmt den Schall bereits wahr, wenn sich das Häutchen ins-gesamt nur 1 Pikometer in Auswirkung der Luftdruckschwingungen wölbt! Das ist ein unglaublich kleiner Wert, da selbst der Durchmesser der Atome zehnmal größer ist.

Musizierende Insekten sind im allge-meinen nicht nur gegenüber Schall-schwingungen empfindsam, die von ihnen selbst produziert werden. Einzelne Heuschreckenarten nehmen Töne im Frequenzbereich von 300 bis 20 000 Hertz wahr, doch Messungen zufolge sind manche Arten selbst gegenüber Ul-traschalltönen im Frequenzbereich um 90 000 Hertz sensibel. Grillen nehmen Luftschwingungen von 300 bis 8000 Hertz, Grashüpfer von 800 bis 45 000

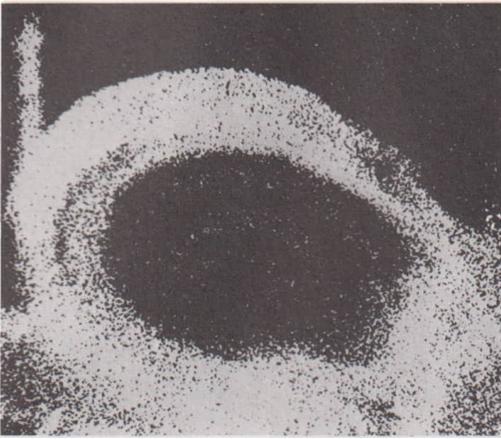


Das Ohr der Heuschrecke befindet sich auf dem „Rücken“. Auf dem Bild ist es zwischen Hinterflügelbasis und Hinterhüfte, in der Mitte, zu sehen. Der dunkle Hohlraum wird durch das Trommelfell schräg abgeschlossen, so daß die Heuschrecke merkwürdigerweise nach hinten horcht. Messungen zufolge ist sie auf Frequenzen zwischen 3000 und 6000 sowie 15 000 und 20 000 Hertz am sensibelsten.



Das hauchdünne Trommelfell und der dazu-gehörige schallübertragende Mechanismus im winzigen Ohr der Heuschrecke konnten nur mit Hilfe des Elektronenmikroskops ent-deckt werden. Das Funktionsprinzip ist ein-fach: Die Schallwellen bringen das Trommel-fell zum Schwingen, worauf dann elektrische Signale auf den Hörnervfaden weitergeleitet werden.

Hertz wahr. Die obere Grenze des Hör-bereichs der Grashüpfer erstreckt sich folglich bereits weit in den für uns nicht wahrnehmbaren Ultraschallbereich. Mi-kroelektronische Untersuchungen an der Schabe haben ergeben, daß zwei Nervenfasern aus dem Gehörorgan der Tierchen in das zentrale Nervensystem führen: Der eine informiert über die tie-fen Töne im Frequenzbereich von 30 bis 200 Hertz, der andere empfängt Töne im Bereich von 200 bis 5000 Hertz.



Durch Belichtung mit Laserstrahlen gelang es, die Schwingungen des Trommelfells der Heuschrecke sichtbar zu machen. Die schwarzen und weißen Zonen veranschaulichen an den beiden sogenannten Hologrammaufnahmen die zirkulär entstandenen Wellen. Auf dem linken Bild traf der Schall mit einer Frequenz von 3250 Hertz, auf dem rechten hingegen mit 4000 Hertz auf das Gehörorgan.

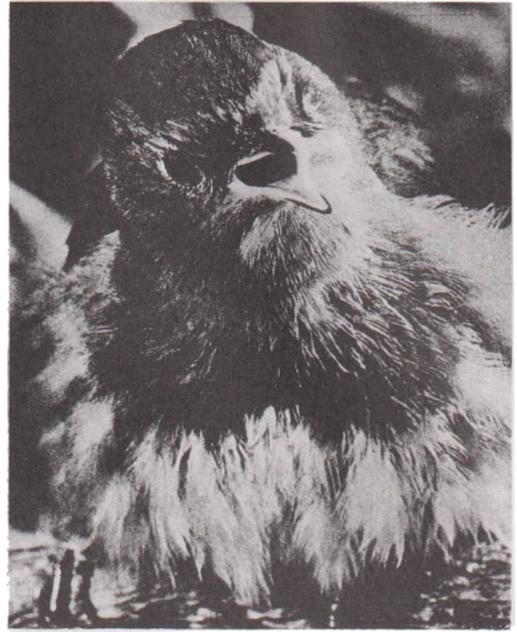
Forscher haben seit langem Bedenken, daß Frequenzuntersuchungen kein charakteristisches Bild über die Sensibilität der Gehörorgane von Insekten geben. R. J. Pumphrey und A. F. Rabdon-Smith kamen bereits im Jahr 1939 zur Schlußfolgerung, daß in der Insektenmusik nicht die Schwingungszahl, sondern die Lautstärkenveränderung zur Nachrichtenübertragung maßgebend ist. Deshalb sind die Gehörorgane der Insekten vor allem darauf ausgerichtet, die Lautstärkenveränderung wahrzunehmen. Für Insekten sind demnach nicht die Tonhöhen, sondern die Tonstärken von Bedeutung. Dieser Umstand ist deshalb beachtenswert, weil das menschliche Ohr vor allem die Tonhöhe besonders fein zu unterscheiden vermag und weniger die Lautstärke erkennen kann.

Diese Annahme wurde auch durch die Untersuchungen von K. D. Roeder und A. E. Treat bestärkt. Das Insektenweibchen empfindet den Werbesang

des liebestollen Männchens ungefähr so, als beobachte jemand die Aussteuerungsanzeige eines Tonbandgerätes bei abgeschaltetem Ton. Die Leuchtdioden dieser und ähnlicher Geräte zeigen bekanntlich nicht die Höhe der Töne, sondern die Intensität der Signale an, also praktisch die momentane Lautstärke. Deshalb sind zum Beispiel die Anzeigewerte beim Finale eines Orchesterstückes besonders groß. Mit etwas Übung kann man sogar Musik und Sprache unterscheiden. Die Nervenfasern der Gehörorgane senden ähnliche elektrische Informationen an das zentrale Nervensystem des Insekts. Das Insekt achtet auf dieses fiktive innere magische Auge, wenn es wissen möchte, was der aus der Umgebung eintreffende Schall bedeuten soll.

Weshalb musizieren eigentlich die einzelnen Insektenarten in verschiedenen Tonhöhen? Vom physikalischen Standpunkt sind diese unterschiedlichen Frequenzen nur deswegen erfor-

derlich, damit das Insekt seine eigene „Visitenkarte“ durch die Lautstärkenveränderung zum Ausdruck bringen kann. Deshalb verwechseln sie auch nicht untereinander die Töne, wie auch wir durch das Einstellen auf der Wellenskala am Radioapparat den von uns gewünschten Sender empfangen können. Um Störungen möglichst zu vermeiden, wurden die einzelnen Wellenlängen des Weltradioprogramms auf Grund von internationalen Vereinbarungen festgelegt. Das System der Nachrichtentechnik der einzelnen Insektenarten ist gleichfalls auf bestimmte Schallwellen eingestellt, so daß jedes Insekt die charakteristischen Signale seiner eigenen Art empfangen und wahrnehmen kann.



Will das Rotkehlchen ein Duett singen, kann es auf einen Partner verzichten. In seiner Kehle befinden sich zwei schallbildende Organe, die zu gleicher Zeit in Funktion treten können. Der Gesang des Vogels liegt im allgemeinen um eine Oktave höher als der höchste Ton des Klaviers.

Zwei Melodien aus einer Kehle

Autoren von Fachbüchern vergleichen manchmal die Funktion von Blasinstrumenten mit der erstaunlich flexiblen und vielseitigen Tonbildungsmöglichkeit der Singvögel; doch diese Annahme ist in keiner Weise stichhaltig. Die Klanghöhe der Klarinette wird durch die Frequenz der im Rohr vorhandenen Luftsäule bestimmt. Je mehr Löcher der Musiker mit seinen Fingern bedeckt, desto länger wird die Luftsäule und um so tiefer der Ton. Die Frage der Klangfarbe ist noch um einiges komplizierter. Entsprechend den Gesetzen der Akustik entstehen in der Luftsäule außer den Grundtonschwingungen auch zwei- bis dreifach überlagerte Schwingungen mit höherer Periodenzahl, die Obertöne. Auf der Grundlage des Verhältnisses und der Stärke der Obertöne können wir die Oboe von der Klarinette selbst

dann unterscheiden, wenn beide den gleichen Ton spielen.

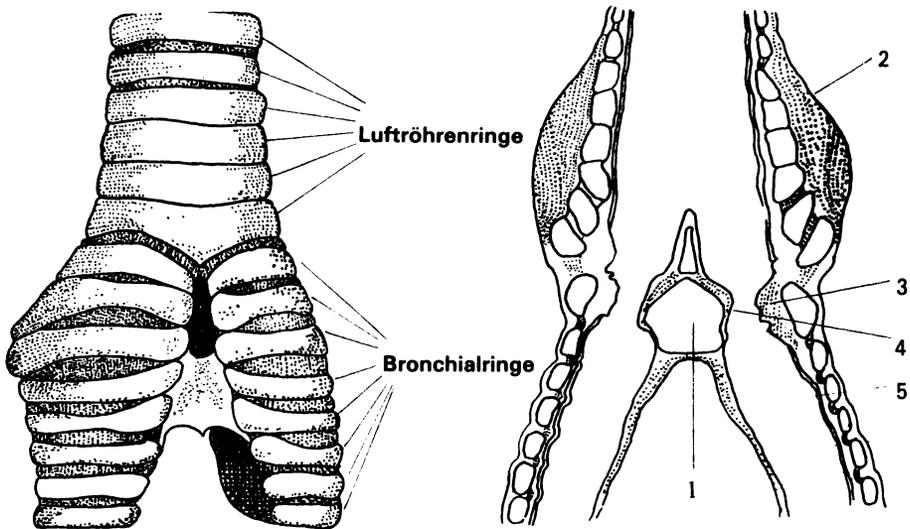
Würden Vögel unter gleichen Voraussetzungen singen, müßte ihr Hals aus einem langen Gummischlauch bestehen. So müßte das Waldgraukehlchen, das im Klangbereich von zwei Oktaven singt, entsprechend den physikalischen Gesetzen seinen Hals bei den tiefsten Tönen um das Vierfache recken. Andererseits erzeugen Singvögel solche reine Töne (Sinustöne), in denen keine Obertöne mitschwingen. Die ausströmende Luft hat hier nur eine Frequenz, was hingegen bei Blasinstrumenten unvorstellbar ist.

Gleicht der Gesang der Vögel eher

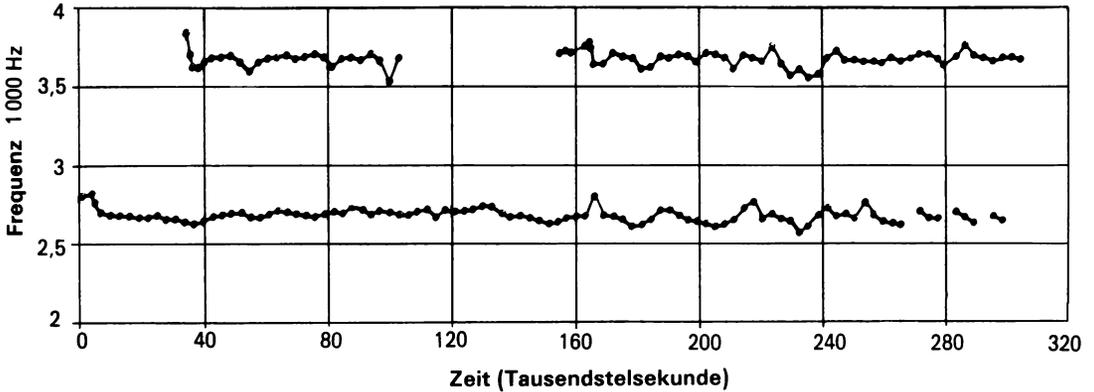
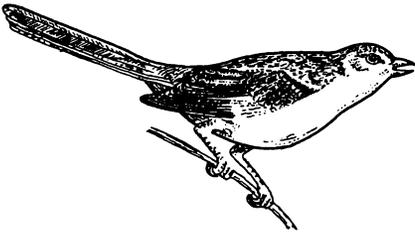
der menschlichen Stimmbildung? Untersuchungen des amerikanischen Forschers C. H. Greenewalt zufolge trifft weder die erste Hypothese noch die zweite zu. Greenewalt hat den Gesang der Vögel mit äußerst feinen Instrumenten untersucht und entdeckte dabei ein ganz besonderes lautbildendes System. Es handelt sich dabei um den Kehlkopf der Vögel, den sogenannten unteren Kehlkopf, weil er sich im Gegensatz zum Menschen nicht am Anfang des Halses beziehungsweise nicht „oben“, sondern „unten“ befindet, wo die beiden aus der Lunge kommenden Bronchien in die Luftröhre münden. An beiden Seiten des unteren Kehlkopfs befinden sich ein eigenständiges Muskelsystem und Nervennetz, so daß der Vogel

den Luftstrom unabhängig voneinander in beide Bronchien leiten kann. Er kann also mit sich selbst ein Duett singen!

Dies ist nicht nur eine theoretisch-biologische Möglichkeit, sondern so etwas kommt auch in der Wirklichkeit vor, wie dies die Schwingungsmessungen von Greenewalt bestätigen. Die Aufnahme des Gesangs einer amerikanischen Spottdrossel ergab, daß sie mit sich selbst ein Duett allein sang, wobei sie mit der einen Stimme den Stimmbereich von 2600 bis 2800 Hertz berührte (ähnlich einem Triller auf der höchsten Oktave des Klaviers zwischen den e- und f-Tönen), mit der zweiten Stimme hingegen „begleitete“ sie ihr Lied im Frequenzwellenbereich von 3500 bis 3800 Hertz.



Das schallbildende Zubehör im Kehlkopf eines Singvogels, wo die Luftröhren- und Bronchialringe zusammentreffen. Der Fortsatz des Schlüsselbeinluftsacks (1); mit den inneren beidseitig elastischen Stimmbändern, der Paukenhaut (4), können die Mündungsöffnungen der beiden Bronchien (5) verschlossen werden. Mit den gegenüber dem inneren Stimmband zur Bewegung der Stimmlippen (3) befindlichen Muskeln (2) wird die zweite Hälfte des Luftverschlusses gebildet. Dadurch verfügt der Vogel zum Singen über zwei „Kehlen“.



Das Duett einer Spottdrossel. Die beiden anhaltenden Töne vibrieren vermutlich nur deshalb, weil das lebende Instrument nicht so präzise wie ein Automat funktioniert. Der durch elektronische Hilfsmittel aufgezeichnete Doppelgesang ist der überzeugendste Beweis, daß bestimmte Vogelarten zur gleichen Zeit aus zwei „Kehlen“ singen.

Des Rätsels Lösung liegt also im doppelten Kehlkopf. Wie genaue anatomische Untersuchungen zeigen, ist der Kehlkopf von Singvögeln durch den elastischen Fortsatz des Schlüsselbeinluftsacks ausgefüllt. Der knorpelige Hohlraum der Kehle ist beidseitig dünner und etwas ausgebeult. Diese „Fenster“, die sogenannten Paukenhäutchen, können mittels der Muskeln des Kehlkopfs einzeln, jedes für sich, gestrafft oder gelockert werden. Am Eingang der beiden Bronchien befinden sich gegenüber den Paukenhäutchen an der Kehlkopfwand je eine muskelartige „Lippe“. Mit Hilfe entsprechender Muskeln können die Lippen gleichfalls voneinander getrennt bewegt werden. So viel „Mechanik“ genügt dem Vogel bereits, um auf einfache Weise den

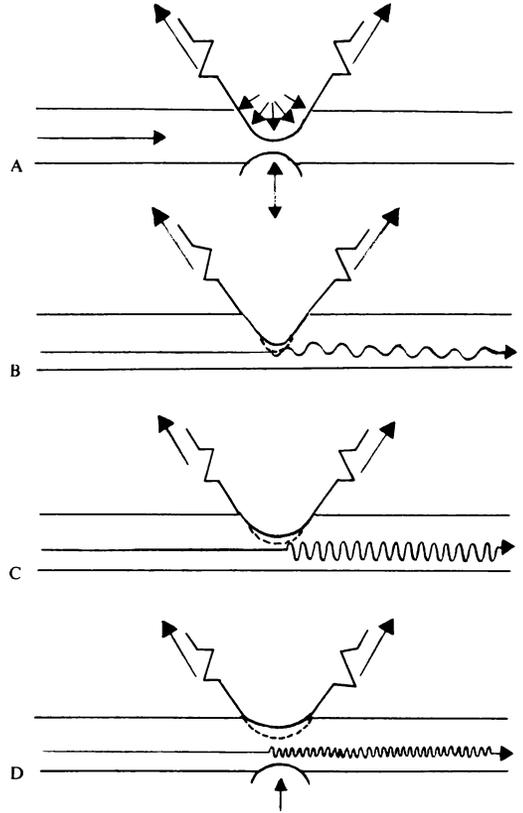
schönsten Gesang zustande zu bringen.

Ist dem Vogel zum Singen zumute, pumpt er seine Lunge und den Luftsack zunächst voll Luft. Der unter dem Schlüsselbein befindliche Luftsack erweitert sich dadurch wie ein aufgeblasener Luftballon, und der Luftdruck preßt die beiden Paukenhäutchen an die gegenüberliegenden Lippen. Die Luft kann jetzt nicht mehr aus der Lunge entweichen. Darauf wird eins der Häutchen mit dem Kehlkopfmuskel gestrafft und etwas zurückgezogen, wodurch der Weg für die aus der Lunge strömende Luft frei gemacht wird. Das Häutchen gerät durch den Luftstrahl in Schwingungen, wodurch die weiterströmende Luft gleichfalls zu vibrieren beginnt: Hierdurch entsteht der Ton. Wenn der Vogel beide Häutchen

strafft, entstehen zu gleicher Zeit zwei Töne. Genauen physikalischen Maßstäben entsprechend ist dies zwar eine etwas vereinfachte Erklärung für die Klangbildung bei Singvögeln, doch sie spiegelt die Wirklichkeit in anschaulicher Weise wider.

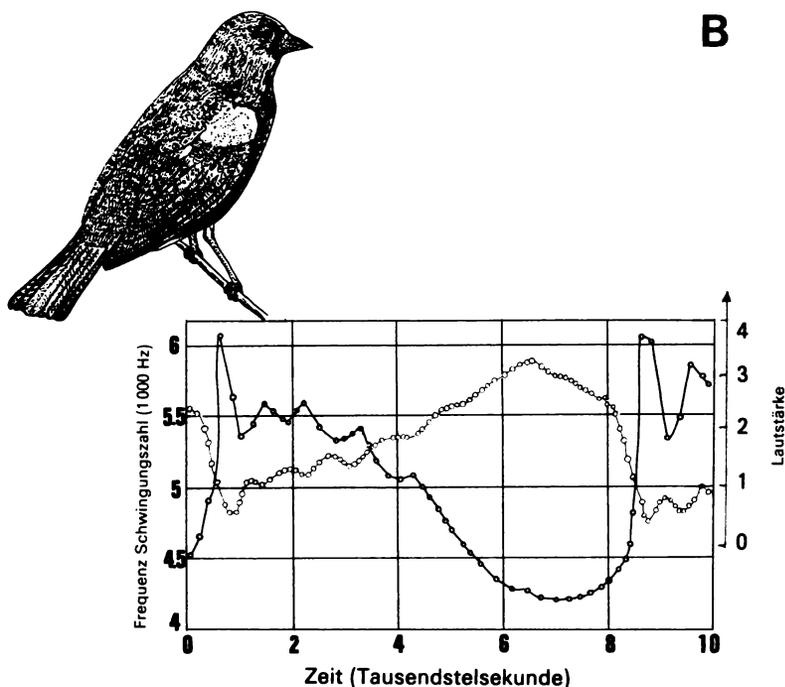
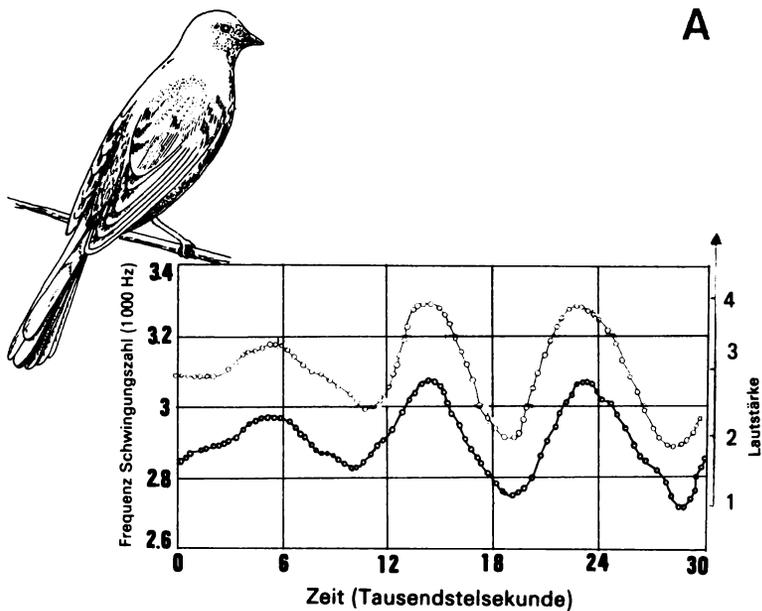
Dieser außergewöhnliche Kehlkopf ist sogar noch zu weiteren musikalischen Bravourstücken fähig. Singvögel sind nicht nur mit Leichtigkeit zu „Glissandos“ imstande, wobei die auf- und abschwelldenden Töne beinahe kontinuierlich unter Verwendung der dazwischenliegenden Frequenz von einem Ton zum anderen ineinanderfließen. Sie sind auch in der Lage, die Klanghärte mit einem unmerklichen Übergang zu verändern, wobei der Ton abklingt oder anschwillt. Sobald der Vogel höhere Töne anschlägt, muß er eine seiner Membranhäutchen mehr straffen, wobei das Häutchen durch die Einwirkung der Luftströmung immer mehr zurückschnellt. Je straffer das Membranhäutchen wird, um so mehr entfernt es sich von der gegenüberliegenden Lippe. Der Ton wird um so lauter, je größere Luftmassen in der Luftröhre in Schwingungen geraten. Mit dem steigenden Ton erhöht sich gleichzeitig auch die Klangstärke.

Wird die Steigerung immer weiter fortgesetzt, tritt einmal der Augenblick ein, wo die Spannung des Häutchens derart stark wird, daß die Luft an der immer größer werdenden Bronchienöffnung entweicht, ohne daß das Membranhäutchen in Schwingungen gerät. Beim Gesang des Waldgraukehlchens ist dies bei einer Frequenzstärke von ungefähr 6800 Hertz der Fall. Kann demnach der Vogel mit einer höheren Stimme nicht singen? Doch! Dann treten nämlich die sich an der Innenwand



Das Funktionieren des Kehlkopfs an Hand eines einfachen Modells. Der Luftdruck des Luftsackansatzes spannt von oben die dünne Membrane des Stimmbands an. Von unten bildet die Stimmlippe den „Schubriegel“ zur hinausströmenden Luft (A). Ist die Stimmlitze klein und die Membrane nur leicht gespannt, entsteht ein leiser und tiefer Ton (B). Je straffer die Spannung der Membrane, desto schneller und kräftiger sind die Schwingungen (C).

Die Klangstärke kann über eine bestimmte Klanghöhe hinweg nicht gesteigert werden. Hier wird der „Umschaltspunkt“ erreicht. Die Stimmlitze schiebt sich weiter nach innen, wobei sich die Stimmlitze um einiges verengt. Jetzt entstehen durch „negative Rückkopplungen“ noch höhere, jedoch leisere Töne (D).



Wenn der Klarinettenvogel nur seine Paukenmembrane in Schwingungen bringt, folgt den Tonhöhenvarianten seines Gesangs (schwarze Kreise) beinahe automatisch der Wechsel der Schallstärke (grüne Kreise). Je höher der Ton steigt, um so lauter wird er (A). Das umgekehrte Verhältnis der Änderung der Tonhöhe und Tonstärke geht aus dem Diagramm über das Singen des Stirlings hervor. Bei solch hohen Frequenzen funktioniert die Vogelkehle bereits mit „negativen Rückkopplungen“.

der Bronchien befindlichen Lippen in Funktion. Die Kehlkopfmuskeln klemmen die Lippen nach innen in die Öffnung, wodurch sich die Stimmritze zusätzlich verengt und der Klang der Stimme noch sanfter wird. Nun kann die Stimme des Vogels noch so hoch sein, die Klangstärke kann nicht mehr anwachsen, sondern nur noch schwächer werden.

Von diesem besonderen „Übergangspunkt“ hängt es bei ansteigenden Frequenzen ab, ob der Vogel den Ton und die Klangstärke parallel entwickelt oder den Ton erhöht und dabei die Klangstärke immer geringer wird. Die Veränderungsmöglichkeiten der Membranenstraffung des Kehlkopfs und das rhythmische Zusammenspiel der „abriegelnden“ Funktion der gegenüberliegenden Lippen bieten selbstverständlich die Möglichkeiten für unzählige Varianten. Wenn zum Beispiel der Vogel einen einzigen Ton dauernd leiser singen möchte und wenn er die Spannung des schwingenden Häutchens nicht verändert, so entsteht ein gleichmäßig hoher Ton. Dabei drückt er die Lippen immer mehr in die Bronchienöffnung: Die Stimmritze wird dadurch enger, der Gesang leiser.

Aus den Untersuchungen ging ferner hervor, zu welchen Leistungen dieses wundervolle Musikinstrument fähig ist. Einzelne Drosselarten sind beispielsweise imstande, während eines „Gluck“-Lautes im Zeitraum von 1 Zehntelsekunde vier Oktaven zu umfassen. Der Stimmenklang bewegt sich in der gleichen Zeit im Schwingungsbereich von 750 bis 10 700 Hertz, was die bisher höchst gemessene Vogelstimme ist. Man braucht sich eigentlich nicht zu wundern, daß Ornithologen das Geheimnis um den Vogelgesang bisher

nicht bekannt war. Der einfach erscheinende Aufbau des Kehlkopfs ließ nichts anderes vermuten. Erst durch die außerordentlich empfindlichen elektronischen Meßinstrumente unserer Zeit wurde es möglich, Vogelstimmen mit einer Genauigkeit von Tausendstelsekunden zu „zerlegen“ und dadurch auch physikalisch eine richtige Erklärung für die Funktion des Kehlkopfs der Singvögel zu finden.

Damit ist es aber mit den Überraschungen noch nicht zu Ende! Im Tierstimmenlaboratorium der Ungarischen Akademie der Wissenschaften gibt es Magnettonaufnahmen, die von einer einzigen Baumlerche 2000 „Melodien“ enthalten: Der besondere Kehlkopf dieses Vogels ermöglicht es ihm, innerhalb 1 Sekunde hintereinander 300 verschiedene Töne zu singen. Eine unglaubliche Leistung! Es gibt sogar Singvögel, die mit einer Geschwindigkeit von 400 Tönen in der Sekunde singen. Es verwundert deshalb nicht, wenn der Mensch meint, Singvögel veranstalten nur ein klirrendes schmetterndes Getriller, obwohl dort oben in der Luft die herrlichsten Stimmen erklingen.

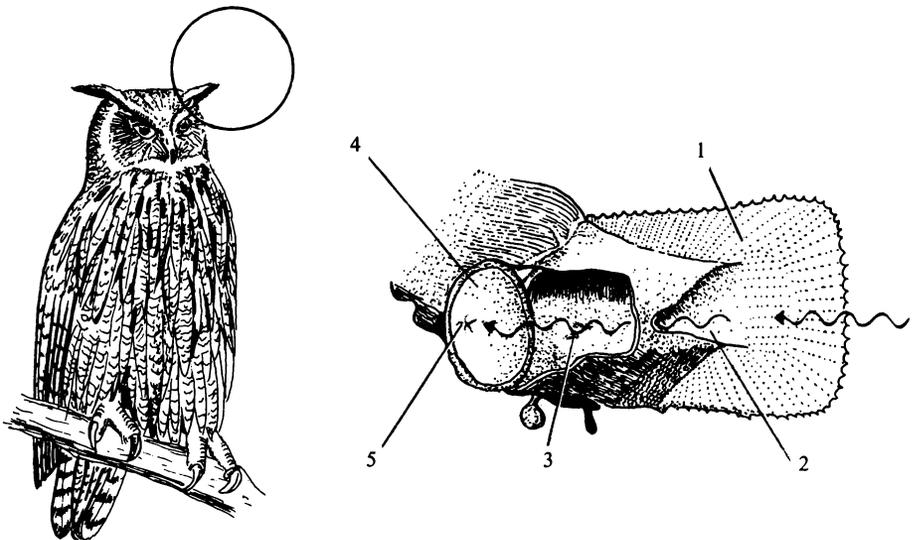
Empfindsame Ohren

Unter den Vögeln haben Eulen das empfindsamste Gehör. Für sie ist es eine Daseinsfrage, denn schließlich jagen sie auf der Grundlage ihres Gehörs. Die Eule nimmt selbst im Stockdunkeln das geringste Geräusch, das eine Maus verursacht, wahr, und sie „steuert“ so schnell und so genau darauf zu, daß sie im Augenblick des Herabstoßens – beim Aufleuchten eines Scheinwerfers – ihr Opfer bereits in den Krallen hielt, wie der amerikanische Forscher

R. S. Payne in Experimenten nachwies, obwohl sie die Entfernung zu der im Dunkeln huschenden Maus mit 7 Metern „einschätzen“ mußte. Interessant dabei ist, daß, als die Eule noch Geräusche hörte, sie ihren Wachposten nicht verließ. Da orientierte sie sich noch. Sie griff erst an, als es plötzlich still wurde.

Der Aufbau des Eulenohrs weicht in vielem von dem der Hörorgane anderer Vögel ab. Die hier in einer Vielzahl vorhandenen mechanischen Tricks dienen alle dem Ziel, die schwächsten Laute und leisesten Geräusche wahrzunehmen. Das äußere Ohr der Vögel beispielsweise besteht lediglich aus einer kleinen Vertiefung am Schädel. Ohrmuscheln fehlen gänzlich, so daß es schwierig ist, festzustellen, wo sich die Ohren befinden. Bei der Waldohreule

hingegen können bereits von weitem die merkwürdigen federumrahmten Ohrmuscheln erkannt werden. Der vor dem Trommelfell befindliche Hohlraum wird durch eine Hautfalte in zwei Teile geteilt. Während der eine Hohlraum zum Trommelfell führt, ist der andere leer und verschlossen. Durch die Bewegung der Hautfalte vermag die Eule wahrscheinlich besser die Schallschwingungen in das Ohr zu leiten, wodurch gleichzeitig mehr Schwingungsenergien von der Schallquelle übertragen werden. Das Trommelfell der Eule ist erstaunlich groß. Dadurch ist es gegenüber Schallschwingungen empfindsamer; denn es benötigt zu einer gleich großen Übertragung eine schwächere Schallstärke als das kleinere Trommelfell anderer Vögel.



Die erfolgreiche nächtliche Jagd der Eule ist im wesentlichen auf ihr empfindsames Ohr zurückzuführen. Die Schallwellen fließen am Hauptlappen des Ohres entlang (1) durch die Ohröffnung (2) in die Kammer des äußeren Ohres (3) und versetzen das ungewöhnlich große Trommelfell in Schwingungen (4). Von hinten stützt sich ein dünnes Knöchelchen, die Columella, auf das Trommelfell (5). Die Columella leitet die Schwingungen an das innere Ohr weiter.



Lautlos huscht die Eule in der Dämmerung vorbei. Sie nimmt hundertmal schwächere Geräusche wahr als der Mensch. So kann sie den Standort des sich bewegenden Nagers im trockenen Laub leicht orten. Neuesten Untersuchungen zufolge trägt auch das schirmförmige Kopffieder zum Einfangen der schwachen Schallwellen bei.

Im Mittelohr ist das Trommelfell und das ovale Fenster des Innenohrs mittels eines einzigen langen Knochens, der Columella, verbunden. Die Columella stützt sich im Vogelohr genau auf die Mitte des Trommelfells. Im Ohr der Eule ist es vom Mittelpunkt des Trommelfells etwas entfernt, obgleich dadurch der Schwingungsausschlag der Columella beim Vibrieren des Trommelfells kleiner wird, „klopft“ es mit um so größerer Kraft an das Fenster des Innenohrs. Das führt vor allem zur größeren Empfindlichkeit, weil die im Innenohr sich bewegende Flüssigkeit ebenfalls höheren Druckwellen ausgesetzt ist. Im menschlichen Ohr verstärken sich die Schallwellen durch Vermittlung

der drei Hörknöchelchen auf das Zweiundzwanzigfache. Das Ohr des Haussperlings verstärkt die Schallschwingungen ungefähr im gleichen Verhältnis. Die hellhörige Eule verfügt über einen vierzigfachen „Verstärker“! Es ist deshalb nicht von ungefähr, daß sich die Eule bei der Jagd in erster Linie auf ihr Gehör stützt. Obgleich sie im Halbdunkel ihre Augen auch benutzt, bestimmt sie den Standort ihres Opfers in jedem Fall durch ihr Gehör. Wenn sie vom Baumast hinabfliegt, weiß sie genau, wohin sie fliegen muß. Während des Fluges leisten ihr selbstverständlich auch ihre Augen beim Ausweichen der im Weg stehenden Bäume und Sträucher Hilfe.

Der untere Bereich des Hörvermögens der Vögel bewegt sich im allgemeinen zwischen 100 und 300 Hertz, doch die obere Grenze liegt in vielen Fällen bereits im Ultraschallbereich. Diese auf die oberen Schwellwerte bezogenen Messungen wurden mit einer Galtonpfeife durchgeführt, die für das Hervorbringen von Ultraschalltönen besonders gut geeignet ist. Der japanische Forscher Konishi Masakazu hält diese Untersuchungsergebnisse jedoch für ziemlich problematisch. Im Jahr 1969 kam er nämlich auf Grund seiner eigenen Untersuchungen zu der Schlussfolgerung, daß Vögel keine höheren Töne wahrnehmen als Menschen. Seiner Meinung nach gingen frühere Forscher deshalb von für uns nicht wahrnehmbaren Tönen beim Gesang der Vögel aus, weil das menschliche Ohr zwischen den einzelnen Tönen der Singvögel nicht unterscheiden kann. Die Ursache läge aber nicht in der außergewöhnlich hohen Frequenz, sondern darin, daß sich im Vogelgesang die verschiedenen Töne überschlagen.

Wenn sich in einem Vogeltriller je Sekunde dreißigerlei Tonfrequenzen zu einem Glanzstück aneinanderreihen, können die einzelnen Töne vom Menschen mehr oder weniger noch wahrgenommen werden. Doch wenn sich die Frequenzänderung auf eine Geschwindigkeit von 100 Tönen in der Sekunde steigert, ist nur ein Gesurr oder Gemumm zu hören. Das „zeitzerlegende“ Hörvermögen der Vögel ist um fünfzig- bis hundertmal besser als das der Menschen. Sie nehmen im wahrsten Sinn des Wortes tonweise wahr, was ihre Gefährten singen! Dadurch wird auch begreiflich, wie sich Vögel „persönlich“ unterscheiden können. Durch die schnelle Änderung der Klanghöhe und

-stärke sind sie in der Lage, in ihrem Gesang so viele Varianten zu realisieren, daß sie hinsichtlich der Anzahl sogar mit den Variationsmöglichkeiten des Zahlenlottos wetteifern könnten. Jeder Vogel hat gewissermaßen eine eigene „Stimmenvisitenkarte“, und das Weibchen erkennt jeden einzelnen Verhehrer auf Grund seines spezifischen Troubadourgesangs.

Unter den Säugetieren übertrifft das Hörvermögen des Hundes bei weitem das des Menschen. Hunde nehmen ein vom Menschen noch mit Mühe vernehmbares Geräusch aus einer viermal weiteren Entfernung wahr. Forscher in Philadelphia haben nachgewiesen, daß der Schneckengang des Innenohrs von Hunden erst bei Bellauten zum Schwingen kommt. Dabei entsteht ein spezifisches Schwingungsmodell in der Flüssigkeit des Innenohrs, wodurch dann über die Empfindungszellen entsprechende elektrische Signale in den Hörbereich des Gehirns laufen. Dadurch kam man zu der erstaunlichen Entdeckung, daß das Innenohr des Hundes nur für das Bellen seiner Artgenossen empfindsam ist. Doch in welcher Weise nimmt er menschliche Stimmen wahr, und wie unterscheidet er die einzelnen an ihn gerichteten Worte? Das konnte selbst bis heute noch nicht eindeutig geklärt werden.

Das Gehör der Katzen ist mindestens so empfindsam wie das der Hunde. Sie hören bereits in einer Entfernung von 14 Metern das Geräusch der huschenden Maus. Es dürfte verständlich sein, warum die Katze akustischen Messungen zufolge nicht wie der Mensch gegenüber Schallschwingungen von 2734 Hertz am empfindsamsten ist, sondern zuerst bei den um zwei Oktaven höheren Tönen als die höchste Frequenz des

Klaviers aufhorcht. Katzen ziehen dadurch außerordentlichen Nutzen beim Fangen von Mäusen, da die Mehrheit der schwachen Geräusche hauptsächlich aus hohen Tönen besteht.

Vom Gesichtspunkt der Nachrichtenübermittlung funktionieren die tonangebenden und tonempfangenden Organe der Tiere im allgemeinen auf abgestimmte Weise im gleichen Schwingungsbereich, die Empfindsamkeit jedoch entspricht der für ihre Lebensbedingung notwendigen Präzision. In diesem Zusammenhang gibt es aber auch noch viele Unklarheiten. Wir wissen beispielsweise nicht, weshalb einzelne Insekten, zum Beispiel der Warzenbeißer, Ultraschalltöne bis zu 90 000 Hertz wahrnehmen. Österreiche Ozeanologen stellten fest, daß auch das spezifische Sinnesorgan der Fische, die Seitenlinie, die aus dem Ultraschallbereich eintreffenden Schwingungen wahrnimmt. Mäuse stellen selbst sensibelste Ultraschallmikrofone in den Schatten, indem sie sich beispielsweise gegenseitig mit Gefahrenschreien von rund 100 000 Hertz warnen, wenn sich eine Katze nähert. Ob sie noch höhere Töne wahrnehmen können, haben Forscher bis heute noch nicht gründlich untersucht. Messungen zufolge sind Hunde bis zu 38 000 Hertz empfindsam. Darum kann Polizeihunden beigebracht werden, daß sie auf das für uns unvernünftige Rufsignal einer Galtonpfeife reagieren. Ebenso erstreckt sich auch das Hörvermögen der Affen bis in den Ultraschallbereich. Beobachtungen amerikanischer Forscher an Makaken haben bestätigt, daß die untersuchten Tiere selbst Töne von 45 000 Hertz wahrnahmen. Sicher werden die Hörmessungen im Bereich des Ultraschalls den Biophysikern noch einige Überraschungen bereiten.

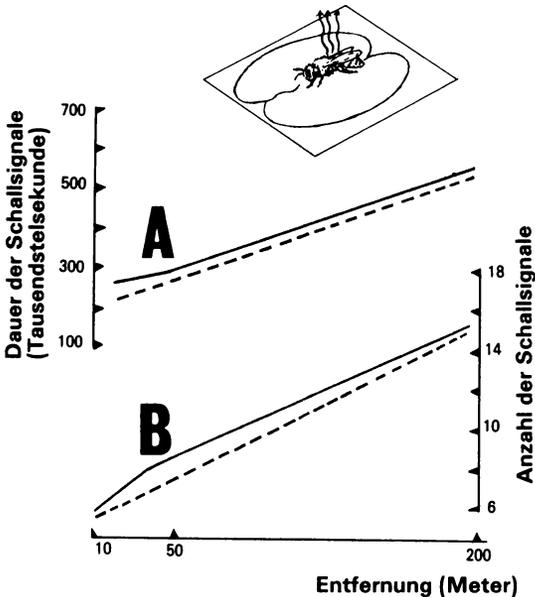
Der Mensch „redet mit“

Wer hat nicht schon im Kindesalter davon geträumt, wie schön es wäre, die Sprache der Tiere zu verstehen? Biophysiker versuchen an Stelle von Träumen auf der Grundlage von wissenschaftlichen Untersuchungen eine Art Wörterbuch über akustische Signale der Tiere zusammenzustellen, doch man muß zugeben, daß auch sie in der Enttätung der für uns unverständlichen Laute nicht viel weitergekommen sind als frühere Naturforscher. Sehr viel können wir freilich von diesen Lauten nicht erwarten. Tiere können vermutlich mit ihren akustischen Signalen manches ausdrücken, doch ihre Kommunikation bezieht sich nur auf die Gegenwart. Sie haben keine Vorstellung von der Vergangenheit und über die Zukunft. Sie kennen nicht jenes zweite Signalsystem der menschlichen Sprache, mit dessen Hilfe auch durch abstrakte Begriffe die Wirklichkeit widerspiegelt wird. Folglich sind sie nicht imstande, ihre Gedanken miteinander auszutauschen. Ihr Signalsystem dient niemals einem Gespräch, sondern nur der Nachrichtenübermittlung.

Dazu gehören freilich einige Besonderheiten. So stellte beispielsweise der holländische Naturforscher Kluver nach eingehendem Studium der Vogelsprache begeistert fest: „Vier Jahre lang folgte ich mit dem Magnetophon einem beringten Zaunkönig. Ich folgte ihm von Hain zu Hain, von Busch zu Busch. Und jetzt weiß ich, wovon er sprach. Vom entsetzlichen Hunger der Kindheit, vom übermütigen Herumtreiben in der Jugendzeit, von der ersten Aufregung bei der Jagd auf Maden, vom ersten Nestbau, von der Begegnung mit der Auserwählten des Herzens...“

Wahrlich, eine klangvolle Sprache . . .“

Die meisten Forscher beurteilen den Informationsgehalt der Tierlaute nicht so romantisch. Sie versuchen auf der Grundlage der Frequenzwerte, der Klangstärke, der Zeitdauer und der Pausen, Gesetzmäßigkeiten bei gleichen Informationssignalen von Tierlauten festzustellen. Auf Grund der bekannten „Tanzsprache“ der Bienen erwies es sich, daß die Entdeckerin von Nektarquellen die Entfernung der Nahrungsquelle nicht nur mit Bewegungen verkündet, sondern auch mit Lauten.



Im dunklen Bienenstock oder in der Dämmerung bedienen sich Bienen bestimmter akustischer Signale. Messungen des sowjetischen Forschers J. K. Jeskow haben ergeben, daß sich die Dauer der Flügelschwingungen (A) beim Bientanz und die Anzahl der Schallsignale (B) zur angezeigten Entfernung proportional verhalten. Die volle grüne Linie stellt die Signale der „nahrungsbeschaffenden“ Bienen, die gestrichelte Linie hingegen die der „quartiervorbereitenden“ dar.

Der Wissenschaftler H. Esch von der Notre-Dame-Universität wies durch eingehende Untersuchungen nach, daß Bienen verschiedene Lautimpulse über ihre Nahrungsquellenentdeckungen verbreiten. Messungen zufolge ruft die Biene während der Nachrichtenübermittlung beim Schwänzeltanz, wenn sie sich auf dem mittleren Bogen der Acht bewegt, mit ihren Flügeln einen Schall hervor, dessen Schwingungsstärke bei 200 bis 250 Hertz liegt. Dabei hängt die Zeitdauer der Schallbildung unmittelbar mit der Entfernung des Fundorts zusammen. Wenn beispielsweise die mit Blumen bedeckte Wiese sich ungefähr 200 Meter entfernt befindet, halten die Schallsignale 0,5 Sekunden an. Beträgt die Entfernung aber 1,2 Kilometer, ist die Zeitdauer der Schallimpulse 2 Sekunden. H. Esch bewies außerdem durch Tonbandaufnahmen, wie bei einer Art der tropischen Meliponabiene eine vom Fundort zurückkehrende erfolgreiche Arbeitsbiene ihre Gefährtinnen durch Schallsignale über die Entfernung des Fundorts informierte. Später gelang es sogar, die Bienen durch Wiederholung der Signale auf Tonband aus dem Bienenkorb zu locken, worauf sie dann die gleiche Blumenwiese wie vorher aufsuchten. Dieses Experiment läßt erkennen, daß die Bienen durch die akustischen Signale nicht nur über die Entfernung, sondern auch über die Richtung informiert werden. Zur Zeit ist den Forschern noch keine nähere Einzelheit über diese sonderbare musikalische Meßmethode bekannt.

J. K. Jeskow, Mitarbeiter des sowjetischen Wissenschaftlichen Instituts für Bienenzucht in Rybnoje, fielen bei Untersuchungen über das Schwärmen der Bienen einige interessante Laute auf. Während sich der Bienenschwarm nach

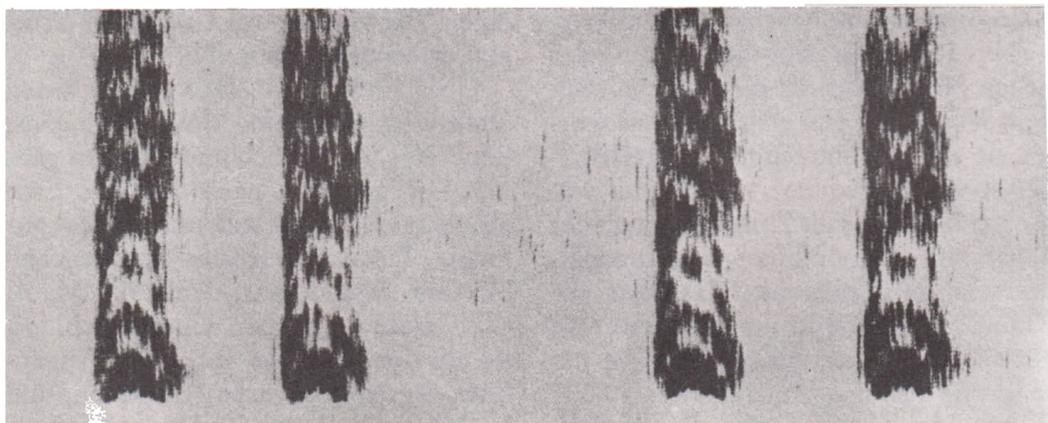
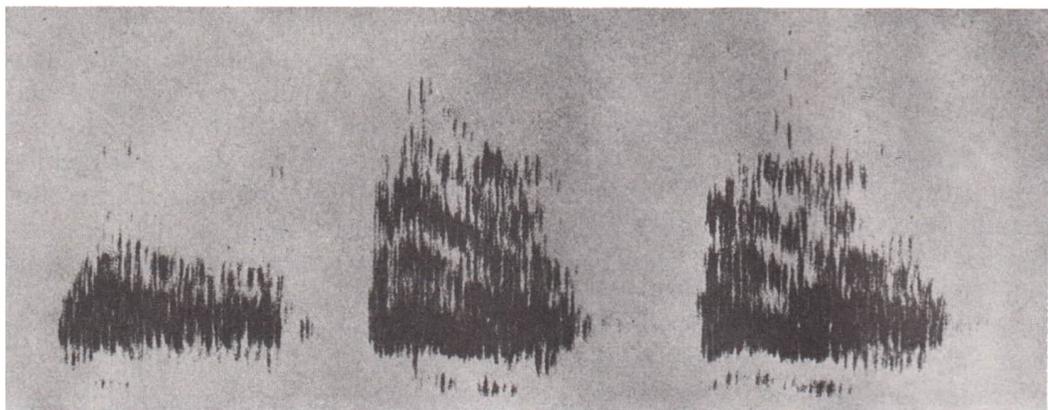
dem Ausschwärmen in einer riesigen Traube um die Königin an einen Ast hängt, scheren „Nahrungsmittelbeschaffer“ und „Quartiermeister“ aus dem Schwarm aus, um den neuen Wohnsitz der Bienenfamilie entsprechend vorzubereiten. Von ihrem Informationsflug zurückgekehrt, entwickelt sich ein ausgesprochenes Wechselgespräch zwischen den Entdeckern und dem Schwarm. Der „Quartiermeister“ informiert den Bienenschwarm mit lautstarken, durch Pausen unterbrochenen Klangsignalen in einer Frequenz von 400 bis 500 Hertz über die Richtung des neuen Nistplatzes. Ist die Mehrheit mit dem Vorschlag einverstanden, antwortet sie mit zustimmenden Flügelschlägen in einer Frequenz von 200 bis 400 Hertz. Nach kurzer Zeit, wenn sich der Schwarm zum Abflug bereitmacht, herrscht im allgemeinen Gesumm die Klangschwingung in der Frequenz von 120 bis 180 Hertz vor, was für die riesengroße Familie von ungefähr 40 000 Bienen das Zeichen der Bereitschaft zum Aufbruch bedeutet. Der aufmerksame und hellhörige Imker weiß dadurch im voraus, wann die Bienen zum Aufbruch ansetzen, und kann dann noch rechtzeitig den gesamten Schwarm einfangen.

In den Tierstimmen sind viele Empfindungen und Ausdrucksmerkmale enthalten. Die Stimmen locken, drohen und drücken Angst sowie Freude aus. So verkünden das Quaken der Frösche und der Gesang der Vögel in gleicher Weise weittönend den Besitzanspruch auf ein bestimmtes Territorium. Gewisse Laute werden auch von biologischen Abläufen bestimmt. Die Forscherin Margaret Vimce konnte in diesem Zusammenhang beobachten, daß die Eier im Wachtelnest einige Tage vor

dem Ausschlüpfen der Vogelkücken zu „piepsen“ beginnen. Diese Laute hängen mit der Atmung der Vögel zusammen, und den Forschern zufolge fördert dies die Entwicklung der zurückgebliebenen Wachtelebryone. Diese Annahme wurde auch durch entsprechende Experimente bestätigt. Es wurden ältere Wachteleier neben Eier mit jüngeren Embryonen gelegt. Das Piepsen in den Eiern bestätigte die Erwartungen. Die in der Entwicklung „zurückgebliebenen“ Kücken schlüpften einen Tag vor der auf Grund der Brutzeit errechneten Frist.

Über Katze und Maus gibt es einen alten Witz. Die kleine Maus flüchtet vor der Katze in ein Loch und lugt, am ganzen Leib zitternd, nach draußen. Eine Zeitlang ist es ganz still, und sie hört gar nichts. Plötzlich erreicht Hundegebell ihr Ohr. Wunderbar, denkt die Maus, die Gefahr ist vorbei! Und so schlüpft sie aus dem Loch. Im folgenden Augenblick ergreifen sie scharfe Krallen, und nachdem die Katze die Maus gefressen hat, sagt sie wohlgefällig: „Es ist doch gut, wenn man fremde Sprachen beherrscht!“ Der sowjetische Professor Marikowski erwähnt ein ähnliches Beispiel im Zusammenhang mit Insektenstimmen, jedoch mit anderem Ausgang. Die hummelartig behaarte und gefärbte Schwebfliege entkommt den ihr nachjagenden Vögeln in der Weise, daß sie auch den Flugton der Hummel täuschend nachahmt. Sie bewegt die Flügel während des Fluges in der gleichen Frequenz, so daß die Vögel Angst vor den Stichen der Hummel bekommen und sie das unheilverkündende Insekt schließlich in Ruhe lassen. Diese List ist zumindest so verheißungsvoll, als erlerne die Katze das Bellen . . .

Immerhin versteht der Mensch heute



Der Lärm spielt im Bereich der Töne eine ähnliche Rolle wie das weiße Licht in der Optik. So wie weißes Licht aus einer Mischung verschiedener Farben besteht, so ist Lärm vor allem deshalb nicht wohlklingend, weil in ihm verschiedene Tonschwingungen enthalten sind. Nicht wohlklingend ist auch das Gekrächze der Raben. Die dargestellten Schallbilder stellen in senkrechter Richtung die anschwellenden Frequenzen dar, waagerecht hingegen die Zeitdauer. Der amerikanische Rabe wiederholt innerhalb von einigen Minuten mehrere hundertmal die zum Sammeln bestimmten Signale (oben). Das Gefahrensignal hat eine höhere Frequenz und besteht aus kürzeren Schallsignalen (unten).

bereits so viel von der Tiersprache, daß er ab und zu mitreden kann. Insbesondere in solchen Fällen, in denen es beispielsweise darauf ankommt, Fische ins Netz zu locken oder schädliche Tiere zu verjagen. Forscher des Instituts für Meeresbiologie der Universität Miami haben mit Erfolg einige Meeresfische, die vom Standpunkt des Fischfangs besonders wichtig sind, irreführt. Man

verbreitete mit einem Unterwasserlautsprecher ein sich innerhalb einer Oktave bewegendes Geräusch mit einer Frequenz von 25 bis 50 Hertz. Der Schallunterschied zwischen dem unteren und oberen Wellenbereich betrug 24 Dezibel. Die Signalfolge wurde von einigen Impulsen in der Minute bis zu mehreren in der Sekunde variiert, wobei der Lautsprecher im wesentlichen die gleichen

Geräusche im Wasser erzeugte wie Tiefseeraubfische beim Fressen. Von diesem Geräusch wurden zum „gedeckten Tisch“ auch ungebetene Gäste, kleinere Fische, angelockt. Wahrscheinlich waren die Fische sehr erstaunt, als sie, dem lockenden Geräusch folgend, anstatt feiner Leckerbissen nur ein Netz entdeckten, dies aber auch zu spät.

Französische Forscher erzielten auf Grund der Analyse von Heuschreckenlauten recht gute Ergebnisse. Es bedurfte langwieriger Experimente, bis es sich herausstellte, daß die gefürchteten Schädlinge nicht auf allmählich anschwellende oder leiser werdende Töne, sondern auf jäh unterbrochene Laute ansprechen. Forschern wurde diese Eigenart dadurch bekannt, daß zufälligerweise ein Tonband riß und die Experimentierheuschrecken in beson-

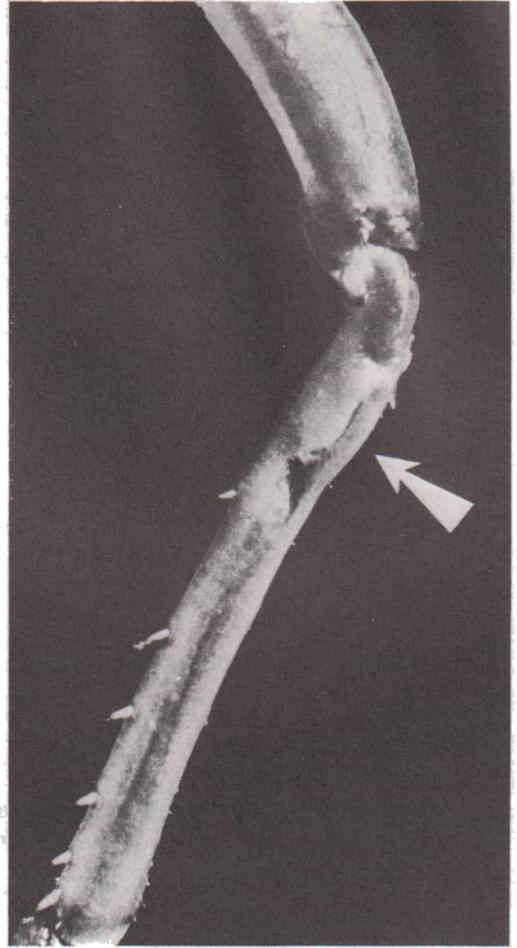
ders auffälliger Weise durch heftiges Zirpen darauf reagierten. Aus den Experimenten ging weiter hervor, daß „ekige“ Laute, die mit einer ruckartigen Schärfe beginnen oder auch unerwartet abbrechen, sich vorzüglich als Rufsignale eignen. Als im Rahmen des Experiments ein derartiges „Programm“ im Freien ausgestrahlt wurde, versammelten sich die Heuschreckenweibchen in riesiger Anzahl um den Lautsprecher. Es ist nicht ausgeschlossen, daß es in absehbarer Zeit gelingen wird, durch Entzersetzung der Heuschreckensprache ein wirksames Mittel zur Bekämpfung der Heuschreckenplage zur Verfügung zu haben.

Das entsetzliche Geschrei eines gefangenen Raben bedeutet für die anderen Raben eine schreckenerregende Gefahr. Französische Forscher nahmen



Umherfliegende wilde Tauben sind am wirksamsten durch Krähengekrächze zu vertreiben. Das japanische Stahlwerk in Kawasaki verschenkt an seine Kunden Schallplatten, auf denen Krähengeschrei zu hören ist. Mit dem Abspielen der Schallplatten und der Verstärkung durch Lautsprecher wurden angeblich einige hundert nistende Tauben aus dem Zentrallager des Stahlwerks vertrieben.

diesen Angstschrei auf Tonband auf und verbreiteten ihn durch einen Lautsprecherwagen in einem von Raben befallenen Eichenwald. Als die Nacht hereinbrach und sich die Vögel zur Ruhe niedergelassen hatten, erklangen über das Tonband die Angstschreie. Die Wirkung war ungeheuerlich! Tausende von Raben ergriffen mit zornigem Geräusche die Flucht. Entsprechende Nachprüfungen ergaben, daß die Raben auf diese Stelle bis zum nächsten Winter nicht zurückgekehrt sind. Englische Forscher erprobten das gleiche mit dem Warnruf eines Stars. Die aufgeschreckten Vögel kehrten zunächst nach einem eintägigen Herumirren am nächsten Tag wieder zu ihrem nächtlichen Schlafplatz zurück. Doch als sie am folgenden Abend wieder durch Schreckrufe aufgestört wurden, zeigte es sich, daß sich der größte Teil der Vogelschar für einen anderen Schlafplatz entschied. Diese Experimente dienen auch der Verhütung von Flugzeugkatastrophen, die durch Vögel, die sich in der Nähe von Flugplätzen aufhalten, verursacht werden. Ähnliche Experimente wurden auch in Ungarn durchgeführt. Der Vogelstimmenforscher Peter Szöke und seine Mitarbeiter strahlten den „Todesangstschrei“ der Eichelhäher mit Hilfe eines Tonbands aus. Die Eichelhäher ergriffen, als sie die Schreie hörten, in großer Eile die Flucht.



Der Grashüpfer kann selbst mit einem Bein die Richtung der Schallquelle bestimmen. Der Schall gelangt durch zwei parallel verlaufende Schlitze an der Vorderschiene (auf der Abbildung ist nur einer zu sehen) ins Gehörorgan. Je mehr das Bein von der Schallquelle abgewendet ist, um so leiser die Wahrnehmung. Damit kann sich der Grashüpfer ebenso orientieren wie der Mensch mit einem Ohr. Da ihm aber die Gehörorgane beider Vorderschienen zur Verfügung stehen, kann er sogar den räumlichen Standort der Klangquelle genau einschätzen.

Woher kommt der Schall?

In Deutschland und Frankreich wurden bereits während des ersten Weltkriegs geheime Experimente mit drehbaren Trichterhorchgeräten durchgeführt, um mit deren Hilfe die Richtung der anfliegenden Flugzeuge zu bestimmen. Kaum

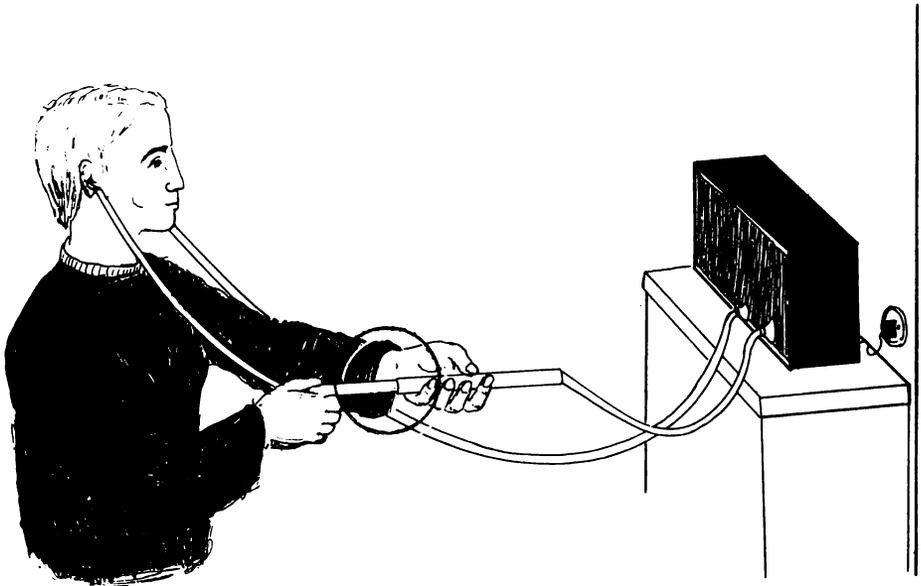
hatte der Mensch die ersten Flugversuche überstanden, wurden die fliegenden Motormaschinen bereits zur furchtbaren Waffe: Die Kriegspiloten entluden

ihre Bombenlast auf feindliche Stellungen und Städte. Damit begann auch die Konstruktion und der Bau von Abwehrgeschützen. Der drehbare Abhörtrichter wurde nach dem Muster des Fledermausohres konstruiert. Die Achse des Trichters zeigt genau in die Richtung des Flugzeugs, wenn vom Gerät das stärkste Geräusch „registriert“ wird, weil der Trichter dabei die verstreuten Geräusche des Flugzeugs konzentrisch zusammenfaßt.

Einige Insekten nutzen diese Erfindung seit Jahrmillionen mit gutem Erfolg. Ihr in Vertiefungen der Beine befindliches Tympanalorgan ist, wie Messungen ergeben haben, richtungsempfindsam: Es registriert den stärksten Schall, wenn die Beinachse gerade in

Richtung der Schallquelle zeigt. Die Insektenweibchen machen sich bereits aus einer Entfernung von 10 Metern begeistert in Richtung des zirpenden Männchens auf den Weg und eilen stets in gerader Richtung zum Stelldichein. H. Autrum setzte im Jahr 1955 eine Laubheuschrecke auf eine drehbare Scheibe und stellte mit Hilfe aus verschiedenen Winkeln ausgestrahlter Schallsignale die Richtungsempfindsamkeit des Gehörsinns der Heuschrecke fest. Ähnliche Experimente wurden auch von dem englischen Forscher Pumphrey durchgeführt, als er die gut einzugrenzende Empfindsamkeit des Hörtrichters des Grashüpfers ermittelte.

Die trichterförmige Ohrmuschel hö-



Wenn wir den Klang aus einem Lautsprecher durch zwei Gummischläuche eines Stethoskops in unsere Ohren weiterleiten, können wir den Ausgangspunkt der Klangquelle selbst bei geschlossenen Augen ziemlich genau bestimmen. Je mehr wir aber das rechte Rohr mittels eines aufgesetzten Ansatzstutzens auseinanderziehen, mit einer um so größeren Verzögerung erreicht der Klang unser rechtes Ohr. Wir empfinden es so, als wandere der Lautsprecher im Zimmer nach links.

herentwickelter Tiere dient gleichfalls dieser Richtungssensibilität. So kann zum Beispiel die Fledermaus ihr Ohr beinahe im Kreis drehen, und wenn ein Ohr der Hufeisennasen-Fledermaus zugestopft wird, findet sie sich trotzdem zurecht. Vögel haben keine Ohrmuscheln es würde sie beim Flug nur hindern. An den meisten Vogelohren befindet sich eine kleine Hautfalte, die, in Federn verhüllt, gleichfalls der Richtungsbestimmung dient. Doch dazu würde im Grunde genommen ein Ohr genügen. Es fragt sich deshalb, weshalb Tiere zwei Ohren haben?

Jeder kennt sicherlich jenen gegabelten Gummischlauch, den der Arzt zum Abhören der inneren Organe benutzt. Dieses Stethoskop eignet sich sehr gut zu einem verblüffenden Experiment. Wenn wir an beiden Enden des Gummischlauchs ein Rohrstück aufstecken und die „tastenden“ Enden an einen Pappkarton klemmen, hinter dem sich ein Lautsprecher befindet, kann das Stethoskop eine besondere Illusion bei uns hervorrufen. Beginnt dabei der Lautsprecher in monotonem Ton zu summen, brauchen wir nur das Stethoskop an die Ohren zu setzen, unsere Augen zu schließen und auf den Klang des Lautsprechers zu achten. Beim Verlängern einer der beiden Seiten durch das Verschieben eines Rohrstücks beginnt der Ton aus dem Lautsprecher auf einmal zu „wandern“. Wenn wir beispielsweise den Schlauch der linken Seite allmählich verlängern, scheint es so, als würde sich die Klangquelle nach rechts fortbewegen.

Wie ist dieses sonderbare Phänomen zu erklären? Da der Ton im linksseitigen Schlauch einen längeren Weg zurücklegt, erreicht er zu einem späteren Zeitpunkt unser linkes Ohr. Diese Ver-

zögerung empfinden wir so, als befände sich die Klangquelle weiter rechts von uns. Dies ist übrigens auf unsere Erfahrungen zurückzuführen.

Wenn uns jemand von rechts etwas zuruft, erreicht der Klang unser linkes Ohr später als das rechte. Unser Gehirn differenziert hier auf Grund des Zeitunterschieds und bestimmt die Richtung der Klangquelle. Der kleinste Zeitunterschied, den wir noch wahrnehmen können, beträgt 0,0001 Sekunden. Außerdem erreicht der später eintreffende Ton in abgeschwächter Stärke unser Ohr, denn er muß ja unseren Kopf „umgehen“. Diese schalldämpfende Erscheinung vermittelt unserem Gehirn ebenfalls nützliche Informationen. Nach neuesten Untersuchungen bestimmt unser Gehirn die Klangrichtung bei niedrigeren Frequenzen als 1400 Hertz auf der Grundlage des Zeitunterschieds, bei höher liegenden Frequenzen jedoch durch den Klangstärkeunterschied. Die Hörorgane niedrig entwickelter Tiere funktionieren im wesentlichen nach dem gleichen Prinzip. Die Laubheuschrecke zum Beispiel nimmt den Klang getrennt mit zwei paukenförmigen Organen wahr, worauf dann im Nervensystem aus beiden Signalen zusammen das Richtungsgefühl entsteht. Die Entfernung zwischen den Ohren der Insekten ist bei den einheimischen Arten kaum größer als 1 Zentimeter. Bei größeren Entfernungen steigt die Genauigkeit der Richtungsbestimmung. Lediglich Fische haben es in dieser Beziehung schwierig. Auf Grund ihrer Schwimmblase haben sie praktisch gesehen nur ein Ohr. Der Ansicht von Harris und van Bergerijk nach können sie sich dennoch orientieren. Ihre Seitenlinie nimmt nämlich den Druckunterschied des Wassers wahr, so daß sie im großen und

ganzen die Richtung der Klangquelle bestimmen können.

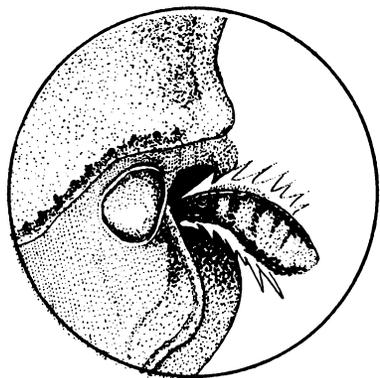
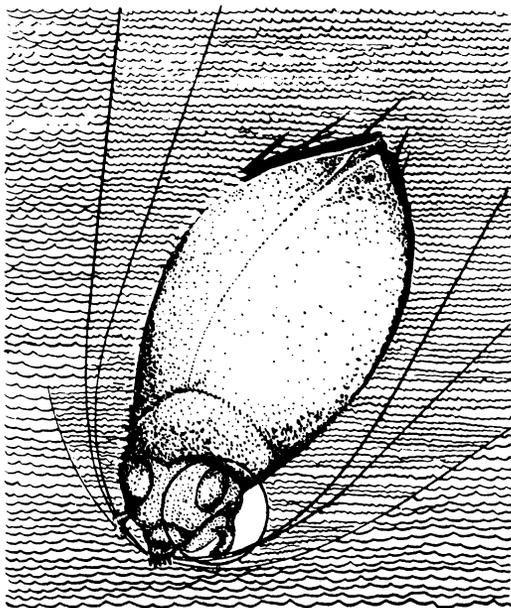
Von den in der Nacht jagenden Tieren ist die Eule am meisten auf eine genaue Orientierung angewiesen, denn sie muß aus dem Geräusch der huschenden Maus feststellen, wo sich das Tierchen im Dunkeln auf den Boden duckt. Der Richtungs- und Entfernungssinn der Eule ist in der Tat vorzüglich: Aus einer Entfernung von 5 Metern verfehlt sie ihre Beute höchstens um 8,7 Zentimeter, wenn sie im Dunkeln auf sie hinabschießt. Einzelnen Forschern zufolge kann sie diese hohe Genauigkeit ihren asymmetrischen Ohren verdanken. Ihre beiden Ohren befinden sich nämlich nicht wie bei anderen Tieren in einer waagerechten Linie. Eins ihrer Ohren ist etwas höher gelegen. Der Mensch ist ziemlich ratlos, wenn der Ton genau vor seiner Nase, aus einer gleichen Entfernung von seinen beiden Ohren, ankommt. Es ist ihm in der senkrechten Ebene unmöglich, festzustellen, ob der Ton von oben oder unten herrührt. Beim Hochheben oder Herunterlassen des Lautsprechers in der gleichen Vertikale empfindet der Mensch keine Veränderung. Nicht so die Eule! Mit ihren beiden schräg angeordneten Ohren kann sie in allen Fällen einen Zeitunterschied wahrnehmen, was ihr auch ermöglicht, die genaue Richtung zu bestimmen.

Erkundung des Raumes

Wenn Seepferdchen in ein neues Aquarium gesetzt werden, beginnen sie derart laute Töne hervorzubringen, daß es selbst in der entferntesten Ecke des Zimmers zu hören ist. Nach Ansicht von Forschern tasten sie dabei mit dem

reflektierenden Klang ihrer Laute die Umgebung ab, und sie beruhigen sich erst, wenn sie das Ausmaß und die Oberflächenbeschaffenheit ihres neuen Zuhauses kennengelernt haben. Dabei handelt es sich ebenfalls um eine wichtige Erfindung der Natur, und zwar um die Echofernmessung, die von zahlreichen Arten der Tierwelt angewandt wird. Das Grundprinzip dieser Erfindung ist einfach: Je später die ausgesandten Laute zurückkehren, desto weiter liegt das im Weg befindliche Hindernis. Vermutlich dient das Getrommel und das Tremolieren mit der Schwimmblase der sich im Wasser des seichten Ufergeländes aufhaltenden Fische ähnlichen „Messungen“.

Die an der Wasseroberfläche lebenden und auf ins Wasser gefallene Insekten jagenden Taumelkäfer wenden die einfachste Variante dieser Methode mit einer verblüffenden Raffinesse an. Sie orientieren sich einzig und allein auf Grund der auf dem Wasser zurückgeworfenen Wellen. Untersuchungen des Biologen Friedrich Egger ergaben, daß die am zweiten Glied ihres Fühlers vorhandenen feinen Haare die geringsten Veränderungen auf der Wasseroberfläche wahrnehmen. Entfernt man diese Haare, treibt der Taumelkäfer wie blind auf dem Wasser herum. Diese Haare sind derart sensibel, daß sie auf der Wasseroberfläche selbst eine Bewegung von 0,000000004 Zentimetern spüren. Selbst die zufällige Bewegung von Wassermolekülen ist größer! Der Käfer bemerkt jedoch die Nachwirkung dieser äußerst geringen Bewegung als Welle an der Wasseroberfläche. Da es sich bei den Fühlerhaaren um Doppelorgane handelt, nimmt der Taumelkäfer den Druckunterschied an beiden Seiten wahr, wobei er auf dieser Grund-



Am Fühler des Taumelkäfers befinden sich unwahrscheinlich sensible Tasthaare (siehe Detailzeichnung). Die Tasthaare nehmen auf der Wasseroberfläche selbst die geringsten Bewegungen wahr, so daß der Käfer die ins Wasser gefallen Insekten leicht aufspüren kann.

lage den Standort seiner Beute oder ein aus dem Wasser ragendes Hindernis genau anpeilen kann.

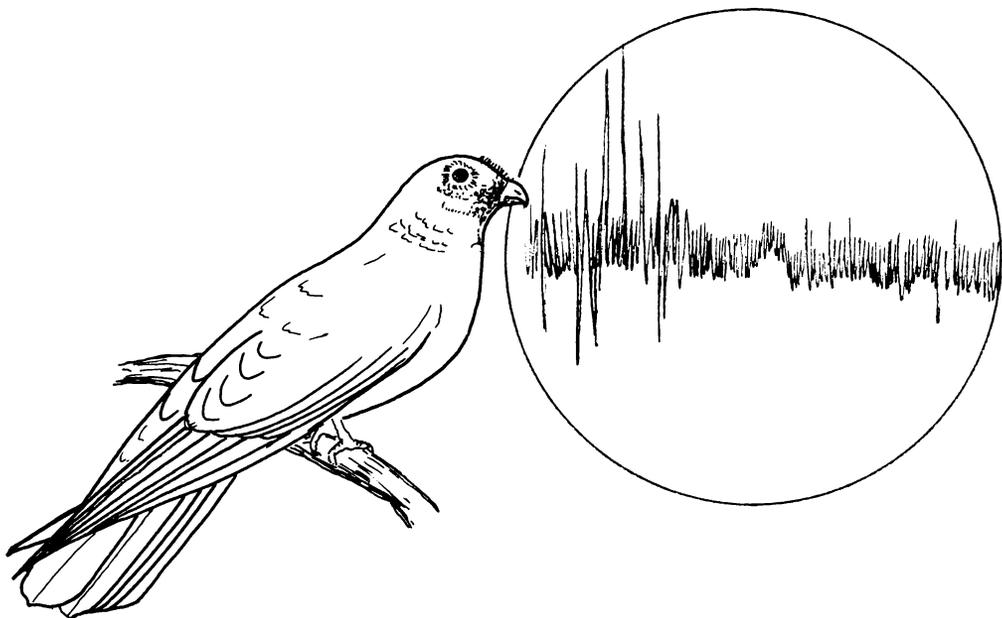
Das Messen der Entfernung durch Widerhall ist auch den Vögeln bekannt. Die auf Ceylon lebenden Salanganen orientieren sich beim Fliegen in Rich-

tung ihrer in dunklen Felsenhöhlen versteckten Nester mit Hilfe eines den höchsten Klaviertönen ähnelnden „Geräusches“. Auf den Guacharo in Venezuela machte bereits vor mehr als einhalb Jahrhunderten Alexander von Humboldt, der berühmte Naturforscher, aufmerksam. Diese eigenartigen Fettschwalme leben in einer riesengroßen Höhle in der Nähe der Stadt Caripe. Alexander von Humboldt fiel auf, wie unheimlich ihre Schreie von den Wänden der dunklen Höhle widerhallten. Die Beschreibung Humboldts veranlaßte den amerikanischen Forscher Donald R. Griffin, der bereits seit längerer Zeit die Orientierungsmethoden von Fledermäusen untersuchte, sich näher mit diesem Problem zu befassen. Er organisierte im Jahr 1953 eine Expedition zu dieser Höhle und fand die Vögel noch an derselben Stelle wie seinerzeit Humboldt. Der Unterschied bestand lediglich darin, daß Griffin bereits mit Ultraschallmikrofonen und elektronischen Frequenzmeßgeräten ausgestattet war. Aus den Untersuchungen ging hervor, daß der Guacharo um eine Oktave höhere Töne als der höchste a-Ton des Klaviers, in einer Frequenzstärke von ungefähr 7000 Hertz, hervorbringt. In der Tiefe der Höhle herrscht eine derartige Dunkelheit, daß sich die Vögel in der Tat nur durch die widerhallenden Stimmen orientieren können. Als das Ohr eines eingefangenen Vogels zugestopft wurde, verlor das wieder freigelassene Tier sein Orientierungsvermögen. Der Flug wurde unsicher, wobei es ab und zu gegen die Felswand stieß. Wenn die Guacharos abends die Höhle verlassen, machen sie im Freien von ihren eigenartigen Orientierungsschreien keinen Gebrauch.

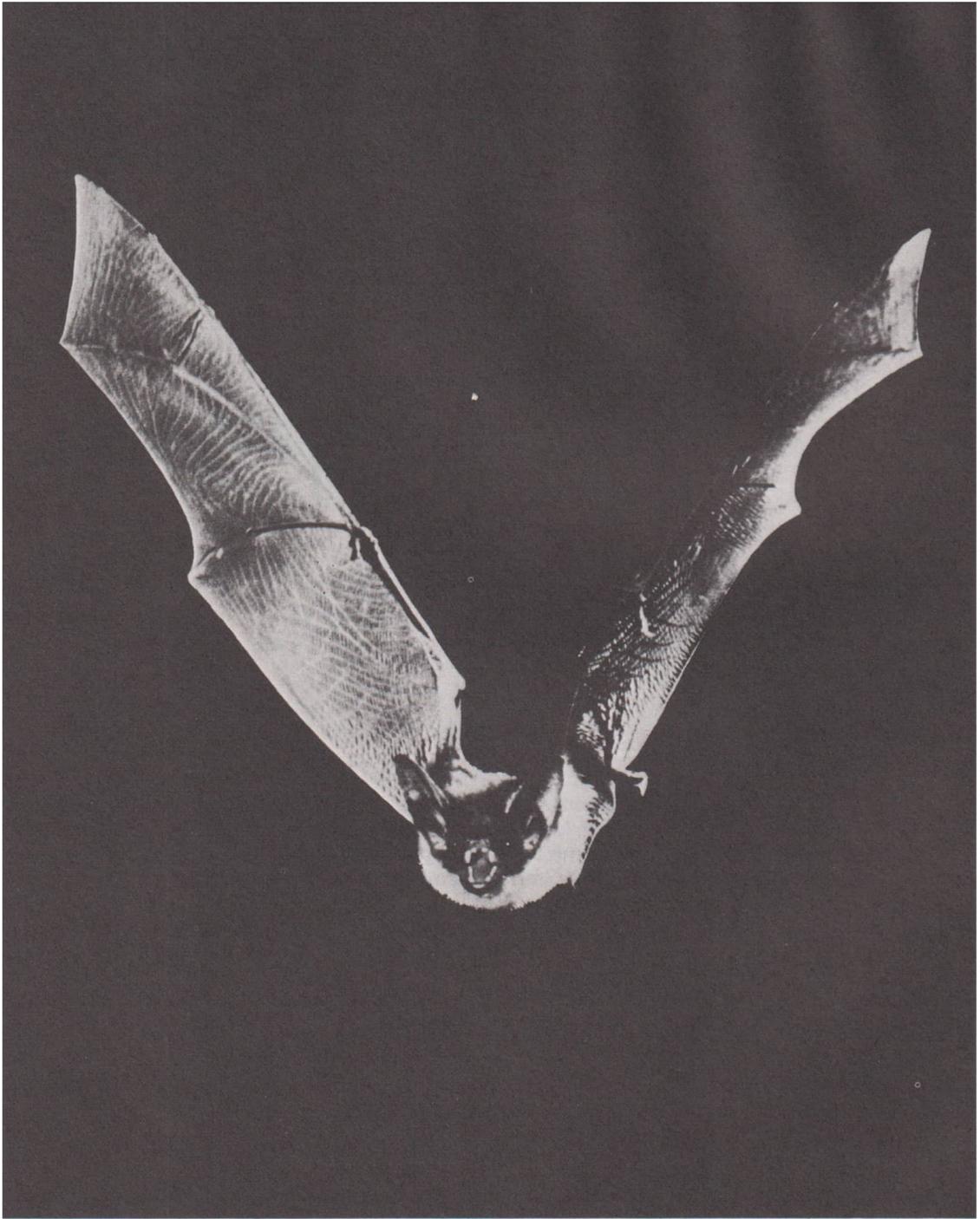
Im Reich der Lüfte und des Wassers

gibt es Tiere, welche die Entfernungsmessung weiterentwickelt haben. Bei diesen Tieren handelt es sich aber um Säugetiere, obgleich Fledermäuse im Bereich der Vögel und Delphine unter den Fischen leben. Das ist

vielleicht die Erklärung dafür, daß gerade diese Säugetiere derart hochempfindliche Sinnesorgane hervorbringen, die selbst bei Ingenieuren des 20. Jahrhunderts Erstaunen und Bewunderung hervorrufen.



Alle Tiere, die Laute von sich geben, sind auch in der Lage, sich auf Grund des Widerhalls zu orientieren. Die in dunklen Höhlen lebenden venezolanischen Fettschwalme oder Guacharos wenden diese Orientierungsform mit besonderem Erfolg an. Während des Fluges stoßen sie ein langgezogenes „Geknatter“ aus, mit dessen Hilfe sie den Hindernissen im Dunkeln auf Grund ihres Widerhalls ausweichen.



Die geheimnisvollen Ritter der Dunkelheit, die vorbeihuschenden Fledermäuse, verfügen über ein phantastisches Patent. Mit ihrer Ultraschallortung orientieren sie sich nachts genauso gut wie andere Tiere am Tag. Die Menschen glaubten lange, daß sie lautlos fliegen.

Stumme Symphonie

Im großen Laboratorium herrschte völlige Stille und Dunkelheit, als wäre das Leben ausgestorben. Nur in der einen Ecke war ein hochempfindliches Ultraschallmikrofon sowie eine elektronische Verstärkeranlage eingeschaltet. In der Luft jedoch jagte eine freigelassene Fledermaus eifrig auf im Dunkeln herum-schwirrende Mücken. Donald R. Griffin, der dieses ungewöhnliche Experiment durchführte, setzte den Kopfhörer auf. Er wollte seinen Ohren nicht trauen!

Zunächst glaubte er das langsame Puffen eines Bootsmotors zu hören, später wurden die Geräusche lauter, und er meinte, das Geräusch eines ratternden Motorrads zu vernehmen. Die Geräusche wurden immer lauter, es schien eine Tür knarrend ins Schloß zu fallen, schließlich trat wieder Stille ein.

Die Fledermaus hatte eine Mücke erhascht! Bei den Geräuschen handelte es sich zweifellos um Ultraschallsignale der Fledermaus, die nur durch die elektronische Verstärkeranlage wahrgenommen werden konnten. Die Fledermaus sandte anfangs Erkundungswellen aus, nach Entdeckung der Beute stieß sie die Ultraschallsignale in immer kürzeren Intervallen aus, schließlich erreichte sie blitzschnell die Mücke und verschlang sie.

Der amerikanische Forscher erhielt im Jahr 1938 mit diesem Experiment eine endgültige Antwort auf die Frage, wie Fledermäuse im Dunkeln sehen kön-

nen. Die seit langem gehegte Vermutung wurde bestätigt. Sie orientieren sich nicht nach dem Licht, sondern nach den für das menschliche Ohr nicht wahrnehmbaren Tönen. Dieser Schall hat mehr als 20 000 Schwingungen in der Sekunde, wobei die Tiere aus der Reflektion der Ultraschallwellen feststellen, welchen Hindernissen sie während des Fluges ausweichen müssen, ja, sie spüren auf diese Weise sogar ihre tägliche Nahrung, die kleinen herumfliegenden Insekten, auf.

Fledermäuse nutzen ihre besonderen Ortungsorgane seit Jahrmillionen und dazu noch in zahlreichen Varianten, die den jeweiligen Lebensbedingungen der verschiedenen Arten im Kampf ums Dasein am vorteilhaftesten entsprechen. Der Mensch lernte dieses vollkommene Patent der Natur erst in diesem Jahrhundert kennen, nachdem Ultraschallmikrofone eingehendere Kenntnisse über das nächtliche Verhalten der Fledermäuse ermöglichten. Früher gehörten die unsichtbar dahinhuschenden „Vampire“ in den Bereich der Hexen und in romantischen Romanen zu einem unentbehrlichen Attribut verfallener Schlösser.

Die Ordnung der Fledermäuse verdient jedoch schon in biologischer Hinsicht besondere Aufmerksamkeit. Es gibt nämlich unter ihnen solch kleine Exemplare, über die der Biologe Eisen-traut erstaunt wie folgt berichtet: „In Kamerun habe ich mehrere Exemplare

der Art *Eptesicus tenuipinnis* gefangen, nachdem sie in mein hell erleuchtetes Zimmer geflogen waren. Als sie den Lampenschirm umkreisten, hielt ich sie im ersten Augenblick für Insekten, so klein waren sie . . . Diese Art ist so klein, daß sie sich selbst in einem Fingerhut niederlassen könnte.“ Es gibt aber auch Fledermausarten, deren ausgebreitete Flügel eine Spannweite von 50 Zentimetern erreichen. Und das merkwürdigste dabei ist: Sie gehören zur höchst entwickelten Gruppe der Tierwelt, zu den Säugetieren. Sie gebären demnach ihre Nachkommen genauso lebend wie die übrigen Säugetiere.

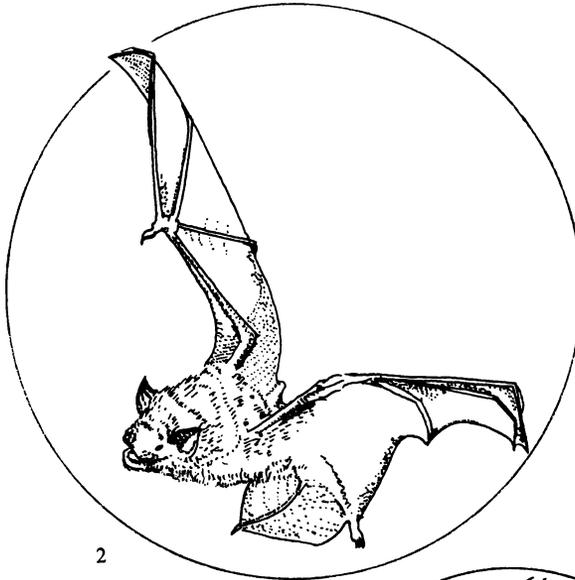
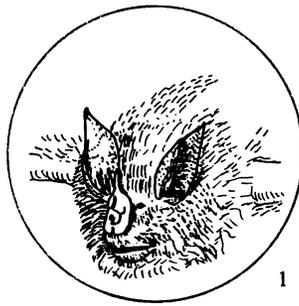
Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß das geheimnisvolle Fliegen der Fledermäuse bereits vor fast zwei Jahrhunderten die Aufmerksamkeit eines italienischen Naturwissenschaftlers auf sich zog. Lazzaro Spallanzani beschäftigte sich bereits damals mit der Frage, wie sich Fledermäuse in der Dunkelheit orientieren. Er spannte in einem Zimmer, das er später verdunkelte, Schnüre, an die er Schellen befestigte. Er ging, wie anzunehmen war, davon aus, daß sich die Fledermäuse genauso verfliegen würden, wie sich auch der Mensch im Dunkeln an den Schellenschnüren verfangen würde, weil sie in Ermangelung des Lichts ihre Augen nicht gebrauchen können. Doch das erwartete Klingeln der Glöckchen blieb aus. Die schnell umherflatternden Fledermäuse wichen den Schnüren mit Leichtigkeit aus. Waren sie etwa imstande, im Dunkeln zu sehen? Er stach den Versuchstieren die Augen aus, doch sie wichen nach wie vor sicher und gewandt den Schnüren aus. Neugierig, wie Forscher nun einmal sind, verstopfte er darauf die Ohren der Tiere mit Wachs und wartete, was sie jetzt tun

würden. Das Fliegen der Fledermäuse wurde unsicher, und sie stießen an die Schnüre und an die Glöckchen. Spallanzani konnte also feststellen, daß Fledermäuse mit ihren Ohren „sehen“, genauer gesagt, ihre Umgebung mit den Ohren wahrnehmen. Da es jedoch nie gelang, für diese merkwürdige Hypothese eine plausible Erklärung zu finden, wurde die Möglichkeit einer auf das Gehör beruhenden Orientierung von den Naturwissenschaftlern wieder verworfen, und selbst Cuvier, ein prominenter Wissenschaftler des 19. Jahrhunderts, nahm noch an, daß Fledermäuse über einen besonders entwickelten Tastsinn verfügen und das Geheimnis ihres sicheren Fliegens darin zu suchen ist.

Doch das Geheimnis blieb nur so lange ein Geheimnis, bis der amerikanische Forscher D. R. Griffin zusammen mit dem gebürtigen Ungarn Robert Galambos nachwies, daß Fledermäuse für das menschliche Ohr nicht wahrnehmbare Töne ausstoßen. Von hier ab wurde das Geheimnis um die Fledermäuse von den Forschern immer mehr gelüftet, und die Ergebnisse des Experiments setzten selbst Experten im Bereich der Ultraschallortung in Erstaunen.

Erstarrte Schnellläufer

Alvin Novick, ein unermüdlicher Forscher der Fledermausortung, berichtet über einen Mitarbeiter, der in Indien geboren wurde und als Kind oft nicht einschlafen konnte, weil vor dem geöffneten Fenster des Schlafzimmers Fledermäuse mit lautem Geschrei auf Insekten jagten. Seine Amme wollte es einfach nicht glauben, daß er Schreie höre und

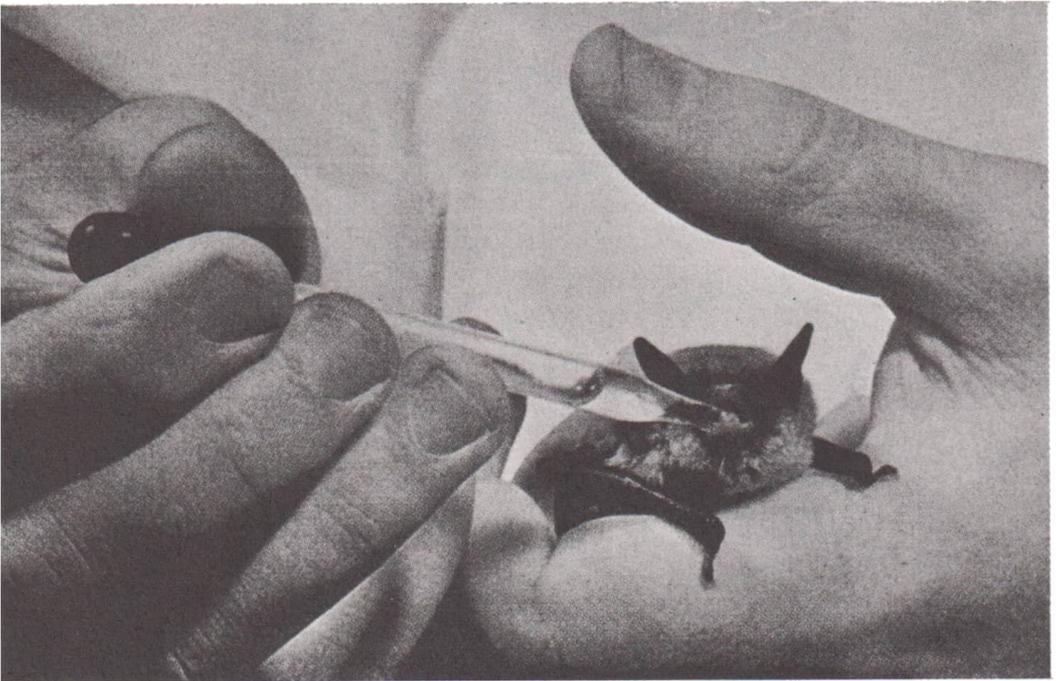


Fledermäuse stellen sich vor. Forscher haben auf Grund der unterschiedlichen Ultraschallortung zwei große Familien eingehend untersucht. Vertreter der Hufeisennasen verbreiten Töne in permanenten Frequenzen (CF-Fledermäuse). Sie verbreiten die Töne durch die Nase, wobei ihre Hufeisennase in der Art eines Parabolreflektors funktioniert. Vertreter der Glattnasen strahlen Rufe in variablen Frequenzen aus (FM-Fledermäuse). Sie geben die Rufe aus der Kehle von sich. CF-Fledermaus: 1 – Hufeisennase; FM-Fledermäuse: 2 – Mausohrfledermaus; 3 – Ohrenfledermaus; 4 – Abendsegler.

deswegen nicht einschlafen könne. Dies ist verständlich, denn mit zunehmendem Alter verschlechtert sich das Gehör des Menschen, und er nimmt hohe Töne nicht mehr wahr. Ein Kind hingegen hört noch mit Leichtigkeit Töne im oberen Grenzbereich des menschlichen Hörvermögens in einer Frequenz von 20 000 Hertz. Experimente haben gezeigt, daß auch Erwachsene in einem gutisolierten Zimmer das charakteristische leise „Ticken“ wahrnehmen, das Fledermäuse in Form von Ultraschallwellen in einer ununterbrochenen Reihe aussenden.

Einige Fledermausarten strahlen in der Sekunde Töne mit ungefähr 12 000 Schwingungen aus, die auch vom menschlichen Ohr gut zu hören sind,

doch die meisten Fledermäuse erzeugen Jagd- und Orientierungsrufe, die eine Frequenz von über 20 000 Hertz haben. Die Familie der Hufeisennasen benutzt bestimmte Frequenzen, die im Ultraschallbereich zwischen 60 000 und 120 000 Schwingungen je Sekunde liegen. Wenn die Fledermaus einen derartigen Impuls (einen für kurze Zeit anhaltenden Ton) ausstrahlt, empfindet sie es ungefähr so, wie wenn jemand lang anhaltend pfeifen würde. Die Kürze der Impulse ist erstaunlich. Sie halten im allgemeinen 0,05 bis 0,1 Sekunden an, je nachdem wie es für ihre Ortungsorientierung notwendig ist. In der Welt der Fledermause zählen diese Schreie zu den langen Impulsen. (Demgegenüber beträgt die Impulsdauer der



Macbeth, eine kleine braune Fledermaus, ist die Hauptfigur von Ultraschalluntersuchungen, die von amerikanischen Forschern am Institut für Technik in Massachusetts durchgeführt wurden. Das Trinkwasser wird der Fledermaus mit einer Augenpipette verabreicht. Ihr Körpergewicht wurde täglich kontrolliert.

Klaffmäuler-Fledermäuse 0,00054 bis 0,00072 Sekunden.) Mit menschlichen Maßen verglichen, sind bereits 0,05 Sekunden eine kurze Zeit! In dieser Zeit „rühren“ sich Hundertmeterläufer kaum von der Stelle; sie bewegen sich nur um 50 Zentimeter weiter.

Den Forschern zufolge kommt den Hufeisennasen eine weitere Bedeutung zu. Bei dieser Fledermausart ist nicht nur der ständige Frequenzton schwächer, sondern ihre parallel verlaufenden, um eine Oktave höheren Töne erklingen gleichfalls etwas leiser, ähnlich wie beim Klang der schwingenden Geigensaite ebenfalls ein um eine Oktave höherer Doppelschwington, ein sogenannter Oberton, herauszuhören ist. Ob die Hufeisennasen diesen sonderbaren Oberton für irgendwelche Zwecke nutzen, ist bis heute noch nicht bekannt.

Glattnasen, Ohrenfledermäuse und Bulldoggfledermäuse verwenden noch eigenartigere Signale. Sie lassen ihre lautlosen Rufe in viel kürzerer Zeit ertönen als die vorher erwähnten Arten. Ihre Ultraschallimpulse sind gewöhnlich nur 1 Tausendstelsekunde lang. Würden wir sie hören, wäre es eine außergewöhnlich schnelle Knallfolge. Interessant dabei ist, daß sie keine ständige Schwingungszahl einhalten, sondern die Frequenz ihrer Stimme während eines Rufes auf die Hälfte reduzieren. Die Glattnasen beginnen im allgemeinen ihre Signale mit Schwingungen von 120 000 Hertz, am Schluß betragen die Schwingungen jedoch nur noch 60 000 Hertz. Das würde für uns so klingen, als würde jemand mit dem Normal-a-Ton zu pfeifen beginnen und das Pfeifen mit außerordentlicher Geschwindigkeit auf der Tonleiter plötzlich um eine Oktave tiefer beenden. Der Technik ist diese tonbildende Methode

gut bekannt, und da sie auf der Veränderung der Schwingungszahl beruht, werden diese Töne als frequenzmodulierte (FM) Töne bezeichnet, zum Unterschied von CF-Tönen, die – wie die Signale der Hufeisennasen – unveränderlich (konstant) schwingen. (CF = konstante – beständige – Frequenz.)

Die Ortung der FM-Fledermäuse ist im allgemeinen nicht auf Töne in einer Frequenz von 120 000 Hertz ausgerichtet, sondern auf eine niedrigere Schwingungszahl. Die Stimme der amerikanischen kleinen braunen Fledermäuse (*Myotis lucifugus*) beginnt beispielsweise bei 90 000 Hertz und endet bei 45 000, also um eine Oktave tiefer. Der am meisten genutzte Bereich hingegen liegt bei 60 000 bis 80 000 Hertz, der sich jedoch bei Beendigung des knallenden Signals auf eine Schwingungszahl von 30 000 bis 40 000 Schwingungen in der Sekunde reduziert.

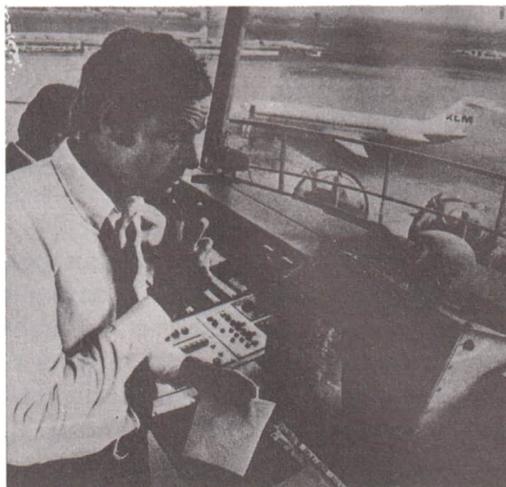
Der Schrei kehrt zurück

Im Vergleich dazu, daß sich der Schall in einer mit einem Hammer angeschlagenen Eisenbahnschiene 5000 Meter in der Sekunde ausbreitet, im Wasser immerhin noch eine Geschwindigkeit von 1500 Metern in der Sekunde erreicht, „schleicht“ er in der Luft gerade nur noch so dahin: Er legt in der Sekunde lediglich 332 Meter zurück. Wem dies von der Schallgeschwindigkeit in der Luft bekannt ist, kann auf Grund des Donners, der dem Blitzschlag folgt, leicht ermitteln, wie weit das nahende Gewitter entfernt ist. Wenn wir nach dem Blitzschlag langsam zu zählen beginnen (ungefähr in Abständen von 1 Sekunde), kann durch die Zeitspanne bis zur Wahrnehmung des Donner-

schlags auf die Entfernung des Gewitters geschlossen werden: Wenn wir zum Beispiel bis 6 gezählt haben, ist der Blitz in der Entfernung von ungefähr 2 Kilometern niedergegangen.

Mit einem Ortungsgerät kann eine ähnliche Entfernungseinschätzung vorgenommen werden, allerdings mit der Ausnahme, daß es eigene Töne aussendet und auf Grund der vergangenen Zeit bis zur Rückkehr des Signals der zurückgelegte Weg der Töne ermittelt wird. Daraus ergibt sich dann die zwischen dem Ortungsgerät und dem georteten Objekt liegende Entfernung. Das Signal kann eine elektromagnetische Welle sein – damit werden Radareinrichtungen betrieben –; es können Ultraschallwellen sein – diese werden zur Ortung von Objekten und Hindernissen unter Wasser eingesetzt. Es können aber auch vom menschlichen Ohr wahrnehmbare Wellen sein. Bei schlechten Sichtverhältnissen werden von Schiffen gewöhnlich die tiefen Nebelhörner betrieben, wodurch die in der Nähe befindlichen Wasserfahrzeuge auf das nahende Schiff aufmerksam gemacht werden. Erfahrene Matrosen können auf Grund des reflektierenden Schalls des Nebelhorns – lediglich mit dem Ohr – die Entfernung einer Steilküste einschätzen.

Hieraus läßt sich leicht erkennen, wie Fledermäuse ihre lebendigen Ortungsgeräte für die Einschätzung von Entfernungen verwenden. Die Frage ist nur, warum gerade mit für uns nicht hörbaren Ultraschallwellen. Forscher führen dafür verschiedene Ursachen an. Zunächst muß man davon ausgehen, daß derartige Töne in der Natur äußerst selten vorkommen. Würden Fledermäuse ihre Signale in für uns wahrnehmbaren Orientierungsrufen

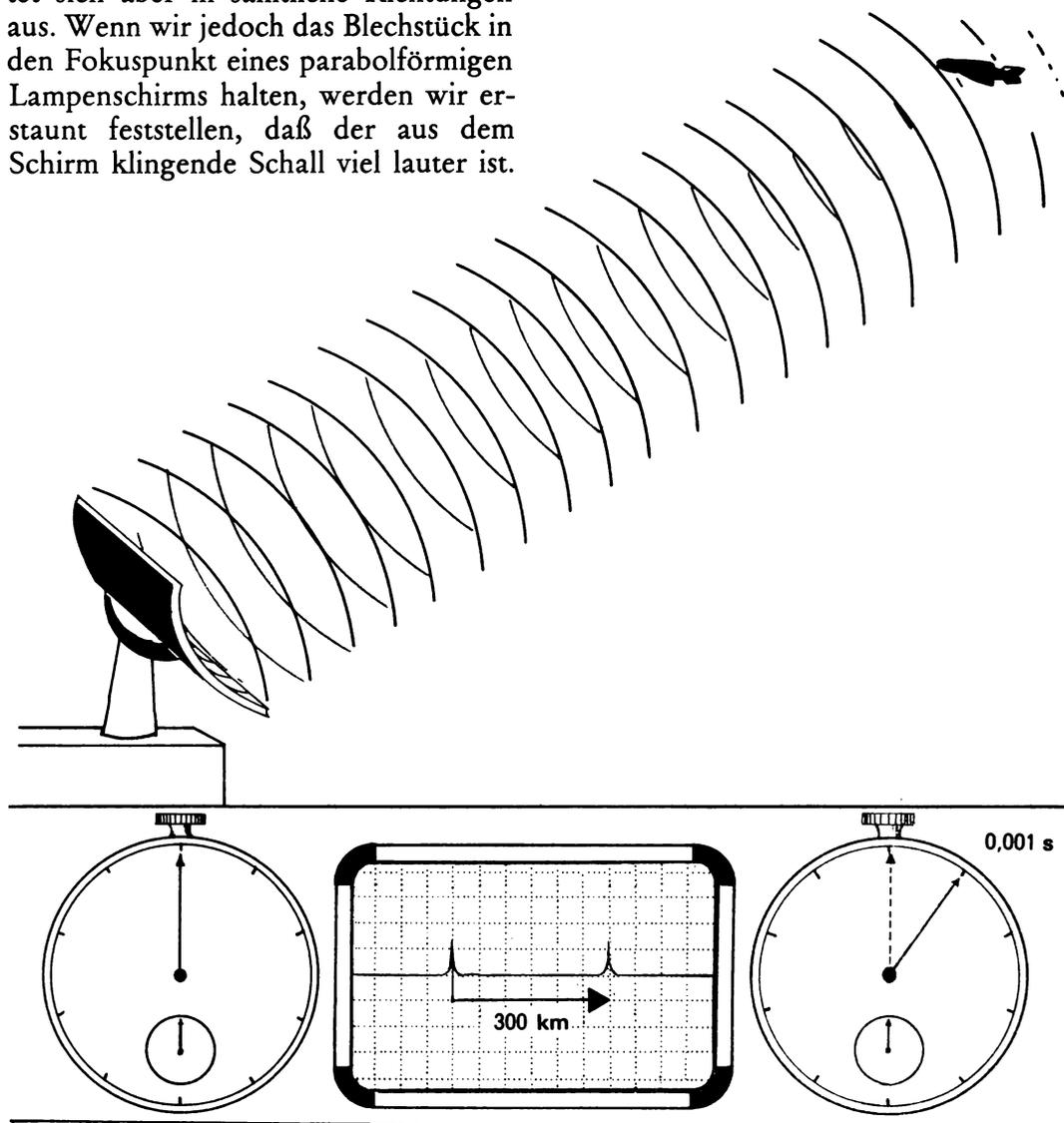


Die Radareinrichtungen auf Flugplätzen funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie die Ortungsorgane der Fledermäuse. Die Rotationsantenne strahlt elektromagnetische Wellen aus. Wenn diese Signale auf ein nahendes Flugzeug treffen, machen sie blitzschnell eine „Kehrtwendung“ und kehren zur Antenne zurück. Auf Grund der vergangenen Zeit zwischen Ausstrahlung und Reflektierung kann die Entfernung des Flugzeugs errechnet werden. Moderne Ortungsgeräte sind mit einem Rundbildschirm ausgestattet, auf dem mit Hilfe von Lichtsignalen die Luftraumdaten des Flugzeugs abzulesen sind.

ausenden, entstünde nicht nur ein buntes Stimmengewirr von Tönen, sondern mit den reflektierenden Signalen würden sich auch viele Laute anderer Tiere vereinen, und für die Fledermäuse wäre es schwierig, ihre eigenen Töne zu erkennen. Doch der Ultraschall bietet auch vom physikalischen Standpunkt aus zahlreiche Vorteile.

In dieser Beziehung scheint es zweckmäßig, sich mit einigen Eigenschaften des Schalls ein wenig näher bekannt zu machen. Wenn wir zum Beispiel eine Konservendose eindrücken, erklingt unversehens ein knackender Ton. Für

den menschlichen Hörbereich klingt dieser kurze Ton genauso wie für Fledermäuse die Ultraschallsignale. Der Schall des knackenden Blechstücks breitet sich aber in sämtliche Richtungen aus. Wenn wir jedoch das Blechstück in den Fokuspunkt eines parabolförmigen Lampenschirms halten, werden wir erstaunt feststellen, daß der aus dem Schirm klingende Schall viel lauter ist.



Das Prinzip eines jeden Ortungsgerätes beruht darauf, daß aus der Zeit zwischen Ausstrahlung und Rückkehr des Suchstrahls die Entfernung des angepeilten Objekts errechnet wird. Die elektromagnetischen Strahlen legen in der Sekunde 300 000 Kilometer zurück. Wenn zwischen der Ausstrahlung und der Rückkehr des Ortungsstrahls der Zeitunterschied 0,001 Sekunden beträgt, haben die Strahlen einen Weg von 300 Kilometern zurückgelegt. Das Flugzeug befindet sich demnach 150 Kilometer entfernt.

Der Lampenschirm bündelt offensichtlich den Ton und sendet ihn in einer Richtung nach vorn. Den auf Erkundung ausfliegenden Fledermäusen kommt dieser Umstand zugute. Sie können aber keinen riesengroßen Reflektor ständig mit sich herumtragen, denn die meisten Fledermäuse sind kaum handgroß. Sie benutzen deshalb einen kleinen Parabolschirm, mit dem sie nur Signale in kürzeren Wellenlängen, dafür aber in höheren Frequenzen ausstrahlen. Darin besteht also eine der Ursachen der Nutzung von Ultraschallwellen.

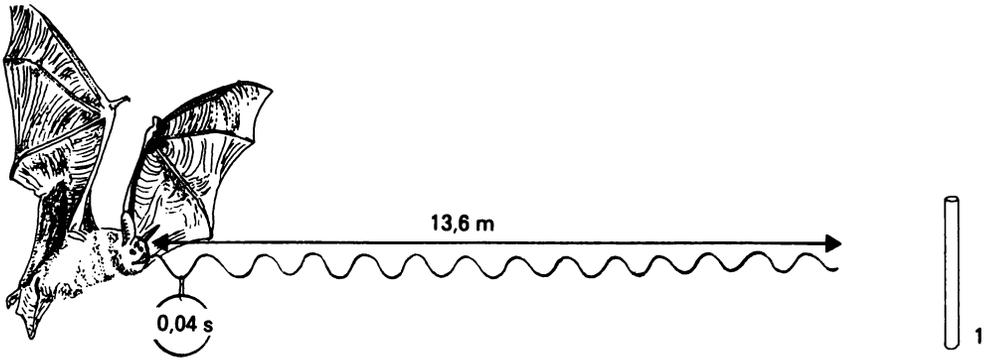
Der Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Schwingungszahl ist außerordentlich einfach. Je höher die Frequenz des Tones, in um so kleineren Wellenlängen breitet er sich aus. Wenn unserem Beispiel entsprechend das eingebaute Blechstückchen die Luft zehntausendmal in der Sekunde in Schwingungen versetzt, setzt sich in der Luft ein aus 10 000 Wellen bestehender „Wellenzug“ in Bewegung, dessen Anfang sich innerhalb 1 Sekunde rund 332 Meter vom Blechstück entfernt. Da der Wellenzug aus 10 000 Wellen besteht, beträgt die Länge einer einzigen Welle den zehntausendstel Teil, also 34 Millimeter. Daraus ergibt sich nun fast von allein, daß sich bei einem 20 000fachen Erschwingen der Luft in der Sekunde durch die Schallquelle der Wellenzug nur aus 17 Millimeter langen Wellenstücken zusammensetzt. Die Fledermäuse bedienen sich letzten Endes auch deswegen der Ultraschallwellen, damit sich mit ihren Rufen möglichst kleine „Stückchen“ ihrer Wellenlängen ausbreiten können.

Weshalb sind Fledermäuse auf kurze Wellenlängen angewiesen? Eine entsprechende Antwort können wir aus der

Reaktion des knackenden Blechstücks ableiten. Nähern wir uns mit dem Blechstück einem Baumstamm, ist der Widerhall des Knackens noch klar wahrnehmbar. Halten wir jedoch das Blechstückchen in Richtung eines in den Boden gesteckten Spazierstocks, ist kein Widerhall mehr zu hören. Physiker weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, daß Objekte um so stärker den Schall reflektieren, je mehr sie die Länge der Schallwellen übertreffen. Die 3,4 Zentimeter langen Wellen des Blechstücks prallen vom breiten Baumstamm leicht zurück, doch der 2 Zentimeter breite Spazierstock bietet ihnen kaum einen Widerstand. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß Fledermäuse mit ihren Rufsignalen von 120 000 Schwingungen in der Sekunde selbst Gebilde im Dunkeln ausmachen können, die kaum einige Millimeter stark sind. Dadurch fallen den mit lebenden „Ortungsgeräten“ ausgestatteten Jägern selbst die blitzschnellen Mücken zum Opfer.

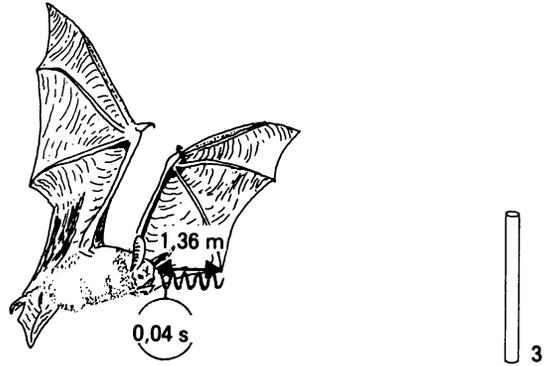
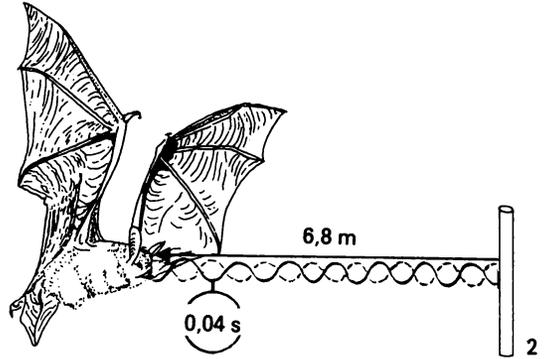
Auf Grund der bisherigen Darstellungen könnte man annehmen, daß kleine Fledermäuse, die auf kleine Beutetiere jagen, Schallsignale in höheren Frequenzen und größere Fledermäuse hingegen in tieferen Frequenzen ausstrahlen. Doch in der Natur kann man keineswegs alles über einen Leisten schlagen. So gibt es für die Entwicklung der lebenden „Ortungsgeräte“ auch zahlreiche entgegengesetzte Beispiele. Vorerst müssen wir aber die Frage klären, weshalb die Signalarufe der Fledermäuse so kurz sind. Dafür gibt es gleichfalls eine physikalische Begründung, die eng mit der Entfernungsbestimmung zusammenhängt.

Wenn wir, in einem geschlossenen Hof stehend, gegen eine glatte Wand ein langes Wort ausrufen, hallt der Ton

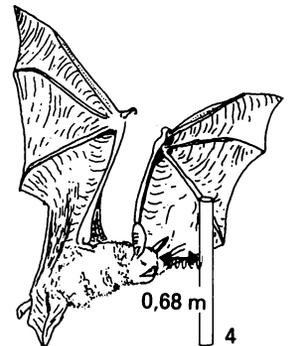


bereits zurück, bevor wir das Wort zu Ende gesprochen haben. Rufen wir ein kürzeres Wort, kehrt der Schall nach dem Eintreten einer kurzen Pause zurück. Auf diese Weise können wir uns so lange der Wand nähern, bis das ausgerufene Wort nicht mehr so schnell zurückschallt, daß der „Anfang“ das „Ende“ des Rufes erreicht.

Etwas Ähnliches ist bei den Fledermäusen festzustellen. Hier wird allerdings das Wort durch den Ultraschallruf ersetzt. Wenn beispielsweise eine Fledermaus einen 0,04 Sekunden anhaltenden Ton ausstrahlt, nimmt sie den rückkehrenden Widerhall bei einer kürzeren Entfernung als 6,8 Meter zugleich mit dem ausgerufenen Signal



Die Fledermaus muß die Dauer ihrer Rufsignale der Entfernung anpassen. Wenn sie einen 0,04 Sekunden langen Impuls ausstrahlt, bildet der Impuls einen 13,6 Meter langen „Strahlzug“ in der Luft (1). Hat sich die Fledermaus dem Objekt auf 6,8 Meter genähert, nimmt sie bei der Beendigung ihres Rufes bereits den rückkehrenden Widerhall wahr (2). Sie wechselt jetzt deshalb auf kürzere Impulse über (3), die bis zu einer Entfernung von 68 Zentimetern wirksam sind (4).



wahr. Dadurch hört sie im Grunde genommen nur einen Ton! Beträgt die Dauer des Tones hingegen nur ein Zehntel dieser Zeit, also nur 0,004 Sekunden, kann sich die Fledermaus noch näher am Objekt befinden, der Wiederhall wird den Ursprungston dennoch nicht „überlappen“. Die Entfernungsgrenze hat sich jetzt auf ein Zehntel reduziert. Bei einem Hindernis in einer Entfernung von 0,68 Metern verhält es sich genauso wie im früheren Fall: Die Fledermaus nimmt zugleich den ausgesandten und den widerhallenden Ton wahr. Da jedoch Fledermäuse nicht nur Hindernissen ausweichen, sondern auch jagen, sind sie darauf angewiesen, die Verfolgung ihrer fliehenden Opfer im Dunkeln mit ihrer Ultraschallortung aus einer kürzeren Entfernung aufzunehmen.

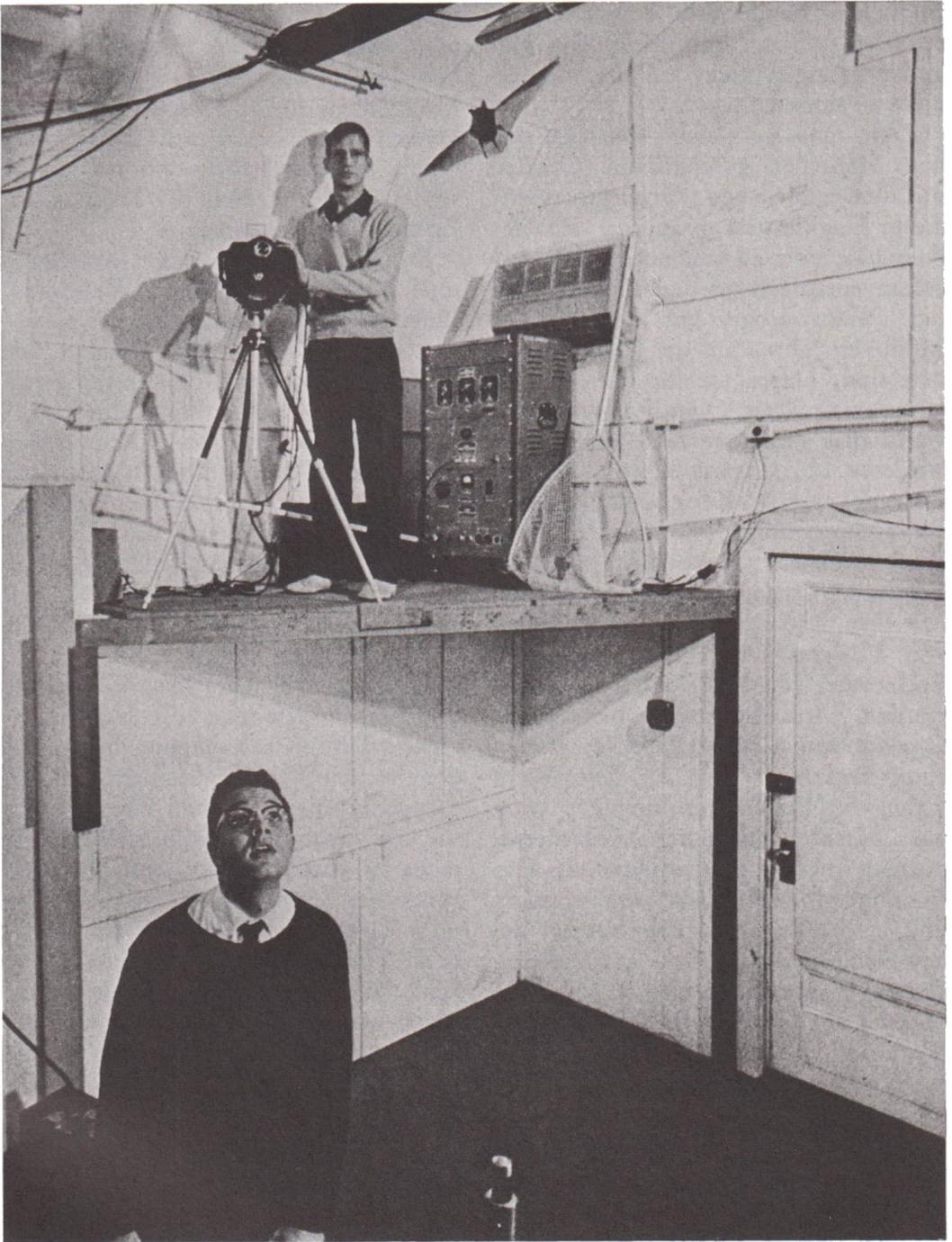
Summende Fledermäuse

Zur Orientierung benutzt die Fledermaus erstaunlich sensible Organe. D. R. Griffin konnte in seinem 10 Meter mal 3 Meter großen Laboratorium feststellen, welch dichtem Drahtgeflecht Fledermäuse beim Fliegen im Dunkeln auszuweichen imstande sind. Er spannte in mehreren Abständen von der hinteren Wand des Raumes in einer Tiefe von 45 Zentimetern Drähte, die voneinander nur 30 Zentimeter entfernt waren, so daß Breitflügel-Fledermäuse (*Eptesicus*) mit ausgebreiteten Flügeln gerade noch durchhuschen konnten. Die Experimente haben gezeigt, daß 0,12 Millimeter dünne Drähte von den Fledermäusen noch gut erkannt werden. Sie fanden sich selbst bei 0,08 Millimeter dünnen Drähten noch gut zu recht und stießen erst an das Geflecht,

als noch dünnere Drähte gespannt wurden.

Dies läßt erkennen, daß die Ortung der Fledermäuse auf alle Fälle viel sensibler ist, als man lediglich auf Grund der Wellenlänge der ausgestrahlten Ultraschallsignale annehmen könnte. Es stimmt zwar, daß die Länge der Drähte einiges dazu beiträgt; denn die einzelnen dünnen Drähte reflektieren genausoviel Schallenergie wie ein dicker, aber kurzer Stahlstab. Selbstverständlich trägt auch das äußerst sensible Ohr der Fledermäuse wesentlich zur Zusammenfassung der reflektierten schwachen Signale bei. Die kürzesten Schallwellenlängen der braunen Fledermäuse (*Myotis lucifugus*) sind zum Beispiel ungefähr 2 Millimeter lang, doch sie nehmen selbst einen 0,2 Millimeter dünnen Spanndraht wahr. Ihre Ortung versagt erst bei einem 0,1 Millimeter starken Drahtfaden.

Die von der Wand des Raumes reflektierten Signale störten in beachtlichem Maße die von den gespannten Drähten zurückkehrenden Ortungssignale, die Fledermäuse konnten sich aber trotzdem ausreichend orientieren. Die Forscher versuchten außerdem, den Flug der Fledermäuse durch einen starken Ultraschallstrahler zu stören. Die Fledermäuse konnten sich jedoch auf Grund ihres sensiblen Gehörsinns nach wie vor mit Hilfe des Wiederhalls ihrer ausgestrahlten Signale zurechtfinden. Selbst als ihr eigener Wiederhall nur in einer 2000fachen Minderung zurückkehrte, orientierten sie sich noch sehr gut. Beim exakten Ausweichen der Hindernisse erreichten die Tiere bei den Laboratoriumsversuchen eine Geschwindigkeit von rund 4 Metern in der Sekunde. Folglich mußten sie sich außerordentlich schnell über die im Raum be-



Für Laboratoriumsversuche sind ein hochleistungsfähiger Fotoapparat und eine Aufnahme-einrichtung für Ultraschall die wichtigsten Geräte. Selbstverständlich auch eine Fledermaus! Zeitweise muß sie mit dem im Hintergrund zu sehenden Schmetterlingsnetz heruntergenommen werden, wenn sie sich an irgendeinem Wandvorsprung festgeklammert hat.

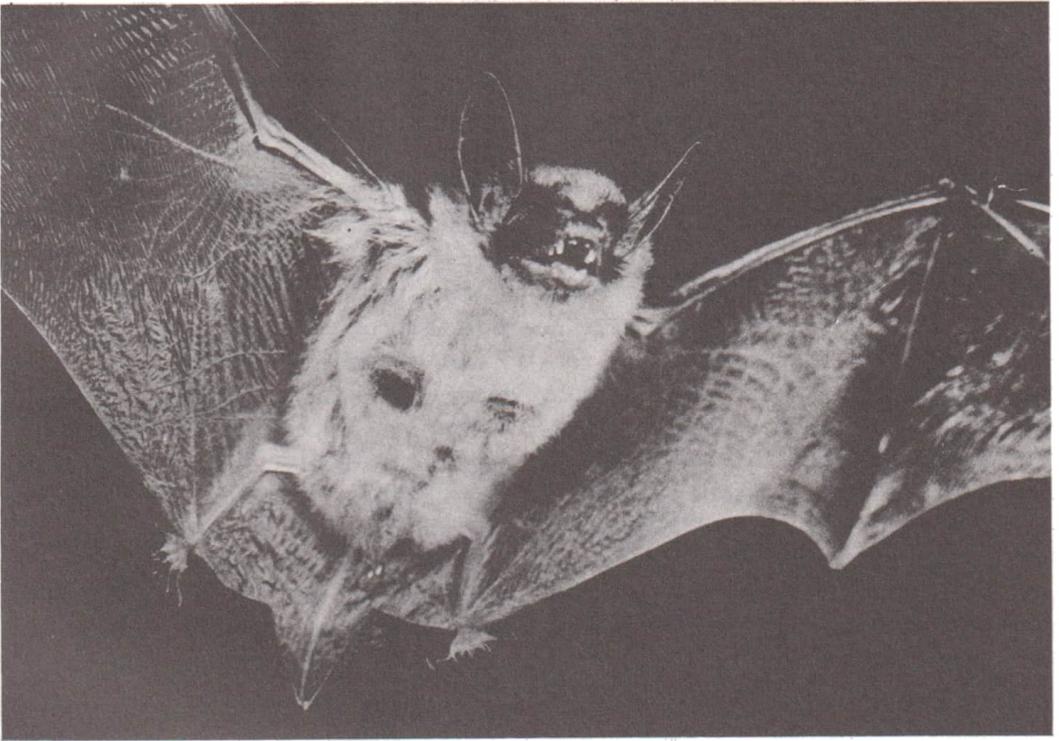
findlichen Hindernisse Kenntnis verschaffen, um mit entsprechenden Flügelmovungen nicht auf die Hindernisse zu stoßen.

Zieht man Vergleiche zwischen den von Menschen geschaffenen Geräten und den natürlichen „Ortungsgeräten“ dieser Flugkünstler, brauchen sich Fledermäuse nicht zu schämen. Da Fledermäuse entsprechend den Ermittlungen der Paläozoologie vor ungefähr 70 Millionen Jahren auf der Welt erschienen sind, hatten sie für die Vervollkommnung ihrer Orientierungsorgane wahrhaftig genügend Zeit. Vergleichen wir eine 120 Gramm schwere Fledermaus mit einer 90 Kilogramm schweren Radareinrichtung, die elektronische Wellen ausstrahlt, und einem 450 Kilogramm schweren Ultraschallempfänger. Mit dem Radargerät kann ein Objekt von 3 Meter Durchmesser aus einer Entfernung von 80 Kilometern geortet werden, Ultraschallempfänger nehmen Objekte von 5 Meter Durchmesser in einer Entfernung von 2,5 Kilometern wahr, die Fledermaus hingegen ortet aus 2 Metern Entfernung ein Hindernis in einer Größe von 0,1 Millimetern. Der Energieverbrauch für die ausgestrahlten und empfangenen Signale beträgt bei der Fledermaus lediglich 0,0001 Watt, der der Radareinrichtung 10 000 Watt und der des Ultraschallempfängers 600 Watt. Bei der Gegenüberstellung dieser Angaben erweist es sich, daß der Wirkungsgrad der Fledermausortung billionenfach besser ist als der der älteren Typen der Funkortungsgeräte und daß er sogar noch hundertfach die Leistung der modernsten Radargeräte unserer Tage übertrifft. Es ist deshalb nicht zufällig, daß Biophysiker eingehend dieses besondere Patent der Natur studieren. Eine genauere Kenntnis dieser Erschei-

nung könnte zweifellos außerordentlich nützlich für die weitere Entwicklung von Schallmeßgeräten sein. Es eröffnet die Möglichkeit für technische Lösungen, die sich in der Natur bereits seit Jahrmillionen bewährt haben und sich somit wahrscheinlich auch in der Technik mit Erfolg anwenden lassen.

Fledermäuse lösen ihre Ultraschalltöne in ziemlich primitiver Weise aus. Ihnen ist die Wirkungsweise des piezoelektrischen Kristalls nicht bekannt, der – wenn Wechselstrom durch ihn geleitet wird – im Rhythmus der Spannungsschwankungen zu vibrieren beginnt, wobei durch das Mitschwingen der ihn umgebenden Luft oder des Wassers Ultraschall erzeugt wird. Fledermäuse bedienen sich nur der aus ihrer Lunge herausströmenden Luft. Ihre Kehle gleicht einer gewöhnlichen Pfeife, lediglich mit dem Unterschied, daß sie bei wahrnehmbaren Tönen mit höheren Frequenzen die durchströmende Luft in Schwingung bringt. In der gleichen Weise funktioniert die Galtonpfeife. Auf den ersten Blick scheint sie sich von einer gewöhnlichen Pfeife nicht zu unterscheiden, doch ihre Besonderheit besteht darin, daß die Länge ihrer Luftsäule veränderbar ist. Wenn beim Hineinblasen in die Pfeife das Ende langsam nach innen gedrückt wird, kann ein ansteigender Ton erzeugt werden. Beim weiteren Nachinnendrücken wird der Ton so hoch, daß er nur noch von besonders empfindlichen Ohren zu hören ist. Wird noch weitergedrückt, bläst man schließlich vergeblich in die Pfeife: Es entstehen Ultraschalltöne, die nur sensible Tierohren wahrnehmen.

Während des Erkundungsflugs halten die Fledermäuse die durch ihre Kehle strömenden Luftwellen in Inter-



Die des Nachts jagenden Glattnasen fliegen nicht deswegen mit offenem Maul, weil sie in der Luft fliegende Insekten fangen wollen. Das aufgesperrte Maul ist ein sicheres Zeichen dafür, daß sie die in der Kehle entstehenden Ultraschalltöne ausstrahlen. Die Blitzlichtaufnahme erfolgt während des Ausstoßens der Rufsignale im Verlauf des Fluges einer Fledermaus.

vallen an und lassen sie durch die Lockerung eines Schließmuskels wieder frei. Dadurch wird der Ton explosionsartig herausbefördert, wodurch ein Ultraschallimpuls entsteht. Beim ruhigen Flug bringt das Tier in der Sekunde 5 bis 10 Erkundungsrufe zustande, doch wenn es in die Nähe der Beute gelangt, vermehren sich die Signalarufe. Wenn die Fledermaus das fliegende Opfer greift, kann in diesem Augenblick die Häufigkeit der Ortungssignale sogar auf 200 in der Sekunde ansteigen.

FM-Fledermäuse, also Glattnasen und verwandte Arten, geben „nach unten verlaufende“ Rufsignale von sich, die durch besonders kurze, einige Tau-

sendstelsekunden lange Impulse miteinander verbunden sind. CF-Fledermäuse hingegen, also Hufeisennasen, „singen“ nur in einem Ton und geben länger anhaltende Impulse ab, wobei sie die Luft nicht durch das Maul, sondern durch die Nase ausströmen lassen. Diese Fledermäuse „summen“ sozusagen nur, denn sie sind selbst bei geschlossenem Maul imstande, ihre Erkundungssignale auszusenden, ja, sie strahlen diese Signale selbst während der Nahrungsaufnahme aus.

Man sollte aber nicht annehmen, daß es sich dabei um leise Töne handelt! Wäre unser Ohr für die Schwingungszahlen des Ultraschalls empfindlich,

würden wir sehr betroffen sein. Der schwächste Fledermausruf ist fünftausendmal stärker als der leiseste Laut, den wir noch wahrzunehmen imstande sind. Dies zeigten Experimente, in deren Verlauf das Ultraschallmikrofon 5 Zentimeter weit vor dem Maul einer Fledermaus gehalten und dabei der Ton auf einem Tonband aufgenommen wurde. Man entdeckte auch lebende „Ortungsgeräte“, deren Signale im vernehmbaren Bereich der Schwingungen mit dem Gedröhn eines Strahltriebflugzeugs konkurrieren könnten. Mit diesem „Krach“ können nur die auf großen Schiffen montierten Ultraschallortungsgeräte wetteifern: Ihr Schall bricht unter Wasser mitunter in einer Lautstärke hervor, als würden auf einmal 6 Millionen Menschen schreien.

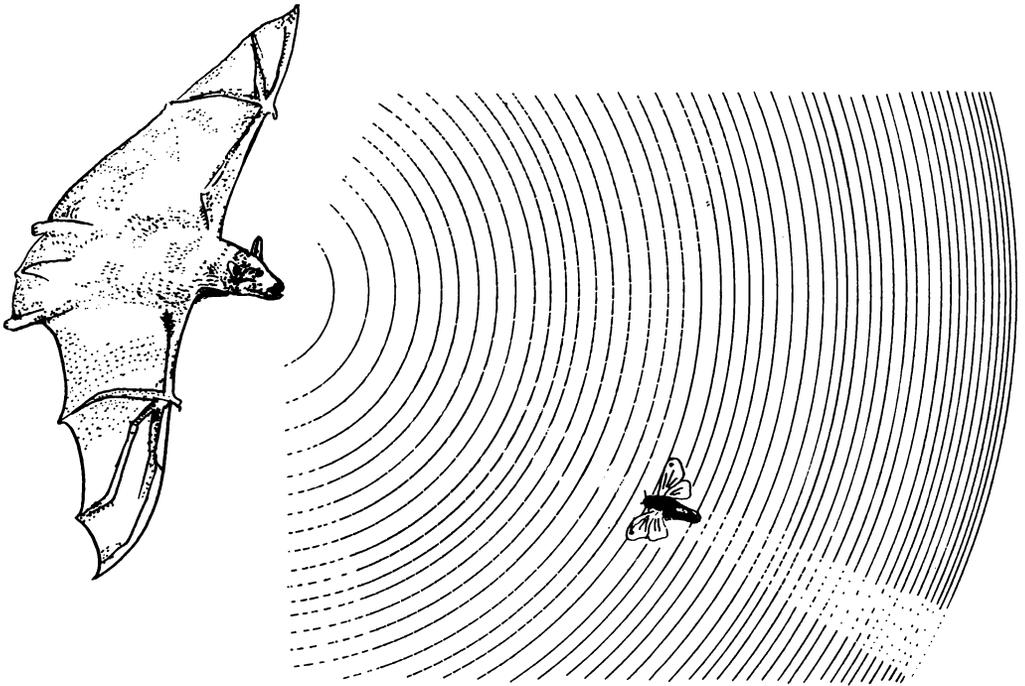
Fledermäuse sind freilich auf diese

enorme Lautstärke angewiesen. Die Schallwellen der Fledermausrufe breiten sich kugelartig in der Luft aus, und nur ein ganz geringer Teil hallt beispielsweise von einer arglos fliegenden Mücke wider. Im allgemeinen sind die Rufsignale der Fledermaus um so lauter, je größer der Funktionsbereich ist. Hufeisennasen nehmen ihre Beute bereits aus einer Entfernung von 6 bis 7 Metern wahr. Mit der größeren Reichweite sind länger anhaltende Impulse verbunden, und diese Fledermäuse fliegen in der Regel schneller als Arten, deren Ortungssysteme auf einer anderen Grundlage funktionieren.

Die in kleinerem Umkreis jagenden Fledermäuse strahlen nur „flüsternde“ Signale aus. Sie fliegen bedeutend langsamer, und nach Annahme des amerikanischen Wissenschaftlers A. Novick



Hufeisennasen-Fledermäuse strahlen ihre Rufe durch die Nase aus. Dabei drehen sie zur gleichen Zeit das eine Ohr von hinten nach vorn, das andere jedoch von vorn nach hinten, um die reflektierten Signale wahrzunehmen.



Die Ultraschallwellen der Fledermausrufe verbreiten sich in der Luft wie sich aufblähende Seifenblasen. Dort, wo die Wellen auftreffen, zum Beispiel an einem arglos fliegenden Insekt, wird ein Teil reflektiert, und sie kehren breitgestrahlt zurück. Dadurch müssen Fledermäuse außerordentlich laut rufen, um schwache Bruchteile der reflektierten Wellen noch zu vernehmen.

sind sie in der Lage, zugleich den Wiederhall von 3 bis 10 Objekten wahrzunehmen. Dabei entscheiden sie sich für das jeweilig günstigste (zum Beispiel das Signal eines fliegenden Insekts) und nehmen von anderen, unbeweglichen Objekten, wie Baumästen und Obst, keine Notiz. Ihre Aufmerksamkeit konzentriert sich nur auf das nächst fliegende Insekt, wobei ihre Rufe noch leiser werden und nur die ausgemachte Beute „sichten“, währenddessen werden die leisen Töne von den entfernteren Objekten so schwach reflektiert, daß sie von der Fledermaus nicht mehr wahrgenommen werden.

Ein Pingpongspiel im Ohr

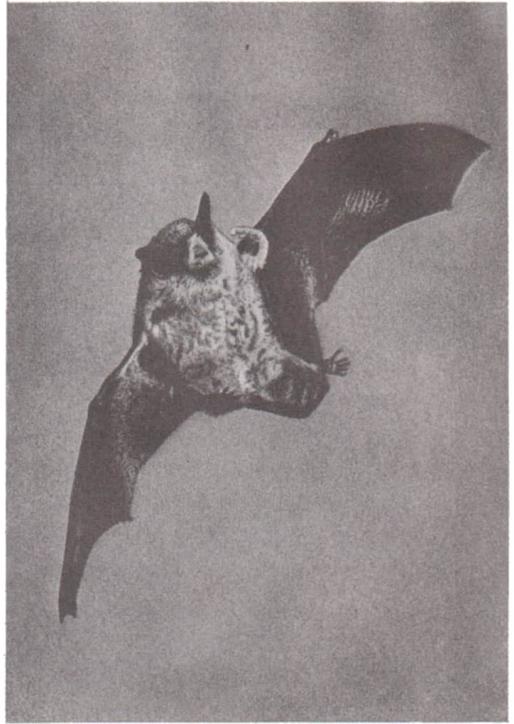
Forscher haben in der Bewegungs- und Ortungsfunktion der jagenden Fledermaus drei gut abzugrenzende Abschnitte beobachtet. Der erste Abschnitt ist die „Suche“, der zweite die „Verfolgung“, der dritte hingegen der „Angriff“, bei dem die Fledermaus ihre Beute ergreift.

Eingehende Untersuchungen haben bereits im ersten Abschnitt der „Suche“ aufschlußreiche Zusammenhänge aufgedeckt. Es ist nicht zufällig, daß die verschiedenen Arten von Fledermäusen, wie groß ihr Jagdrevier auch ist, sich

zuerst über die Situation ihrer voraus-sichtlichen Insektenbeute informieren. Diese Erkundung hängt eng mit der Dauer der ausgestrahlten Erkundungs-impulse zusammen. Die Hufeisennase erkundet ihre Umgebung mit Rufen, die 0,05 Sekunden anhalten, so daß sie die fliegenden Insekten aus einer Entfer-nung von 8,6 Metern wahrnimmt. Die zur Familie der Blattnasen gehörende Kinnblattfledermaus (*Chilonycteris psi-lotis*) hingegen strahlt viel kürzere Er-kundungssignale aus. Mit ihren 4 Tau-sendstelsekunden anhaltenden Rufsig-nalen wird sie nur auf Insekten auf-merksam, die sich näher als 68 Zentime-ter von ihr befinden. Doch weshalb nimmt sie nicht von etwas weiter ent-fernt fliegenden Nachtinsekten Kennt-nis?

Darauf gibt uns eine eingehende Un-tersuchung der erwähnten Kinnblattfle-dermaus Aufschluß. Dieses Tier strahlt während des Suchabschnitts 18 Impulse in der Minute aus. Dabei beträgt die Zeitdauer eines ihrer unvernünftigen Impulse 0,004 Sekunden. Dies bedeutet, daß die Länge des ausgestrahlten „Wel-lenzugs“ etwa 1,35 Meter beträgt. Wird diese Wellenreihe von 68 Zentimeter entfernten Objekten reflektiert, trifft sich das Ende des „Rufsignals“ mit dem Anfang der zurückkehrenden Wellen-reihe. Aus einer kürzeren Entfernung als 68 Zentimetern nimmt die Fleder-maus die „Stille“ zwischen dem Ausruf und dem Widerhall nicht mehr wahr, da Ausruf und Reflexion ineinanderflie-ßen. Befindet sich das Objekt noch nä-her, ist die Überlappung der Wellen-folge noch umfassender.

Aller Wahrscheinlichkeit nach wird die Aufmerksamkeit der Fledermaus in der Dunkelheit durch die Verschmel-zung des Signalrufs mit dem Widerhall



Der letzte Augenblick der Jagd. Die im Labo-ratorium fliegende Fledermaus schnappt nach dem aufgehängten Wurm. Diesmal war die Erkundung der Ortung vollkommen, da der begehrte Bissen seinen Standort im Raum nicht verändern konnte. Handelt es sich bei der Beute um einen beweglichen Nachtfalter, muß die Fledermaus oft ihre Beute mit dem Flügel ergreifen und so zum Maul führen.

in Richtung des fliegenden Insekts ge-lenkt. Der große Vorteil dieser Metho-de besteht darin, daß die Fledermaus auf Grund des Zusammenklings bei-der Töne sofort weiß, wie weit entfernt sich ihre Beute befindet. Sie ist deshalb auf keinerlei Entfernungsmessung an-gewiesen und braucht sich nur auf ihr Gehör zu verlassen.

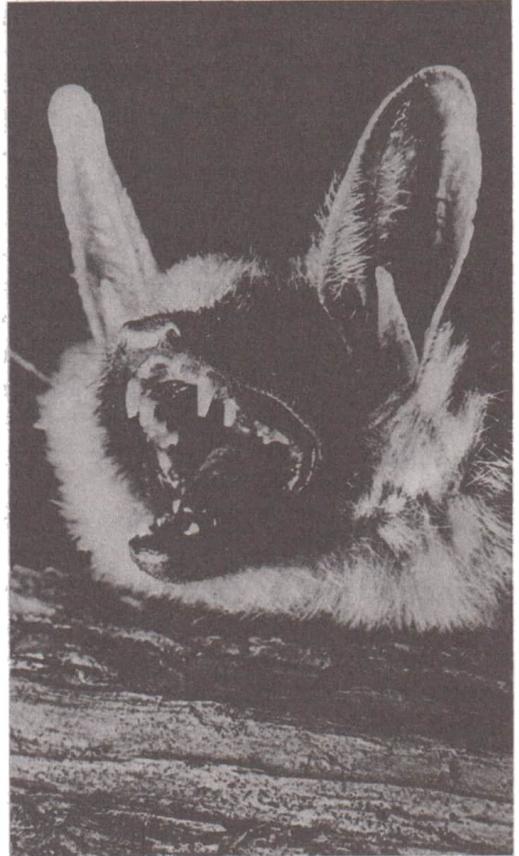
Die Ereignisse vollziehen sich dann in dramatischer Schnelligkeit. Die Fle-dermaus nähert sich ihrem arglosen Op-

fer, und aus einer Entfernung von einem halben Meter strahlt sie in der Sekunde bereits 100 Impulse aus. Zur Ausstrahlung dieser Impulse steht ihr allerdings kaum Zeit zur Verfügung, denn der „Verfolgungsabschnitt“ ist kürzer als ein Atemzug, er dauert insgesamt nur 0,2 Sekunden. Beim abschließenden „Angriff“ verwandelt sich der Ortungsschall in ein „Surren“, die Impulse steigen auf 170 in der Sekunde an. Die Zeitdauer des Angriffs dauert insgesamt 0,075 Sekunden; in dieser Zeit hat die Fledermaus ihre Beute bereits erwischt.

Weshalb beschleunigt die Fledermaus ihre Signalarufe? Die bisherige Annahme schien sinnvoll gewesen zu sein, daß ihre Rufe, wenn sie sich dem Ziel nähert, in einer immer kürzeren Zeit zurückkehren und sie deshalb immer schneller neue Impulse ausstrahlen muß, um zu vermeiden, daß die ausgestrahlten Rufsignale und deren Widerhall sich in ihrem Ohr nicht vollkommen vermischen. Der sowjetische Forscher E. J. Pumper hat auf dieser Grundlage eine interessante Theorie aufgestellt: Die Fledermaus sendet erst dann neue Schallimpulse aus, wenn sie gerade die vorher ausgestrahlten als Echo zurückempfängt, sonst könnte sie die ausgestrahlten Rufsignale vom zurückgestrahlten Widerhall nicht unterscheiden. Eine einleuchtende Vorstellung; doch neueste Untersuchungen haben bestätigt, daß die Wirklichkeit viel komplizierter ist. Hat die Fledermaus nämlich ihre Beute entdeckt, läßt sie es in der Phase der „Verfolgung“ ohne weiteres zu, daß sich die Rufsignale mit dem Widerhall überlappen!

Ihr geht es keinesfalls so wie dem Beatsänger, dem etwas ins Ohr geflüstert wird, der aber infolge des Lärms kein Wort verstehen kann. Ihr Trom-

melfell ist nämlich mit den drei Gehörknöchelchen und dem Schneckengang des Innenohrs als winzige Kapsel im Schädel schallsicher aufgehängt. Ein gallertartiges, elastisches Zellgewebe verhindert wie ein Isolierstoff, daß sich die durch die Lautsignale verursachten



Die Ortung der Glattnasen wird von Forschern für vollkommener gehalten als die der Hufeisennasen. Vom „Summen“ bis zu den aus der Kehle herauskommenden Ruflauten führte ein weiter Weg in der Stammesentwicklung. Mit ihren in der Spannweite einer Oktave variierenden Ortungssignalen sind Glattnasen gewöhnlich aus einer Entfernung von 2 bis 2,4 Metern imstande, im Dunkeln fliegende Insekten aufzuspüren.

Schwingungen der Gehörknöchelchen auf das Mittel- und Innenohr übertragen. An der Universität von Yale wurde in diesem Zusammenhang ermittelt, daß die Fledermaus 0,01 Sekunden vor jedem Rufsignal durch das Zusammenziehen entsprechender Muskeln die drei kleinen Knöchelchen des Mittelohrs so fixiert, daß sie den Schall des Rufsignals nicht in das innere Ohr weiterleitet. Die Muskeln lockern sich erst gegen Ende des Schallimpulses wieder, damit die Ohren den Widerhall noch wahrnehmen können. Diese biophysikalische Lösung bewahrt also die Sensibilität des Ohres, so daß das vorangegangene Rufsignal früher zurückkehren und den folgenden Ruf überlappen kann. Warum ist aber die Fledermaus darauf angewiesen, daß sich das Rufsignal mit dem Widerhall in ihrem Ortungssystem überlappt? Zum Verständnis dieser Notwendigkeit muß man sich vorher mit den von Menschen hergestellten Ortungsgeräten im Bereich der Funkortung beschäftigen.

Mit gespannter Aufmerksamkeit sitzt die Bedienungsmannschaft des Ortungsgeräts im Funkraum ihres Schiffes und beobachtet das Gerät. Die Stille wird nur durch das rhythmisch klingende Ping-ping-ping aus dem Ortungsgerät unterbrochen. Plötzlich wird der Ton höher! Auf den Gesichtern tritt Spannung ein. Das Ortungsgerät zeigt das Nahen feindlicher Unterseeboote an . . .

Die Ultraschalltöne werden für die Bedienungsmannschaft mit einer interessanten Methode hörbar gemacht. Wenn das Ortungsgerät Töne mit einer Frequenz von 23 000 Hertz sendet, werden gleichzeitig Töne mit einer Schwingung von 22 000 Hertz in den Funkraum ausgestrahlt. Da es sich um Ultraschalltöne handelt, sind beide

Töne nicht wahrzunehmen. Wenn aber die zurückgeworfenen Schallimpulse auf die permanenten Schalltöne des Ausstrahlungsraums treffen, entsteht durch die Differenz beider Schwingungswerte ein Ton mit einer Frequenz von 1000 Hertz, der deutlich zu hören ist. Hierdurch ergibt sich der charakteristische, glockenschlagähnliche Klang am Ortungsgerät.

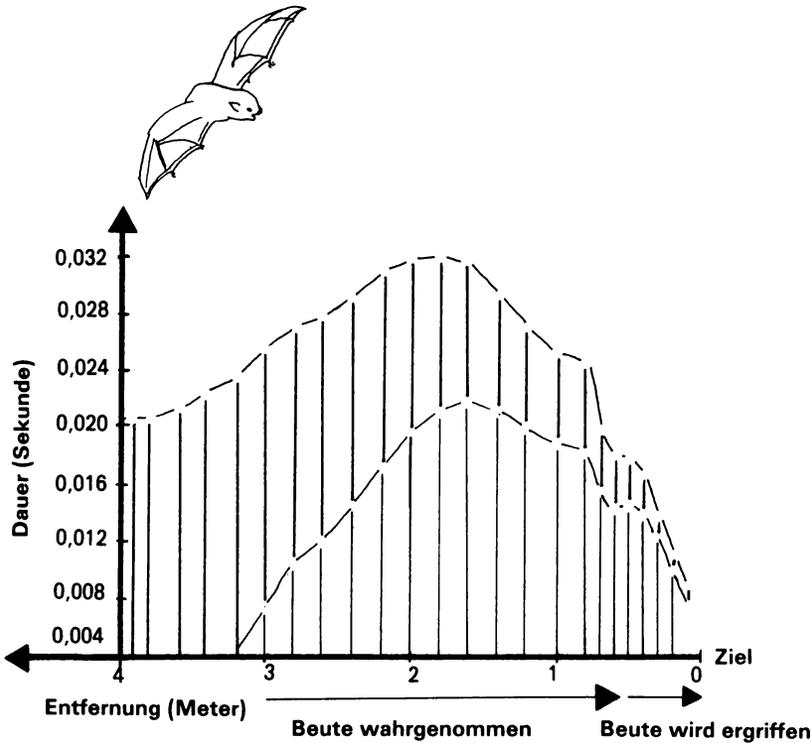
Was geschieht aber, wenn das Ortungssignal auf ein sich näherndes Unterseeboot trifft? In diesem Fall kehrt der Schall merkwürdigerweise in einer höheren Frequenz zurück, als er ausgestrahlt wurde. Dieser sogenannte Dopplereffekt tritt auch bei einem vorbeifahrenden Zug auf: Das Pfeifen der sich nähernden Lokomotive klingt höher, während er beim Entfernen der Lokomotive tiefer zu sein scheint. Das sich uns nähernde Objekt drückt den „Wellenzug“ des Schalls beinahe harmonikaartig zusammen. Die Länge der Wellen wird dadurch reduziert, in einer Sekunde entstehen mehr Wellen, wodurch sich die Frequenz des Schalls erhöht. Setzen wir voraus, daß in solch einem Fall die Frequenz des rückkehrenden Ultraschallsignals im Ortungsgerät 23 500 Hertz beträgt. Was hört dabei der Beobachter? Er nimmt anstatt eines Tones von 1000 Hertz einen von 1500 Hertz wahr, was selbstverständlich höher ist als die ursprüngliche Differenz. Der erfahrene Ortungsoffizier kann allein aus dieser Schallabweichung „heraus hören“ und selbstverständlich auch daraus ableiten, ob das Unterseeboot wendet oder seine Geschwindigkeit verringert.

Höchstwahrscheinlich findet im Ohr der Fledermaus ein ähnlicher Vorgang statt. Mittels der „Überlappung“ der ausgestrahlten und zurückgeworfenen

Schallsignale führt die Fledermaus gewissermaßen für sich selbst den Differenzton des Schiffsortungsgeräts herbei. Wenn beispielsweise eine Mücke gerade auf einer Stelle schwebt und die Fledermaus mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit auf sie zufliegt, bleibt der Differenzton auf der gleichen Höhe, und vielleicht hört die Fledermaus: Pang-pang-pang. Bemerkt jedoch die Mücke die Gefahr und beginnt zu fliehen, hört die Fledermaus plötzlich: Pong-pong-pong. Je schneller das Beuteinsekt zu fliehen versucht, desto

tiefer wird der Ton. Wenn jedoch die Mücke nichtsahnend in Richtung der Fledermaus fliegt, erhöht sich der von der Fledermaus wahrgenommene Ton plötzlich, und sie hört: Ping-ping-ping.

Wir können freilich nicht mit Sicherheit davon ausgehen, daß dieses „Ping-pongspiel“ im Ohr beziehungsweise im Gehirn der Fledermaus tatsächlich stattfindet, wo im Grunde genommen ein Vergleich der elektrischen Nervenreize der Schallsignale ausreichen würde, die Wahrnehmung eines Differenztons hervorzurufen. Tatsache jedoch ist, daß



Die *Chilonycteris parnellii* ruft noch, wenn sie bereits den eigenen Widerhall wahrgenommen hat. Die Dauer der Überlappung zwischen Ruf und Widerhall wird beim Herannahen an die Beute immer geringer. So kann sich die Fledermaus lediglich auf Grund der Zeitdauer und der Schallhöhe ständig darüber informieren, wie weit noch das Ziel entfernt ist. Die schwarzen senkrechten Linien stellen die Dauer der Rufsignale, die grünen die rückkehrenden Impulse und deren Überlappungszeit dar.

sich die Fledermaus auf Grund der Frequenzdifferenz zwischen dem ausgestrahlten und zurückkehrenden Schallsignal genau über die Geschwindigkeit ihres Zielpunkts orientieren kann. Der Ausgang einer erfolgreichen Jagd hängt nämlich von der blitzschnellen Information dreier Dinge ab: der Entfernung, der Richtung und der Geschwindigkeit ihrer Beute. Bei der Entdeckung des fliegenden Insekts schätzt die Fledermaus gleichzeitig auf der Grundlage des ersten Zusammenfallens von Schallsignal und Widerhall die Entfernung ein. Die Annäherungsgeschwindigkeit nimmt sie höchstwahrscheinlich während des „Verfolgungsabschnitts“ reflexartig wahr, wenn sie die Auswirkung der Differenzfrequenz beachtet, wie es erfahrene Beobachter an Ortungsgeräten tun.

Auf Grund von Ultraschallzeitmessungen der Ortungssignale verschiedener Fledermäuse wurde festgestellt, daß sich die Zeitdauer der „Überlappung“ sogar während des Fluges verändert, doch Ursache und Bedeutung dieser Veränderung konnten bisher noch nicht geklärt werden. Die zur Familie der Blattnasen gehörende *Chilonycteris parnellii* – Kinnblattfledermaus – achtet beispielsweise bereits aus einer Entfernung von 2 Metern von einer Tauflye, bei einer Überlappung von 0,019 Sekunden, auf ihre eigenen Impuls-signale; aus einer Entfernung von 1,65 Metern hingegen erreichte die Länge der „inneren Stimme“ ihr Maximum: 0,02 Sekunden. Von da an strahlt sie immer kürzere Impulse aus, wobei die Zeitdauer der Überlappungen ihrer Rufsignale gleichfalls kürzer wird.

Auf die Geschwindigkeit können nicht nur auf Grund der Höhenschwankungen des Differenztons Rückschlüsse

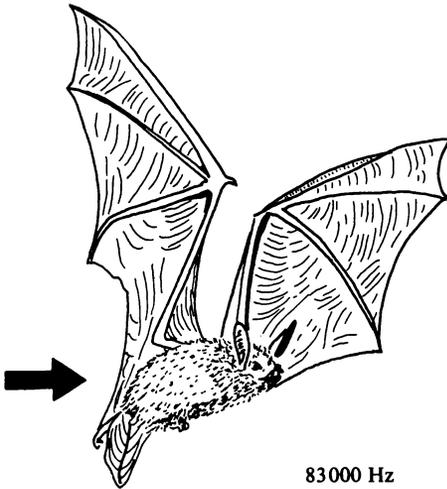
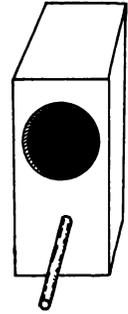
gezogen werden. Es gibt auch Ortungsgeräte, an denen der für den Vergleich dienende Ultraschall verändert werden kann. Dabei ist der Beobachter am Ortungsgerät bei der Bestimmung der Geschwindigkeit nicht allein auf sein Gehör angewiesen. Wenn zum Beispiel von einem sich nähernden Fischschwarm 23 500 Hertz starke Signale an Stelle der 23 000 Hertz starken ausgestrahlten zurückkehren, kann der Beobachter durch die Drehung an einer Stimmscheibe die Höhe des permanenten Schallsignals verändern. Dadurch trifft der zurückkehrende Ultraschall anstatt auf eine Schwingung von 22 000 Hertz auf eine solche von 22 500 Hertz, wodurch die vernehmbare Frequenzdifferenz unverändert 1000 Hertz beträgt. Der Beobachter nimmt also weiterhin das gleich hohe, sich wiederholende Schallsignal wahr, das vom Ortungsgerät vor dem Nahen des Fischschwarms registriert wurde.

Dieser Typ von Ortungsgeräten kann die Arbeit des Beobachters wesentlich erleichtern. Einerseits muß lediglich darauf geachtet werden, daß der Differenzton in unveränderter Höhe erklingt, andererseits kann von der Stimmscheibe unmittelbar abgelesen werden, mit welcher Geschwindigkeit sich der Fischschwarm bewegt. Eine derartige Lösung fiel aber nicht nur den Ingenieuren ein. Die Großen Hufeisennasen und die rundsatteligen Hufeisennasen wenden diese Methode der Geschwindigkeitsmessung vermutlich seit Jahrmillionen an.

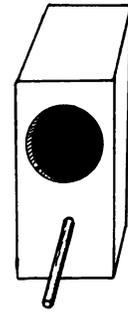
H. U. Schnitzler nahm an der Universität Tübingen Messungen der Rufsignalfrequenzen an Fledermäusen vor, die zum Beutefang flogen, und mußte überrascht feststellen, daß die Frequenz dabei niedriger war, als sie die Fleder-



81 000 Hz



83 000 Hz



Die Fledermaus muß sich auf das Zielobjekt zunächst „einstimmen“, um dann festzustellen, mit welcher Geschwindigkeit sie zu fliegen hat. Fliegt sie in Richtung ihrer Futterstelle, achtet sie darauf, daß sie immer einen gleichmäßigen Echoton wahrnimmt (zum Beispiel 83 000 Hertz). Sie gibt deshalb während des Fliegens bei einer bestimmten Geschwindigkeit Rufsignale mit einer Frequenz von 81 000 Hertz ab (oben), so daß der reflektierte Wiederhall durch den Dopplereffekt in einer entsprechend des wachzunehmenden gleichmäßigen Echotons unveränderten Frequenz von 83 000 Hertz eintrifft.

mäuse im Ruhezustand ausstrahlen. In Richtung der Beute fliegend, strahlen zum Beispiel die Hufeisennasen Rufe mit einer um etwa 2000 Hertz niedrigeren Frequenz aus.

Der Forscher war sich darüber im klaren, daß die Rufsignale mit höheren

Schwingungszahlen in die Ohren der zum Beutefang ausfliegenden Fledermäuse zurückkehren, als sie zu Beginn ausgestrahlt wurden. Unter Zugrundelegung der Fluggeschwindigkeit und der Entfernung errechnete Schnitzler mühelos die Frequenz der reflektierten

Signale. Er mußte überrascht auf das Ergebnis blicken: Es betrug 83 000 und 104 000 Hertz. Diese Fledermausarten nehmen demnach während des Fluges die gleichen Tonschwingungen wahr, die sie im Ruhezustand ausgestrahlt haben. Mit dem „Abstimmen“ ihrer Rufe wird der Dopplereffekt eliminiert, und gleichzeitig informiert sie diese Abstimmung über die notwendige Flugeschwindigkeit zum Zielpunkt. Dabei müssen sie nur darauf achten, daß in ihren Ohren stets der ihnen geläufige Widerhallton in gleicher Frequenz erklingt. Einem anderen Experiment zufolge waren dieselben Fledermäuse, nachdem ihnen ein Pendel gegenübergestellt worden war, auch dazu in der Lage, Rufsignale in unterschiedlichen Frequenzen auf die sich nahende oder entfernende Pendelscheibe auszustrahlen. Vermutlich stimmen sie sich darauf ein, währenddessen sie die Frequenz des gewohnten Widerhalls wahrnehmen.

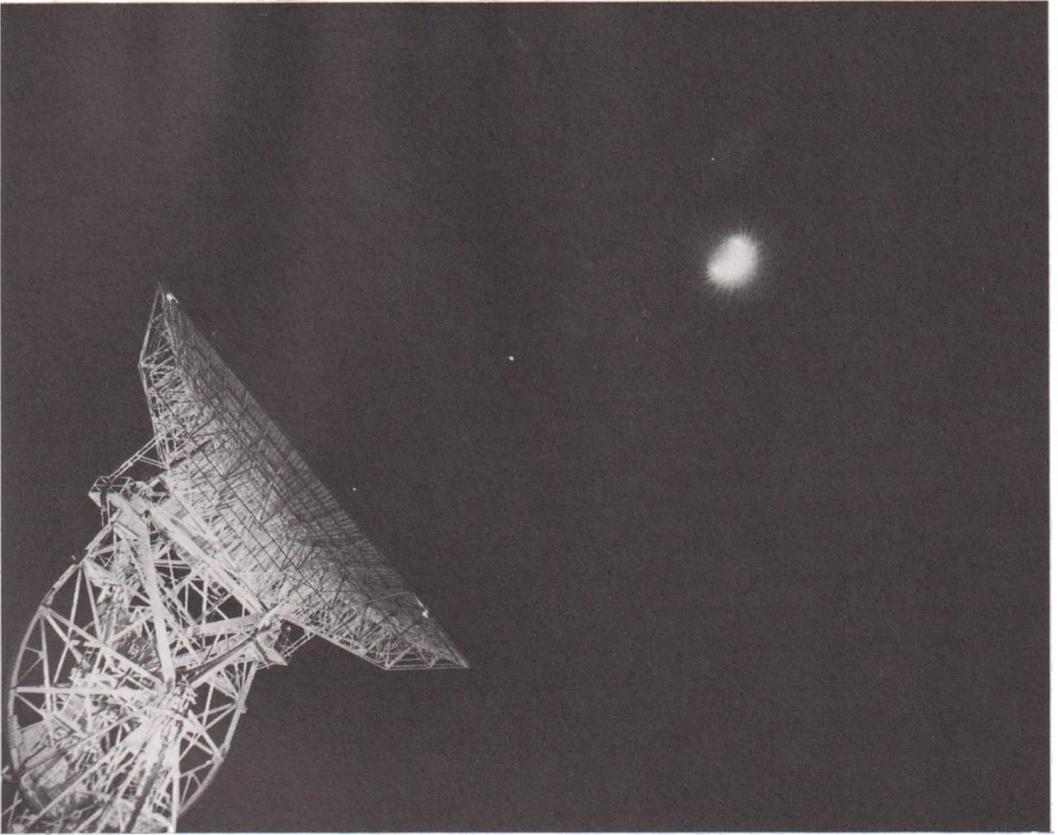
Daraus ergibt sich, daß Fledermäuse durchaus imstande sind, ihre Ortung auf ein Objekt zu konzentrieren! Die gleichzeitigen Rufsignale von anderen Objekten werden vergebens reflektiert, sie „horchen“ nur auf das ausgesuchte Objekt.

Wozu nur unsere Augen fähig sind, das können Fledermäuse mit den Ohren machen! Wenn wir beispielsweise einen fliegenden Vogel mit den Augen verfolgen, sehen wir den Vogel scharf, die dahinterliegenden Bäume und Häuser nur undeutlich und verschwommen. Genauso achtet die Fledermaus nur auf ein fliegendes Insekt, alles andere hört sie nur „unscharf“. Sie nimmt mittels der widerhallenden Ultraschallimpulse nur die Bewegungen ihres Opfers deutlich wahr.

„Bildhaftes“ Hören

Die riesigen Antennenschirme der Funkteleskope kontrollieren Tag und Nacht pausenlos die aus den fernen Regionen des Universums eintreffenden Funksignale. Die Signale sind am lautesten, wenn die Achse des Antennenschirms genau auf einen Stern ausgerichtet ist. Beim Umschwenken des Schirmes werden die Signale sofort schwächer. Fledermäuse haben zwar verhältnismäßig kleine Ohren, doch sie sind ebenso beweglich wie die Antennenschirme. Untersuchungen von A. D. Grinnel und N. Suga zufolge sind ihre Ohren im Ruhezustand in einer Seitenrichtung von 30 Grad zur Längsachse des Körpers am empfindsamsten. Fledermäuse können durch Drehung der Ohrmuschel feststellen, von wo die Ultraschallrufe am stärksten reflektiert werden. Das flatternde Insekt muß sich ihrer Ortung nach offensichtlich in dieser Richtung befinden. Wenn sie danach die reflektierten Töne mit ihren Ohren verfolgen, können sie ihre künftige Beute im „Auge“ behalten, wie im zweiten Weltkrieg die enorm starken Scheinwerfer die feindlichen Flugzeuge „erfaßten“ und verfolgten, damit der Zielpunkt in der Dunkelheit von der Bedienung der Flakgeschütze gut gesehen werden konnte.

Die zur nächtlichen Jagd aufbrechende Fledermaus orientiert sich mit beiden Ohren. So ist sie also imstande, nicht nur die Richtung des ausgemachten Insekts einzuschätzen, sondern sie kann mit ihrem räumlichen Hören auch die Geschwindigkeit pausenlos feststellen. Dies erfolgt in der Weise, daß sie nicht nur die beiden Ohren ständig in Richtung des reflektierenden Schalls ausrichtet, wobei die Spannmuskeln



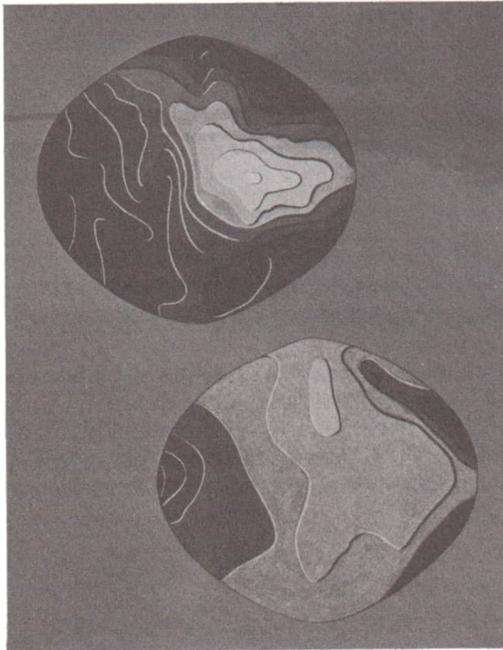
In den großen Sternwarten sind riesengroße Antennenschirme auf das nächtliche Himmelsgewölbe gerichtet. Experten sind auf der Suche nach unsichtbaren Himmelskörpern im Universum, die Radiostrahlen senden. Wenn die Signale in der rotierenden Parabolantenne am stärksten in Erscheinung treten, wissen die Forscher, daß die Antennenachse in Richtung der unsichtbaren Strahlenquelle weist. Die Fledermäuse nutzen ihre Trichterohren in ähnlicher Weise zur Einschätzung des reflektierten Schalls.

entsprechende Informationen an das Gehirn übermitteln, sondern sie orientiert sich auch auf der Grundlage des Zeitunterschieds des Schalls. Stellen wir uns beispielsweise vor, daß die summende Mücke auf der Stelle schwebt. Die Ultraschallsignale reflektieren das Gesumm in schneller Folge. Der „Flattermanteljäger“ horcht auf. Wo kann die Mücke sein? Wenn der Wiederhall das rechte Ohr etwas später als das linke erreicht, gibt es keinen Zweifel: Die

Mücke befindet sich auf der linken Seite. Auf Grund dieses winzigen Zeitunterschieds orientiert sich die Fledermaus ähnlich wie der Mensch, der ja auch feststellen kann, woher im Dunkeln der Schrei einer Eule ertönt. Die Richtungssensibilität der Fledermaus ist jedoch zweiundeinhalbmal genauer.

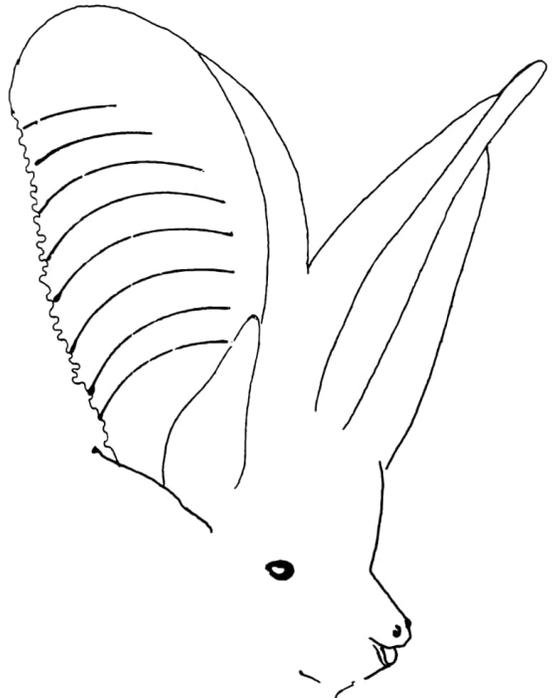
In Anbetracht der bisherigen Erfahrungen scheint es immer wahrscheinlicher, daß die schnell dahinhuschenden kleinen Tiere tatsächlich über ein „bild-

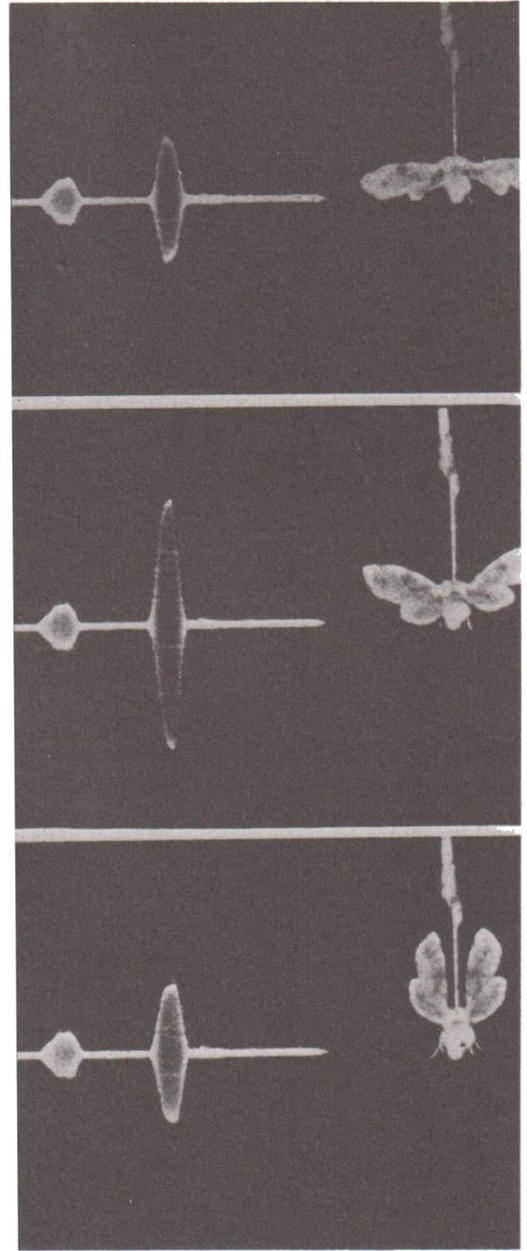
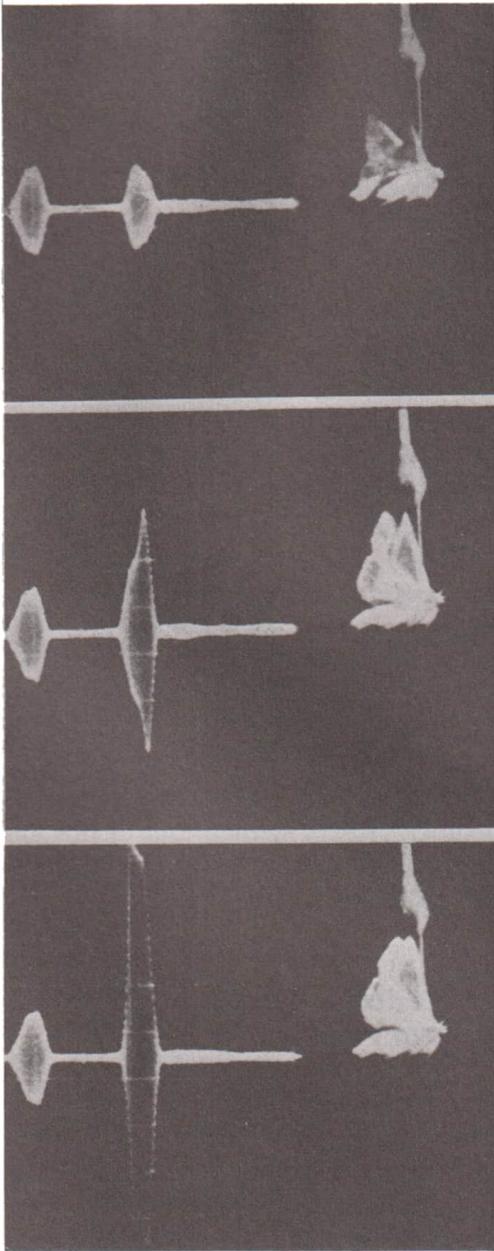
haftes“ Hören verfügen. Sie nehmen im Dunkeln genau das mit ihren Ohren wahr, was wir am hellichten Tag mit unseren Augen sehen. Ohrenfledermäuse strahlen ihre Ultraschallwellen in einem Winkel von 90 Grad aus, so als würden sie ihre Umgebung mit Hilfe kleiner Schallreflektoren „beleuchten“. Die Schallwellen der Hufeisennasen bilden nur einen Strahlungskegel von 20 Grad, so als würden sie mit einer lichtscharfen Taschenlampe die Umgebung bestrahlen. Wenn sie schließlich etwas „erblick-



Das Hörvermögen der Ohrmuschel der Fledermaus ist nicht gleichmäßig sensibel. Wenn die Muschel im Verhältnis zur Körperachse in einem Winkel von 30 Grad steht, nimmt die Empfindsamkeit vom Mittelpunkt zur Seite hin ab. Diese Bereiche sind durch dunklere Streifen gekennzeichnet (oben). Wenn die Fledermaus ihre Ohren an den Körper drückt, dehnen sich diese sensiblen Streifen aus. Dabei nimmt der „Jäger“ nur noch schwache Wiederhalltöne wahr und erkennt nicht mehr ihre Richtung (unten).

Die Ohren der Ohrenfledermaus sind mit eigenartigen Faltenrillen durchzogen. Entsprechend den neuesten Untersuchungen erhöhen diese Rillen die Sensibilität der Fledermausart. Eine jede dieser Rillen leitet die reflektierten schwachen Ultrasignale wie ein kleiner Schallsammelspiegel in Richtung des Trommelfells.





Vermutlich „sieht“ die Fledermaus mit ihrem „bildhaften“ Hören die Nachtfalter so, wie wir es hier darstellen! Auf jedem Einzelbild sind drei Aufnahmen aufeinanderkopiert. Links die grafische Darstellung eines Fledermaussignals, in der Mitte der reflektierte Widerhall (der von der Fledermaus wahrgenommen wird), rechts ist das Beuteinsekt sichtbar. Aus dem oszillographischen Bild geht deutlich hervor, daß die Fledermaus selbst die Flügelschläge des davonfliegenden Schmetterlings wahrnimmt. Auf der linken Seite fliegt das Insekt in der Querrichtung, auf der rechten Seite hingegen parallel mit der Fledermaus.

ken“, was mehr Aufmerksamkeit erfordert, wird das Schallwellenbündel weiter eingeeengt, als würde man den Lichtkreis der Taschenlampe kleiner stellen, um stärkeres Licht zu erhalten.

Die Ortungsorgane der Fledermäuse sind in der Tat mehr als ein einfaches Entfernungsmessgerät. So können sie bei gleich geformten Objekten im Dunkeln sofort zwischen Nahrung und einem für sie wertlosen Steinstückchen unterscheiden. Außerdem sind sie während des Fluges im Laboratorium imstande, sofort zu erkennen, ob sie waagrecht oder senkrecht fliegen müssen, um enggespannten Drahtfäden auszuweichen. Sven Dijkgraaf, Wissenschaftler an der Utrechter Universität, konnte seinen Experimentierfledermäusen sogar beibringen, zwischen einem rund und einem eckig geformten Gegenstand zu unterscheiden. Die Tiere haben sich tatsächlich so verhalten, als könnten sie im Dunkeln sehen!

Der Schall bietet ihnen offensichtlich die gleiche Orientierung wie anderen Tieren das Licht. Vielleicht behandeln Fledermäuse ihre Informationen ähnlich wie andere Tiere ihre Informationen auf Grund des Lichts. Dr. Pál Greguss jun. hat darauf fußend eine verblüffende Theorie aufgestellt, wonach im Gehirn der Fledermaus Biohologramme entstehen. Das Hologramm — eine Erfindung des Nobelpreisträgers Dénes Gábor — ist eine Art Lichtbild, welches sämtliche Daten eines plastischen Bildes enthält. Wenn es mit einfarbigem Licht (Laserstrahlen) durchleuchtet wird, erscheint ein dreidimensionales Bild des Objekts dahinter. Es ist durchaus möglich, daß die durch das Gehirn der Fledermaus laufenden elektrischen Schallreize ein ähnliches plastisches Bild entstehen lassen. Das Tier

sieht also — lediglich mit Hilfe der Schallsignale — vermutlich die ganze Umgebung dreidimensional vor sich.

Diese geistreiche Theorie wird noch durch einige Experimente untermauert, doch entsprechend den Untersuchungen von K. D. Roeder gilt es bereits als sicher, daß die Fledermaus „sehen“ kann, ja sogar die Flügelschläge von einem kleinen Nachtschmetterling wahrnimmt, und dies alles auf der Grundlage der reflektierten Schallsignale. Das arglose Opfer befindet sich vor allem dann in größter Gefahr, wenn es den Anflugweg der Fledermaus senkrecht kreuzt. Dabei werden die Ultraschallsignale der Fledermaus vom Insekt ungefähr hundertmal stärker reflektiert als beim sich nähernden oder sich entfernenden Flug. Eine endgültige Antwort darauf, wie es sich mit dem „bildhaften“ Hören der Fledermaus wirklich verhält, werden wir erst dann erhalten, wenn wir jede Einzelheit ihres Ortungssystems kennen und es uns gelingt, nach diesem Muster etwas Ähnliches zu konstruieren.

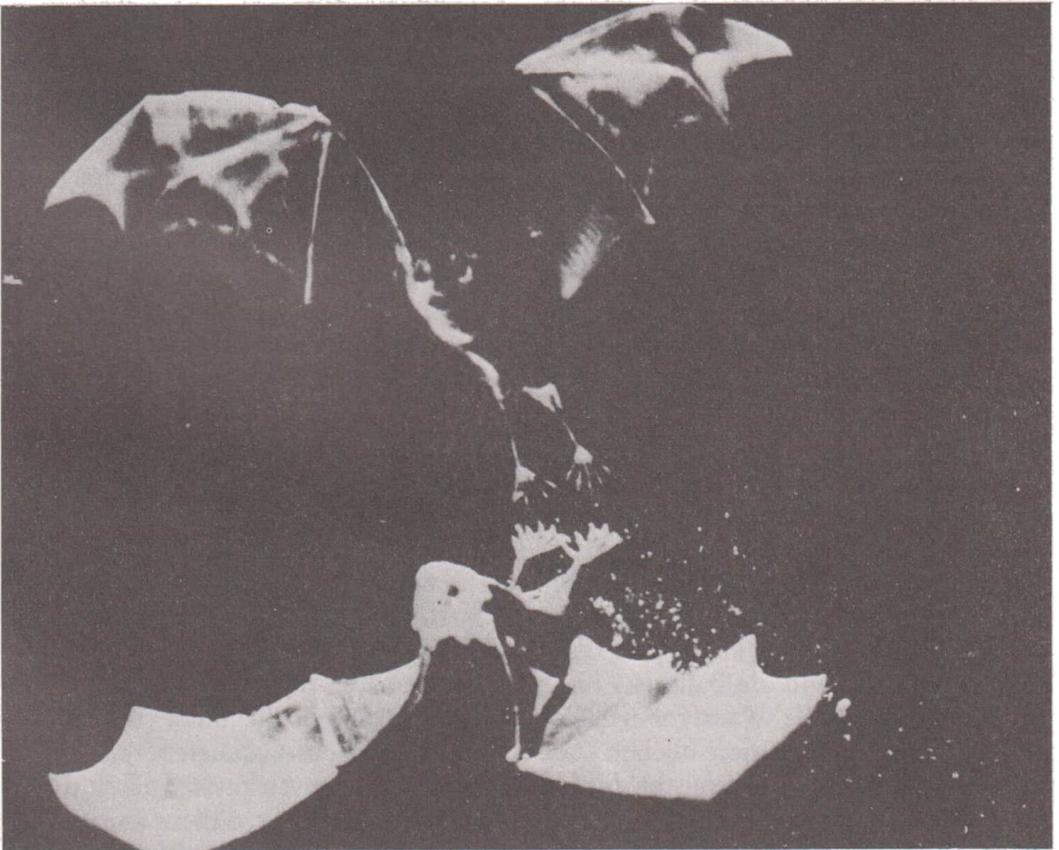
Verräterische Signale auf dem Wasser

Die Familie der fischenden Fledermausarten ernährt sich nicht von Insekten, sondern von Fischen. Seit Forscher auf die lebenden Ortungsgeräte der Fledermäuse aufmerksam geworden sind, unterlag es keinem Zweifel, daß auch die fischenden Fledermäuse ihre Nahrung mittels Ultraschall aufspüren. Aber gerade dieser Umstand verursachte viel Kopfzerbrechen. Physikern ist bereits seit langem bekannt, daß die Grenzfläche von Luft und Wasser die Schallwellen spiegelartig reflektiert. Von den Si-

gnalrufen der Fledermäuse gelangt dadurch nur ein tausendstel Teil unter die Wasseroberfläche, und um das gleiche wird auch der reflektierte Schall geschwächt, wenn er wieder an die Luft gelangt. Außerdem sind die leckeren Bissen, die Fische, vom akustischen Gesichtspunkt transparent. Dadurch werden die Ultraschallstrahlen nur von der Schwimmblase reflektiert, und dies auch nur äußerst schwach. Das Rufsignal der Fledermaus kann also noch so

kräftig sein, von der dabei verbrauchten Energie gelangt höchstens der millionste Teil ins Gehörorgan zurück. „Die fischenden Fledermäuse verfügen anscheinend über besonders sensible Ortungsorgane“ – mit dieser Feststellung wurde früher diese Tierfamilie von den Forschern charakterisiert.

Der amerikanische Biologe R. A. Suthers gab sich mit dieser unzureichenden Erklärung nicht zufrieden. Er beschloß, der Ursache auf den Grund zu gehen.



Das Wasser widerspiegelt das Bild der fischenden Fledermaus. Forscher nahmen lange Zeit an, daß der Ortungssinn der Fledermäuse besonders empfindlich sei, weil sie auch imstande sind, Fische unter dem Wasser auszumachen. Untersuchungen von R. A. Suthers haben jedoch gezeigt, daß die Ortung der Fledermaus nur dann erfolgreich ist, wenn durch die Bewegungen des Fisches Wellen auf der Wasseroberfläche entstehen.

Er ließ die Versuchstiere während der Experimente im Laboratorium über ein Wasserbassin fliegen und stellte dabei fest, wie die Ortungsorgane der fischenden Hasenschartenfledermäuse funktionieren. Den Messungen entsprechend erwies es sich, daß diese Fledermausart über keine vollkommeneren Fähigkeiten verfügt als die anderen Arten. Während der Beutesuche strahlten die Fledermäuse in einer Sekunde 10 bis 20 Erkundungsimpulse aus, deren Frequenz ungefähr bei 60 000 Hertz lag. Nachdem 0,1 Millimeter starke Drähte quer durch das Laboratorium gespannt wurden, flogen sie ziemlich unsicher durch das Netz.

Die Überraschung trat erst ein, als der Forscher die Tiere daran gewöhnte, auf in das Wasser gelegte Fischstücke zu jagen. Die Versuchstiere fanden den „Köder“ leicht, wenn die Stückchen mindestens 1 bis 2 Millimeter aus dem Wasser herausstanden. Als jedoch die Bissen einige Millimeter unter das Wasser getaucht wurden, konnten die Fledermäuse kein einziges Stück entdecken.

Suthers und seine Mitarbeiter kamen daraufhin auf die Idee, daß die Fledermäuse vielleicht die reflektierten Strahlen von der Schwimmblase der Fische besser wahrnehmen. Es wurden deshalb Fischstückchen an kleinen Luftballons befestigt und die Ballons 1 bis 2 Millimeter unter die Wasseroberfläche gesteckt. Die Versuchstiere blieben aber auch jetzt hungrig und kreisten hilflos über dem Wasserbehälter. Es gelang ihnen nicht, ein einziges Stückchen zu entdecken. Als jedoch die Luftballons einige Millimeter über dem Wasser schwebten, wurden die Fischstückchen sofort ergriffen.

Dadurch konnte also diese Frage ge-

klärt werden. Die fischefangenden Hasenschartenfledermäuse und offensichtlich auch die übrigen Arten dieser Familie „fegen“ mit ihrer Ortung nur an der Wasseroberfläche entlang. Als Suthers eine kleine Fontäne am Boden des Behälters sprudeln ließ und die Wasseroberfläche durch das aus dem Rohr austromende Wasser etwas aufgewirbelt wurde, stürzten sich die Fledermäuse sofort auf ihre Beutestücke. Für die Sensibilität ihrer Ortungsorgane war es charakteristisch, daß sie sich bedenkenlos auf die aus dem Wasser 1 Millimeter herausragenden und 0,2 Millimeter starken Drahtenden stürzten, an denen unter der Wasseroberfläche Fischstückchen angebracht waren. Ihr „Bildsehen“ ist derart ausgeprägt, daß sie selbst Stärkeunterschiede von 0,4 Millimetern unterscheiden können. Im Laufe einer Experimentierreihe haben die Fledermäuse schnell gelernt, daß an aus dem Wasser verstreut herausstehenden 0,9 Millimeter starken Drähten sich keine Nahrung befand, lediglich am unteren Ende der 1,3 Millimeter starken Drähte waren unter dem Wasser Fischstückchen befestigt. Sogar auch von den Forschern die 5 Millimeter hoch herausragenden Drahtenden anders angeordnet wurden, die Fledermäuse fanden stets die 1,3 Millimeter starken Drahtenden mit den Fischstücken.

Hatten die Fledermäuse mit ihren Ortungsorganen die unter Wasser befindlichen Fischstückchen bereits ausgemacht, war ihre Aufmerksamkeit derart darauf konzentriert, daß sie andere Artgenossen, die sich gleichfalls auf die Beute gestürzt hatten, erst im letzten Augenblick registrierten. Sie konnten einem Zusammenstoß kaum ausweichen, weil sie den warnenden Signalton einfach nicht wahrnahmen. Forscher

vermuten schon seit langem, daß Fledermäuse in dichtgefüllten Höhlen kaum auf ihre Ortungsorgane achten. Dabei füllt ein lautes „Piepsen“ den gesamten Raum der Höhle aus, und sie werden nicht nur durch die gegenseitigen Rufe gestört, sondern der von den rauhen Wänden widerhallende Schall breitet sich ebenfalls im gesamten Raum aus. Sollte es möglich sein, daß die Fledermäuse dabei auf die Signale ihrer Ortungsorgane nicht achten?

Ja! Es hat sich nämlich erwiesen, daß sie sich auf Grund ihrer Erinnerung orientieren. Sie kennen jede Ecke ihrer Wohnstätte in der Höhle bereits so gut, daß sie auf ihre Ortungssignale nicht mehr achten. D. R. Griffin bezeichnete dieses Verhalten als „Andrea-Doria-Phänomen“. Die großen Ozeanschiffe verkehren auf ihren gewohnten Wasserwegen derart sicher und unbesorgt mit Hilfe ihrer konventionellen Navigationsgeräte, so daß die Ortungsgeräte oft nicht beachtet werden. Niemand denkt daran, mit einem vom Kurs abgekommenen Schiff zusammenzustößen.

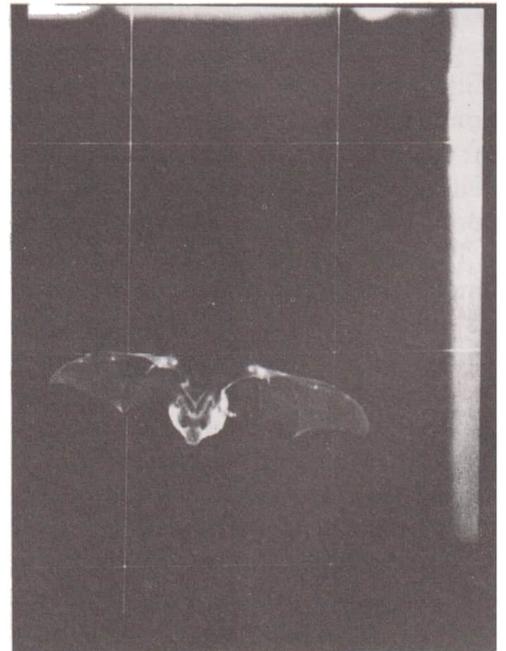
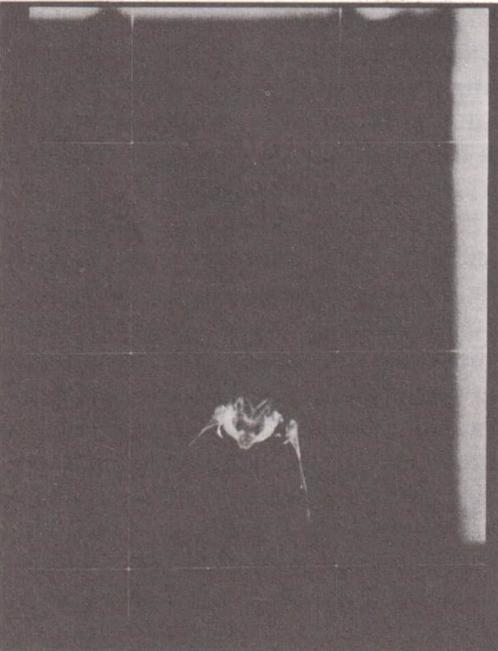
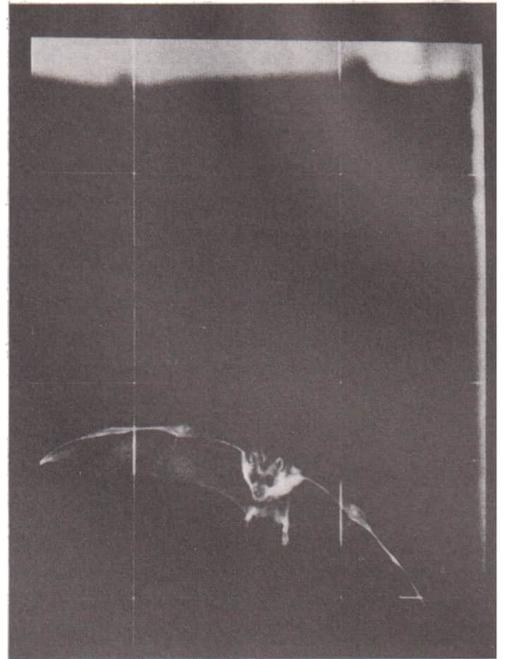
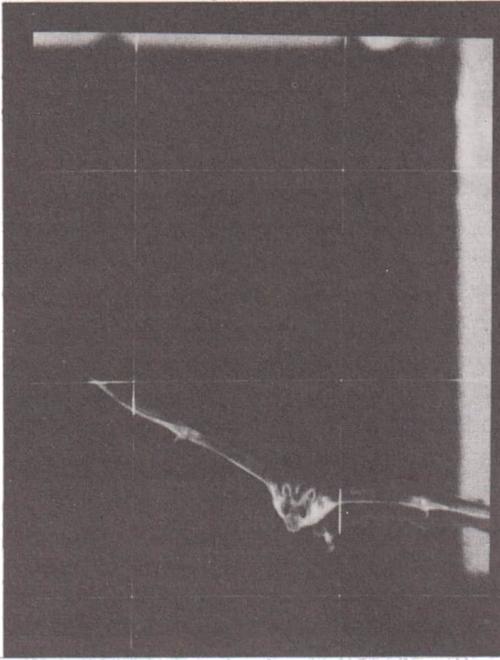
Fledermäuse fliegen demnach in der ihnen vertrauten Umgebung so herum, als durchwandere jemand mit geschlossenen Augen seine Wohnung, ohne dabei an die Möbel zu stoßen. Diese Vorstellung wurde im Laufe eines besonderen von A. D. Grinnel und seinen Mitarbeitern veranstalteten Hinderniswettbewerbs experimentell bestätigt. Klaffmaulfledermäuse flogen durch ein aus 70 Quadraten bestehendes Drahtnetz. Dabei schwebten die Versuchstiere nicht durcheinander und planlos durch die Öffnungen zur Futterstelle, sondern durch ein bestimmtes Viereck und durch ein anderes zurück. Selbst bei einem dreißigmaligen Hin- und Herfliegen am Tage benutzten sie stets die-

selben beiden Öffnungen. Demnach ist das räumliche Erinnerungsvermögen der Fledermäuse vorzüglich.

In einem anderen Experiment wurde ein 42 Zentimeter breites Fenster durch einen dünnen Draht in zwei Teile zu je 18 und 24 Zentimeter geteilt. Auf Grund ihres Ortungssinns wichen die Fledermäuse dem Draht genau aus und schwebten stets mit zusammengezogenen Flügeln durch die schmalen Fensteröffnungen. Danach wurde der Draht entfernt, und an Stelle des Drahtes wurden unsichtbare „Lichtfäden“ gezogen. Dabei handelte es sich im wesentlichen um Fotozellensensoren, die häufig an Türen moderner Bauten eingebaut werden. Tritt jemand vor die Tür, wird der Lichtstrahl unterbrochen, in den Fotozellen entsteht dadurch ein elektrisches Signal, wodurch der Öffnungsmechanismus der Tür in Bewegung gesetzt wird. Die Forscher wollten dadurch Informationen gewinnen, wie oft die Fledermäuse den Lichtstrahl bei ihrem Flug „unterbrechen“.

Hierauf folgte allerdings eine Überraschung. Der Draht war entfernt worden, damit die Fledermäuse nach eigenem Belieben durch das Fenster fliegen sollten. Sie schwebten jedoch weiterhin mit angelegten Flügeln durch das Fenster, ohne die Linie des Lichtstrahls zu unterbrechen. Sie verhielten sich genauso, als wäre der Draht noch vorhanden, obwohl ihr Ortungssinn ihnen sicherlich signalisierte, daß kein Hindernis mehr vorhanden war. Sie achteten aber nicht mehr auf den reflektierenden Schall, sondern flogen entsprechend ihrer früher gemachten Erfahrung!

Das ist sicherlich die Erklärung dafür, daß Fledermäuse an der Stelle eines gefälltten Baumes tagelang herumfliegen und auf der Suche nach Insekten sind.



Die im Dunkeln fliegende Fledermaus erlernt es schnell, durch welches Viereck sie am leichtesten zur Futterstelle in der gegenüberliegenden Hälfte des Raumes gelangen kann. In der hier gezeigten Aufnahmenserie gleitet sie gerade durch das dritte Viereck, durch das „Fenster“. Beim späteren Entfernen des Drahtnetzes fliegt sie nach wie vor durch ihr „Lieblingsviereck“, obwohl ihre Ortung signalisiert, daß kein Hindernis mehr vorhanden ist. Sie fliegt dabei nach der Erinnerung.

Sie nehmen es anscheinend nicht zur Kenntnis, daß der Baum nicht mehr vorhanden ist. Gelangt eine Fledermaus in eine ihr unbekanntere Umgebung, vermeidet sie möglichst das Fliegen. Sie orientiert sich zunächst vorsichtig aus einer ruhigen Ecke hängend durch Ultraschallsignale und erhebt sich erst später in die Luft. So kann sie danach ihre ganze Aufmerksamkeit auf die vor ihr schwebenden Insekten konzentrieren und sich in der nun bekannten Umgebung mit „geschlossenen Ohren“ orientieren.

Damit tauchen freilich neue Fragen auf. Wenn das Tier seinen Ortungssinn nicht nutzt, wie vermag es sich dann an den „unsichtbaren“ Raum zu erinnern? Selbst auf einer ebenen Fläche ist es nicht gerade leicht, sich mit geschlossenen Augen zu orientieren, viel weniger noch im Raum. Ist es möglich, daß das Tier dabei auf andere Widerhallsignale achtet? Wahrscheinlich kaum, denn auf Grund von Gehöruntersuchungen ist uns bekannt, daß die schwingungsempfindlichen Hörzellen der Fledermäuse auf Ultraschalltöne in einer Frequenz von 30 000 bis 70 000 Hertz am empfindlichsten reagieren, zumindest haben dies durchgeführte Messungen an Mausohrfledermäusen ergeben. Demnach haben alltägliche Töne, die von Menschen wahrgenommen werden, für sie keine besondere Bedeutung. Vielleicht orientieren sie sich nach dem Gleichgewichtsgefühl und der Anzahl ihrer Flügelschläge über ihre räumliche Lage? Diese Frage ist noch ziemlich ungeklärt, und eine endgültige Antwort können wir nur von künftigen Forschungen erwarten.

Das Luftabwehrsystem der Schmetterlinge

Die besondere Eignung der Fledermausartung kann nicht besser als durch die Versuche bewiesen werden, in deren Verlauf im Laboratorium von Griffin von einer 7 Gramm schweren Fledermaus während einer Stunde Mücken im Gesamtgewicht von 1 Gramm erbeutet wurden. Ein wirklich gutes Ergebnis, denn das Gewicht einer Mücke beträgt nicht mehr als 0,002 Gramm! Doch noch erstaunlicher war das Ergebnis einer kleinen Fledermaus, die innerhalb einer viertelstündigen Jagd zu ihrem Eigengewicht von 3,5 Gramm 10 Prozent „zunehmen“ konnte, wobei sie mindestens 175 Mücken erbeutete. Im Stockdunkeln, nur auf ihre Ortung angewiesen, erwischte sie im Durchschnitt alle 6 Sekunden ein Insekt.

Doch was tun unterdessen die „Verfolgten“? Warten sie in Ruhe ab, bis sie von der Fledermaus erwischt werden? Im Zweikampf zwischen Insekten und Fledermäusen wurden bisher von der Wissenschaft nur die Kampfmethoden der Fledermäuse erforscht, obwohl auch die Insekten mit einigen Überraschungen aufwarten können. Das kann man zumindest auf Grund der Untersuchungen der beiden amerikanischen Forscher A. E. Treat und K. D. Roeder annehmen, die sich mit dem besonderen „Luftabwehrsystem“ der Nachtinsekten beschäftigt haben.

Nachtschmetterlinge und andere Nachtinsekten haben ihre Ohren beziehungsweise jenes sensible Gehörorgan, welches die Schallschwingungen in elektrische Signale umwandelt, in der Nähe ihrer „Taille“, am Rumpf. Die Untersuchung dieser winzigen Gehörorgane bedeutete für die Forscher keine

einfache Aufgabe. Es mußten feine Silberelektroden in die Nervenfasern der Empfindungszellen gesteckt werden, um die schwachen Regungsströme abzuleiten. Die Signale waren dann an einem Bildschirmgerät abzulesen.

Die Forscher gingen davon aus, daß die Beutetiere der Fledermäuse die ausgestrahlten Ultraschallsignaltöne wahrnehmen. Dabei reizte man ihre Gehörorgane mit verschiedenen Ultraschallimpulsen, wobei die elektrischen „Antworten“ in der Tat ein aufschlußreiches Bild ergaben. Je stärker der Schall war, in um so schnellerer und dichter Folge wurden Alarmsignale vom Gehörorgan in das Gehirn des Insekts gesandt. Beim Überleiten dieser Signale in einen Lautsprecher wurden die Töne immer lauter.

Innerhalb einer neueren Versuchsreihe wurde festgestellt, daß das Gehörorgan der Nachtfalter Laute in einer Frequenz von 3000 bis 150 000 Hertz wahrzunehmen imstande ist. Demnach scheint ein Klavier für einen winzigen Nachtschmetterling ein dürftiges Instrument zu sein. Der Nachtschmetterling erkennt folglich den Ultraschall der Fledermaus sehr leicht, weil sie selbst gegenüber noch viel höheren Tönen sensibel ist.

Nach den Laboratoriumsversuchen begaben sich die Forscher, mit einem betäubten Schmetterling sowie elektronischen Instrumenten ausgerüstet, ins Freie. Sie suchten die Nähe einer alten, von Fledermäusen bewohnten Scheune auf und ließen sich in einer Entfernung von 180 Metern nieder. Der Schmetterling wurde so hingelegt, daß sein Gehörorgan zur Scheune hin ausgerichtet war. Außerdem wurde die Beobachtungsstelle in einem Umkreis von 6 Metern beleuchtet, um die heranfliegenden Fledermäuse beobachten zu können.



Der Nachtfalter nähert sich in vollem Prunk einer geöffneten Blume. Sein behaarter Körper und die behaarten Flügel absorbieren die Ultraschallsignale der Fledermaus wie Samtvorhänge, die ja auch Schreie und Lärm abhalten. Der sensible Gehörsinn des Insekts steht ebenfalls im Dienst der „Luftabwehr“: Der Falter nimmt selbst höchste Ultraschallfrequenzen wahr, die ihm das Herannahen der Fledermaus verkünden.

Nachdem alle Vorbereitungen getroffen waren, wartete man in aller Ruhe den weiteren Fortgang ab. Der die Gefahr erkennende Schmetterling verhielt sich jedoch keineswegs lange ruhig. Die Forscher merkten noch gar nichts, doch der Schmetterling kündigte bereits das Nahen der Fledermäuse an. Den Messungen zufolge nahm der Schmetterling die Ortungssignale der Fledermäuse bereits aus einer Entfernung von 30 bis 36 Metern wahr.

Danach folgte der interessanteste Teil des Experiments. Die elektrischen

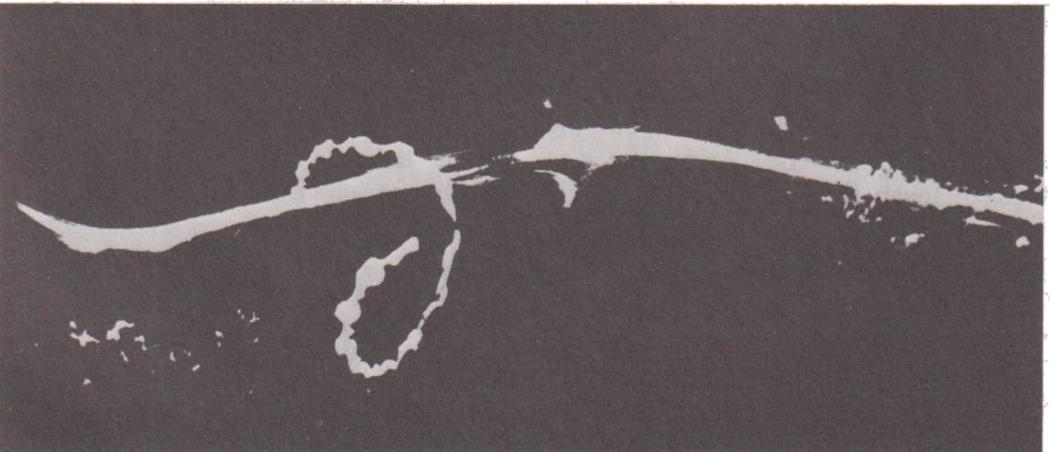
Signale der auffliegenden Fledermäuse wurden nämlich zugleich aus beiden Gehörorganen des Insekts abgeleitet und die Impulse auf Stereotonbändern aufgenommen. Dabei stellte es sich heraus, daß das Insekt das Herannahen der Fledermaus dreidimensional wahr-

nimmt. Je nachdem, von welcher Seite stärkerer Ultraschall in das Gehörorgan gelangt, reagieren von dort auch die Empfindungszellen mit schnelleren elektrischen Signalen.

Vergegenwärtigen wir uns, welches besondere Gefühl es ist, mit einem Stereo-



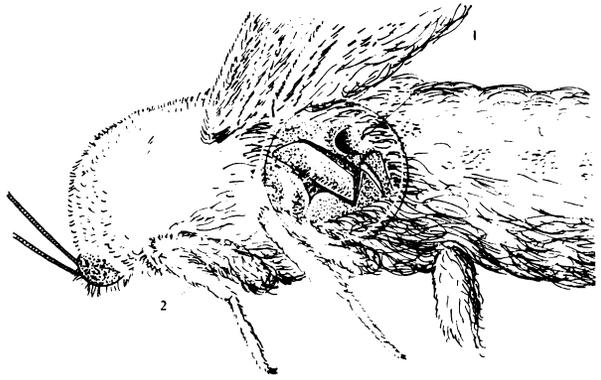
Noch einmal gelang die Flucht vor der von links herannahenden Fledermaus, die auf dem Negativ infolge des Scheins auf dem beleuchteten Gelände einen dicken Streifen hinterließ. Der hakenförmige Flugweg des Nachtinsekts steigt im letzten Augenblick hoch, so daß das Insekt seinem Verfolger entkommen konnte.



Dramatischer Augenblick im Dunkeln. Die Signalarufe der Fledermaus wahrnehmend, fliegt der vom Schrecken gepackte Nachtfalter in Schleifen mal nach oben und mal zurück. Doch die Ortung der Fledermaus funktioniert genau und zuverlässig. Die beiden Spurlinien treffen sich, und das Insekt verschwindet . . .

kopfhörer die Antworten der Hörnerven mitzuhören, als säße der Mensch inmitten des Nervensystems des entsetzten Insekts und beobachtete selbst das Herannahen der Fledermaus. Dabei ist genau zu hören, wie der unheimliche Jäger von einer Seite auf die andere fliegt, um sich dann frontal fliegend zu nähern! Diese besondere Sinestäuschung rührt daher, daß die Frequenz der Nervenimpulse um so höher ist, je lauter die Signalrufe der Fledermaus sind. Dadurch stellt sich der Mensch unwillkürlich auch die Entfernung der Schallquelle vor. Nähert sich die Fledermaus, werden die elektrischen Signale der Empfindungsnerven durch die Verstärkung des Ultraschalls immer schneller. Die Schwingungsfrequenz des Ultraschallsignals schnellte hoch wie ein Schrei.

Von den beiden Forschern wurde ferner untersucht, wie sich Nachtfalter im Freien verhalten, wenn sie Ultraschallrufe der Fledermäuse wahrnehmen. Dazu montierte man an der Spitze eines langen Rohres einen Ultraschallstrahler, der immer dann eingeschaltet wurde, wenn sich ein Nachtfalter dem mit einer Lampe beleuchteten Rohr näherte. Auf Grund von Lichtbildaufnahmen konnte festgestellt werden, daß die Insekten auf zweierlei Arten vor den Fledermäusen fliehen. Nehmen sie die furchterregenden Signale aus einer angemessenen Entfernung wahr, verändern sie plötzlich ihre Flugrichtung und versuchen möglichst schnell, den gefährlichen Luftraum zu verlassen. Kommen die Signale aus unmittelbarer Nähe und haben die Insekten keine Zeit zum Umkehren oder zur Veränderung der Flugrichtung, schließen sie ihre Flügel und lassen sich im Sturzflug in das Gras fallen.



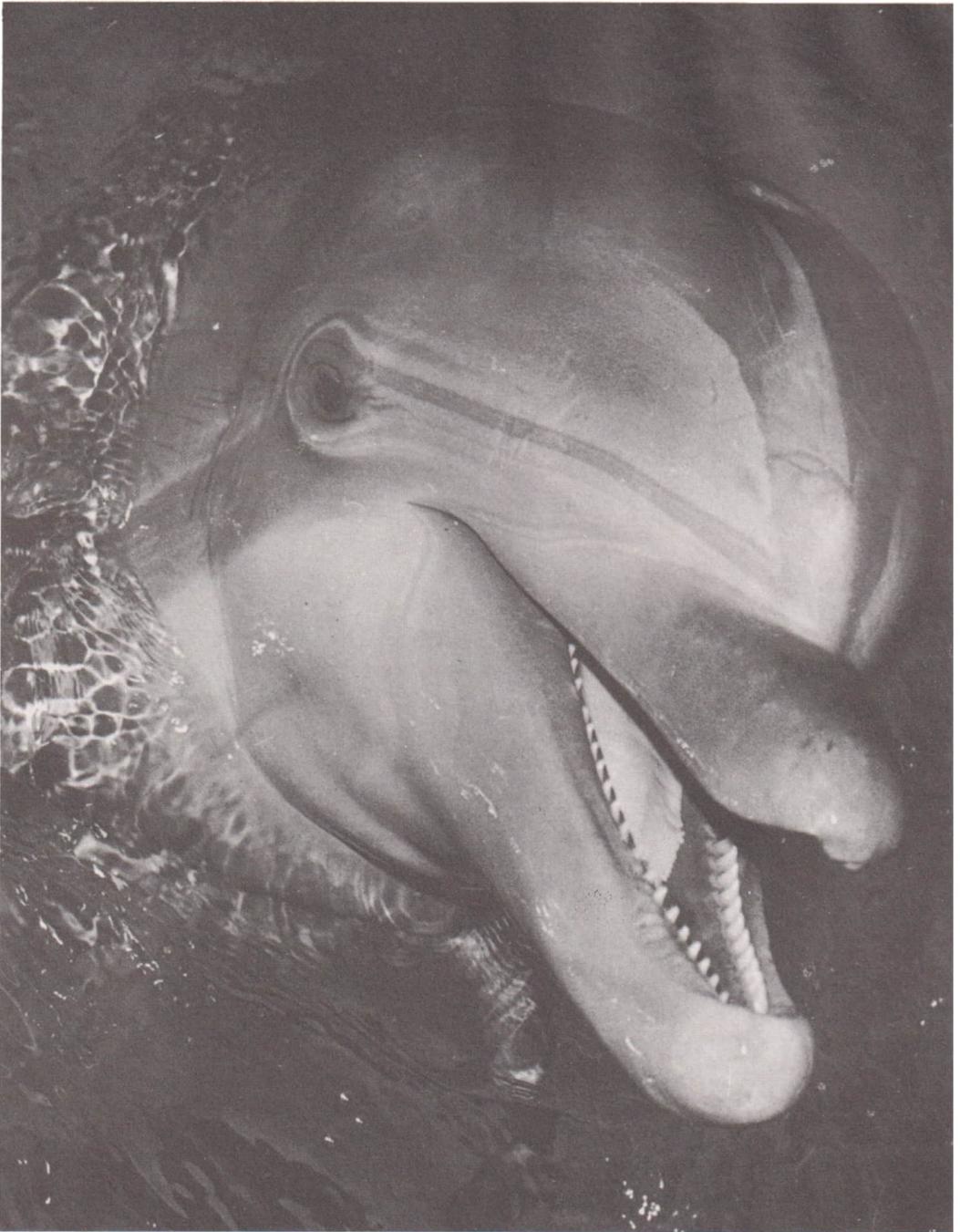
Bärenspinner erschrecken nicht so leicht vor den Rufsignalen der jagenden Fledermaus. Wie die im zweiten Weltkrieg von den Flugzeugen abgeworfenen Stanniolstreifen die Radargeräte wirkungslos machten, genau so absorbiert der dicke Pelz dieser Insekten die Ultraschallsignale der Fledermäuse fast vollständig. Wird die Situation trotzdem gefährlich, geben sie mit lautem Geknatter Abschreckungssignale von sich. 1 – Gehörverletzung; 2 – schallbildendes Organ.

David Blest und David Pye, die beiden englischen Forscher, haben an zahlreichen Vertretern der dicht behaarten Familie der Bärenspinner „Gegenortungseinrichtungen“ entdeckt. Diese Nachtinsekten geben sich anscheinend damit nicht zufrieden, daß ihr dicker Pelz die Ultraschallstrahlen der Fledermäuse beinahe ganz auflöst und dadurch nur schwache Signale reflektiert werden. Einzelne Arten ziehen sogar ihr drittes Paar Beine schnell auseinander und zusammen und geben mit diesen kammartigen Organen knatternde Laute in einer Frequenz von 1000 Hertz ab. In diesen Tönen sind auch Ultraschalltöne mit hohen Frequenzen enthalten. Wozu ist dieses sonderbare Knattern gut?

Die englische Forscherin Dorothy C. Dunning untersuchte die Wirkung

dieser Signale an zahmen Fledermäusen. Sie nahm die Stimme eines Bärenspinners auf Tonband auf und schaltete das Gerät stets dann ein, wenn die Fledermaus sich anschickte, einen befestigten Mehlkäfer im Flug zu ergreifen.

Die Rufe des Bärenspinners veranlaßten die Fledermaus in den meisten Fällen zum plötzlichen Richtungswechsel. Das „Knattern“ des Insekts gilt demnach als irgendein „höherer Befehl“, dem sich anscheinend die Fledermaus unterwirft.



Das lustige Volk der Delphine bedient sich derart vollkommener Ortungsorgane, daß sie selbst in unseren Tagen mit großem Interesse von Forschern studiert und bewundert werden. Ihre Ultraschallrufe unter Wasser sind für das menschliche Ohr nicht wahrnehmbar. Selbst heute ist es noch rätselhaft, weshalb die vierbeinigen Vorfahren der Delphine im Laufe ihrer Stammesgeschichte vor ungefähr 50 Millionen Jahren wieder in das Wasser zurückgekehrt sind.

Rufe unter Wasser

Nachdem Arion, der griechische Lautensänger und Dichter, mit seinen herrlichen Gesängen ganz Italien begeistert hatte, bestieg er, vollbeladen mit kostbaren Geschenken, ein Schiff nach Korinth, in Richtung seiner Heimat. Die Besatzung des Schiffes kümmerte sich nicht viel um den verträumten Dichter auf Deck, aber um so mehr fielen ihr seine Schätze auf. Die Seeleute berieten und beschlossen: Arion sollte für immer zum Schweigen gebracht werden, dann wollten sie mit der Beute wegsegeln. Als der Dichter dies erfuhr, bot er ihnen sein gesamtes Vermögen an, damit sie ihn am Leben ließen. Doch die Schurken wollten den für sie gefährlichen Augenzeugen beseitigen. Sie waren deshalb nur zu folgendem Zugeständnis bereit: Er sollte sich entweder freiwillig ins Meer stürzen, oder sie schlugen ihn tot und würden seinen Leichnam vergraben.

Arion entschied sich für das Meer. Er nahm vorher noch seine Laute zur Hand und verabschiedete sich mit den schönsten Gesängen von seinem irdischen Leben. Dann stürzte er sich schicksalsergeben ins Meer. Doch Wunder über Wunder, er ging nicht unter. Eine spielende Delphingruppe, die wahrscheinlich von seinem schönen Gesang angelockt worden war, umringte ihn. Die Tiere nahmen Arion auf ihren Rücken und trugen ihn zur Küste von Tainaron. Zum Andenken an diese wundervolle Rettung ließ der tiefbe-

wegte Dichter bald darauf ein Delphindenkmal aus Bronze in dem Heiligtum des dem Ufer nahe gelegenen Tempels errichten.

Die Begebenheit um die wundersame Rettung des griechischen Dichters Arion wurde von Herodot, dem Vater der griechischen Geschichtsschreibung, aufgezeichnet. Seitdem wird dieses Thema von vielen Schriftstellern, Poeten, Malern und Bildhauern bearbeitet, obwohl es niemand für wahr hielt. Im Licht der Forschung der letzten Jahrzehnte wird diese Geschichte aber doch immer mehr für möglich gehalten. Delphine helfen tatsächlich mit vereinten Kräften ihren verletzten Artgenossen, damit sie sich an der Wasseroberfläche halten können. Mit gleichem Eifer bemühen sie sich instinktmäßig auch um die Rettung ertrinkender Menschen. Darüber gibt es viele interessante Beispiele.

Für den Delphin ist es durchaus nicht schwierig, einen im Wasser untergegangenen Menschen zu finden, zumal er über ein Patent verfügt, das erst in den letzten Jahrzehnten in der Schifffahrt nachgenutzt wird: die Ultraschallortung! Delphine orientieren sich und jagen mit den gleichen für das menschliche Ohr nicht wahrnehmbaren Rufen wie Fledermäuse. Sie müssen allerdings noch aufmerksamer sein, denn ihre abgegebenen Ultraschallsignale kehren fünfmal schneller zurück als die der Fledermäuse.

Entsprechenden Untersuchungen zufolge gebrauchen Delphine mühelos ihre Ortung, und sie kommen keineswegs in Bedrängnis, wenn sie im trüben Wasser fischen müssen. Selbst im schlammigen und morastigen Wasser finden sie ihre aus kleineren Fischen bestehende Hauptnahrung. Ihr 1700 Gramm schweres Gehirn, das sogar schwerer als das menschliche Gehirn ist, verarbeitet die Signale der Ultraschallortung wie eine hochleistungsfähige elektronische Minirechenanlage. Die außerordentliche Intelligenz der Delphine ist auf die komplizierten Windungen der Großhirnrinde zurückzuführen.

Nach der turchtbaren Schiffskatastrophe der „Titanic“ im Jahr 1912 empfahl der englische Ingenieur Hiram Maxim (Erfinder des Maxim-Maschinengewehrs), Schiffe mit Ortungsgeräten zu versehen, die mit Hilfe des reflektierten Schalls Hindernisse unter Wasser signalisieren. Die Idee war einleuchtend, denn je schneller die ausgestrahlten Schallwellen zurückkehren, um so näher ist offensichtlich der Meeresboden oder der Eisberg. Maxim irrte sich lediglich darin, daß er insgesamt einen Infraschall von nur 15 Hertz zur Ortung empfahl. Solche niedrigen Frequenzen werden nämlich nur von Objekten reflektiert, deren Ausmaß größer als 150 Meter ist, ihr „Auflösungsvermögen“ ist viel zu gering, beziehungsweise sie sind nicht imstande, kleinere Objekte zu unterscheiden. Die Delphine sind in den vergangenen Jahrtausenden notwendigerweise auf die richtige Lösung gestoßen. Ihnen steht eine Ortung zur Verfügung, deren Ultraschallsignale Frequenzen bis zu 256 000 Hertz erreichen.

Der Delphin geht auf Jagd

Mit dem Erkundungssystem der Delphine unter Wasser haben sich als erste die beiden amerikanischen Forscher W. Shevill und B. Lawrence eingehender beschäftigt. Sie wühlten den Untergrund eines kleinen Sees auf, damit ein gezähmter Delphin nichts sehen und sich nicht orientieren konnte. Danach ließen sie von ihrem Kahn Fischstücke ins Wasser hängen. Das Versuchstier fand die begehrte Nahrung ohne Schwierigkeiten. Nachher spannten die Forscher ein 2,4 Meter breites und langes Netz senkrecht an die Seite des Kahnes und steckten ein Fischstück mal an der Spitze, mal an dem Ende des Kahns ins Wasser, mal vor das Netz, mal hinter das Netz.

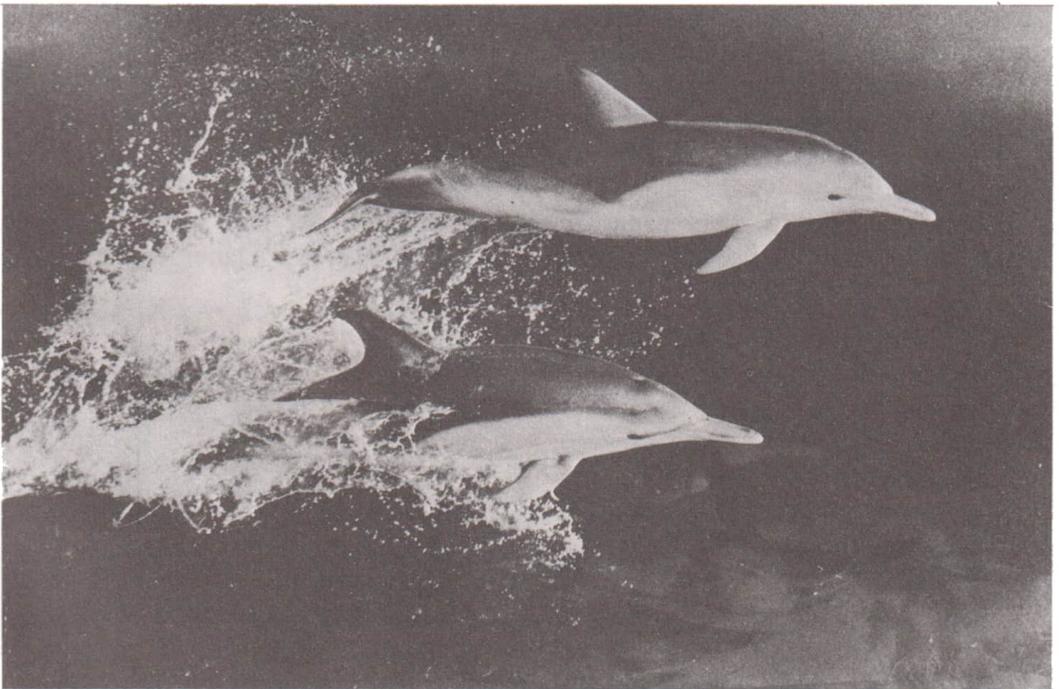
Der Delphin irrte sich auch jetzt nicht, obwohl er aus einer Entfernung von 2,4 Metern entscheiden mußte, an welcher Seite des Netzes er zur Nahrung schwimmen mußte. Die später durchgeführten Experimente ergaben, daß Delphine 10 bis 15 Zentimeter lange Fische bereits aus einer Entfernung von 10 Metern erkennen und daß sie außerdem beim Spiel im Versuchsbassin mit Leichtigkeit zwischen 2 Zentimeter starken Stangen hindurchschwimmen. Ein von Kenneth Norris durchgeführtes Experiment bewies das feine Unterscheidungsvermögen der Delphine. Wenn sie zwischen einem 4 Zentimeter langen, mit Steinchen gefüllten Kunststoffrohr und einem 4 Zentimeter langen Fisch zu wählen hatten, entschieden sie sich niemals für das Rohr, sondern sie schnappten stets nach dem Fisch.

Selbst die weltberühmte peruanische Sängerin Yma Sumac hätte die Delphine um ihre Stimme beneiden können,

obwohl sie angeblich über einen Stimmumfang von drei Oktaven verfügte. Der „Gesang“ der sympathischen Wassertiere – die Frequenz der verbreiteten Töne – steigt vom tiefsten Baß der menschlichen Stimme bis hoch in den Bereich der nicht wahrnehmbaren Töne. Innerhalb dieser weiten Skala werden drei Stimmgruppen unterschieden. Die „Pfeife“ bewegen sich in einer Frequenz von 4000 bis 20 000 Hertz. Die Frequenz der „Knalltöne“ kann sogar bis zu 170 000 Hertz ansteigen, so daß diese für uns nicht mehr feststellbar sind. Mit großer Wahrscheinlichkeit handelt es sich bei diesen kurzen Impulsen um Schallwellen zur Erkundung. In den „schnatternden“ Signalen der drit-

ten Gruppe verschmelzen komplizierte und variable Frequenzen sowie Lautstärken ineinander, so daß daraus je nach Belieben ein Krächzen, Miauen, Bellen, Winseln, Seufzen oder Stöhnen entstehen kann. Mit diesen Tönen „unterhalten“ sich die Delphine vermutlich untereinander.

Die Dauer der Rufe beträgt im allgemeinen 0,1 bis 1 Tausendstelsekunde. Der kalifornische Biologe J. J. Dreher wollte sich ein genaues Bild über die Impulse der Delphinstimmen verschaffen. Er nahm deshalb die Ortungstöne verschiedener Delphinarten auf Tonband auf. Dabei stellte es sich heraus, daß sich der Gemeine Delphin mit Lauten von 0,25 bis 0,5 Tausendstelsekunden



Im Bereich der Ultraschallortung könnte die Leistungsfähigkeit des Delphingehirns nur von einer kleiderschrankgroßen elektronischen Rechenanlage erreicht werden. Selbst heute sind uns alle Einzelheiten über den komplizierten lebenden Mechanismus der Delphinortung noch nicht bekannt. Soviel ist jedoch sicher, daß der jagende Delphin beim Herannahen an den verfolgten Fisch seine vom Menschen nicht wahrnehmbaren Ortungspfeife wie die Fledermaus beschleunigt.

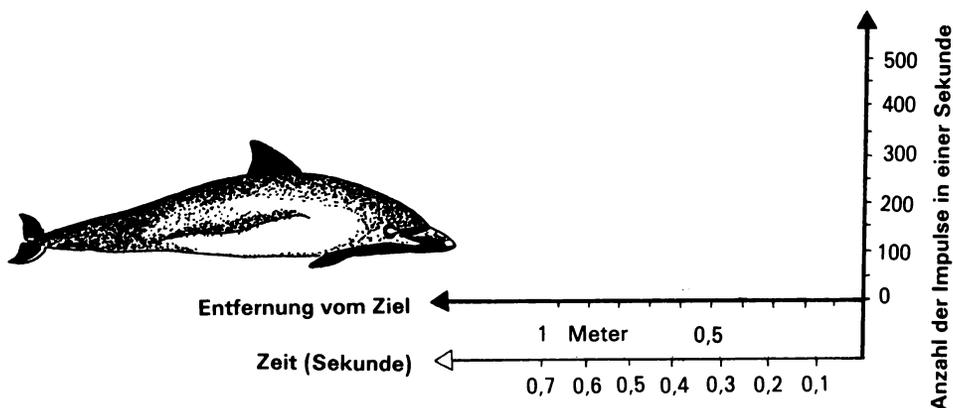
orientiert, was einer derart kurzen Zeit entspricht, daß auf einem 9,5 Zentimeter je Sekunde laufenden Tonband das entsprechende Stückchen nur 23,75 bis 47,5 Tausendstelmillimeter lang ist. Von den zwei Arten von Ortungssignalen des Grindwals beträgt die Dauer des längeren 9,6 bis 17,5 Tausendstelsekunden. Messungen ergaben, daß sich die bekannten Tümmler mit Lauten orientieren, die etwa 0,7 Tausendstelsekunden lang sind.

Untersuchungen der beiden sowjetischen Forscher W. M. Belkowitzsch und J. I. Nesterenko zufolge hängt die Lautstärke der Delphinrufe im allgemeinen davon ab, wie hoch der Ton ihrer Rufe ist. Ihre stärksten Ortungssignale bewegen sich im Bereich der Frequenzen von 20 000 bis 60 000 Hertz, und obwohl diese Töne für uns nicht wahrnehmbar sind, entfesseln sie im Wasser derart starke Stöße, als würde die Stille einer Straße durch das Knattern eines Motorrads unterbrochen.

Belkowitzsch stellte gemeinsam mit einem anderen sowjetischen Forscher

fest, in welcher Zeitfolge mit einem Unterwassermikrofon ausgestattete Tümmler in einem Laboratoriumsbassin ihre Ultraschallsignale ausstrahlen. Die Experimente zeigten, daß der untätig herumstreifende Delphin im allgemeinen 10 bis 50 Signale in der Sekunde aussendet. Das ist offenbar die „Ruhepause“. Als er sich aber ungefähr 40 Zentimeter dem an einer Schnur hängenden Köderfisch genähert hatte, begann sich die Anzahl der Impulse blitzschnell zu erhöhen. Obgleich den Delphin im Verlauf des dramatischen Ablaufs eine Strecke von nur 0,25 Sekunden von der Beute trennte, was auf Grund der Aufnahmen der Schnellfilmkamera ermittelt werden konnte, stieg die Anzahl der Impulse plötzlich von 50 auf 200 an. In einzelnen Fällen erreichte sie sogar 500 in der Sekunde, fiel dann aber einige Zentimeter vor dem Ziel auf 250 zurück.

Eine verblüffende Ähnlichkeit! Die Ortung der Delphine funktioniert nämlich im Laufe der Jagd genauso wie die der Fledermäuse. Dabei ergeben sich



Der Kraftfahrer eines auf dunkler Landstraße fahrenden Kraftwagens schaltet um so öfter das Fernlicht ein, je schlechter und gefährvoller die Straße wird. Der Delphin verwendet seine Ortung in ähnlicher Weise. Je näher er an die verfolgte Beute kommt, um so dichter ist die Folge der angestrahnten Ultraschallsignale.

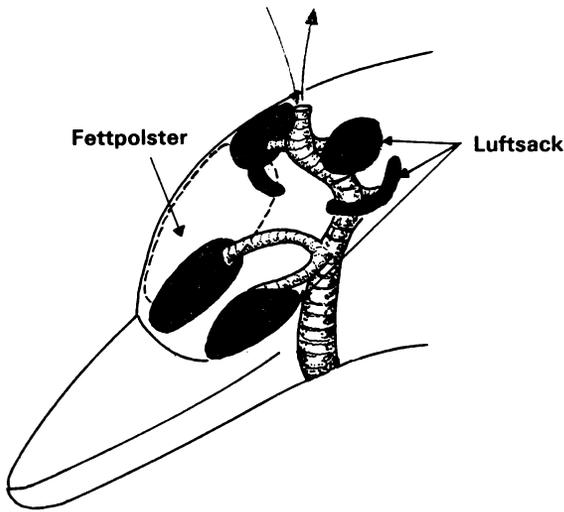
aber auch Widersprüche. Experimente an Fledermäusen zeigten, daß die fliegenden Säugetiere wahrscheinlich ihre Aufmerksamkeit auf ein fliegendes Insekt richten, wenn sie die Anzahl ihrer Rufe in der Sekunde plötzlich zu steigern beginnen. Sollte sich dies im Fall der Delphine ebenso verhalten, würde dies bedeuten, daß die schwimmenden Säugetiere die schwimmenden Fische erst in einer Entfernung von 40 Zentimetern vor ihrer Nase erkennen. A. E. Resnikow und W. M. Belkowsch halten deshalb eine solche Deutung für die Beschleunigung der Rufe für unrealistisch, zumal andere Experimente bestätigten, daß Delphine ihre Beute aus einer viel größeren Entfernung wahrnehmen.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß der Delphin bereits während der Suchphase Kenntnis von seiner Beute nimmt und mit der Verfolgung erst aus unmittelbarer Nähe beginnt, wenn er seinen „Ultraschallreflektor“ mit voller Energie ausrichten kann. Vielleicht beginnt er die Aufmerksamkeit erst mit der Beschleunigung seiner Rufe auf den vor ihm herumschwimmenden Fisch zu konzentrieren, um jede Bewegung des Fisches genau zu verfolgen. Zweifels ohne wurde bisher die Ortungsstruktur der Delphine von den Forschern nicht so lange untersucht wie die der Fledermäuse. Für den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der Rufe und der Dauer der Impulse stehen deshalb keine eingehenden und genauen Daten zur Verfügung. Über die Gesetzmäßigkeit von Ultraschallsignalen jagender Delphine wird uns erst die Forschung der kommenden Jahre endgültig Klarheit verschaffen.

Der „Schallreflektor“

Es galt lange Zeit als ein Rätsel, wie der Delphin Töne ausstoßen kann, obwohl er doch über keine Stimmbänder verfügt. Anfang der sechziger Jahre unseres Jahrhunderts war den Forschern lediglich so viel bekannt, daß die Töne irgendwo im Kopf des Delphins entstehen und sich im wesentlichen waagrecht ausbreiten. Später nahm man an, daß die Laute in der Nase erzeugt werden. Der sowjetische Forscher A. G. Tomilin berichtet, daß das Wasser in der Umgebung von Delphinen, die aus dem Wasser gefischt wurden, geradezu schäume. Die Luftblasen seien aus den Nasenöffnungen der sich im Netz befindlichen winselnden und krächzenden Tiere herausgetreten.

Eingehende, von Biologen durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, daß sich die Nase der Delphine ziemlich hoch, nahe der Stirn, befindet. Der Nasengang führt vom oberen Gaumen zu der an der Stirn befindlichen Öffnung. Im Nasengangsystem befinden sich drei Verzweigungen, an denen drei Paar symmetrisch gelagerte Luftsäcke angeschlossen sind. Der Nasengang zum Einatmen und Auspusten der Luft und die Luftsäcke sind von einem komplizierten Netzsystem feiner Muskeln umgeben. Bei jedem Ausatmen muß der Delphin mit den entsprechenden Schließmuskeln zunächst das Wasser aus dem Nasengang herausdrücken, und die in den Luftsäcken gespeicherte Luft aus dem einen Sack in den anderen blasen, bis schließlich die gesamte verbrauchte Luft durch die Nase entweicht. Unterdessen beginnt die Luft in den kleinen Luftsäcken zu vibrieren, so daß dadurch Töne in unterschiedlichsten Frequenzen entstehen.



Im Kopf des Delphins sind drei Paar Luftsäcke an den Nasengang angeschlossen. Das Volumen jedes einzelnen Luftsacks ist durch eine selbsttätige Muskulatur veränderbar, wodurch gleichzeitig verschiedene Schallschwingungen in der akustischen Linse, hinter der beulenförmigen Stirn im Fettpolster, entstehen.

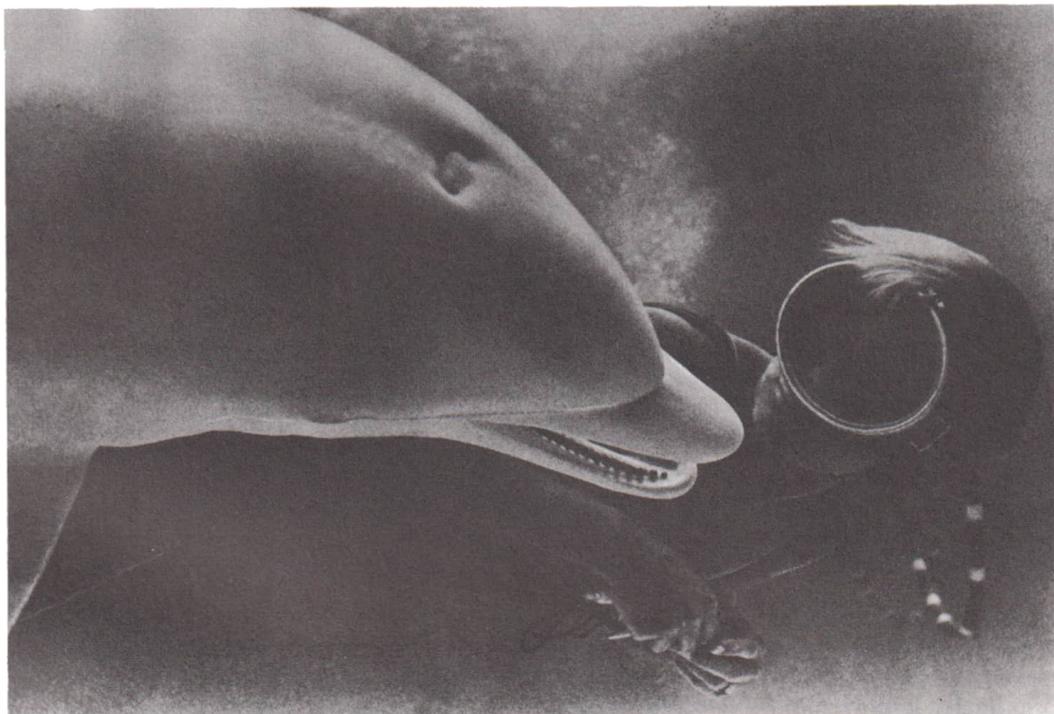
Mit dieser komplizierten „Orchester-ausrüstung“ kann der Delphin gleichzeitig auf mehreren Instrumenten spielen. Während er aus dem einen Luftsack vernehmbare Töne, Pfiffe, von sich gibt, kann er aus dem anderen ganz anders geartete krachende Ultraschalltöne ausstoßen. Die Frequenzhöhe der Töne wird in den einzelnen Luftsäcken durch Zusammenziehen der ringförmigen Muskeln bestimmt. Je kleiner das Volumen der Luftsäcke, um so höher die Tonfrequenz, so wie auch die Posaune in desto höherem Ton erschallt, je weiter die U-förmigen Luftrohre zusammengeschieben werden. Auf diese Weise kann der Delphin nach Belieben Töne in verschiedenen Frequenzen und Stärken, vom Seufzen bis zum Schreien, abgeben.

Untersuchungen von Belkowitzsch

und Resnikow zufolge entstehen die Ultraschalltöne gewöhnlich in dem mittleren Luftsackpaar. Diese beiden hornförmigen Luftsäcke umschließen den Nasengang ringförmig. Ihr Innendurchmesser ist ungefähr 3 bis 5 Millimeter groß, wobei die Schließmuskeln vollkommen unabhängig voneinander tätig sind. Es ist aber auch ohne weiteres vorstellbar, daß der Ton nicht in den Luftsäcken entsteht, sondern die Luftsäcke lediglich als Resonanzkörper dienen, die die sich im Nasengang bildenden Schwingungen verstärken. Durch die Muskeln des Nasengangs könnte möglicherweise die Luft in verschiedenen Abschnitten der Nasengangröhre in Schwingungen gebracht werden und es dadurch ermöglichen, daß die Schallquelle im Nasengang je nach Belieben hin- und herwandert.

Soviel ist auf alle Fälle sicher: Die Töne entstehen im Kopf des Delphins vor der stark gewölbten Stirnpartie des Schädels (die durch das Stirnbein und den Kiefer gebildet wird), hinter dem hervorschwellenden fleischigen Fettpolster. Es bleibt nur noch die Frage offen, wie die Ruftöne aus dem Kopf des Delphins nach außen dringen. Zunächst, als man noch vermutete, daß sich Delphine mit Hilfe von Ultraschallsignalen orientieren, verdeckte man die Augen der Tiere mit weichen Kunststoffklappen, so daß das Sehen in der Orientierung vollkommen ausgeschaltet wurde. Die Versuchstiere schwammen trotzdem genauso sicher und gelassen durch die senkrecht aufgestellten Stangen im Bassin und verschlangen der Reihe nach die an Schnüren hängenden Fischstücke, als könnten sie einwandfrei sehen.

Als ihnen jedoch schalldichte „Sturzhelme“ über den Kopf gezogen wurden, die aber ihr Sehvermögen nicht beein-



Ein Sporttaucher macht unter Wasser die Bekanntschaft eines Tümmlers. Am Scheitel ist die Nasenöffnung des Delphins gut zu sehen. Ein einmaliges Aus- und Einatmen geht außerordentlich schnell vor sich, es dauert insgesamt 0,3 bis 0,7 Sekunden. Beim Schwimmen in der Nähe der Wasseroberfläche atmet der Delphin drei- bis achtmal in der Minute. Er kann aber auch eine Pause von 20 Minuten einlegen. Indem er die Luft von einem Luftsack in den anderen drückt, entstehen vermutlich die Schwingungen für die notwendige Ultraschallortung.

trächtigten, wurden die friedlichen Tiere plötzlich wild. Sie schlugen wütend um sich und mühten sich so lange ab, bis sie sich von den unbequemen Hauben befreit hatten. Dies bestärkte die Annahme der Forscher, daß die zur Orientierung notwendigen Ultraschallsignale durch die Stirn der Delphine ins Wasser gelangen. Die Bioniker gingen zunächst davon aus, daß der gewölbten Stirnpartie des Schädels eine ausschlaggebende Rolle bei der Ausstrahlung der Erkundungssignale zukomme, da vermutlich mit dieser Partie die Schwingungen des Schalls wie aus dem Brennpunkt eines Parabolspiegels ausgestrahlt werden. Ein optischer Parabol-

spiegel strahlt nämlich ein parallellaufendes Lichtbündel aus, wenn eine brennende Kerze in den Brennpunkt des Spiegels gestellt wird. Spätere Untersuchungen haben allerdings diese Annahme widerlegt, da es sich herausstellte, daß diese Knochen des Delphins in Anbetracht akustischer Gesichtspunkte viel „transparenter“ sind, als ursprünglich angenommen wurde. Messungen ergaben, daß die Schädelknochen der Delphine nur 35 Prozent der auf sie auftreffenden Schallenergie reflektieren. Der Wirkungsgrad des „Reflektors“ ist demnach für den Delphin keineswegs als gut zu bezeichnen.

Dagegen ist die Höckerwulst am



Die Veranlagung des Delphins wurde im Unterwasserlaboratorium Sealab 2 bereits in den Dienst des Menschen gestellt. Tuffy, der 2 Meter lange und 122 Kilogramm schwere Tümmler verrichtet „Kurierdienst“. Von dem sich in 62 Meter Tiefe befindlichen Unterwasserlaboratorium Sealab 2 schwamm der Delphin in 45 Sekunden zu dem an der Wasseroberfläche verankerten Begleitschiff. In einem anderen Experiment – auf unserem Bild mit einem Hydrophon ausgestattet – wurde sein Pfeifen mit Hilfe eines Unterwassermikrofons aufgenommen.

Scheitel des Delphins ein besonders vorzügliches akustisches Instrument. Dieses Fettpolster ist auch beim Schwimmen von Nutzen, weil es den Wellenwiderstand des Wassers mindert. Für die Ultraschallerkundung scheint es aber noch bedeutsamer zu sein. Im Grunde genommen faßt eine akustische Linse die aus den Schallquellen hervorbrechenden Töne so zusammen wie die optische Linse das Licht und strahlt sie in einem schmalen Bündel überwiegend in waagerechter Richtung nach vorn aus. Der sowjetische Forscher J. W. Romanenko führte mit dem Kopf eines verendeten Delphins ein interessantes Experiment durch. Er stellte den auf einem Gestell montierten Kopf des Delphins 1 Meter unter die Wasseroberfläche des Versuchsbassins und führte durch die Nasenöffnung eine Ultraschalleitung

von 1,6 Zentimeter Durchmesser in den Nasengang. Ferner wurde in einer Entfernung von 1,5 Metern von der Schallquelle ein Kugelmikrofon mit einem Durchmesser von drei Zentimetern angebracht.

Im Laufe des Experiments wurden in immer höher ansteigenden Frequenzen Töne von 10 000 bis 170 000 Hertz durch den Kopf des Delphins ausgestrahlt. Das Ergebnis war verblüffend! Je höher die Töne, um so dichter und enger wurde das Strahlenbündel. Bemerkenswert dabei ist, daß auch Fledermäuse imstande sind, den Ultraschallstrahl ihrer Ortung in immer engere Bündel zu fassen, sobald sie einen „scharferen Blick“ auf das reflektierende Objekt werfen. Die akustische Linse des Delphins vollzieht diesen Vorgang selbsttätig. Will der Fischjäger die

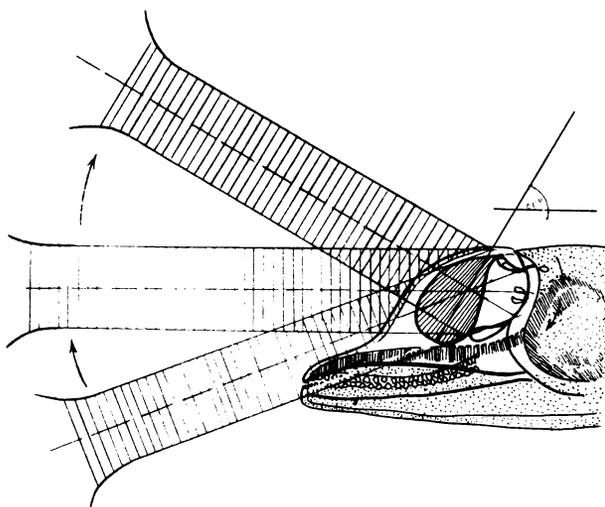
Energie seiner Strahlen auf eine kleinere Fläche konzentrieren, muß er mit einer höheren Stimme „singen“.

Vom physikalischen Standpunkt aus funktioniert die „Schalllinse“ recht einfach: Sie verringert vom Rand zur Mitte hin stets die Geschwindigkeit des durchdringenden Schalls. Beim Anschlagen einer Glocke hinter einer derartigen Schalllinse im Wasser wird sich der Glockenton nicht zerstreuen, sondern in Richtung der Linsenachse am lautesten zu hören sein. Die auseinanderstrebenden Schallwellen erreichen nämlich den Rand der Linse später als die Mitte. Da die Mitte dichter ist, tritt hier aber schneller eine Verzögerung als am Rand ein, folglich „warten“ die in Richtung der Linsenachse ankommenden Wellen auf die vom Rand eintreffenden, und die Wellen können jetzt in einem einzigen Bündel weiterstrahlen.

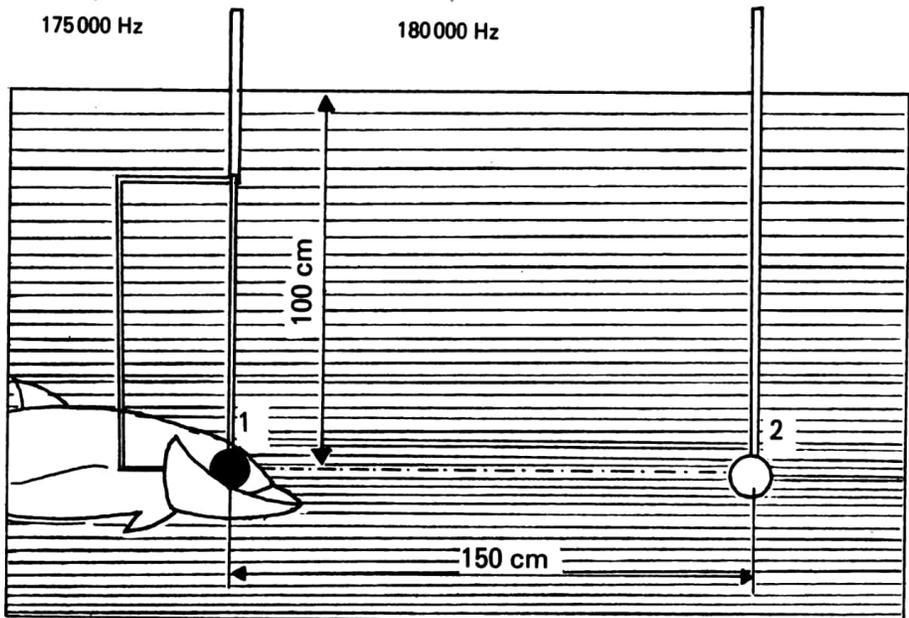
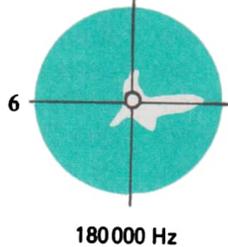
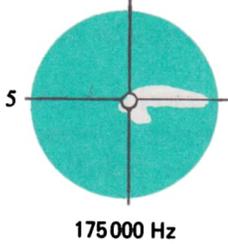
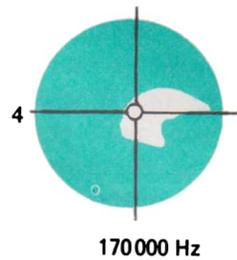
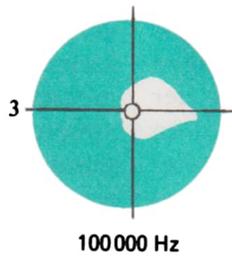
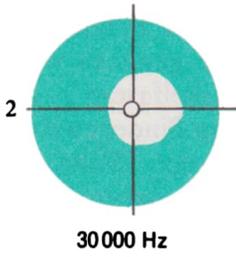
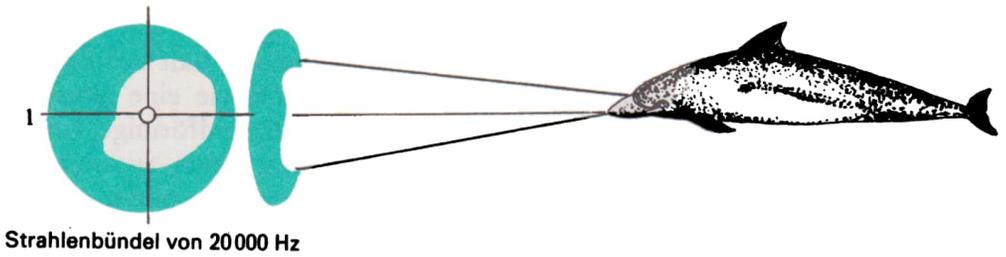
Im Kopf eines lebenden Delphins läuft vermutlich ein ähnlicher Vorgang ab. Die am Institut für Entwicklungsbiologie der Akademie der Wissenschaften der UdSSR durchgeführten anatomischen Untersuchungen haben bewiesen, daß diese Vermutung zutref-

fend ist. Demnach verhält sich das Fettpolster tatsächlich wie eine akustische Linse. Dieser ellipsoidförmige Körper, der besonders an einen zusammengedrückten Ball erinnert, bildet vor dem Stirnbein zur Längsachse des Delphinkörpers einen Winkel von 60 Grad. In der Mitte des Polsters befinden sich kleine Fettzellen, die genauso wie die menschlichen Muskelfasern durch außerordentlich feine Bindegewebe zusammengehalten werden. Mikroskopische Untersuchungen haben gezeigt, daß die Zellen zum Rand der Linse hin immer spärlicher werden, wobei die Bindegewebefasern hingegen ein dichteres Netz bilden.

Daraus lassen sich zwei aufschlußreiche Folgerungen ableiten. Einerseits ist es gewiß, daß sich der Schall in den Fettzellen langsamer fortbewegt als im umliegenden Zellgewebe. Demnach erfüllt das Fettpolster tatsächlich die Aufgabe einer „akustischen Linse“. Andererseits ermöglichen es die umgebenden Bindegewebeschichten des Fettpolsters, daß der Delphin nach Belieben die Dichte der Linse verändern kann. Erforderlichenfalls kann das Tier die Fett-



Sendet der Delphin seine Ultraschallsignale in senkrechter Richtung aus, verändert er vermutlich die Stelle der Schallbildungsquelle im Nasengang. Die akustische Linse des Fettkissens „projiziert“ die im Brennpunkt entstehenden Schallwellen parallel nach außen. Verändert der Delphin ein wenig die Form der Linse, breitet sich das Strahlenbündel konisch aus.



Beim Einsetzen des Erkundungsstrahlenkegels zum gründlicheren Erkennen eines Objekts sendet der Delphin immer höhere Ultraschalltöne aus. Dieses Phänomen wurde durch ein Experiment im Wasserbassin aufgedeckt, in dessen Verlauf am Kopf des Delphins ein Ultraschallreflektor angebracht wurde. Dabei stellte es sich heraus, daß das Stirnfettpolster wie eine akustische Linse, ähnlich einer optischen Linse, die höheren Frequenzen von Ultravioletstrahlen stärker als rote Frequenzen „beugt“. 1 – Ultraschallreflektor; 2 – Mikrofon.

zellen zur Mitte hin verdichten, ebenso aber auch auseinanderdrücken. Der Delphin ist also auf diese Weise in der Lage, die „Schallbrechung“ der Linse zu verändern. Durch diese Möglichkeit vermag er sich außerordentlich leicht der unterschiedlichen Dichte des ihn umgebenden Wassers anzupassen. Schlammiges Wasser ist vom akustischen Gesichtspunkt dichter als sauberes Wasser. Gelangt der Delphin in solches Wasser, erhöht er einfach den „Brechungsindex“ seiner akustischen Linse. So können die Schallwellen weiterhin an der Grenzfläche des Wassers und der Linse in der gewohnten Richtung nach außen treten.

Es ist aber auch durchaus möglich, daß der Delphin beim Orten mit dieser Linse den Strahlenkegel der Schallwellen weitert oder einengt. Es stimmt zwar – wie es sich auf Grund der Experimente von Romanenko gezeigt hat –, wenn die „Schallbrechung“ der Linse nicht verändert wird, daß auch dann noch dieses Symptom zutrifft, dabei muß der Delphin aber die Frequenz der ausgestrahlten Rufsignale reduzieren oder erhöhen. Mit der Erhöhung der Schallbrechung der Linse kann der Strahlenkegel auch bei permanenter Schallhöhe eingengt werden.

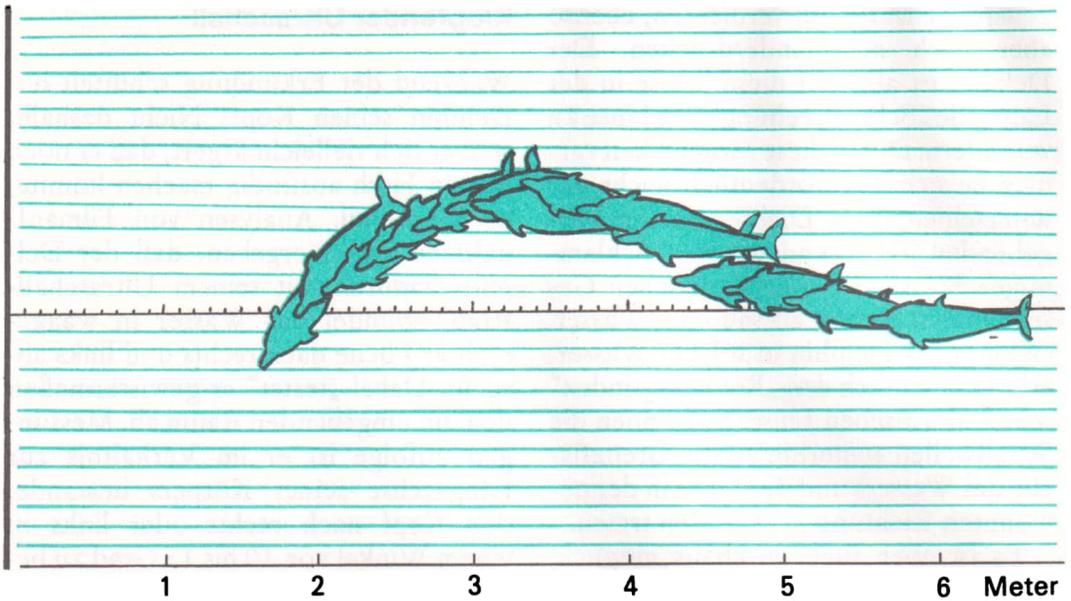
Es ist bis heute noch nicht eindeutig geklärt, welche Hypothese zutrifft und wie der Delphin in Wirklichkeit mit dieser akustischen Linse „spielt“. Auf alle Fälle ist es erstaunlich, daß dieses vielfältige Regelungssystem stark an die Stimmbildung der Singvögel erinnert, bei der die Stimmhöhe und -stärke nach Belieben verändert werden können. Eingehendere Untersuchungen im Laufe von weiteren Experimenten mit Delphinen werden sicherlich dazu beitragen, diese offenen Fragen in Zukunft zu beantworten.

Klopfender Ultraschall

Während der Erkundung schüttelt der Delphin seinen Kopf! Nicht deshalb, weil er sich vielleicht ärgert, daß er noch keinen Fisch ausfindig machen konnte, im Gegenteil. Analysen von Filmaufnahmen haben ergeben, daß der Delphin dadurch mit seinem Ultraschallstrahlenbündel das Wasser in waagerechter Ebene nach rechts und links absucht. Dabei „testet“ er gewissermaßen den ihn umgebenden Raum ab. Messungen zufolge ist er im Verhältnis zur Längsachse seines Körpers imstande, den Kopf nach rechts oder links in einem Winkel von 10 bis 13 Grad zu bewegen und so aus dem vor ihm befindlichen halbkugelförmigen Raum einen Abschnitt von $1/9$ bis $1/8$ zu übersehen. Je näher er einem Hindernis ist, um so schneller bewegt er den Kopf.

Der Delphin kann das Strahlenbündel seiner Ortung nicht nur waagerecht, sondern auch senkrecht bewegen. Nach den Untersuchungen von Belkowsch und Nesterenko hängt die Richtung des Schallstrahls davon ab, wo der Delphin im Nasengang den Ton bildet. Entstehen die Schallschwingungen an den beiden hornförmigen mittleren Luftsäcken, strahlt die akustische Linse das Strahlenbündel überwiegend in waagerechter Richtung aus. Befindet sich die Schallquelle etwas tiefer, in Richtung der unteren Luftsäcke, „überschlägt“ sich der Schallstrahl und verläßt den Kopf des Delphins schräg nach oben. Entstehen die Ultraschalltöne hingegen in der Nähe der Nasenöffnung, richtet sich der Ortungsstrahl von der Waagerechten nach unten.

In diesem Zusammenhang sind die beiden sowjetischen Forscher außerdem auf Erscheinungen gestoßen, die einen

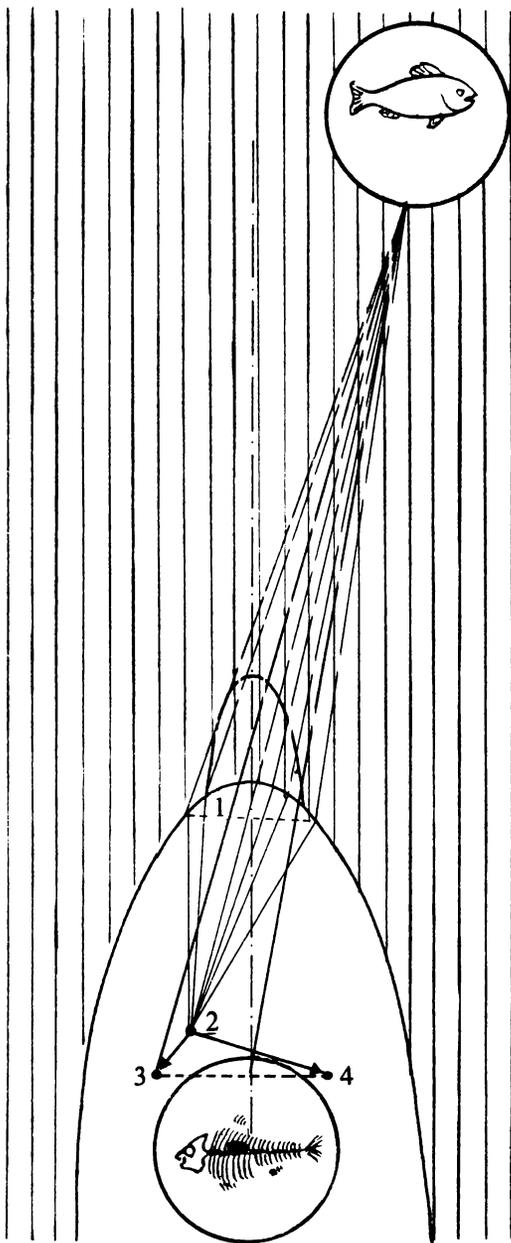


Bewegt der Delphin seinen Strahlenkegel in waagerechter Richtung, wendet er seinen Kopf während des Schwimmens hin und her. Je näher er an die Beute oder an ein Hindernis herankommt, um so schneller werden die Bewegungen.

Einblick in bisher unbekannte Eigenschaften der Delphinortung gewähren. Im Strahlenbündel einzelner Signalarufe ist die Lautstärke nicht gleichmäßig verteilt. Wenn man beispielsweise ein dünnes Seidentuch vor den Kopf des Delphins hält, ist festzustellen, daß sich das Tuch nach einem kurzen knallenden Signal an einer Stelle stärker aufbläht. Hier ist nämlich der Schalldruck stärker! Beim nachfolgenden Ortungsimpuls sowie bei dem entsprechenden Knall wölbt sich das Tuch an einer anderen Stelle stärker aus. Entsprechende Messungen ergaben, daß sich der „Scheitel“ des Schalldrucks in 0,003 Sekunden um ungefähr 1 Grad um die Achse des Strahlkegels dreht.

Weshalb sind Delphine auf dieses sonderbare Spiel angewiesen? Man nimmt an, daß sie auf diese Weise während des Schwimmens jedes einzelne

Detail ihrer Umgebung „abtasten“. Durch das Schlenkern des Kopfes und durch die Lageveränderung der Strahlenquelle vermögen sie das Strahlenbündel der Ortung in beliebiger Richtung zu ändern, wobei sie durch eine gleichzeitige Steigerung der Schallstärke weitere Einzelheiten über das vor ihnen auftauchende Hindernis oder die Beute feststellen. Mit dieser besonderen Methode der Ortungsstrahlung scheint es sich so zu verhalten, als wenn über jemandem ein Zelt zusammenbricht. In solch einem Fall können wir mit einem einzigen Blick feststellen, wo sich der im Zelt befindliche Mensch befreien will, weil sich an dieser Stelle die Zeltbahn am stärksten aufbauscht. Die Ortung des Delphins funktioniert auf der Grundlage von Schallsignalen, wobei die im Kreis herumwandernden Signale irgendwie an Klopfzeichen erinnern.



Neuesten Untersuchungen zufolge wird der Ultraschall durch die akustische Linse des Delphins konzentriert. Über die beiden Hörnerven gelangt der Schall ins Hörzentrum des Gehirns. Der Delphin „sieht“ vom kleinen Beutefisch vermutlich nur das Skelett und die Schwimmblase. Er kann in die Objekte nur „hineinsehen“. 1 – akustische Linse; 2 – Brennpunkt; 3 – linkes Ohr; 4 – rechtes Ohr.

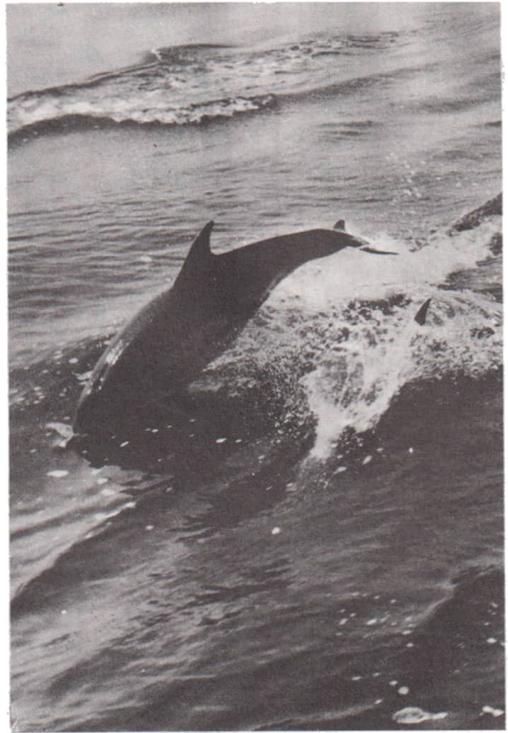
Wenn der Delphin im Laufe einer Impulsserie Ortungssignale in Richtung eines Hindernisses ausstrahlt, erkennt er auf Grund der unterschiedlichen Stärke der Klopfschall gleichzeitig auch, aus welchem Material das Objekt besteht. Offenbar ist es darauf zurückzuführen, daß er zwischen einem fischähnlich geformten Kunststoffobjekt und einem Fisch unterscheiden kann, da diese unterschiedlichen Stoffe den Schall nicht gleichmäßig reflektieren. In diesem Zusammenhang wird zur Zeit eingehend die sogenannte Methode der Amplitudenmodulation (AM) der Delphinortung untersucht.

Verborgene Ohren

Zu einer solch vorzüglichen Ortung sind außerordentlich sensible Ohren nötig. Wie genau wir Lichtbildaufnahmen von Delphinen auch betrachten, wir finden keine Spur von Ohrmuscheln. Genauso wie Fledermäuse auf drehbare „Parabolantennen“ in Anbetracht der reflektierten schwachen Ultraschallstrahlen angewiesen sind, ebenso können auch Delphine nicht darauf verzichten – müßte man logischerweise denken. Die an beiden Seiten des Kopfes, unmittelbar unter den Augen, befindliche äußere Gehörgangöffnung ist so klein und kaum wahrnehmbar, daß sie im Grunde genommen lediglich Biologen bekannt ist. Auf Ohrmuscheln müßten Delphine im Verlauf der stammesgeschichtlichen Entwicklung offensichtlich verzichten, weil sie im Wasser einen zu großen Widerstand verursacht hätten.

Wissenschaftler nahmen lange Zeit an, daß Wale (Delphine gehören auch zu dieser Ordnung) aus den von außen

hereinführenden schmalen Schallkanälen keinen großen Nutzen ziehen. Da die Knöchelchen des Trommelfells und des Mittelohrs eine ungewöhnliche Form haben, wären sie von vornherein nicht imstande, den Schall zum ovalen Fenster des Innenohrs zu führen. Man setzte voraus, daß Wale den Schall mit ihrem ganzen Körper auffangen, um unmittelbar mit dem Schädelknochen die Schwingungen an das Innenohr weiterzuleiten. Spätere Untersuchungen ergaben jedoch, daß die Theorie der Übertragung durch die Knochen vollkommen falsch ist. Folglich sei das Hörvermögen der Wale vorzüglich, und der Mechanismus der akustischen Umformung ihrer Ohren funktioniere ebenso wie der der übrigen Säugetiere, mit der Ausnahme allerdings, daß Wale nicht an der Luft, sondern im Wasser ausgezeichnet hören. Da ein großer Teil ihres Körpers aus Wasser besteht, versetzen die Schallwellen vermutlich die Luft in den Luftsäcken in Schwingungen. Diese Schallschwingungen gelangen dann durch die sogenannte Eustachische Röhre in das Mittelohr, wo das Trommelfell von „innen nach außen“ in Schwingung gebracht wird. Diese Annahme wurde allerdings experimentell noch nicht nachgewiesen. Soviel ist jedoch sicher, daß die drei Gehörknöchelchen den durch die reflektierten Signale der Schallortung zum Schwingen gebrachten Schall im Trommelfell in einer dreißigfachen Verstärkung an das Innenohr weiterleiten. Die Gehörschnecke im Gehörgang der Delphine ist ein recht kompliziertes Organ und wahrscheinlich zu feineren Unterscheidungen fähig als das menschliche Ohr. Die Gehörschnecke des Menschen und die des Tümmlers sind ungefähr gleich groß, doch die herausführenden Gehör-



Instrumente des Delphins zum Raumhören sind viel empfindlicher als die des Menschen und im Bereich des Ultraschalls am sensibelsten. Es bestätigt sich immer mehr, daß Delphine zumindest über ein solch vollkommenes Bildhören verfügen wie Fledermäuse in der Luft.

nervenbündel sind beim Delphin fünfmal so stark wie die des Menschen (statt 1 Millimeter 5 Millimeter!).

Da der Delphin auch Ultraschallwellen ausstrahlt, ist es selbstverständlich, daß sein Ohr nicht nur im Bereich des menschlichen Hörvermögens funktioniert, sondern auch Töne in höheren Frequenzen wahrnimmt. Diese Sensibilität vermindert sich jedoch bei bestimmten Frequenzwerten nach oben immer mehr. B. Lawrence und W. Shevill haben im Verlauf ihrer Untersuchungen an Tümmlern festgestellt, daß die Tiere bei der Durchführung einer Aufgabe auf Grund bestimmter Schall-

signale im Frequenzbereich von 150 bis 120 000 Hertz auf jeden Ton mit irgendeiner Bewegung genau reagieren. Stiegen jedoch die Tonschwingungen auf 153 000 Hertz an, unterliefen ihnen immer mehr Reaktionsfehler, so daß nur noch 13 Prozent der Aufgaben richtig gelöst wurden. S. C. Johnson, ein amerikanischer Forscher, kam auf ähnliche Ergebnisse. Er fand das Hörvermögen eines Tümmlers bei einer Frequenz von 10 bis 150 000 Hertz als noch annehmbar gut, allerdings mit dem Schönheitsfehler, daß das Versuchstier am Rand des unteren und oberen Frequenzbereichs nur noch Töne in einer Lautstärke wahrnahm, die vergleichsweise von einem ratternden Staubsauger hervorgebracht werden. Ansonsten erwies sich der Delphin im Bereich des Ultraschalls, bei Schwingungen von 50 000 Hertz, am sensibelsten: Dabei nahm er selbst solch leise Töne wahr, die nicht stärker waren als das Rascheln von Laub in der Luft. Zumindest erkannte er die Richtung, aus der die Töne kamen; denn über die Entfernung orientieren ihn ja Ortungssignale. An der Grenze des vernehmbaren Schallbereichs (20 000 Hertz) muß der Ton mindestens so laut wie das Ticken einer Uhr sein, damit der Delphin ihn noch wahrnimmt.

Die Ohren des Delphins eignen sich auch recht gut zur Feststellung der Richtung der reflektierten Schallsignale, da sie sowohl voneinander als auch vom Schädelknochen vollkommen isoliert sind. Im Jahr 1960 entdeckten F. K. Frazer und P. E. Pervec, daß das Mittelohr und das Innenohr des Delphins mit einer vollkommenen Schaumisolierung umgeben sind, die jede störende Schwingung absorbiert. Dieser Isolierstoff setzt sich aus Fett, das mit

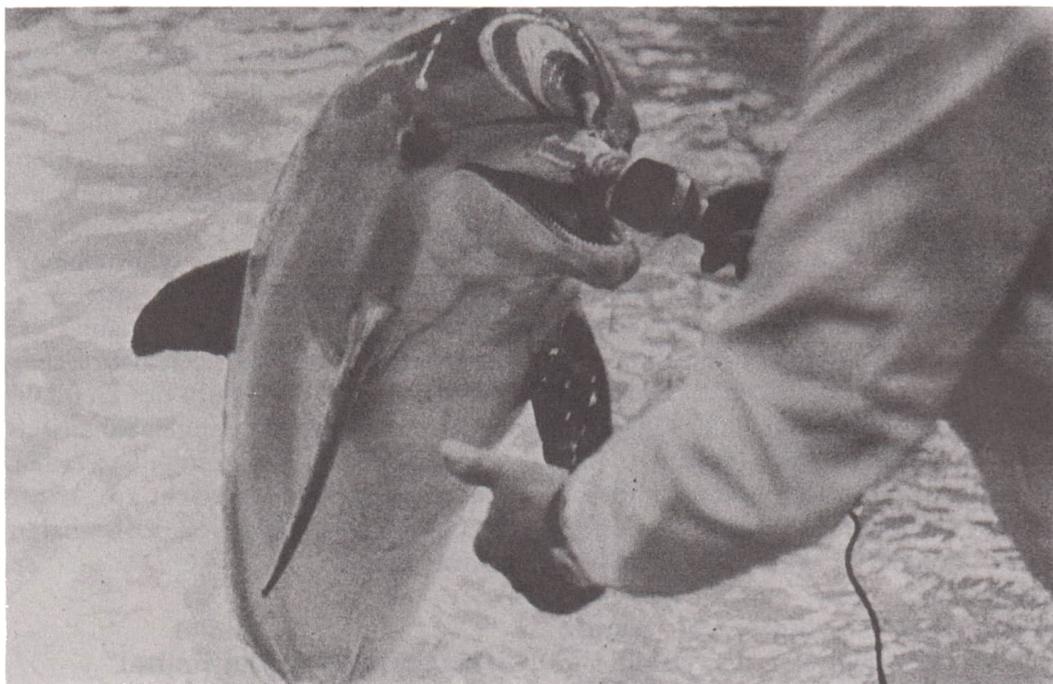
kleinen Luftblasen durchsetzt ist, zusammen. Diese kleinen Luftbläschen absorbieren offensichtlich jede Schwingung, so daß der Schall nur über das Mittelohr durch Vermittlung des „klopfenden Steigbügels“ in das Innenohr gelangt. Da die beiden Ohren, jedes für sich, den Schall getrennt wahrnehmen, kann dadurch nicht nur die relative Verspätung, sondern auch die genaue Lage des Objekts von der „elektronischen Rechenanlage“ im Gehirn des Delphins auf Grund des ganz geringen Schallstärkeunterschieds festgestellt werden. Diese Unterscheidung reicht aus, selbst das schwächste Echo von Rufsignalen wahrzunehmen.

„Jetzt bist du an der Reihe!“

„Sie unterhielten sich miteinander durch ein Drahtgitter wie Kinder, die in getrennten Zimmern schlafen müssen. Als Zugabe seufzten und stöhnten sie während ihres Zusammentreffens in bestimmter Reihenfolge: Keiner unterbrach den anderen, jeder sprach so lange, wie es ihm gefiel, sie waren ausgesprochen höflich zueinander“ – berichtet der amerikanische Forscher John Lilly über das Verhalten von zwei Delphinen im Ozeanarium.

Können Delphine tatsächlich miteinander sprechen? Nach dem Aufbau ihrer stimmbildenden Organe ist es unbestreitbar, daß Delphine zur Bildung außerordentlich komplizierter Laute in der Lage sind. Dies bedeutet jedoch nicht, daß sie in menschlichem Sinn sprechen können. Sie sind lediglich imstande, kompliziertere Informationen auszutauschen, als es gewöhnlich andere Tiere können.

Das Rätsel um das Sprachvermögen



Über die „Sprache“ der Delphine wissen wir noch wenig! Obwohl Forscher zahlreiche Lautsignale auf Tonbändern aufgezeichnet haben sowie die Zeitdauer der Pfiffe, deren Form und Frequenzen sie in unterschiedlichster Weise analysiert haben, scheint die Lösung des Rätsels um das „Sprechen“ der Delphine noch in weiter Ferne zu liegen.

der Delphine wurde von dem amerikanischen Psychologen J. Bastian eingehend untersucht. Nachdem er ein Wasserbassin mit einem grobmaschigen Netz geteilt hatte, setzte er in jede Hälfte je einen Delphin. Jedem Delphin wurden in seinem „Schulzimmer“ zwei Pedale eingebaut, wobei im rechten Abteil des Bassins zwischen beiden Pedalen eine Glühlampe montiert wurde. Die Experimentierreihe begann mit der Schulung der Tiere. In das mit der Glühlampe versehene Abteil, in den „vollkomfortablen“ Teil, wurde ein Delphinweibchen gesetzt, welches bei entsprechender Belohnung mit Fischen zunächst lernte, daß es beim ständigen Brennen der Lampe das Pedal auf der

rechten Seite und beim Auf- und Abflackern der Lampe das Pedal auf der linken Seite betätigen mußte.

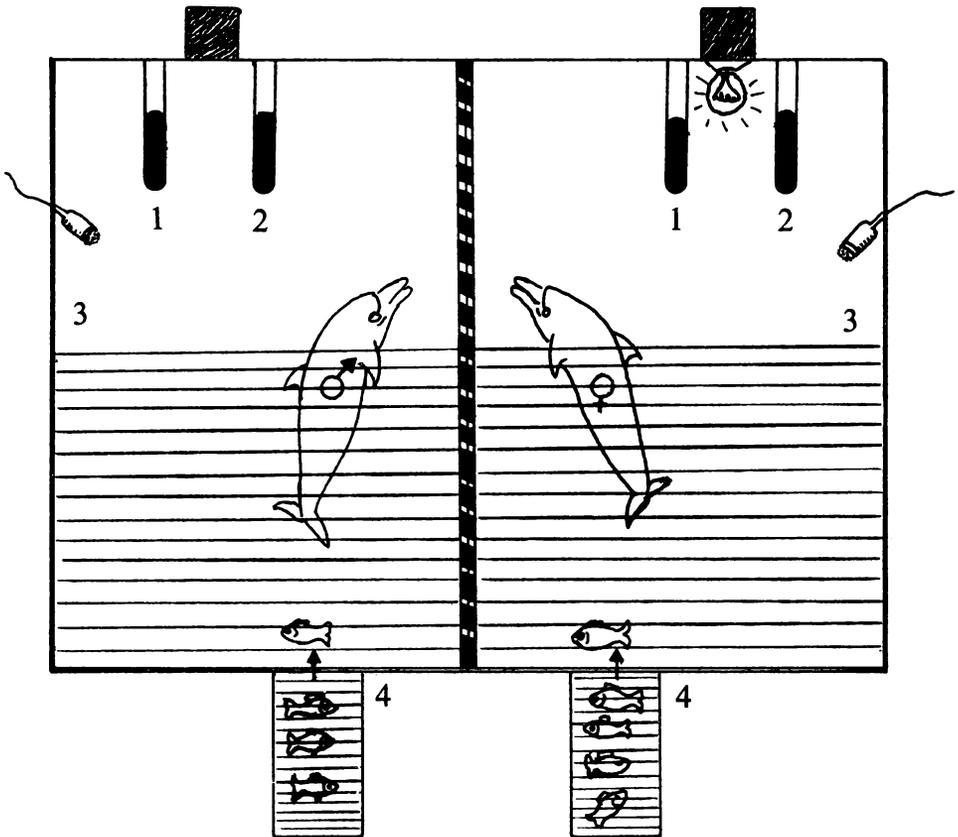
Diese „Kunststücke“ erlernte auch recht schnell das Männchen von der anderen Seite, indem es ständig durch das Netz zur Lampe „hinüberschielte“.

Anschließend folgte eine schwierigere Aufgabe. Als die Lampe ständig leuchtete, mußte erstmals das Männchen im anderen Abteil auf das entsprechende Pedal drücken. Das Weibchen mußte geduldig warten und durfte erst dann auf eines der „eigenen“ Pedale drücken, wenn sein Partner versagte. Dieses Spiel erlernten die Delphine verhältnismäßig schnell. Sie benötigten insgesamt 5 Minuten dazu! In 100 Fällen

wurden die Aufgaben siebenundneunzigmal ohne Fehler durchgeführt, sei es, daß die Lampe ununterbrochen oder flackernd brannte.

Danach wurde das Experiment noch schwieriger gestaltet! Die Delphine mußten sich jetzt durch Laute verständigen. Das trennende Netz wurde durch eine undurchsichtige Holzplatte ersetzt. Man schaltete die Lampe ein, und sie brannte fortwährend. Das Delphinweibchen konnte das Lampenzeichen weiterhin gut wahrnehmen, doch es mußte in der erlernten Art eine Weile

warten. Sie informierte ihren Gefährten durch bestimmte Pfeife. Ihr Partner drückte daraufhin auf der anderen Seite sofort auf das rechte Pedal. Beim Flackern der Lampe drückte das abgesonderte Männchen, nach dem Wahrnehmen einiger Pfeife des Weibchens, auf das linke Pedal. Das Weibchen mußte das nachbarliche Männchen nicht nur darüber informieren, daß die Lampe eingeschaltet war, sondern auch darüber, ob sie ununterbrochen oder nur flackernd brannte. Davon hing es ab, auf welche Taste der Partner zu drücken



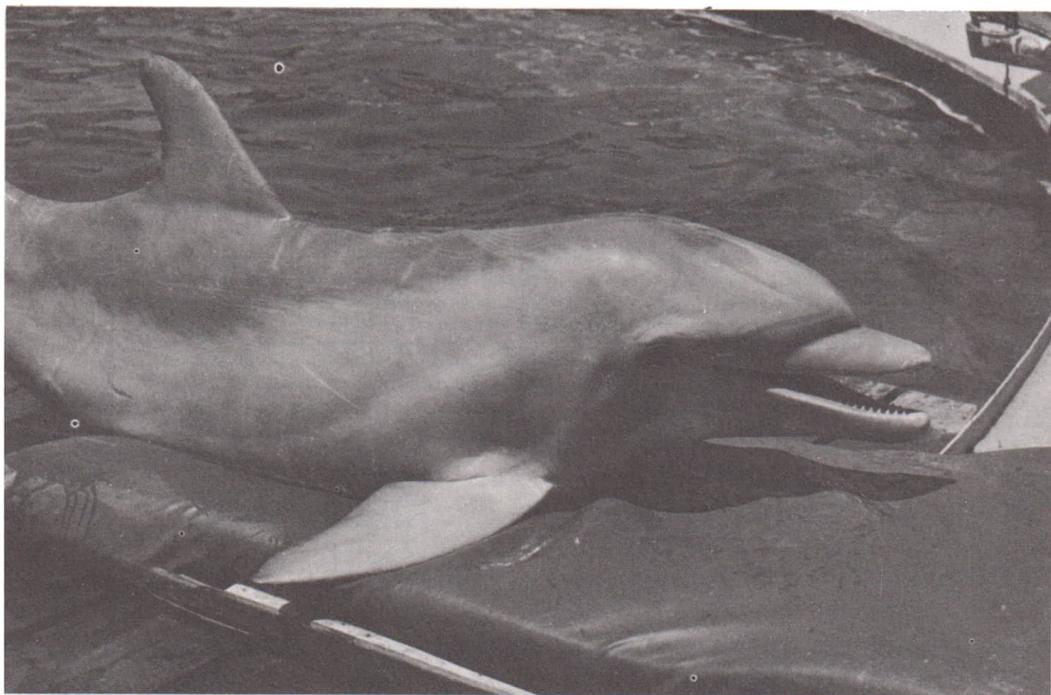
Das berühmte Experiment, mit dem erstmals mit konkreten Beweisen nachgewiesen werden konnte, daß Delphine miteinander „sprechen“. Das Delphinweibchen orientierte ihren in der anderen Hälfte des Bassins eingeschlossenen Partner mittels verschiedener Laute über die eingeschaltete Lampe und die damit zusammenhängenden Aufgaben des Experiments. 1 – linkes Pedal; 2 – rechtes Pedal; 3 – Hydrophon; 4 – Belohnungsfische.

hatte. Die Delphine erfüllten die Aufgabe abermals mit einer Genauigkeit von 97 Prozent. Aufschlußreich war, daß das Männchen das unsichtbare Weibchen durch Pfeifsignale aufforderte, daß es jetzt auch auf die entsprechende Taste drücken könne.

Daß dabei die Informationen tatsächlich durch Schallsignale übermittelt wurden, darüber konnten sich die Forscher in einfacher Weise überzeugen. Als nämlich das Wasserbassin durch schalldämmendes Material geteilt wurde, lösten die Delphine die Aufgaben nur in 54 von 100 Fällen richtig, so als hätten sie gewissermaßen die Lösung nur erraten. Als jedoch die schalldämmende Platte mit einigen kleinen Löchern versehen wurde, erhöhten sich die richtigen Antworten auf 84 Prozent.

Bastian interessierte sich auch dafür, mit welchen Lautsignalen sich die Delphine im Laufe des Experiments verständigten. Er nahm ihre „Zwiesgespräche“ mit Hilfe von Unterwassermikrofonen auf Tonbänder auf und untersuchte mehrere tausend Impulsfolgen und Pfeife. Auf Grund der Häufigkeit in den Analysen ging hervor, daß vom Weibchen bei eingeschalteter Lampe gewöhnlich ein lauter Pfiff und eine Folge von Knallen ausgestoßen wurden. Danach wurde die Aufgabe vom Männchen genau erfüllt. Blieb der Pfiff aus, drückte das Männchen in den meisten Fällen nicht auf das richtige Pedal.

Während einer Experimentierreihe wurde vom Weibchen beim Einschalten der Glühlampe fünfundzwanzigmal gepfiffen und einhundertsiebzehnerlei an-



Der Tümmeler nimmt mit sichtbarem Vergnügen an wissenschaftlichen Experimenten und Dressurübungen teil.

dere Signale abgegeben. Das Männchen hingegen antwortete in der Regel mit 20 Pfiffen. In der letzten Versuchsreihe gaben die Delphine insgesamt 500 Pfiffe und 400 knallende Laute von sich. Dabei tauschten die Delphine ihre Informationen nicht nur im menschlichen Hörbereich aus, sondern sie verwendeten dazu auch Ultraschallsignale. Die Impulsfolge lag in der Zeitspanne von 1,6 bis 0,9 Sekunden, wobei in einer Folge durchschnittlich 47 Impulse ausgestrahlt wurden. Aus den Signalen ging deutlich hervor, daß das Weibchen beim ständigen Brennen der Lampe dem Männchen in längeren Abständen Signale übermittelte als beim Flackern der Lampe. All diese Untersuchungen ermöglichen es bei weitem noch nicht, sich eine bestimmte Vorstellung über ein informationstechnisches System der Delphine zu bilden.

Da diese Säugetierart außerordentlich gelehrig ist und über ein ausgezeichnetes Gehör verfügt, versuchten einige Forscher ihnen englische Wörter beizubringen. Auf Grund der bedingten Reflexe der Laute wurde zumindest so viel erreicht, daß, als die Frequenz der Wörter „Reifen“, „Mütze“ oder „Stock“ mit entsprechender Verstärkung ins Wasser geleitet wurde, die Delphine erlernten, welchen Gegenstand sie aus dem Wasser heranzubringen sollten. Doch damit haben sie im wesentlichen nicht mehr Gelehrigkeit gezeigt als Hunde.

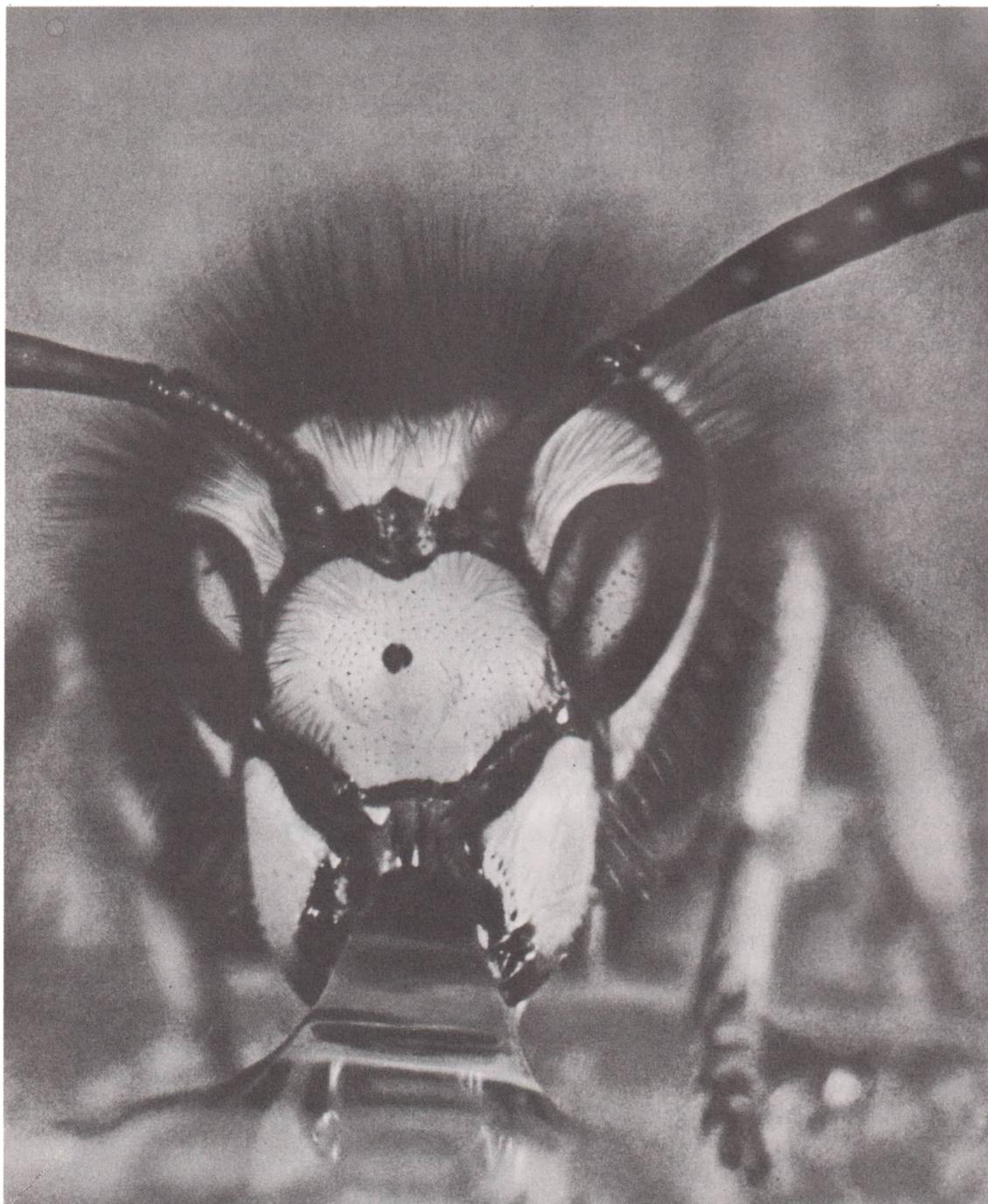
Untersuchungen am Institut für Morphologie der Akademie der Wissenschaften der UdSSR ergaben, daß Delphine ungefähr 400 verschiedene „Wörter“ als Ausdruck ihrer Empfindung verwenden, vom Schallbild der Zufriedenheit über Ärger bis zur Angst.

Ob wir uns irgendwann mit Delphi-

nen wirklich unterhalten können? Dies ist sicherlich eine Illusion, die wahrscheinlich nie in Erfüllung gehen wird. Welche Sprache wir auch immer diesen intelligenten Wassertieren beizubringen versuchen, sie werden das menschliche Begriffssystem niemals verstehen. Wir werden uns mit ihnen folglich auch in der Zukunft nicht unterhalten können, wenn auch über diese Möglichkeit in einer noch so interessanten Weise von Robert Merle, dem großartigen französischen Schriftsteller, in seinem Roman „Ein vernunftbegabtes Tier“ phantasievoll geträumt wird.



Der kluge und mit vielen vorzüglichen Eigenschaften ausgestattete Delphin als Hauptfigur phantastischer Romane.



Die Harmonie des Geschmacks und Duftes genießend, saugt die Deutsche Wespe den Nektar. Vom Standpunkt der Bionik ist es nicht einfach, den Geschmack und den Duft von Stoffen mit den gleichen physikalischen Kennwerten zu bestimmen wie das Licht und den Schall. Dadurch ist uns über die Funktion duft- und geschmacksempfindlicher Sinnesorgane nicht viel bekannt.

Beine mit Geruchs- und Geschmacksorganen

Wenn die Gläser klingen und der erste Schluck verkostet wird, können die meisten nur sagen, daß der Wein schmeckt oder nicht schmeckt. Nach ein paar Gläsern kümmert sich niemand mehr um den Duft, den Geschmack und die Blume des Getränks. Professionelle Weinverkoster müssen bekanntlich stets nüchtern bleiben. Bei der Verkostung werden die Weinproben nicht getrunken, denn die Verkoster müssen manchmal unter mehr als 30 Weinsorten unterscheiden.

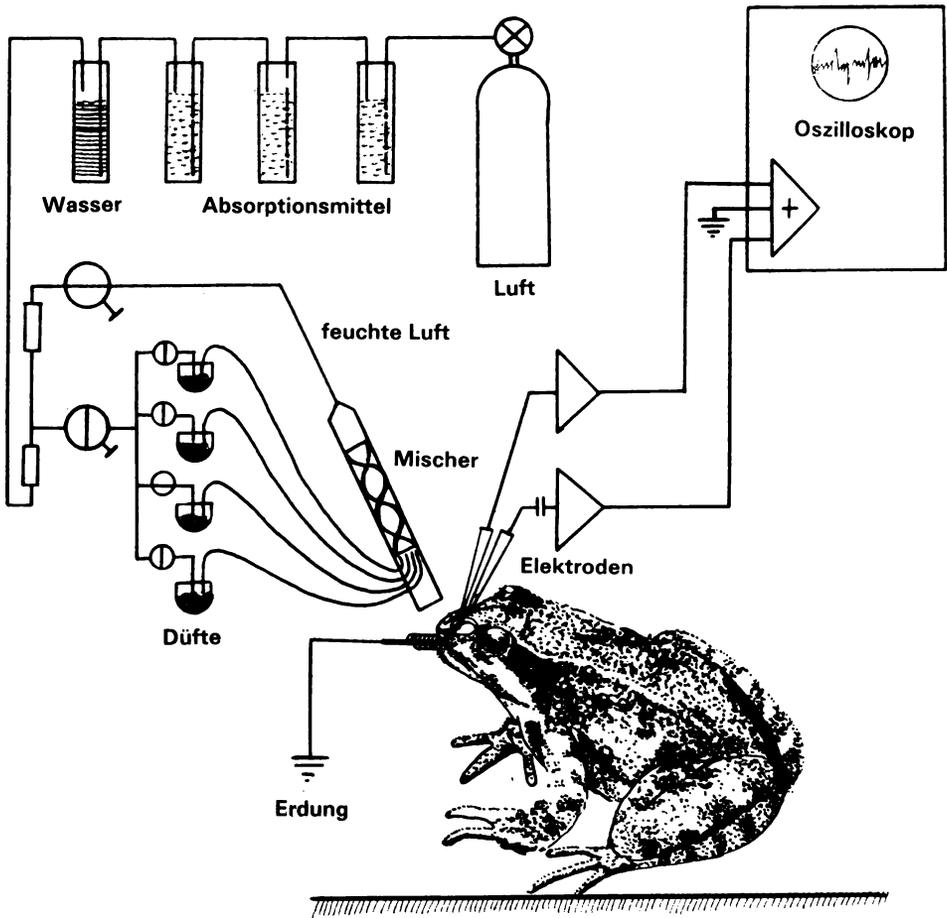
Wie bescheiden ist dies aber im Vergleich zu den in den Weinen enthaltenen Geschmacksnuancen und den aus den Gläsern aufsteigenden Duftsymphonien! Jeder Duft, jeder Geschmack unterscheidet sich vom anderen. Sie zu systematisieren ist äußerst schwierig. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß bisher selbst die fortgeschrittene Technik unserer Zeit nicht in der Lage war, ein Gerät zu entwickeln, das auf der Grundlage von physikalisch-chemischen Wertmaßstäben die einzelnen Duftkomponenten und den Geschmack von Lebensmitteln oder anderen Stoffen bestimmt.

In der Tierwelt beeinflussen Duft und Geschmack in erheblichem Maße das Verhalten der Tiere von der Nahrungssuche bis zur rettenden Flucht. Durch den Duft können sich zahlreiche Arten die gleichen Informationen verschaffen wie andere mit der Sinnempfindung durch Licht oder Schall.

Sollte es der Bionik gelingen, die Funktion der lebenden Mechanik des Duftes und Geschmacks zu analysieren, wird vielleicht auch die Technik in nicht allzu langer Zeit mit diesen erstaunlich feinen Sinnesorganen in Wettbewerb treten können.

Die duftempfindlichen „Geräte“ der Lebewesen sind in der Tat rätselhafte Organe. In der menschlichen Nase ist die eigentliche Riechschleimhaut insgesamt nur 4 bis 5 Quadratzentimeter groß. Berücksichtigt man jedoch, daß aus ihren Zellen 2 Millimeter lange Sinnesfäden (Zilien) in die feine Schleimschicht hineinragen, mit der die Riechschleimhaut bedeckt ist, dann beträgt die gesamte Fläche einschließlich der Zilien 60 bis 100 Quadratzentimeter. Auf dieser handtellergroßen Fläche kommen die Geruchsnerven mit den durch den Luftzug eindringenden Stoffteilchen in Berührung. Wie nehmen sie aber Kenntnis von den verschiedenen Molekülen? Soviel steht fest, daß sie beim Einwirken eines Reizes wie winzige Funkstationen elektrische Signale an das zentrale Nervensystem übermitteln.

Die Sehnervzellen des Auges setzen das Licht in Elektrizität um. Die Empfindungszellen des Ohres übertragen die Schallschwingungen in elektrische Signale. Was empfindet jedoch eine Geruchszelle? Darüber gibt es bereits seit Jahrzehnten verschiedene, einander zum Teil widersprechende Theorien;



Forscher stellen gewöhnlich mittels des bedingten Reflexes fest, über welche Reize Sinnesorgane von Tieren reagieren. Hinsichtlich der Düfte ist es die verlässlichste Methode, wenn beispielsweise in die Nase eines Experimentierfrosches der entsprechende Duft mit feuchter Luft eingeführt wird und die elektrischen Signale der duftempfindlichen Zellen mit Hilfe winziger Elektroden empfangen werden.

bis heute gelang es aber noch nicht, diesen sonderbaren Vorgang eindeutig aufzudecken. Im Eiweiß der Sinneszelle der Geruchsschleimhaut befindet sich das Vitamin A. Dieser Stoff hat eine ähnliche Struktur wie der in den Sehzellen vorhandene lichtempfindliche Sehpurpur (Rhodopsin), dessen Molekularstruktur sich durch Einwirkung des Lichts verändert. Es ist durchaus möglich, daß die Duftmoleküle ähnliche

chemische Veränderungen in den Sinneszellen hervorrufen, wodurch elektrische Informationen an das Gehirn weitergegeben werden. Sollte diese Theorie richtig sein, so fehlen uns bisher tatsächlich Einzelheiten und Beweise.

Der englische Forscher R. C. Gesteland und seine Mitarbeiter haben sich bei der Untersuchung der elektrischen Signale der Geruchszellen von Fröschen diesem Problem von einer anderen Seite

genähert. Sie interessierten sich vor allem dafür, welchen Unterschied die Nase zwischen den verschiedenen Gerüchen macht. Das Ergebnis dieser Untersuchungen führte zu erstaunlichen Erkenntnissen: Jede einzelne Sinneszelle ist im Grunde genommen gegenüber allen Düften empfindlich, aber nicht in gleichem Maß. Es ist durchaus möglich, daß die eine den Teeduft, die andere den Zitronenduft als „Liebling“ bevorzugt, obwohl auch der Zitronentee in jeder Zelle einen Reiz hervorruft.

Demzufolge soll von jeder Zelle ein andersgeartetes elektrisches Signal in das Gehirn gelangen und sich danach aus diesen Mosaikteilchen, einem Mini-computer ähnlich, die wahre „Visitenkarte“ des Duftes ergeben. Den Forschern zufolge verhält sich jede Sinneszelle wie eine selbständige winzige Nase. Demnach sei jede Zelle imstande, jeden Duft zu unterscheiden.

Der englische Forscher R. H. Wright hingegen ging von der Voraussetzung aus, daß es keine Sinneszelle gibt, die imstande wäre, mehr als 1 Milliarde verschiedene Düfte zu unterscheiden. Seines Erachtens muß es Grunddüfte geben, aus deren Kombinationen sich sämtliche Düfte, vom Zitronen- bis zum Teeduft, aufbauen, so wie man auch mit einigen Tönen verschiedene Akkorde auf dem Klavier spielen kann.

Gäbe es beispielsweise in der menschlichen Nase nur eine derartige grundduftempfindliche Zelle, hätten wir in dieser Hinsicht nur zwischen zweierlei Stoffen zu unterscheiden: duftende und nichtduftende. Verfügten wir jedoch über zweierlei grundduftempfindliche Zellen, könnte man die Stoffe bereits in 4 Duftgruppen einteilen. Wenn wir den einen Grundduft mit a, den anderen mit

b bezeichneten, so könnten wir von einem Viertel der Stoffe sagen, sie seien a-duftempfindlich, weil wir an ihnen nur den a-Grundduft wahrnehmen würden. Das zweite Viertel würden wir als b-duftempfindlich bezeichnen, da der Duft jener Stoffe nur von der zweiten grundduftempfindlichen Zelle wahrgenommen würde. Den dritten Teil jedoch müßten wir als ab-Duft bezeichnen, weil ihn die beiden grundduftempfindlichen Zellen empfinden würden. Schließlich müßten wir vom verbleibenden Restviertel der Stoffe sagen, daß sie geruchlos sind, weil wir in deren Duft offensichtlich weder den a- noch den b-Grundduft entdecken würden.

Wenn wir diesen Gedanken weiter verfolgen, erhöht sich für uns mit jeder neuen grundduftempfindlichen Zelle die für uns zu unterscheidende Anzahl der Gerüche um das Doppelte. Bei 20 verschiedenen Sinneszellen in unserer Nase wären wir bereits in der Lage, 1 048 576 unterschiedliche Düfte wahrzunehmen. Bei 30 Sinneszellen wären es bereits mehr als 1 Milliarde verschiedener Düfte.

Dies verhält sich genauso wie mit den ersten 7 Tasten des Klaviers, mit denen man auf der C-Dur-Skala 128 Arten harmonisch klingender Akkorde spielen kann. Bei der Benutzung von 20 Tasten können bereits 1 048 576 Akkorde gespielt werden (einschließlich der einzeln angeschlagenen Tasten).

Die Grunddüfte kann man allerdings niemals rein für sich wahrnehmen, da sich jeder Duft aus mehreren Einzelkomponenten zusammensetzt. Bisher durchgeführte Experimente erhärten diese Theorie. Es wurden mehrere tausend Verbindungen von verschiedenen Insekten berochen. Aus der statistischen Analyse ging hervor, daß die europä-

ische Obstfliege beispielsweise nur über 1 grundduftempfindlichen Zellentyp verfügt. Für sie gibt es demnach nur duftende und nichtduftende Stoffe. Die mexikanische Obstfliege orientiert sich bereits mit zweierlei Sinneszellen, der Wollschweber jedoch erkennt mit 4 Arten von Zellengruppen bereits 16 verschiedene Düfte. Die duftunterscheidende Fähigkeit verfeinert sich stets mit der Zunahme der Anzahl der Grundzellen.

Untersuchungen zufolge übermitteln die Nervenfasern des Frosches 8 verschiedene Grundsignale an das Gehirn, so daß Amphibien bereits 256 Düfte unterscheiden können. Bei Ratten gelang es sogar, 24 grundduftempfindliche Zelltypen zu entdecken, die zwischen fast 20 Millionen Gerüchen differenzieren.

Die elektrischen Signale dieser Grundtypen gelangen zugleich in das Gehirn, wo aus ihnen eine einheitliche „Harmonie“ entsteht. Wie nahe dieser Vergleich an der Wirklichkeit liegt, geht aus den Untersuchungen der englischen Forscher I. R. Hughes und D. E. Hendrix hervor. Als sie Mikroelektroden in die Riechnervenfasern von Ratten einpflanzten und die auf Tonband aufgenommenen Signale an einen Lautsprecher anschlossen, ertönten die pochenden elektrischen Signale der auf die einzelnen Düfte reagierenden Zellen so, als hätte jemand auf mehrere Tasten einer Orgel auf einmal gedrückt. Diese „Duftorgel“theorie wird noch heute von vielen Forschern nicht anerkannt; es ist aber anzunehmen, daß sie im Ergebnis weiterer Untersuchungen erhärtet wird.

Witternde Fische

Der Sohn des berühmten Kapitäns Cousteau begleitete seinen Vater auf dem Forschungsschiff „Calypso“ als Kameramann auf jeder Reise. Er berichtete von seinen interessanten Erlebnissen bei einem Experiment, in dessen Verlauf mit einer aus Fischfleisch gewonnenen Flüssigkeit eine 300 Meter lange Duftspur zur Untersuchung des Geruchssinns der Haifische im Wasser hinterlassen wurde:

„Wir brauchten nicht lange zu warten. Es tauchten fast gleichzeitig zwei Haie auf. Beide schwenkten ihre Köpfe ohne Unterlaß mal nach rechts, mal nach links. Sie schwammen schnell und unruhig. Den beiden folgten vier kleinere Artgenossen, höchstens 1 Meter große Tiere. Alle berührten mit ihren Körpern den mit weißem Sand bedeckten Boden. Sie waren mit der Verfolgung der Duftspur so beschäftigt, daß sie unsere Anwesenheit gar nicht bemerkten... Bei jedem Korallenhindernis steigerte sich ihre Erregung, da sie ja wieder die Spur aufnehmen mußten, obwohl durch das strudelnde Wasser die Spur allmählich verlorenging. Die gesamte Strecke wurde mit einer zeitweiligen Abweichung von 3 Metern in einer Zeit von höchstens 8 Minuten zurückgelegt, wobei sich die Haie wie Jagdhunde benahmten und die Duftspur ständig verfolgten.“

Sind die Haie wirklich ihrer Nase gefolgt? In der Welt des Wassers ist es äußerst schwierig, eine Grenze zwischen Geschmack und Duft zu ziehen, da sich ja beide im Wasser verbreiten. Es ist selbst nicht genau zu unterscheiden, ob Düfte der „Fernempfindung“ und Geschmäcke der „Nahempfindung“ nützen, denn im Wasser können die



Der auf das Ufer geworfene Hai ist kein schöner Anblick. Im Wasser wittert er mit weitgeöffneten Nasenlöchern schon von weitem den Geruch von Blut. Er zieht während des Schwimmens das Wasser an beiden Nasenöffnungen der oberen Kopfseiten ein, worauf es durch die Geruchsläppchen sickert und durch die unteren, mit einer Haut verdeckten Nasenöffnungen entweicht. Durch die Bewegung dieser Haut regelt der Hai die Durchströmungsgeschwindigkeit des Wassers in seiner Nase und damit gleichzeitig auch die Sensibilität des Geruchsinns.

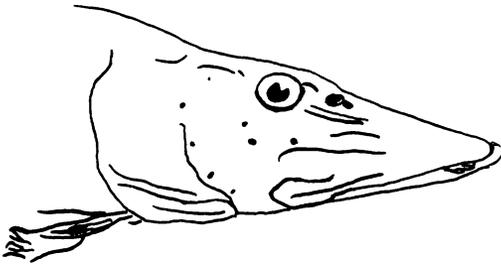
Stoffpartikelchen aus der gleichen Entfernung eintreffen. Es ist jedoch unumstritten, daß die chemische Sinnesempfindung von entscheidender Bedeutung für die Fische bei der Nahrungssuche ist. Außerdem spielt sie eine wesentliche Rolle in der Erkennung anderer, der Nahrung nicht dienender Arten, aber

auch in der Unterscheidung der verwandten Arten genauso wie in der Verteidigung gegenüber Raubfischen, im Verhalten der Eltern gegenüber ihren Nachkommen oder bei der Orientierung.

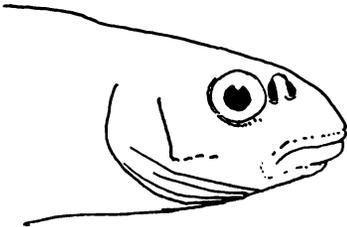
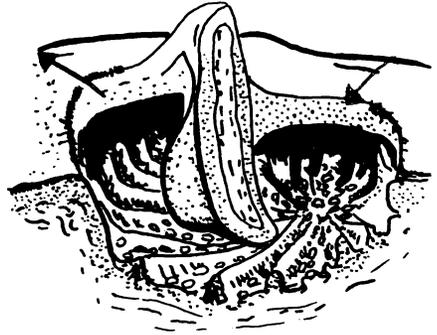
Die Forscher können trotzdem ziemlich genau zwischen dem Geruchs- und

Geschmackssinn der Fische unterscheiden. Da die geruchs- und geschmacksempfindlichen Organe am Körper der schwimmenden Fische gut auseinanderzuhalten sind, wird all das, was sie mit ihren Nasen empfinden, als Geruch angesehen, und nur das als echter Geschmack betrachtet, was sie mit ihren Geschmacksorganen wahrnehmen. Die

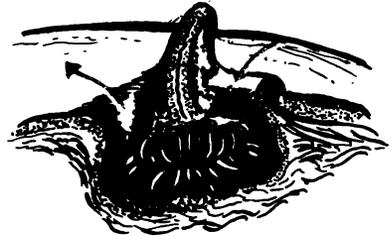
Geruchsöffnungen befinden sich gewöhnlich vor den Augen, und sie münden niemals in den Rachenschlund. Doch merkwürdigerweise sind beide Nasenöffnungen der Fische in gewissem Sinn als eine Einheit zu betrachten: An einem Ende wird das Wasser eingesogen, am anderen strömt es hinaus. Beim Hecht ist beispielsweise die Vorder- von



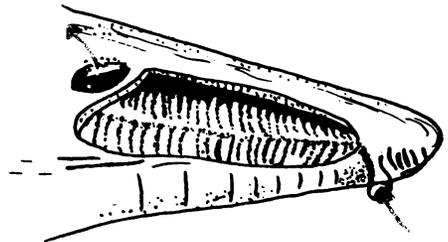
Hecht



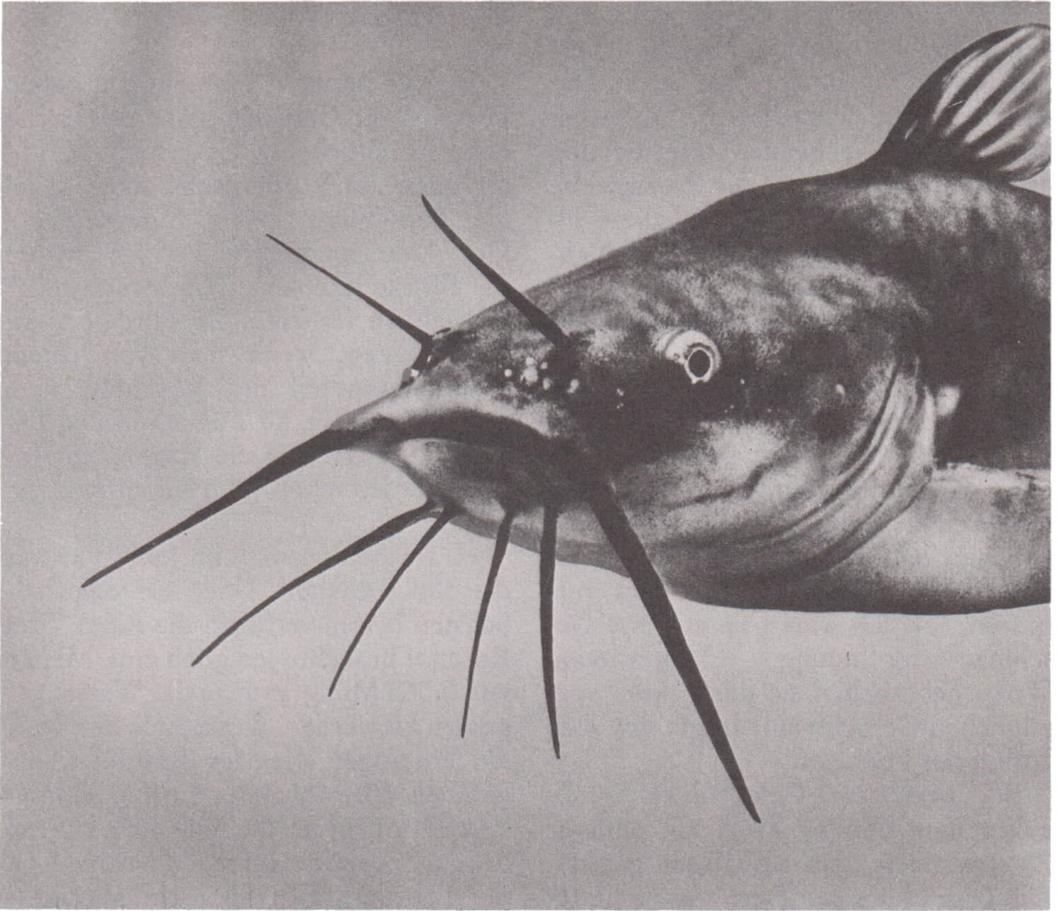
Elritze



Aal



Am Kopf haben die Fische auf beiden Seiten doppelte Nasenöffnungen, durch die das Wasser während des Schwimmens fließt. Im Nasengang befinden sich faltige Geruchshäutchen. Je größer deren Oberfläche ist, um so besser kann der Fisch im Wasser „riechen“.



Von den acht tastenden „Schnurrbartenden“, den Barteln, des Zwergwelses befinden sich die beiden oberen an den hinteren Nasenlöchern. Forscher haben die elektrischen Signale der geschmacks- und geruchsempfindlichen Organe untersucht und festgestellt, wie der Fisch auf die im Wasser aufgelösten Stoffe reagiert. Ungeklärt ist bis heute noch, auf Grund welcher physikalischen oder chemischen Merkmale der Wels zwischen Geschmack und Duft differenzieren kann.

der Hinternasenöffnung nur durch ein kleines Hautläppchen voneinander getrennt. Strafft der Fisch während des Schwimmens dieses Läppchen etwas, strömt das Wasser kräftig durch den U-förmigen Nasengang.

Eine ähnliche Nasenöffnung hat auch die Elritze. Am eigentümlichsten ist sie beim Aal: Das Wasser fließt in die nahe der Maulöffnung befindliche kleine Öffnung ein, sickert dann durch

eine Reihe mit Geruchshäutchen bedeckter kleiner Membranen und strömt schließlich durch eine vor dem Auge befindlichen Öffnung wieder nach außen.

Bei Fischen mit großer Geruchshautoberfläche (wie beim Aal) ist zweifellos eine stark entwickelte Geruchssensibilität vorhanden. Eine kleine Oberfläche der Geruchshäutchen hingegen ist stets mit einem schlechten Geruchsvermögen verbunden (wie beim Hecht).

Das Studium des Geschmacks und des Duftes hält noch zahlreiche Überraschungen für die Forscher bereit. Der amerikanische Forscher G. H. Parker kam zum Beispiel bei der Untersuchung der Nahrungsfindung der Zwergwelse zu der Schlußfolgerung, daß diese Fische ihre im Wasser verborgene Nahrung auf Grund ihres sehr hervorragenden Geruchssinns aufzuspüren vermögen.

J. H. Todd legte bei ähnlichen Experimenten strenge Maßstäbe zugrunde. Er beraubte die Versuchsfische nicht nur ihres Sehvermögens, sondern durchschnitt ihnen auch die Geruchsnervenzellenfaser. Die Zwergwelse konnten ihre Nahrung trotzdem aufspüren, folglich waren sie auf ihre Geschmacksempfindung angewiesen. Wozu gebrauchen sie dann ihren vorzüglichen Geruchssinn? fragte sich daraufhin der Forscher.

Bei passender Gelegenheit wurde außer dem blinden Fisch ein anderer Zwergwels in das Aquarium gesetzt. Die Begrüßung der Tiere war nicht gerade freundlich. Sie begannen sich sofort zu bekämpfen und waren kaum voneinander zu trennen. Schließlich mußte man sie in getrennten „Wohnungen“ unterbringen. Als man aus dem Aquarium des verletzten, erblindeten Fisches etwas Wasser in das Aquarium des Neulings träufelte, geriet dieser sofort in Erregung, als spürte er die Gegenwart des Rivalen.

Aus den späteren Untersuchungen ging hervor, daß Zwergwelse sich einander auf Grund des individuellen Geruchs persönlich erkennen. Diese Fähigkeit hat sich bei den Tieren wahrscheinlich deshalb herausgebildet, weil sie in Seen und Flüssen in großer Anzahl auf kleinem Raum leben müssen, so daß sie

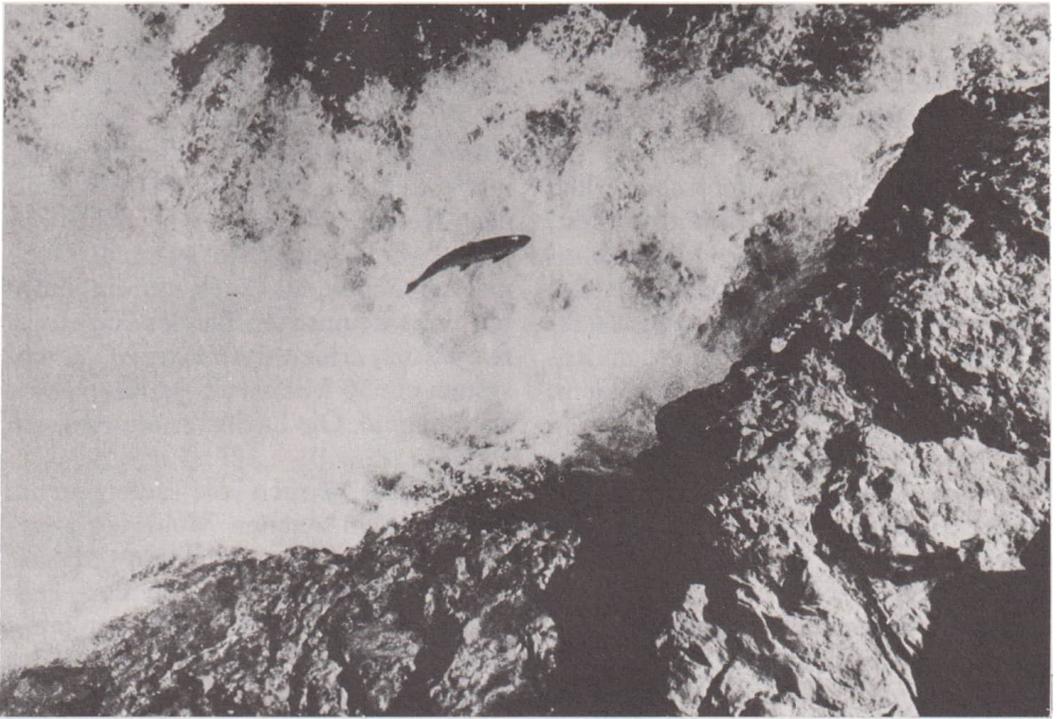
in ständigem Kontakt zueinander stehen.

In den letzten Jahrzehnten haben Forscher die Geruchsorgane der Fische einer gründlicheren Untersuchung unterzogen. Im Vordergrund stand dabei die Sensibilität dieser Sinnesorgane. Den Untersuchungen zufolge würde die Elritze in einem „Riechwettbewerb“ schmählich verlieren. Sie würde erst etwas merken, wenn man von einem Hauptbestandteil des Rosenöls, dem Benzylkarbonyl, 80 Tonnen in den Balaton schüttet. Für die Regenbogenforelle würden schon 1800 Kilogramm genügen.

H. Teichmann stieß im Jahr 1959 auf die Rekordhalter: Über die empfindlichsten Nasen verfügen die Aale! Vom Rosenöl brauchte lediglich eine Menge von 0,063 Milligramm in das Wasser gegossen zu werden, damit Aale den Duft am jenseitigen Ufer des Balatons wahrnehmen. Obwohl dieser Stoff in biologischer Hinsicht für die Aale nicht viel bedeutet, charakterisiert er vortrefflich die Leistungsfähigkeit ihres Geruchssinns.

Das Geschmacksempfinden der Fische ist zweifellos besser als das der Menschen. Doch auch auf diesem Gebiet sind noch viele Untersuchungen notwendig. P. J. Trudel hatte bereits im Jahr 1929 festgestellt, daß die Elritze gegenüber dem bitteren Geschmack von Chinin viel empfindlicher ist als der Mensch. Die späteren Untersuchungen von M. Kinner bestätigen, daß Elritzen den Geschmack von Zucker in einer 512mal kleineren Menge wahrnehmen als wir, der Schwellenwert der Salzempfindlichkeit hingegen liegt 184mal niedriger.

Wie steht es mit der Sensibilität der Fische gegenüber dem Salzgeschmack?



Lachse ziehen zu ihren „heimatlichen“ Bächen, um dort Hochzeit zu feiern und zu laichen. Ihr mühseliger Weg führt oft über reißende Strömungen. Doch sie lassen sich von ihrem Weg nicht abbringen, weil sie vom Instinkt und von der Erinnerung an den Geruch des Wassers ihres Laichplatzes getrieben werden. Für das Feingefühl ihres Geruchs ist es bezeichnend, daß die Lachse beim Erreichen einer Flußverzweigung genau wissen, in welchem Flußarm sie weiterschwimmen müssen, um zu ihrem gewohnten Laichplatz zu gelangen.

Empfinden sie den Salzgeschmack des Meerwassers?

Ja, dies ist der Fall! Sie nehmen aber davon keine Kenntnis, so wie wir beim Lesen in einem ruhigen Zimmer das Ticken einer Wanduhr nicht wahrnehmen, weil wir einfach nicht darauf achten. Das Gehirn schaltet die monotonen Meldungen des Ohres aus der Eindrucksaufarbeitung der Empfindungsorgane aus. Dieses Phänomen wird als Reizadaptation bezeichnet. Für das zentrale Nervensystem sind die sich plötzlich verändernden Reize am wichtigsten. Bleibt die Uhr aber stehen, so registrieren wir das sofort, weil wir bei

der ungewohnten Stille aufhorchen. So nehmen Meeresfische auch nur eine Veränderung der Salzkonzentration des Wassers wahr, was beispielsweise auf die Nähe des Mündungsgebiets eines Flusses hindeutet.

Vermutlich gebrauchen wandernde Fische diese Fähigkeit der Salzempfindung, um nach Hause zu finden. Holländische Forscher haben beobachtet, wie kleine Glasaale von den Gezeiten des Meeres in die Nähe der Flußmündungen getrieben werden, sich zur Zeit der Ebbe hingegen, wenn das Wasser in Richtung des Meeres abfließt, eingraben und sich auf Grund des vorbeiströ-

menden Süßwassers orientieren. Das Verhalten der bekanntesten Weltwanderer – der Lachse und Aale – wird schon seit langer Zeit von Forschern untersucht.

Die Lachse halten unerschütterlich an ihrer sonderbaren Gewohnheit fest, nach zwei- bis dreijähriger Meereswanderung wieder in das Quellgebiet des Süßwasserflusses oder Baches zurückzukehren, wo sie seinerzeit aus dem Roggen geschlüpft sind. Sie kehren heim, um zu sterben! Nach einer Wanderung von 4000 bis 6000 Kilometern wartet auf sie die Liebe und der Tod. Die zurückgekehrten Lachse sterben, doch aus den befruchteten Fischrogen entsteht neues Leben.

Neueste Untersuchungen bestätigen, daß Lachse sogar schon 30 bis 40 Kilometer vor der Flußmündung am Meer den kleinen Flußarm oder Bach ihrer Geburtsstätte wahrnehmen – lediglich auf Grund des charakteristischen Duftes, welcher sich aus dem dortigen Pflanzenwuchs und der Zusammensetzung des Bodens ergibt. Das „Duftbild“ ihrer Geburtsheimat bewahren sie selbst 7 Jahre lang in ihrem Erinnerungsvermögen auf. Vergessen die Fische den Duft nicht?

Nein! Dies konnte unter Laboratoriumsbedingungen von den Wissenschaftlern H. J. Miesner und R. Baumgarten im Jahr 1966 an Goldfischen nachgewiesen werden. An 0,01 Gramm des angenehm nach Waldmeister duftenden Präparats Kumarin, in einem Liter Wasser aufgelöst, erinnerten sich die Fische mehrere Monate lang.

Das Geruchsvermögen der Lachse wurde von dem japanischen Forscher T. J. Hara und seinen Mitarbeitern untersucht. Nachdem man dünne Elektroden in die geruchsempfindlichen Zellen

der Tiere gesteckt hatte, wurden die elektrischen Signale der Geruchsorgane abgeleitet. Welches Wasser auch immer in die Nase der Lachse geträufelt wurde, sie zeigten sich vollkommen uninteressiert. Sie blieben selbst ruhig, als das Wasser aus einem benachbarten Bach ihrer Geburtsstätte stammte. Doch im Augenblick, als ihnen nur ein Tropfen ihres heimischen Baches eingeträufelt wurde, erhielt das zentrale Nervensystem ein 50 Mikrovolt starkes elektrisches Signal. Die Lachse erinnerten sich wieder!

Gerüche können oft unangenehm sein. Den im zweiten Weltkrieg abgeschossenen Flugzeugpiloten drohte große Gefahr, wenn sie mit dem Fallschirm über dem Meer abspringen mußten. Haifische nehmen den Geruch des Menschen bereits von weitem wahr, wobei sie diesen oft unheilverkündend umringen und bedrohen. Die Piloten trugen deshalb stets ein eigenartiges Abwehrmittel bei sich. Sie öffneten eine Konservendose, in der ein „abschreckendes“ Mittel für Haie enthalten war. Nachdem die Haie diesen Geruch wahrgenommen hatten, nahmen sie sofort Reißaus.

Im Informationssystem der Wasserwelt spielen Gerüche eine wichtige Rolle. K. Frisch konnte im Jahr 1938 als erster feststellen, welche Verwirrung um eine Elritze ausbrach, als er sie mit einer Nadel verletzte und sie ins Wasser zurückwarf. Ein jeder der Artgenossen des Fisches versuchte Hals über Kopf zu flüchten. Bei den später durchgeführten Untersuchungen stellte es sich heraus, daß sich unter der Haut der Fische geruchsbildende Drüsen befinden, deren Inhalt erst ins Wasser gelangt, wenn der Fisch verletzt ist. Die anderen Fische nehmen dies sofort wahr und ergreifen

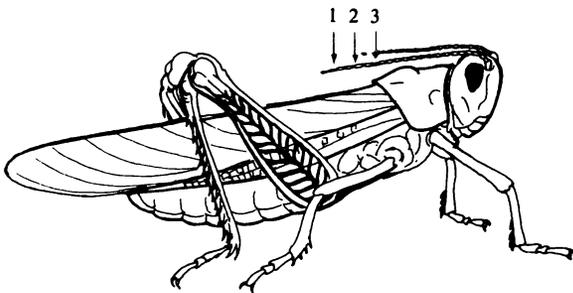
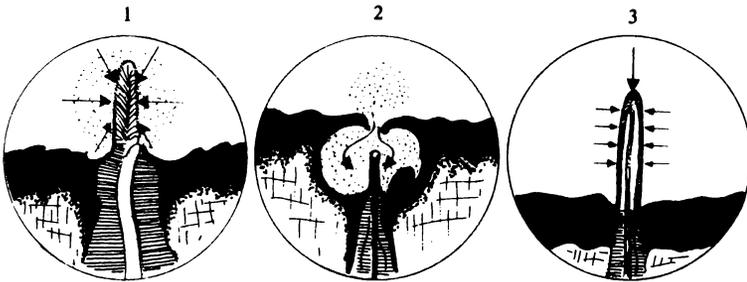
entsetzt die Flucht. Ihr Verhalten ist verständlich, denn eine solche Verletzung wird in der Regel von Raubfischen verursacht. Sie empfinden bereits 0,1 Gramm dieses Stoffes in einer Wassermenge von 25 bis 150 Litern.

J. R. Reed wies im Jahr 1969 nach, daß das Herannahen der Raubfische, wie Barsche oder Hechte, von ihren „Beutefischen“ bereits von weitem auf Grund des Geruchs, den sie verbreiten, wahrgenommen wird. Den Versuchen von J. R. Brett und D. MacKinnon zufolge nehmen Fische sogar die Geruchspur des Menschen wahr. Hält jemand nur 1 Sekunde lang seine Hand in den Bach, in dem Lachse aufwärts schwimmen, halten diese bereits in einer Entfernung von 100 Metern in ihrer Wanderung plötzlich inne, weil sie den Geruch jener Buttersäure wahrnehmen, die von der menschlichen Haut beim Schwitzen ausgeschieden wird. Ihre Sensibilität ist so stark, daß sie im Wasser des Velence-

sees bereits auf einen Schweißtropfen aufmerksam werden.

Ausrufezeichen am Pfad

Als im sowjetischen Bergbauggebiet von Norilsk Gas aus einer Grubenzeche geleitet wurde, bot sich den Arbeitern ein besonderer Anblick. Oberhalb der an der Pumpenöffnung heraustretenden Gasfontäne, die 6 bis 9 Prozent Methan enthielt, hatten sich in einer riesengroßen Wolke Mücken angesammelt. Bei anderen Probebohrungen erschienen gleichfalls Mücken, wenn Erdgas aus dem Boden strömte. Für Mücken ist demnach der Geruch des Methangases ausgesprochen angenehm, und sie nehmen ihn bereits von weitem wahr. Wie bekannt, fliegen Schwalben beim Herannahen eines Gewitters tief, um so die Mücken mit größeren Chancen zu jagen. Dies bestätigt wieder den außeror-



Ähnlich wie bei den meisten Insekten ist der Fühler bei den Heuschrecken ein „vielseitiges“ Instrument. Die Duftstoffmoleküle werden durch winzige Fühlhaare an der Oberfläche des Fühlers aufgenommen (1). In den dickeren und kürzeren Haaren befinden sich kleine Hohlräume (2). Von den geschmacksempfindlichen Härchen gehen elektrische Signale aus, wenn sie mit den entsprechenden Duftstoffen, deren Moleküle an der Spitze der Fühlerhärchen haften, in Berührung kommen (3).

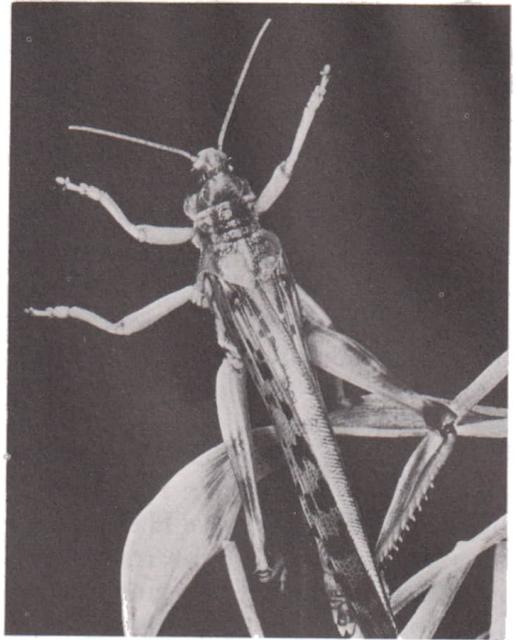
dentlich feinen Geruchssinn der Mücken: Bei Gewitter tritt eine Minderung des Luftdrucks ein. Dabei entströmt dem Boden Gas, welches im Fall von Methangas von den winzigen Insekten sofort wahrgenommen wird.

Aus menschlicher Sicht betrachtet, sitzen die Geruchsorgane der Insekten an merkwürdigen Stellen: An den Fühlern, am Oberkiefer und am Mundrand. Da sich diese chemischen Sinnesorgane (die Sensillen) an unterschiedlichen Stellen befinden, ist uns über ihre Funktion noch wenig bekannt.

E. H. Slifer und seine Mitarbeiter haben im Jahr 1957 diese außerordentlich feinen „Instrumente“ mit einem Elektronenmikroskop eingehend untersucht, wobei sie am Fühler der Heuschrecke zweierlei Sinneszellen nachweisen konnten. Bei der einen handelt es sich um dünne „Fädchen“, die nur so lang sind wie in diesem Buch die Stärke einer Papierseite und dünner als der feinste Faden einer Spinne. Aus dem Längsschnitt geht des weiteren hervor, daß es sich nicht um ein volles Profil handelt, sondern um ganz feine Röhrchen. In ihnen führen winzige Nervenzellenfäden nach oben, wo sich am Ende der Röhrchen kleine „Fensterchen“ befinden.

Die zweite Sorte, die dicken „Fädchen“, sind nur halb so lang wie die dünnen, doch um eineinhalbmals dicker. An ihnen befinden sich ungefähr 150 winzige Fenster. Zweifelsohne empfangen diese Fenster die kleinen aus der Luft kommenden Moleküle. Auf dem Fühler der Honigbiene befinden sich insgesamt 10 000 Sensillen. Die Bremse verfügt über 7000 und die nektarsaugenden Fliegen über 2000 Riechfädchen.

Die sich auf dem Insektenfühler be-



Stellen wir uns einen Kompaß vor, der stets in Richtung der nächstgelegenen Gaststätte weist, aus der angenehme Gerüche in die Luft emporsteigen. Die Fühler der Wanderheuschrecke, an denen sich duftempfindliche Fäden befinden, funktionieren in ähnlicher Weise. Da sich auf einer Fläche von 10 Quadratkilometern mitunter mehr als 500 Millionen Heuschrecken zusammenrotten können, sind sie, um nicht zugrunde zu gehen, auf diese Orientierungsmöglichkeit angewiesen.

findlichen „Nasen“ (die Geruchszellen) sind außerordentlich sensibel. Das Männchen des Großen Nachtpfauenauges spürt den verführerischen Duft des Weibchens bereits aus einer Entfernung von 8 Kilometern, was mindestens eine solche Leistung darstellt, als würde jemand aus einer Entfernung von 270 Kilometern den Parfümduft seiner Geliebten wahrnehmen und daraufhin sofort zu ihr eilen. Dazu verwenden die Schmetterlingsmännchen ein besonderes „Antennensystem“, das sich schon

rein äußerlich sehr stark vom dünnen Fühler der anderen Insekten unterscheidet.

Wie reizsensibel sind Insekten gegenüber den verschiedenen Düften? Darüber ist uns allerdings äußerst wenig bekannt. Soviel jedoch steht fest, daß beispielsweise Bienen mit dem feinen Geruchssinn des Menschen kaum wett-eifern können.

Nach Untersuchungen von R. Schwarz nehmen Bienen bestimmte Mischungen



Der zu den Pfaueaugen zählende Atlasspinner besitzt ein erstaunlich sensibles Antennensystem. Diese „Antenne“ ist vor allem gegenüber Düften empfindsam und führt das Männchen durch den verführerischen Duft zum Weibchen. Für die Sensibilität des Fühlers des Atlasspinner ist es bezeichnend, daß er bereits eine Menge von 100 Billionstel-gramm Duftstoff in 1 Kubikmeter Luft wahrnimmt.

erst wahr, wenn in 1 Kubikzentimeter Luft 10 Milliarden Moleküle mehr schweben, als sie der Mensch zum Erkennen des charakteristischen Geruchs benötigt. Andererseits verhält es sich mit dem an den Duft von Nelken erinnernden Eugenol und dem Duft von Zitronenöl (Zitral) gerade umgekehrt. Hier sind die Bienen sensibler: Sie nehmen den Duft des Eugenols bereits wahr, wenn davon 20 Milliarden Moleküle in einem Fingerhut voll Luft vorhanden sind. Dies ist eine hervorragende Leistung; wenn man bedenkt, daß in 1 Kubikzentimeter normalem Gas $271 \cdot 10^{16}$ Moleküle vorhanden sind!

Von den geschmacksempfindlichen Organen der Insekten wissen wir nicht einmal, wo sie sich befinden. Nur bei den Zweiflüglern, den Schmetterlingen und den Hautflüglern hat sich bisher herausgestellt, daß sie geschmacksempfindliche Fädchen nicht nur am Mundrand aufzuweisen haben, sondern auch an den Füßen, was für uns zumindest so komisch erscheint, als würden wir mit unseren Händen den Geschmack der Speisen wahrnehmen. Bei den Insekten ist es demnach ganz natürlich, daß sie den Geschmack bereits empfinden, wenn sie die Nahrung mit den Füßen berühren.

Den süßen Geschmack des Rübenzuckers empfindet der Mensch, wenn in 1 Liter Wasser mindestens 2,42 Gramm Raffinadezucker aufgelöst worden sind. Dem Admiralfalter genügt die Hälfte dieser Menge: Steckt man seine Beine in solch ein gesüßtes Wasser, rollt er sofort den Sauger zum Trinken aus. Ist er ausgehungert, interessiert ihn sogar eine Menge von 0,01 Gramm auf 1 Liter Wasser. Untersuchungen zeigten, daß tropische Schmetterlinge die sensibelsten Feinschmecker sind.

Sie spüren in einem Fingerhut voll Wasser bereits 0,0000025 Gramm Zucker. Auf den Geschmack von Salz reagieren Insekten im allgemeinen nicht so sensibel wie der Mensch. Doch in der Erkennung des sauren Geschmacks übertreffen uns beispielsweise die Bienen. Den typisch bitteren Geschmack von Chinin, dem Medikament gegen die Malaria, nimmt der Mensch dagegen in kleinsten Mengen wahr. Lediglich Taumelkäfer können sich in dieser Hinsicht mit dem Menschen messen, obwohl in der gleichen Menge Wasser zehnmal soviel Chinin enthalten sein muß, damit sie den bitteren Geschmack auch wahrnehmen.

Insekten können sich auf Grund von Düften auf eine viel größere Entfernung orientieren als der Mensch. Als bei einem Brand in Kalifornien 12 000 Tonnen Öl in Flammen aufgingen, zog der Rauch der brennenden Ölbehälter jene Käfergattung *Amelanophilia* an, deren Vertreter sich am liebsten, selbst aus einer Entfernung von 80 Kilometern, auf qualmende und verrauchte Baumäste niederlassen.

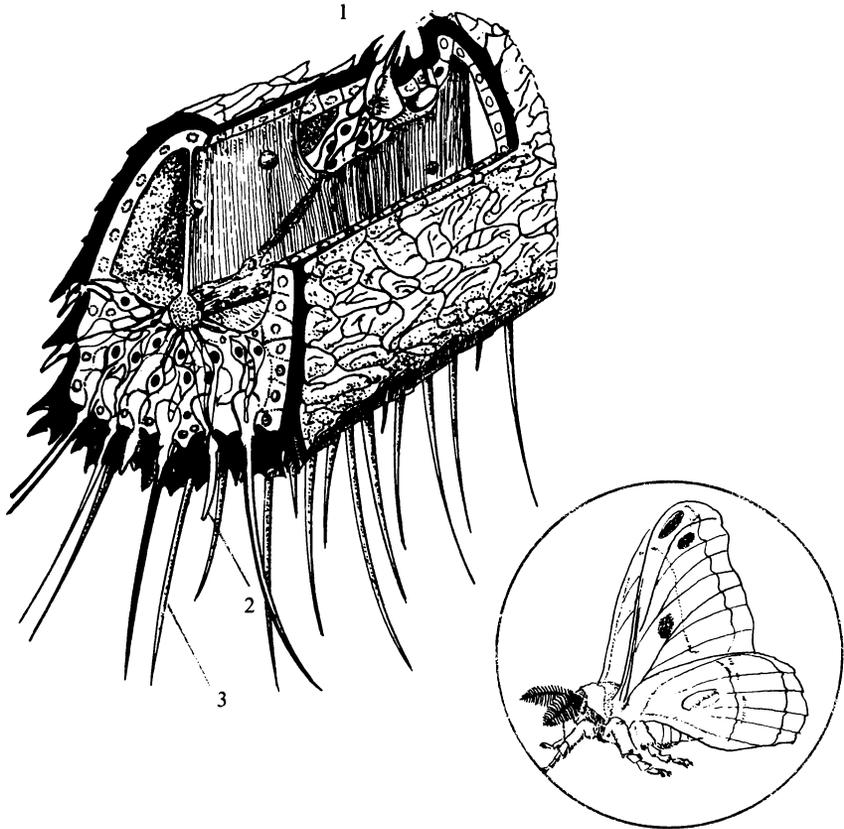
Einzelne Schmetterlingsarten, zum Beispiel die Spinner, verspüren aus einer Entfernung von 4 Kilometern den verführerischen Duft des Weibchens (das Sexualpheromon). Als im Verlauf von Experimenten ein in einen Käfig eingeschlossenes Männchen freigelassen wurde, flog es in die Höhe und entfernte sich sofort in die Richtung eines lange vorher freigelassenen Weibchens. Woher wußte das Männchen, in welche Richtung es zu fliegen hatte?

Gerüche breiten sich nicht in gerader Richtung aus wie das Licht, und es entstehen dadurch keine an „zerplatzende“ Seifenblasen erinnernde Wellen wie bei den Schallwellen. Düfte verbreiten sich

gleichmäßig in der Luft, wenn sie nicht durch einen Windstoß vertrieben werden. Insekten achten auf diese herumtreibenden duftverbreitenden Winde, oder sie schätzen bei ruhigem Wetter die Dichteverteilung der Moleküle entsprechend ein: Je stärker der Duft, desto näher die Duftquelle. Sie gebrauchen ihre Fühler ungefähr so, als wären sie Radioamateure, die zu einem Wettbewerb mit dem Ziel eilen, den in einem dichten Wald versteckten „Piratensender“ mit ihren tragbaren Drehantennen einzukreisen und auf der Grundlage eines guten Empfangs den Geheimsender zu entdecken. Das Auffinden des Senders ist verhältnismäßig leicht: Je stärker die Töne im tragbaren Gerät, um so genauer weist die Antenne in die Richtung des Senders.

Am Institut für Tierkunde der Münchener Universität wurden derartige Orientierungsversuche mit Bienen durchgeführt. Die dabei erzielten Ergebnisse bestätigten diese Annahme. Die Bienen mußten aus dem unteren Teil eines Y-förmigen Rohres in einen oberen Schenkel des Rohres kriechen, an dessen Ende sich ein Behälter, gefüllt mit Zuckerwasser, befand. Bei der Verzweigung zögerten die Bienen nicht lange.

In 87,7 Prozent der Fälle krochen sie in die richtige Verzweigung. Selbst bei Entfernung der Hälfte ihrer Fühler fanden noch 78 Prozent den richtigen Weg zur begehrten Zuckerlösung, nur daß die Orientierung etwas länger dauerte, wobei sie ständig unruhig die Fühler hin und her bewegten. Selbst als die Forscher die Fühler der Bienen kreuzweise befestigten, waren die Bienen in der Orientierung noch immer sicher. Als jedoch die „Antennen“ so befestigt wurden, daß sie nur noch 2 Millimeter von-

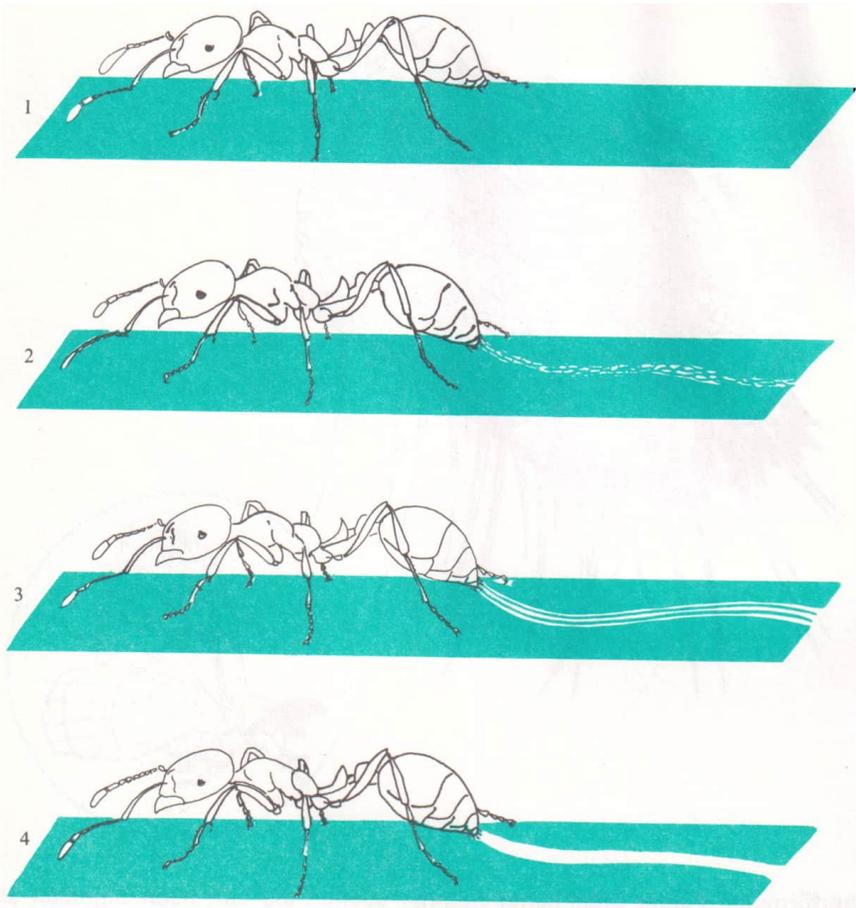


Die fächerförmigen Fühler männlicher Spinner suchen die Luft nach Signalen ab, ähnlich wie die Antennen eines Ortungsgeräts. Diese Insektenantennen sind allerdings auf der Suche nach Düften. An der 0,1 Millimeter langen Vertiefung der Querschnittsdarstellung des Fühlers befinden sich eingebettete Fäden (1), kurze Fäden (2) und lange, hohle Fühlerfäden (3). Die Duftsignale der Weibchen werden durch die langen, hohlen Fühlerfäden empfangen.

einander entfernt waren, wurden die „Naschkatzen“ unsicher. Demnach ist es offensichtlich, daß die beiden Fühler um so genauer die „Sensibilitätsskala“ der Luftdichte anzeigen, je breiter die zwischen den beiden Faktoren liegende Luftzone ist.

Düfte sind in der Nachrichtentechnik der Insekten Grundlage der vielseitigen Informationen. Entsprechend den Berechnungen des englischen Forschers Wilson vermag der Duft eines einzigen

Seidenspinnerweibchens etwa 1 Million Männchen zu informieren! Auch das Weibchen der Fichtenwespe macht es den Männchen bei der Paarungssuche leicht. Im Laufe eines Experiments konnte nachgewiesen werden, daß es innerhalb einer Woche insgesamt 11 000 Männchen anzog. Ameisen haben auf dem Gebiet der „Markierung“ die Anwendung der Düfte vervollkommenet. Sie hatten es auch nötig, denn ein nur 5 Millimeter großes Insekt



Die Duftspur verrät den Wanderern der winzigen Straßen, ob der Nahrungsfundort ergiebig ist oder nicht. Die in ihren Bau eilende Feuerameise hinterläßt keine Spur, wenn die Nahrungssuche erfolglos war (1). Es lohnt sich, die Fundstelle aufzusuchen – darauf weist die hinterlassene schwache Spur hin (2). Der Fundort ist üppig (3). Die Nahrung reicht für das gesamte Nest, bedeutet die starke Duftspur (4).

kommt sich im Dschungel der Grashalme und kleinen Pflanzen vermutlich so vor wie wir in einem Urwald, in dem die Bäume 60 bis 70 Meter hoch sind. Blattschneiderameisen hinterlassen deshalb alle 5 bis 6 Millimeter winzige Duftspuren, die sie aus ihren Giftdrüsen absondern. Die Tröpfchen verhärt

sich ähnlich wie Nagellack und verbreiten einen schwachen Duft. Interessant dabei ist, daß Ameisen selbst die Form des Duftzeichens erkennen! Wenn sie beispielsweise einen Pfad kreuzen, wissen sie genau, welche Richtung zum Ameisennest oder zur Nahrungsquelle führt. Werden die Duftzeichen aus dem

Boden gehoben und auf den Kopf gestellt, bedeutet das für die Ameise, daß sie die entgegengesetzte Richtung einschlagen muß.

Der sowjetische Professor P. I. Mariowski untersuchte eingehend den Sammelpfad einer tropischen Holzameise, der *Cremastogaster subdentata*. Er entdeckte dabei, daß die Duftspur dieser winzigen Insekten wie ein punktloses Ausrufezeichen aussieht, dessen schmaleres Ende stets zum Nest weist. Die in ihren Bau eilende Ameise drückt ihren Hinterleib während der Fortbewegung zeitweise auf den Boden, wobei durch ein abgesondertes Tröpfchen die duftende Wegmarkierung entsteht. Die Ameisen achten bei ihrer Orientierung auf diese Markierungen.

Heutzutage können bereits mehr als

20 Arten von Duftstoffen auf künstlichem Wege hergestellt werden, die zum Beispiel den Duft eines Insektenweibchens oder den Geruch einer beliebigen Pflanze vortäuschen oder gar schädliche Insekten in eine Falle locken. Dadurch können Wissenschaftler immer erfolgreicher den Kampf gegen die schädlichen Obstspinner und vor allem gegen die Schädlinge in der Landwirtschaft aufnehmen.

Wenn Zucker nicht süß schmeckt

Wenn eine Wassernatter ihre gegabelte Zunge unruhig hin- und herbewegt, ist der Anblick schon reichlich beängstigend, es sieht aber noch furchterregender aus, wenn eine Viper vor uns das



Ähnlich wie die meisten Schlangenarten züngelt die Wassernatter nicht deshalb ihre gespaltene Zunge, um damit jemandem Schrecken einzujagen. Sie wittert einfach nur. Schlangen „lecken“ sozusagen die in der Luft schwebenden Duftmoleküle auf, indem sie die Zunge einziehen und an das Jacobsonsche Organ weiterleiten. In den beiden Gruben dieses Organs wird das „Duftmuster“ von den Geruchszellen analysiert.



Wissenschaftler bemühen sich mit Hilfe der Technik, den schwierigen Bereich der bisher ungelösten Fragen um die Düfte zu klären. Bei analytischer Untersuchung verschiedener Gase sind einwandfrei feststellbare physikalische und chemische Eigenschaften erforderlich. Mit dem hier abgebildeten Gerät zur Blutanalyse können innerhalb von 90 Sekunden das Vorhandensein und die Quantität von Kohlendioxid im Blut nachgewiesen werden. Die Blutspur wird mit Hilfe einer Injektionsspritze in das Gerät eingespritzt.

sinn der Vögel wissen wir bis heute nicht viel. Vogelsammler verschiedener Museen haben eine interessante Methode zum Heranlocken der herumstreifenden Sturmvögel auf den Meeren entwickelt. Die findigen Jäger besteigen, mit einer Flinte, einem Petroleumkocher und einem Stück Speck ausgerüstet, einen Kahn. Wenn der Kocher brennt, wird der Speck in der Brat-

pfanne ausgelassen und während des Ruderns von Zeit zu Zeit das ausgebratene Fett ins Meer geschüttet. Nach einer Ruderstrecke von 1 bis 2 Kilometern kann der Jäger dieselbe Strecke wieder zurückrudern. Wenn bisher am Horizont keine Spur von Meeresvögeln zu sehen war, werden sie nun mit Sicherheit auf dem Wasser schaukeln und erregt die Fettspuren absuchen. Der Jä-

ger kann sie also nach Belieben abschließen.

Für Albatrosse und Sturmvögel ist der gute Geruchssinn tatsächlich eine Existenzfrage, denn sie müssen tagelang über der öden Wasseroberfläche segeln, wobei sie sich bei der Nahrungssuche nur auf ihr Sehvermögen und ihren Geruchssinn verlassen können. Der Geruchssinn der Geier der Alten Welt ist beispielsweise sehr viel schlechter.

Diese nehmen nicht einmal den Geruch verdorbenen Fleisches wahr, wenn es mit einem Tuch bedeckt ist. Der Geruchssinn der Geier der Neuen Welt hingegen ist ausgeprägter, was auch ihr entwickeltes Nasenbeckensystem verrät. Doch vom Gesichtspunkt der Vögel hat letzten Endes der Geruchssinn fast keine Bedeutung, zumindest ist das die gegenwärtige Meinung der Forscher. Über ihren Geschmackssinn gelang es lediglich so viel festzustellen, daß der Geschmack des Zuckers sie so gleichgültig läßt, als würden sie Kieselsteinchen picken. Nur die Feinschmecker unter ihnen — die Kolibris und Papageien — empfinden das Süße. Mit dem Salz verhält es sich anders. Wenn im Trinkwasser von Hühnern nur 2 Prozent Salz enthalten ist, würden sie eher verdursten, als davon auch nur einen Schluck zu trinken. Saures und alkalisches Wasser hingegen wird von Hühnern kaum empfunden.

In der Welt der Säugetiere können Hunde auf ihren scharfen Spürsinn zu Recht stolz sein. Untersuchungen von A. Müller zufolge befinden sich in der Nasenhaut eines Deutschen Schäferhundes 225 Millionen Geruchszellen; sein ausgeprägter Geruchssinn ist demnach verständlich. Ein Mensch besitzt dagegen nur etwa 20 Millionen Riech-

zellen. Für einen Spürhund genügt es, den Gegenstand eines Menschen lediglich 1 Sekunde lang zu beschnuppern, um die Witterung aufzunehmen. Es wurden Experimente durchgeführt, in deren Verlauf ein Setter aus den Spuren von 11 Menschen die ihm bekannte Spur herausfand und sie auch beharrlich verfolgte. Heutzutage wird der ausgezeichnete Geruchssinn der Hunde sogar zum Finden von Erzlagern eingesetzt. Von Hilda, einer sowjetischen Spürhündin, wurden sogar Goldvorkommen aufgespürt.

Die moderne Technik unserer Zeit bemüht sich augenblicklich mit ersten vagen Versuchen, Geräte zu entwickeln, die in irgendeiner Weise zwischen den einzelnen Gerüchen differenzieren können und auch zur Messung der Duftquantität geeignet sind. In Chicago wurde ein besonderes Geruchsforschungsinstitut für die Erforschung von Gerüchen gegründet, dessen Aufgabe es ist, die winzigen Mengenunterschiede verschiedener Duftverbindungen nachzuweisen. Als am geeignetsten hat sich bisher das Flammenfotometer erwiesen, das in 1 Kubikmeter Luft bereits 5 Millionstelgramm Schwefel nachweist. Das Flammenfotometer wird in verschiedenen tragbaren Varianten hergestellt, es wird vor allen Dingen für die Verhinderung einer Umweltverschmutzung durch chemische Kombinate eingesetzt.

Dies ist allerdings erst der Anfang. Wir müssen die Funktion der geruchs- und geschmacksempfindlichen Zellen genauer kennenlernen, um auf dieser Grundlage vollkommener Meßinstrumente herzustellen. Dann wären auch jene Experten in der Parfümherstellung überflüssig, welche mit Hilfe ihres feinen Geruchssinns aus mehr als 1000

Duftstoffen ein neues Kölnischwasser oder Parfüm zusammenmixen. Eine elektronische Rechenanlage würde für diese Aufgabe reichen. Experten brauchten nur die charakteristischen

Daten der neuen und modernen Parfümkompositionen in die Anlage einzuspeisen, und der Computer könnte die angenehmsten Düfte spielend leicht zusammenstellen.



Dieses Spinnennetz ist nicht nur eine meisterhafte Schöpfung, die eine perfekte Falle für die Beute der Spinne darstellt, sondern gleichzeitig ein vollkommener Schwingungsanzeiger. Wo immer sich die Spinne darin befindet, sie wird sofort davon informiert, wenn sich eine Beute im Netz verfangen hat. Ähnlich wie auch bei anderen Gliederfüßern ist der Körper der Spinne mit Tastaaren bedeckt.

Verräterische Schwingungen

„Wohin habe ich meine Brille gelegt?“ jammert die Großmutter fast jeden Tag. Zuerst sucht sie auf dem gewohnten Platz, im Sessel. Die Brille ist nicht da. Danach durchstöbert sie die ganze Wohnung, doch die verflixte Brille läßt sich nirgendwo finden. Jetzt beteiligt sich schon die ganze Familie. Alle suchen fieberhaft, als der kleine Enkel zufällig einen Blick auf die Nase der Omi wirft. „Du hast sie doch auf“, ruft er verwundert. Die Großmutter ist nicht überrascht. Das gleiche ist ihr schon oft passiert.

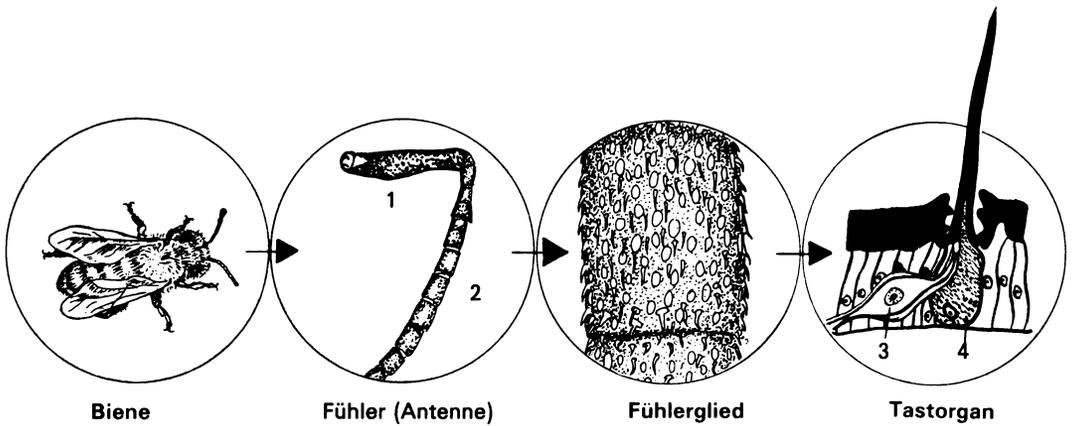
Unsere Sinne können uns in solch sonderbarer Weise einen Streich spielen. Wir gewöhnen uns an den ständigen Druckreiz und merken davon nichts mehr, wie wir auch nicht fühlen, daß wir bekleidet sind. Wir werden durch das Verhalten unserer Tastzellen erst aufmerksam, wenn beispielsweise unsere Jacke irgendwo zu eng ist oder der Hemdkragen drückt. In der Tierwelt haben sich im Laufe der Stammesentwicklung verschiedene druckempfindliche „Instrumente“ herausgebildet. Es gibt Empfindungsorgane, die nach unmittelbarer Berührung elektrische Signale an das zentrale Nervensystem übermitteln. Andere Sinnesorgane zeigen den ständigen Druck an. Wieder andere orientieren über die langsame Druckveränderung, die Schwingungen in niedrigen Frequenzen.

Über die Umgebung muß jedes Tier unterrichtet sein, zumal es oft das Leben

kostet, wenn es die „einwirkenden“ Reize nicht beachtet. Selbst die mikroskopisch kleinen Wassertierchen sind gegenüber Berührungen empfindlich. Wenn wir zum Beispiel ein zwischen zwei Glasplatten harmlos schwimmendes winziges Glockentierchen mit einem dünnen Platindraht berühren, nimmt es sofort eine Abwehrhaltung ein, ja, es informiert sogar in irgendeiner Weise die anderen Tierchen, so daß sich sämtliche Glockentierchen in wenigen Augenblicken in eine angemessene Entfernung von der „feindlichen“ Platinnadel zurückziehen. Ebenso empfindlich ist auch der Süßwasserpolyt, wenn einer seiner Tastarme berührt wird.

Es schwingt das Netz

In der Welt der Gliederfüßer verfügen die Spinnen über die feinsten schwingungsempfindlichen Instrumente. Da das Sehvermögen der Webspinnen ziemlich schwach ist, orientieren sie sich überwiegend durch Tasten, sie „unterhalten“ sich sogar auf diese Weise. Wird das Netz der Spinne gleichmäßig bewegt, stört sie das in keiner Weise. Sie nimmt offensichtlich an, daß der Wind das Netz bewegt. Doch beim plötzlichen Bewegen eines Verbindungsfadens gerät die achtbeinige Jägerin sofort in Erregung und bereitet sich zum Angriff vor. Eine in das Netz gehaltene Stimmgabel, die ungefähr in der Frequenz der



Biene

Fühler (Antenne)

Fühlerglied

Tastorgan

So wie Säuglinge alles in die Hände nehmen, um ihre Umgebung kennenzulernen, so tasten auch Insekten mit ihrem Fühler alles ab. An den einzelnen Gliedern der Fühlergeißel der Biene reihen sich duftempfindliche Grübchen und Tastfäden aneinander. Durch die Krümmung des winzigen „Stachels“ entsteht in den Sinneszellen ein Signal, welches von den Nervenzellen weitergeleitet wird. 1 – Fühlerschaft; 2 – Fühlergeißel; 3 – Nervenzelle; 4 – Sinneszelle.

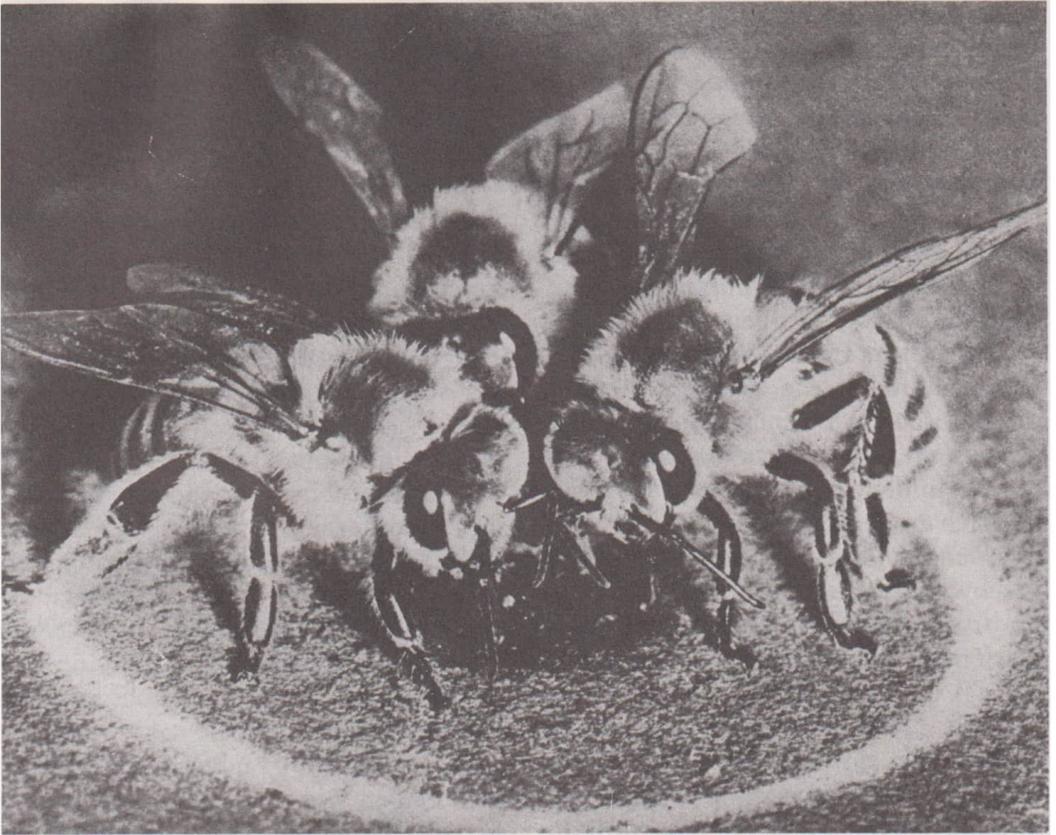
Flügel schlägt eines in das Netz gefallen Insekts schwingt, lockt die Spinne ebenso aus ihrem Hinterhalt, als zappelt eine echte Beute im Netz.

Die Spinnenmutter ruft selbst ihre Kinder durch Schwingungen des Netzes zum Festmahl, nachdem sie das erbeutete Insekt vollkommen geknebelt hat. Doch neben der „Mittagsglocke“ sind den Kleinen auch die Gefahrensignale bekannt. Wenn die gefangene Beute im Netz heftig zu zappeln beginnt und sich zu befreien versucht, hebt die Spinnenmutter eins ihrer Hinterbeine und versetzt das Netz in Schwingungen. Die kleinen hungrigen Spinnen halten dann plötzlich inne und kehren schnellstens um. Das Spinnenweibchen vermag zwischen den Schwingungen des Spinnennetzes die feinsten Unterschiede zu erkennen. Als sie im Verlauf eines Experiments ihres Augenlichts beraubt wurde, erkannte sie die Bewegungen ihrer Sprößlinge im Netz und verwechselte sie nicht mit anderen ins Netz geratenen Insekten.

In einem anderen Experiment ver-

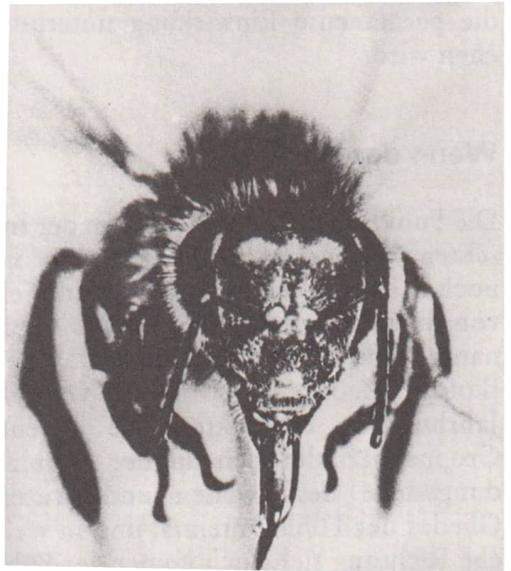
suchten Forscher die durch Insekten verursachten Netzbewegungen in Form von umgewandelten elektrischen Signalen auf Tonband aufzunehmen. Später wurden diese Schwingungen mit Hilfe einer feinen Nadel auf das Netz „zurückgespielt“. Die Spinne zeigte hinsichtlich dieser Signale kein Interesse. Dies beweist erneut, daß ihr Tastsinn außerordentlich sensibel ist. Sie nimmt den Unterschied zwischen den natürlichen und künstlichen Schwingungen ebenso wahr, wie wir mit geschlossenen Augen auch merken, ob eine „lebende“ oder Tonband-Stimme ertönt.

Bestimmte Spinnenarten operieren mit den gleichen Methoden wie Angler, die durch das Zucken des Schwimmers merken, ob ein Fisch angebissen hat. Diese Spinnen befestigen nur einen einzigen Signalfaden in der Mitte des Netzes und ziehen sich mit dem anderen Ende des Fadens in ein trichterförmig gekrümmtes Blatt zurück, als warteten sie in einem Hochsitz auf das Auftauchen der Beute. Dabei halten die Spinnen mit einem der vorderen eingewin-



Als Mittel der „Masseninformation“ der Bienen gelten die verschiedenen Geschmäcke und Düfte. Der an ihren Körpern haftende Geschmack und der Duft des Blütenstaubes informieren die Gefährtinnen, auf welche Blumen sie sich bei ihrer Nahrungssuche zu konzentrieren haben.

Der Fühler der Biene bildet mit den Organen der Flügelbewegung ein vollkommenes kybernetisches System. Dieser Wissenschaftszweig, welcher sich mit Selbststeuerungssystemen beschäftigt, konnte auf nützliche Erfahrungen in der Tierwelt zurückgreifen. Während des Fluges mißt der Fühler der Biene genau die Geschwindigkeit der Luftströmung, wobei die entsprechenden Signale automatisch die Flügelbewegung regeln. So kann das Insekt auch bei Aufkommen von Seitenwind in der beabsichtigten Flugrichtung weiterfliegen.



kelten Greifbeine den Signalfaden fest. Bringt man die Spinne mit dem Signalfaden und dem Blatt etwas weiter vom Netz unter und bindet das Ende des Fadens an einen festen Gegenstand, nimmt sie von den Vorgängen am Netz keine Notiz, selbst wenn sie dabei sieht, daß im Netz ein Insekt zappelt. Sie hält nach wie vor den Signalfaden unentwegt mit ihrem Greifbein fest.

Die Tastorgane der Insekten funktionieren ähnlich wie winzige elektromechanische Instrumente. Sie sind überall an dem festen chitinversteiften Körper zu finden, doch die meisten befinden sich an den Beinen und an den Fühlerantennen. Ein Teil dieser Fühler ist geschwindigkeitsempfindlich, ein anderer druckempfindlich. Die geschwindigkeitsempfindlichen Fühlerborsten übermitteln die elektrischen Signale an das zentrale Nervensystem erst, wenn sich die auf sie einwirkende Druck- oder Biegekraft laufend verändert. Die Empfindungsnerven des druckempfindlichen Fühlers hingegen signalisieren die ständige Formänderung, und das Insekt reagiert offensichtlich erst darauf, wenn die permanente Einwirkung unterbrochen wird.

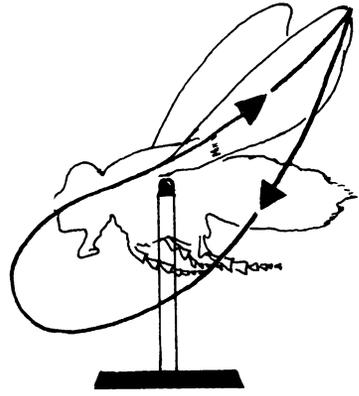
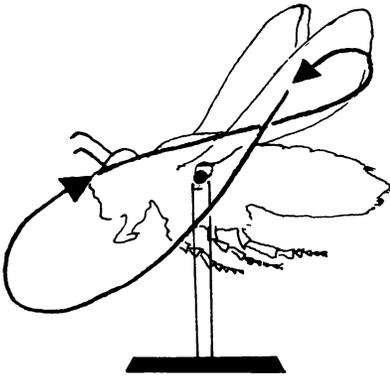
Wenn der Wind weht

Die Funktion der an den Fühlern der Insekten vorhandenen Fühlerfäden ist noch nicht eindeutig geklärt. Ein Teil von ihnen gruppiert sich um das sogenannte Johnstonsche Organ, das der Biologe George Johnston im vorigen Jahrhundert entdeckte. Die zweite Gruppe befindet sich an der Verbindungsstelle des zweiten und dritten Gliedes der Fühlerantenne, und in welche Richtung sich auch immer der Füh-

ler neigt, das Insekt wird darüber sofort durch elektrische Signale informiert. Der Insektenfühler ist folglich gleichzeitig ein vortrefflicher Windgeschwindigkeitsmesser.

Wenn der Wind über das Getreidefeld weht, biegen sich die Ähren. Je stärker die Luftbewegung, um so mehr neigen sich die dünnen Halme. Die Fühler der Insekten biegen sich während des Fliegens ebenso. Die Empfindungszellen des Johnstonschen Organs erhalten ihre Orientierung durch den Stau- und Geschwindigkeitsdruck der sie umgebenden Luft. Fliegt die Honigbiene oder die Wanderheuschrecke bei ruhiger Luft mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, ziehen vor ihren Facettenaugen die Formen der Erdoberfläche in derselben Geschwindigkeit vorbei. Dies kann von den Bienen zu jeder Zeit leicht kontrolliert werden. Wollen sie jedoch bei Gegenwind mit der gleichen Geschwindigkeit fliegen wie bei Windstille, müssen sie die Amplitude der Flügelschläge verringern. Nur so können sie erreichen, daß bei stärkerer Luftströmung eine gleich starke vorwärts treibende Kraft an den Flügeln entsteht wie bei ruhigem Wetter. Zu dieser „relativen“ Geschwindigkeitsmessung ist das Insekt auf die Fühler angewiesen. Biegen sich die beiden Antennen mehr nach hinten als bei windstillem Wetter, bedeutet dies, daß der Gegenwind stärker ist. Das Johnstonsche Organ „informiert“ auf Grund des Neigungsgrads der Fühler die zuständigen Flügelbewegungsmuskeln, daß sie die Flügelausschläge reduzieren.

Über die Existenz eines derartigen Rückkopplungssystems wurden die Wissenschaftler erstmals durch Experimente im Windkanal aufmerksam. Spätere Untersuchungen bestätigten die ge-



Im Verlauf von Laboratoriumsexperimenten bei einer Windstärke von 1,4 Metern in der Sekunde bewegt die an einer Stelle befestigte Fliege ihre Flügel in der bekannten Form einer Acht. Wenn man der Fliege die Fühler entfernt – und sie so ihres druckempfindlichen Johnstonschen Organs beraubt –, kann sie die Flügelbewegungen nicht mehr regeln; sie würde im Freien auf den Boden fallen.

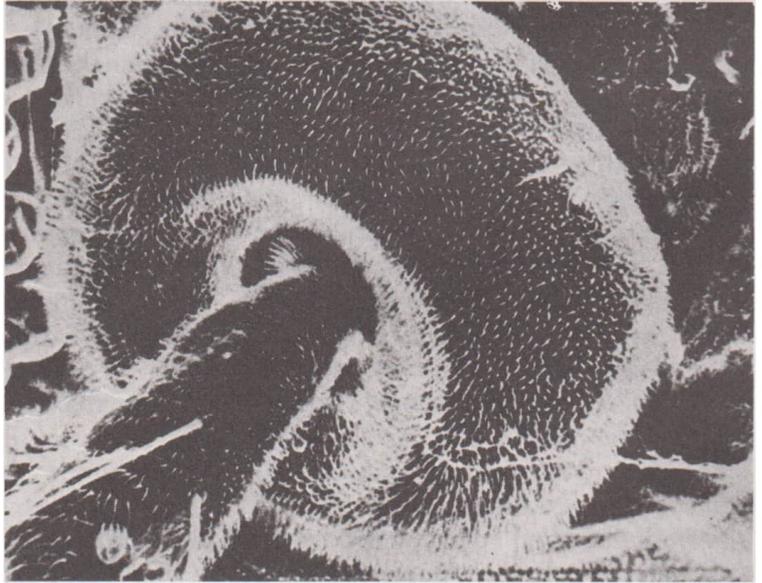
schwindigkeitsmessende Funktion der Fühler und die regulierende Rolle der Flügelschläge. Als man die Fühlerantennen der Biene beseitigt hatte, verstärkte man die Luftströmung im Windkanal vergeblich, das Insekt bewegte seine Flügel in einer gleich großen Auslenkung, als flöge es in Windstille. In entgegengesetzter Richtung fanden die Forscher ihre Annahme gleichfalls bestätigt. Man befestigte winzige Stahlblättchen an den Fühlerantennen der Biene, wobei das Insekt in ruhiger Luft aufgehängt wurde, damit es ungestört an einer Stelle fliegen konnte. Danach wurden die Fühler der Biene mittels eines Magneten so eingeknickt, als wehe eine Luftströmung mit großer Geschwindigkeit auf die empfindsamen Antennen. Die Biene reduzierte daraufhin sofort die Amplituden der Schwingungen ihrer Flügel.

Die „Liebesbotschaft“ der Flügelschwingungen wird gleichfalls durch die Fühlerantennen wahrgenommen, wobei die Fühler in einem Rhythmus mit den „summenden“ Flügelschlägen des Weibchens schwingen. 16 Tage alte

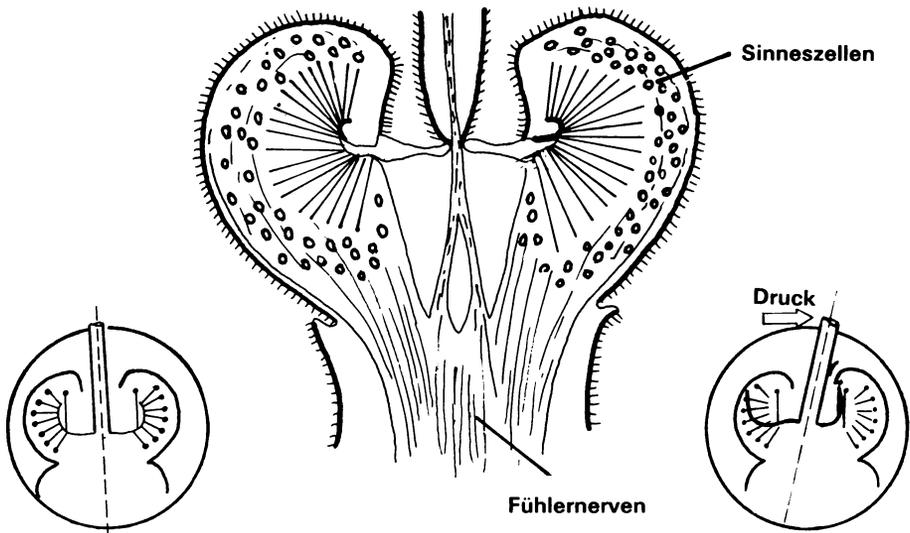
Mückenmännchen antworten auf eine Luftschwingung von 400 bis 500 Hertz am empfindlichsten, 200 bis 300 Tage alte Moskitos hingegen empfinden im Frequenzbereich von 275 bis 700 Hertz den lockenden Liebesgesang am heftigsten. Beträufelt man jedoch die Insektenfühler mit einem Tropfen Lackfarbe, dort, wo sich das Johnstonsche Organ befindet, geht das Interesse gegenüber dem Weibchen sofort verloren.

Weiterentwickelte Varianten der winzigen Tastaare sind an Fischen und auch an Säugetieren vorzufinden. Der „Schnurrbart“ des Welses ist mindestens ein solch sensibles Tastorgan wie die Fingerkuppe des Menschen. Tiefseefische verfügen bereits über Tastbarteln, die länger als ihr Körper sind.

Ein besonders verwunderlicher Anblick ist die im Aquarium herumstöbernde Rotbarbe. Während des Schwimmens hat sie die Barteln eng an den Kopf angelegt, doch wenn sie am Boden des Aquariums nach Nahrung sucht, breitet sie die Tastorgane aus und sucht während des Schwimmens alles ab. Da sich in ihren Barteln ein besonde-



Beim Erklingen des Normaltons a auf einer Geige in einer mond hellen Sommernacht am Ufer eines Teiches kann man an einem besonderen Erlebnis teilhaben. Innerhalb von einigen Minuten wird sich um die Schallquelle eine riesige Mückenwolke bilden. Die Schwingung der Geigensaite wird gleichfalls von den Fühlern der Mücke empfangen, wobei das an der Wurzel des Fühlers befindliche, an einen aufgeblasenen Autoreifenschlauch erinnernde, winzige Johnstonsche Organ die Schwingungen in elektrische Signale verwandelt. Das rasterelektronenmikroskopische Bild veranschaulicht gut, daß sich der Fühler der Mücke wie ein Kugelgelenk an das Johnstonsche Organ anschließt (oben), wodurch er sich in jede Richtung frei bewegen kann (unten).



Das Johnstonsche Organ eines Moskitomännchens, welches sich am Ende der Fühlerwurzel befindet. Darin wird der Fühlerstiel von den Fühlerfäden ringförmig umgeben. Wird der Fühler aus irgendeiner Richtung einem Druck ausgesetzt, löst sich das zwischen den Fühlerfäden bestehende Kräftegleichgewicht auf. Auf Grund der elektrischen Signale kann das Insekt die Richtung und Stärke des Windes erkennen.

res Versteifungssystem befindet, verhält sich der am Boden befindliche Teil wie ein Gelenkband, wobei sich das senkrechte Stückchen wie ein Stäbchen versteift. Je höher der Fisch schwimmt, um so länger ist das Stück der Barteln, das sich versteift.

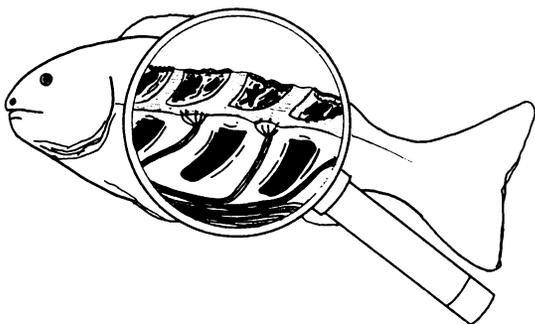
Von den im Wasser lebenden Säugetieren haben vor allem die Robben einen ansehnlichen Schnurrbart, womit sie selbst im trüben Wasser zwischen den Klippen ihre Nahrung finden. Über den längsten Schnurrbart verfügen Walrosse. Da sie sich von Muscheln ernähren, die im Schlamm des Meeresbodens vergraben sind, sind ihnen die sensiblen Tastbarteln bei der Suche nach den Muscheln eine große Hilfe.

„Abgetastete“ Wellen

Bei den Fischen hat sich zur Wahrnehmung der Schwingungen des Wassers ein eigentümliches Organ herausgebildet. Dabei handelt es sich um die „Seitenlinie“, deren ununterbrochene Linien sich im allgemeinen gut sichtbar vom Kopf des Fisches bis zum Schwanz hin entlangziehen. Die bisher durchgeführten Experimente bestätigen einheitlich, daß Fische damit die Wasserwellen und Druckveränderungen wahrnehmen. Der holländische Forscher Dijkgraaf wies bei Experimenten mit Elritzen nach, daß sich diese, wenn sie im Aquarium seitlich von einem Wasserstrahl getroffen wurden, in die Richtung des Wasserstrahls drehten. W. Wunder führte Experimente mit Hechten und Aalen durch, die ihres Augenlichts beraubt worden waren. Der hungrige Hecht nahm den flüchtenden

Beutefisch aus einer Entfernung von 5 bis 10 Zentimetern wahr und konnte die Beute noch erwischen. Der Aal hingegen verfolgte beharrlich eine in Bewegung gesetzte Attrappe im Aquarium. Elritzen „peilen“ ausschließlich auf Grund der Druckveränderungen mit erstaunlicher Genauigkeit die Stelle einer schwingenden Scheibe im Wasser an.

Die Seitenlinie ist im Grunde genommen ein elastischer Kanal, der sich unter der Haut des Fisches entlangzieht und durch winzige Nebenkanäle mit der Körperoberfläche und dem ihn umgebenden Wasser in Verbindung steht. In den Kanälen befinden sich kleine gallertartige Knoten (Cupula), die vom strömenden Wasser hin und her bewegt werden. Doch wie nimmt der Fisch die Druckveränderung im Wasser wahr? So wie ein Ball, der im hohen Gras hin und



Die „Seitenlinie“ der Fische nimmt die Druckveränderung des Wassers wahr. Der sich unter der Haut entlangziehende Kanal ist durch dünne Nebenarme mit der Oberfläche des Körpers verbunden. Wenn Wasser den Kanal durchfließt, wird dies von den darin befindlichen kleinen, gallertartigen Knötchen empfunden. Die Seitenlinie nimmt vorwiegend Druckveränderungen wahr, die in paralleler Richtung auf sie einwirken.

her bewegt wird, das unter ihm befindliche Grasbüschel zum Schwanken bringt, so liegt auch die Cupula auf einer Gruppe von Sinneszellen. In jeder Gruppe ist die längste Sinneszelle bloß 7 Mikrometer lang, der Durchmesser beträgt 15 Mikrometer. Die sich daran anschließenden 35 kürzeren Sinneszellen sind stufenweise wie Orgelpfeifen angeordnet.

Kippt die gallertartige Cupula durch die Wasserströmung um, werden dadurch die „Stufen“ der Sinneszellen zusammengedrückt, wodurch aus den Sinneszellen eine sich verringernde elektrische Spannung in das Gehirn des Fisches strömt. Beim Umkippen der Cupula in entgegengesetzter Richtung öffnen sich die Sinneszellen fächerförmig, wodurch ein anwachsender Spannungsdruck entsteht. Aus dem jeweiligen Zustand des Spannungsdrucks kann der Fisch auf Richtung und Geschwindigkeit der Wasserströmung schließen. Das ist für ihn um so leichter, da er an beiden Seiten über eine „Stufenreihe“ verfügt, so daß von den beiden Seiten stets eine den Reiz wahrnehmen kann. Nach elektrischen Messungen von A. Sand ist mit Sicherheit anzunehmen, daß die Sinneszellen der Seitenlinie die Druckveränderungen so schnell registrieren und anzeigen, daß sie selbst Schall-schwingungen im Wasser ermitteln können. Höchstwahrscheinlich ist auch, daß der Fisch den mit der Seitenlinie erfaßten Infraschall lediglich als Schwingung wahrnimmt, denn für die eigentliche Hörwahrnehmung steht ja im Innenohr ein vollständiges schwingungsanalytisches System zur Verfügung.

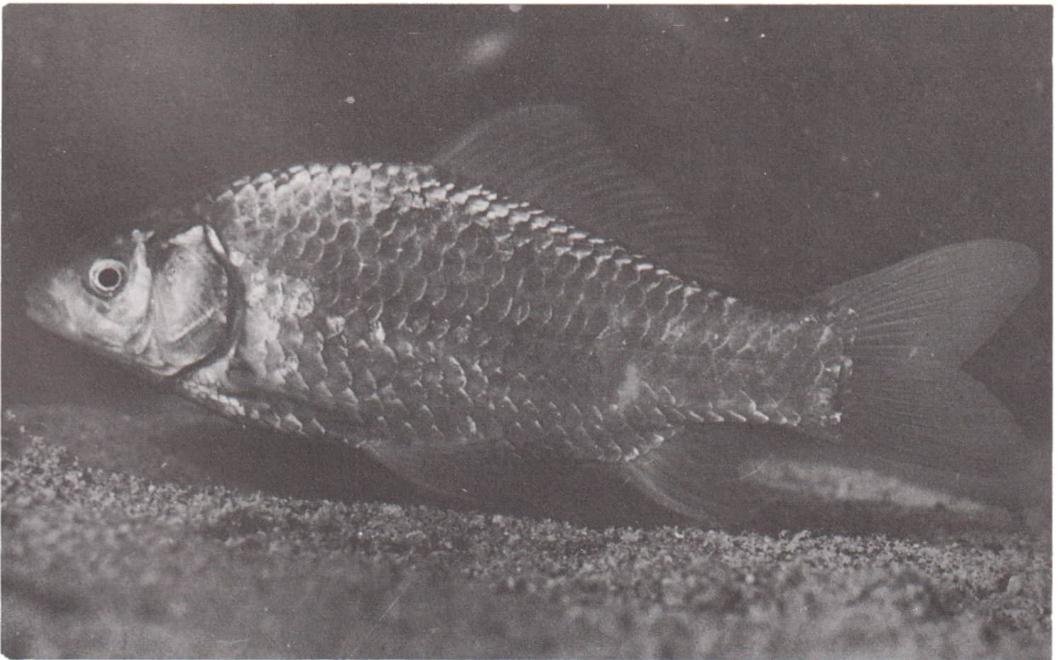
Der sowjetische Forscher W. R. Pro-tassow und seine Mitarbeiter untersuchten eingehend die Druckempfindlichkeit der Seitenlinie von Fischen. Die

Forscher entfachten mit einer schwingenden Membrane Wellen an der Wasseroberfläche eines Aquariums, wobei sie an den zur Familie der Karpfen gehörenden Schleien und Rotaugen Untersuchungen durchführten, in welcher Tiefe sie die Schwingungen an der Oberfläche noch bemerken. Aus diesen Untersuchungen konnten verblüffende Erkenntnisse gewonnen werden: Fische nehmen Wellen an der Oberfläche um so leichter wahr, je kleiner der Winkel zwischen ihrer Seitenlinie und der Fortbewegungsrichtung der Wellen ist.

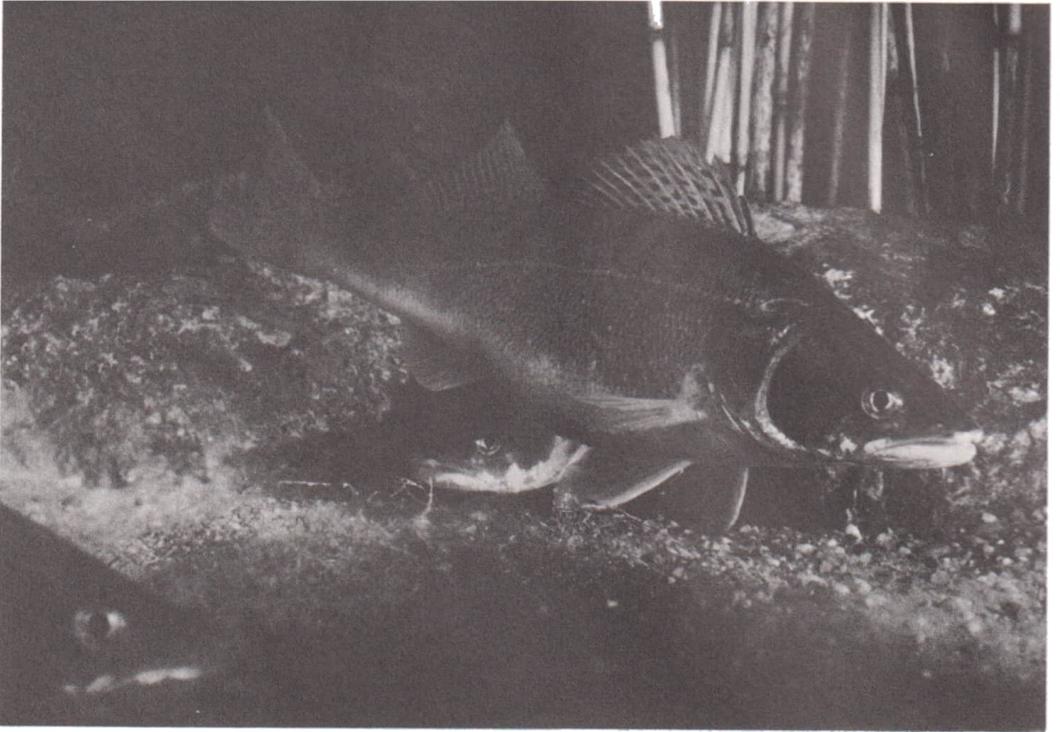
In der Experimentiereinrichtung wurden 100 Millimeter lange und 7 Millimeter hohe Wellen erzeugt. Die Schleie erkannten die Bewegung an der Oberfläche bereits in einer Tiefe von 177 Millimetern, wenn sich die

Wellen genau parallel zur Seitenlinie fortbewegten. Wenn sich jedoch die Richtung der Wellen von der Längsachse ihres Körpers wegbewegten, nahm ihre Empfindsamkeit sogleich ab. Zur Seitenlinie senkrecht ausgerichtete Wellen nahmen die Fische unter Wasser überhaupt nicht mehr wahr. Aus Berechnungen der sowjetischen Wissenschaftler geht hervor, daß Schleie mit der Seitenlinie schon dann Schwingungen spüren, wenn die Wasserpartikelchen durch die Einwirkung der Wellen an der Oberfläche bereits in eine Bewegung von nur 1 Mikrometer geraten.

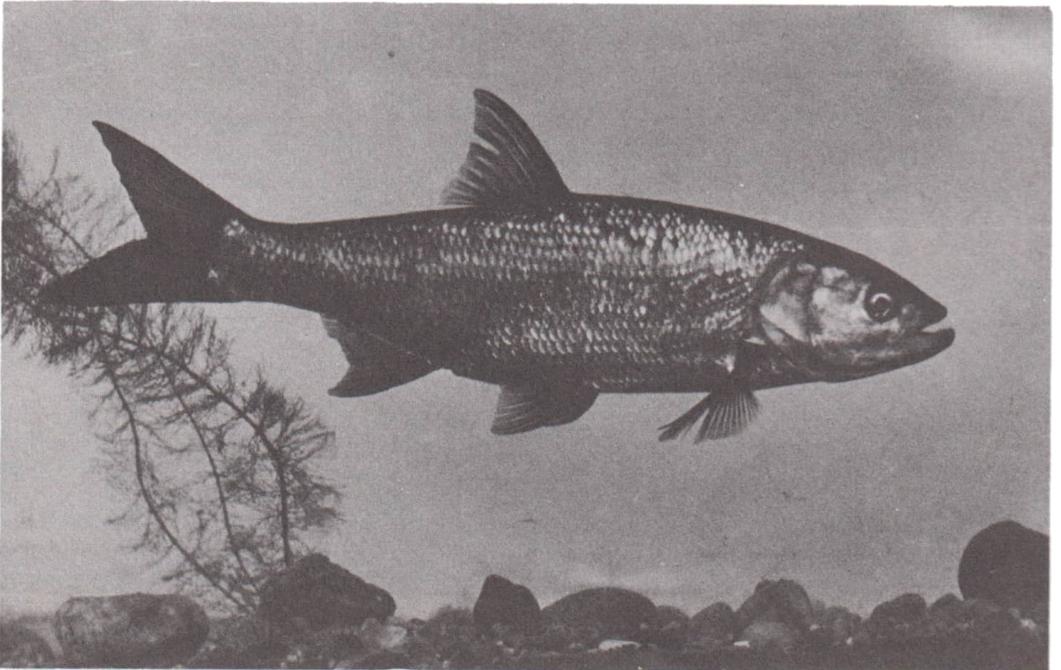
Bei den Untersuchungen stellte sich auch heraus, daß das Rotauge noch sensibler ist. Dieser Fisch bemerkte 9 Millimeter hohe und 4 Hertz starke Oberflächenwellen, die sich mit der Seiten-



Die Seitenlinie ist an den in unseren heimischen Gewässern verbreiteten Silberkarauschen gut zu sehen.

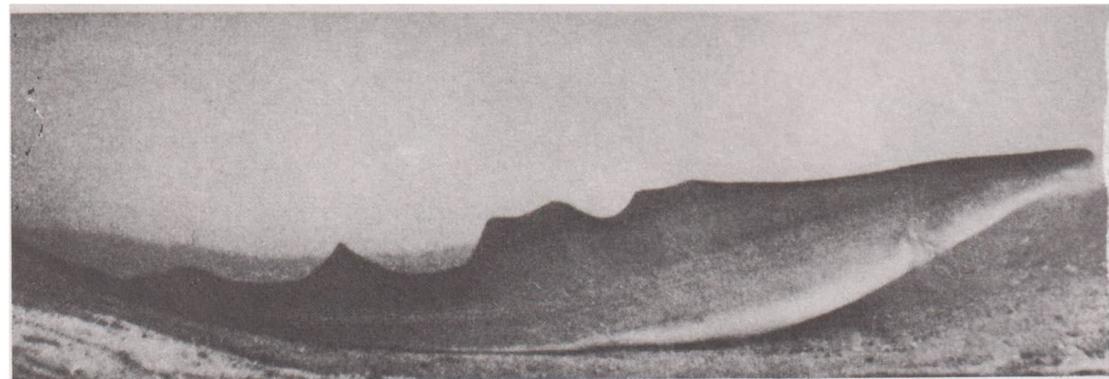
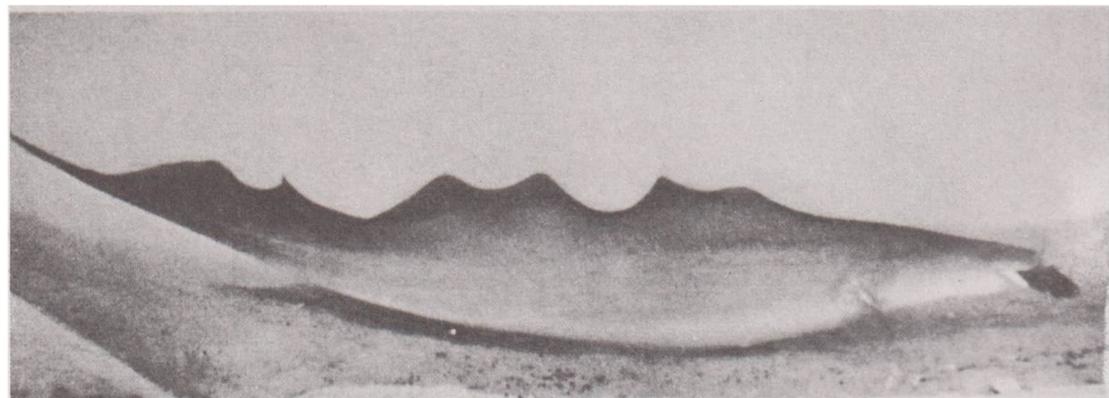
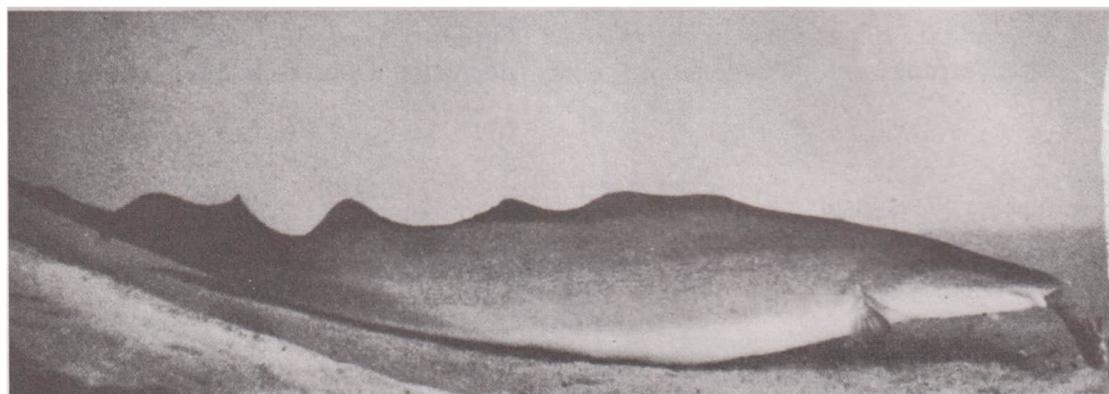
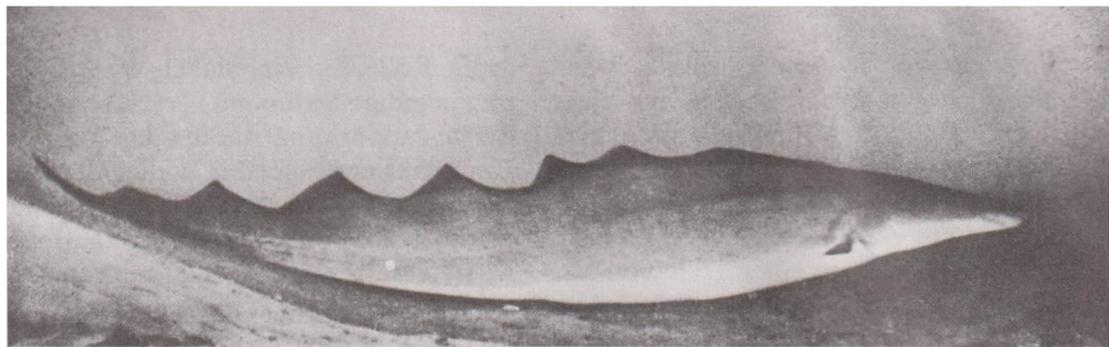


Raubfische schätzen mit großer Genauigkeit die Entfernung zu ihrer Beute mit Hilfe ihrer Seitenlinie ein. (Oben auf unserem Bild ein Zander, unten ein Rapfen.)



linie parallel bewegten, bereits, wenn sich die Wasserpartikelchen in einer Tiefe von 200 Millimetern in einem Ausschlag von 70 Nanometern neben der Seitenlinie bewegten. Messungen zufolge merken bestimmte Meeresfische sogar noch in einer Tiefe von 500 Metern, wenn an der Oberfläche 3 Meter hohe und 100 Meter lange Wellen parallel über sie hinwegziehen. Diese Sensibilität spielt vermutlich in der Orientierung der Wanderfische eine

große Rolle. Es gibt nämlich Winde, die eine ständige Strömung verursachen, in deren Auswirkung die an den Küsten von Afrika entstehenden Wellen den Atlantischen Ozean durchqueren und in direkter Richtung die amerikanische Küste erreichen. Die Fische brauchen sich also nur nach diesen ständigen „Wellenstraßen“ zu richten, um sich zu orientieren. Die endgültige Klärung der Funktion der Seitenlinie hält vermutlich noch viele Überraschungen bereit.



„Wer kann was?“ in der Tierwelt

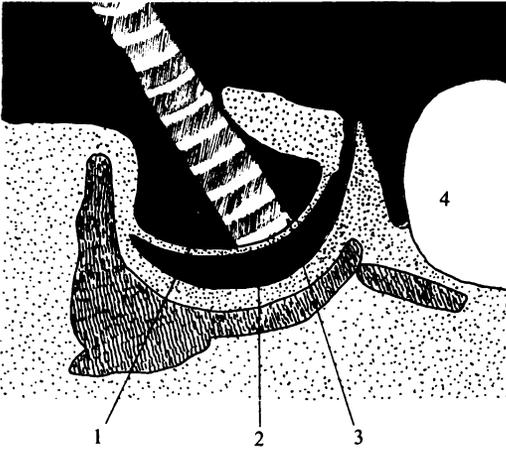
Würde man einen Wer-kann-was-Wettbewerb in der Tierwelt veranstalten, fände man keine einzige Tierart, die nicht übereinsinnreiches Patent verfügte. Im Kampf ums Dasein hat jedes Tier im Laufe von Jahrmillionen zur Bewältigung der Schwierigkeiten die geeignete Lösung gefunden, um am Leben zu bleiben und sich zu vermehren. Für uns Menschen sind vor allem jene millionenfachen „Patente“ am sinnreichsten, die selbst von der fortgeschrittenen Technik unserer Zeit noch nicht vollends nachgestaltet werden konnten, oder wir verwenden dazu völlig andere Mittel oder Mechanismen als die Tierwelt. Von diesen besonderen Patenten wollen wir jetzt einen Strauß präsentieren, der vielleicht ähnlich wie die Vielfalt in der Welt der bunten Blumen vermuten läßt, daß in der Natur noch viele interessante Ideen darauf warten, entdeckt zu werden.

Außergewöhnliche Sinnesorgane

Der Industrie gelang es erst in den letzten Jahrzehnten, Thermometer herzustellen, mit denen man die Temperatur von Objekten aus einer Entfernung von

10 bis 20 Metern mit einer Genauigkeitsabweichung von 0,1 bis 0,2 Grad Celsius messen kann. Solche tragbaren Infrarotgeräte werden beispielsweise zur Messung gefährlicher Übertemperaturen verwendet. Einige Schlangen hingegen verfügen bereits seit Jahrmillionen über ähnliche „Fernthermometer“. Bei den den Vipern verwandten Grubenottern befindet sich an beiden Seiten des Kopfes, zwischen Augen und Nasenlöchern, je eine Sinnesgrube. Das sind die sogenannten Grubenorgane. Jede Grube ist mit einer 0,025 Millimeter dünnen Haut in zwei Hälften geteilt. Dabei nimmt die eine Hälfte die ständige Temperatur der Umgebung wahr, während die andere Hälfte die daraufstrahlende Wärme empfindet. Auf Grund des dabei eintretenden Temperaturunterschieds gelangt ein entsprechendes Signal in das Gehirn der Schlange. Grubenottern sind dadurch in der Lage, selbst Temperaturunterschiede von 0,001 Grad Celsius wahrzunehmen. Dieses Doppelsinnesorgan ist imstande, die Ursprungsstelle der Strahlenquelle selbst im Dunkeln bei der Jagd auf die kleinen Nagetiere einzuschätzen. Im Laufe eines Experiments wurde eine Halysschlange ihres Augenlichts,

Der Körper des Nilhechts ist mit unsichtbaren elektrischen Feldlinien umgeben, wenn seine elektrische Ortung in der Sekunde 300 Signale ausstrahlt. Wird der gleichmäßige Rhythmus dieser Feldlinien durch einen ahnungslosen Fisch gestört, geht der Nilhecht zum Angriff über. Die Bildfolge zeigt, daß die Begegnung für den kleinen Fisch tragisch ausgeht.



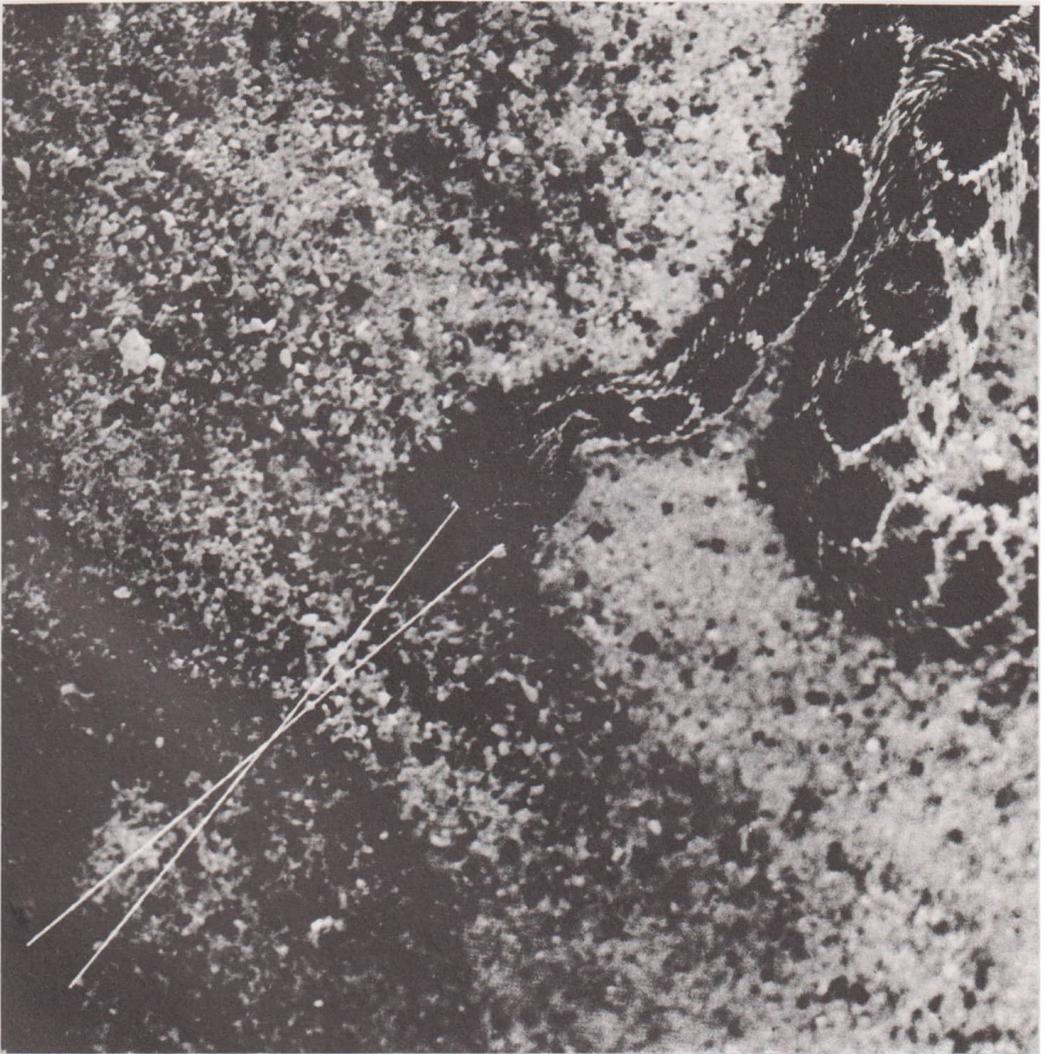
Bei den Schlangen der Familie der Grubenottern befindet sich vor dem Auge eine 3 Millimeter tiefe Grube: das Organ für die Wärmemessung. Die Strahlen erwärmen das Häutchen, auf dem sich Sinneszellen befinden. Die Schlange „mißt“ die Energie der infraroten Strahlen im Verhältnis zur normalen Temperatur der sie umgebenden Luft. 1 – wärmeempfindliches Häutchen; 2 – normale Luft; 3 – erwärmte Luft; 4 – Auge.

ihres Gehör- und Geruchssinns beraubt. Sie bemerkte aber, wie eine in schwarzes Papier gewickelte brennende Glühlampe nahe an sie herangehalten wurde. Ihr Biß traf sicher das Ziel. Den amerikanischen Forschern Th. Bullock und R. Cowles zufolge reagiert das „Thermometer“ der Schlange gegenüber 0,01 bis 0,15 Millimeter langen Infrarotstrahlenwellen am empfindlichsten.

Bestimmte Fische hingegen sind insbesondere gegenüber schwachen elektrischen Feldern empfindsam. Der Nilhecht, der mitunter eine Länge von 1,5 Metern erreicht, unterzieht seine Umgebung mittels permanenter schwacher elektrischer Entladungen einer Kontrolle. Mit Hilfe seiner elektrischen Orientierung ist er sogar in der Lage, eine 2 Mil-

limeter starke Glasnadel im Wasser zu entdecken. Mit den Augen könnte er das nicht. Die amerikanischen Forscher S. A. Rommel und J. D. McCleave haben ermittelt, daß Aale sogar noch gegenüber elektrischen Feldern mit einer Spannung von 0,07 Mikrovolt sensibel sind. Werden die beiden Schenkel einer Trockenbatterie von 4,5 Volt 1 Zentimeter voneinander entfernt ins Wasser gesteckt, entsteht ein um das Vierundsechzigmillionenfache stärkeres elektrisches Feld, als es von Aalen noch wahrgenommen werden kann. Forscher weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, daß Aale dadurch auf die vom Erdmagnetismus verursachte unwahrscheinlich schwache Elektrizität in den Meeresströmungen achten und diese vermutlich zur Orientierung auf ihrem mehrere tausend Kilometer langen Wanderweg nutzen.

Will der Fotoamateur gute Bilder aufnehmen, muß er zuerst mit dem Belichtungsmesser die von der Landschaft reflektierte Lichtstärke messen. Auch Reptilien verfügen über einen derartigen organischen Belichtungsmesser in der Mitte ihrer Stirn. Biologen bezeichnen dieses Organ als Parietalauge, weil es von oben mit einer dünnen transparenten Haut bedeckt ist und die Struktur weitgehend mit der des Auges übereinstimmt. Nach neuesten Untersuchungen orientiert dieses lebendige „Instrument“ die sonnenscheinliebenden Reptilien über die Lichtstärke. Nimmt die Lichtstärke der Umgebung zu, wird auch das Verhalten des Reptils lebhafter. Anderen Untersuchungen zufolge summiert dieses Sinnesorgan die Einstrahlung des ganzen Tages und gibt dem Tier ein warnendes Signal, wie lange es sich noch von der Sonne bescheinen lassen kann, ohne sich dabei

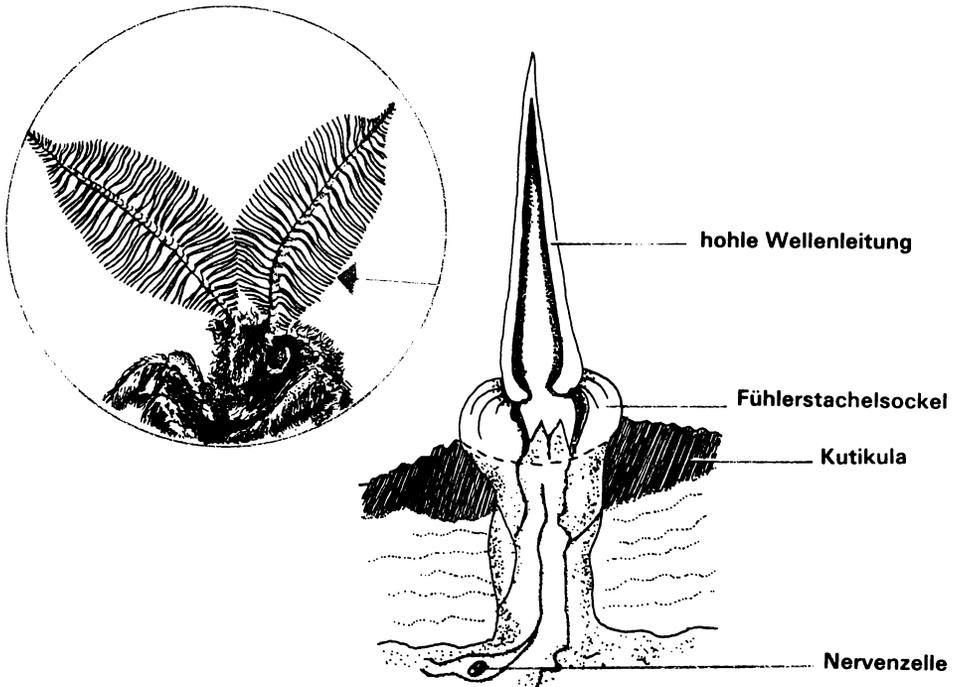


Grubenottern fangen die infraroten Strahlen mit wärmeempfindlichen Häutchen auf, die sich in den vor ihren Augen liegenden Grübchen befinden. Dieses Sinnesorgan unterstützt möglicherweise ihr schlechtes Sehvermögen. Wenn das zu Tode erschrockene Nagetier beim Anblick der Schlange instinktiv erstarrt, verrät es sich durch die Körpertemperatur. Da es sich bei dem Infrarotstrahlenfühler um ein Doppelorgan handelt, ist es möglich, daß die Schlange nicht nur die Richtung ihres Opfers, sondern auch dessen Entfernung bestimmen kann.

der Gefahr der Austrocknung auszusetzen.

Nachtfalter nehmen das Licht außer mit ihren Facettenaugen auch mit einem besonderen Organ wahr. In der Elektrotechnik werden zum Beispiel für

den Empfang von elektromagnetischen Wellen in bestimmten Frequenzen Hohlraumresonatoren eingesetzt. Dabei hängt es vom inneren Durchmesser und von der Wanddicke des Rohres ab, wie lang die elektromagnetischen Strah-



Lichtstrahlen sind eigentlich elektromagnetische Wellen. So haben sich an den Fühlern bestimmter Arten von Nachtfaltern winzige Sinnesfäden herausgebildet, die Licht auf elektrischem Weg empfangen. Diese Sinnesfäden sind in 150 bis 200 Gruppen auf dem Fühler gegliedert und funktionieren für das Insekt als „Alarmsignal“.

lenwellen sind, die vom Gerät empfangen werden. Über ähnliche Hohlraumresonatoren verfügen auch Nachtfalter. Auf ihren Fühlern befinden sich 0,07 Millimeter lange und 0,007 Millimeter starke kegelförmige Hohlorgane. Diese winzigen Organe empfangen die außerordentlich kurzen Wellenlängen der Lichtstrahlen nach dem gleichen physikalischen Prinzip. Untersuchungen von P. S. Callahan haben ergeben, daß die geometrischen, optischen, physikalischen und elektrischen Eigenschaften dieser Organe vollkommen mit jenen theoretischen Werten übereinstimmen, die auf Grund von mathematischen Berechnungen für den Bau eines solchen lichtempfindlichen Hohlraumresona-

tors ermittelt wurden. Dem Nachtinsekt dient dieses Instrument als Gefahrenanzeiger. Wenn in der Nähe im Dunkeln Licht aufblinkt, wird es sofort aufmerksam, egal was es gerade tut.

Mit dem Kompaß um die Erde

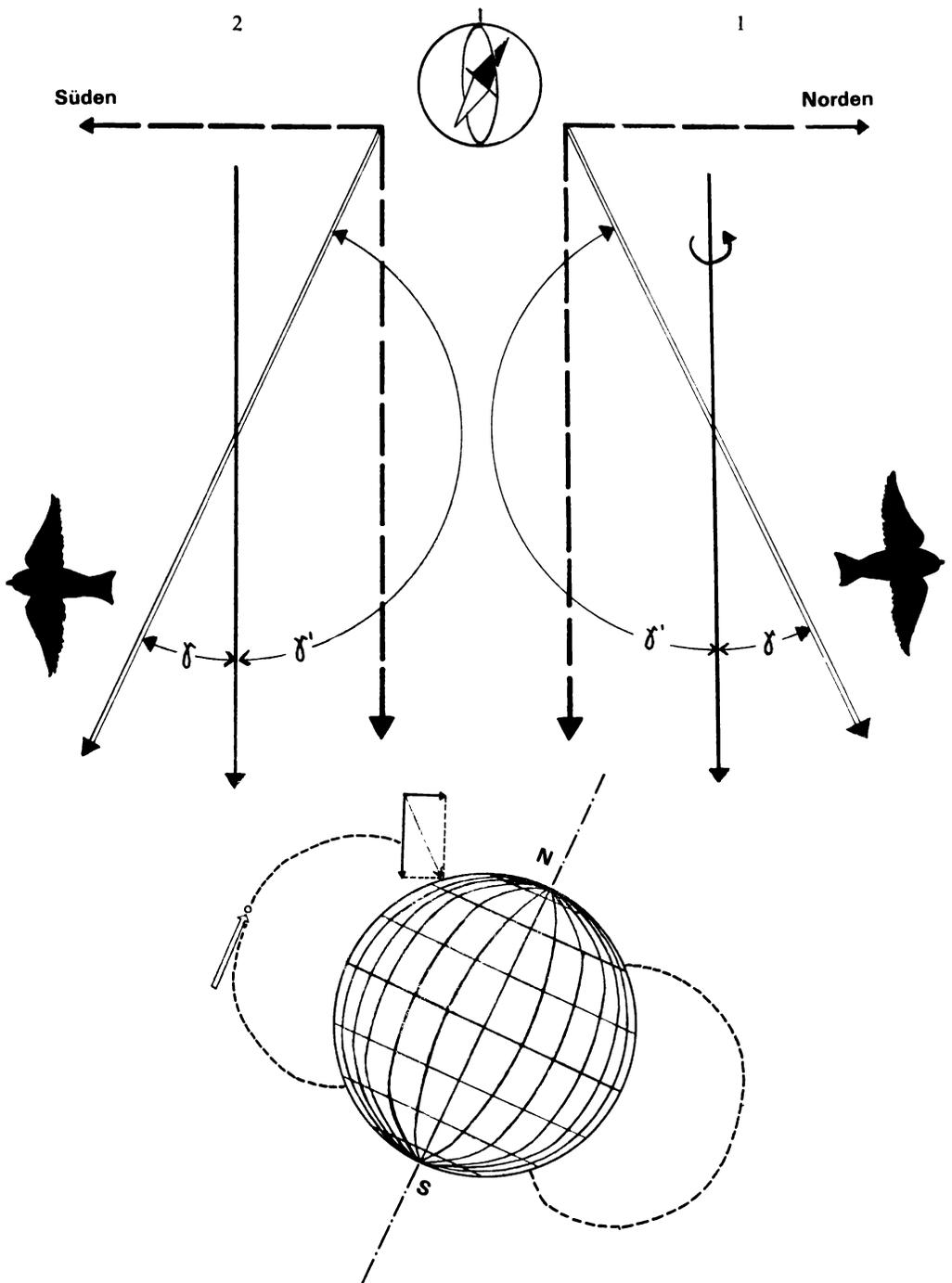
Mit welcher Genauigkeit orientieren sich Tiere, die sich nach der Sonne richten? Dafür sollen zwei Beispiele angeführt werden. Die mit Facettenaugen ausgestatteten Bienen beobachten während des Fliegens stets mit demselben Elementarauge die Sonne, wie auch der Schiffskapitän darauf achten muß, daß sich die Fortbewegungsrichtung des

Schiffes im gleichen Winkel zu der Kompaßnadel befindet. Die Biene korrigiert ihre Flugrichtung offensichtlich erst, wenn der winzige Leuchtpunkt der Sonne von einem Ommatidium auf das andere gleitet. Dabei schließen zwei Elementaraugen einen Winkel von ungefähr 1 Grad ein, was durch die Messungen von I. W. Buddenbrock bestätigt wurde: Bienen fliegen tatsächlich in einem Winkel von 1 Grad in Richtung ihres Zieles. Es gibt immer mehr Beweise dafür, daß sich Lachse sowie andere Wanderfische gleichfalls nach dem Stand der Sonne im offenen Ozean orientieren. Doch mit welcher Genauigkeit geschieht dies? Würden sie pfeilgerade zu ihrem Laichplatz zurückschwimmen, müßten sie den Berechnungen der amerikanischen Forscher S. B. Saila und R. A. Shappy zufolge innerhalb von ungefähr 600 Stunden zu Hause ankommen. Tatsächlich dauert die Reise bedeutend länger. Man geht deshalb davon aus, daß sich Lachse im großen und ganzen erst nach einer zurückgelegten Strecke von 40 Kilometern orientieren. Innerhalb dieses Abschnitts schwimmen die Fische in irgendeine unbestimmte Richtung. Und erreichen sie trotzdem ihr Ziel? Auf Grund eines entsprechenden Modells konnte mit Hilfe eines Computers ermittelt werden, daß von 100 „theoretischen Lachsen“ 60 die ihnen bekannten Flußmündungen trotz des unsicheren Herumstreifens erreichen, von denen sie der Geruch des heimatlichen Baches weiterleitet. Anderen Schätzungen zufolge sind die tatsächlichen Chancen der Rückkehr in die heimatlichen Gefilde bedeutend ungünstiger: Von den sterbensmüden Lachsen erreichen vermutlich nur 10 bis 20 Prozent den Laichplatz; die Wirklichkeit wird wahr-

scheinlich in der Mitte der beiden Werte liegen.

Eine der ältesten Erfindungen des Menschen – der Kompaß – lehnt sich an die Wahrnehmung des Erdmagnetismus an. Der Kompaß weist stets in die Nordsüdrichtung. Auf welchem Punkt der Erdkugel wir jedoch stehen, das können wir nur mit einem Kompaß feststellen, dessen Nadel auch in senkrechter Richtung ausschlägt. Weist beispielsweise der Kompaß gegenüber der Horizontalen einen Winkel von 63 Grad aus, dann befinden wir uns ungefähr auf dem Breitengrad von Budapest. W. Wiltshko kam bei der Untersuchung der Ortung der Rotkehlchen zu der Feststellung, daß Vögel nicht nur den Erdmagnetismus „erspüren“ sondern sich auch danach während der Zeit des Vogelzugs richten. Ihr „innerer Kompaß“ nimmt sogar die magnetische Inklination wahr! So können sie leicht feststellen, auf welcher geographischen Breite sie fliegen. Wenn beispielsweise die Rotkehlchen im Herbst, während ihres Fluges nach dem Süden, in wärmere Gegenden ziehen, weicht ihr „innerer Kompaß“ im Vergleich zum senkrechten „Zug“ ihres Schwerpunkts in zunehmend größerem Winkel ab. Als im Verlauf eines Experiments Vögel in einem Stahlbehälter eingeschlossen und von einem künstlichen Magnetfeld umgeben und dabei die magnetischen Induktionslinien um eine senkrechte Achse von 180 Grad gedreht wurden, setzten die Vögel ihren Flug in entgegengesetzter Richtung fort.

Tauben orientieren sich gleichfalls mit Hilfe des Erdmagnetismus. Dies wurde durch die Experimente des amerikanischen Forschers R. Green im Jahr 1972 nachgewiesen. Er montierte kleine Elektromagneten auf den Kopf der Vö-



Der herkömmliche Kompaß richtet sich nur in waagerechter Lage nach den erdmagnetischen Kraftlinien aus, obwohl diese auch senkrecht wirken. Untersuchungen haben ergeben, daß sich das Rotkehlchen vermutlich auf der Grundlage dieses schräg ausgerichteten Magnetfelds orientiert. Wird das Magnetfeld um den Vogel künstlich gewendet, setzt er seinen Flug in entgegengesetzter Richtung fort. Wenn die Zugvögel die Inklination des Gravitationsfelds nicht wahrnehmen, wissen sie, daß sie sich über dem Äquator befinden.

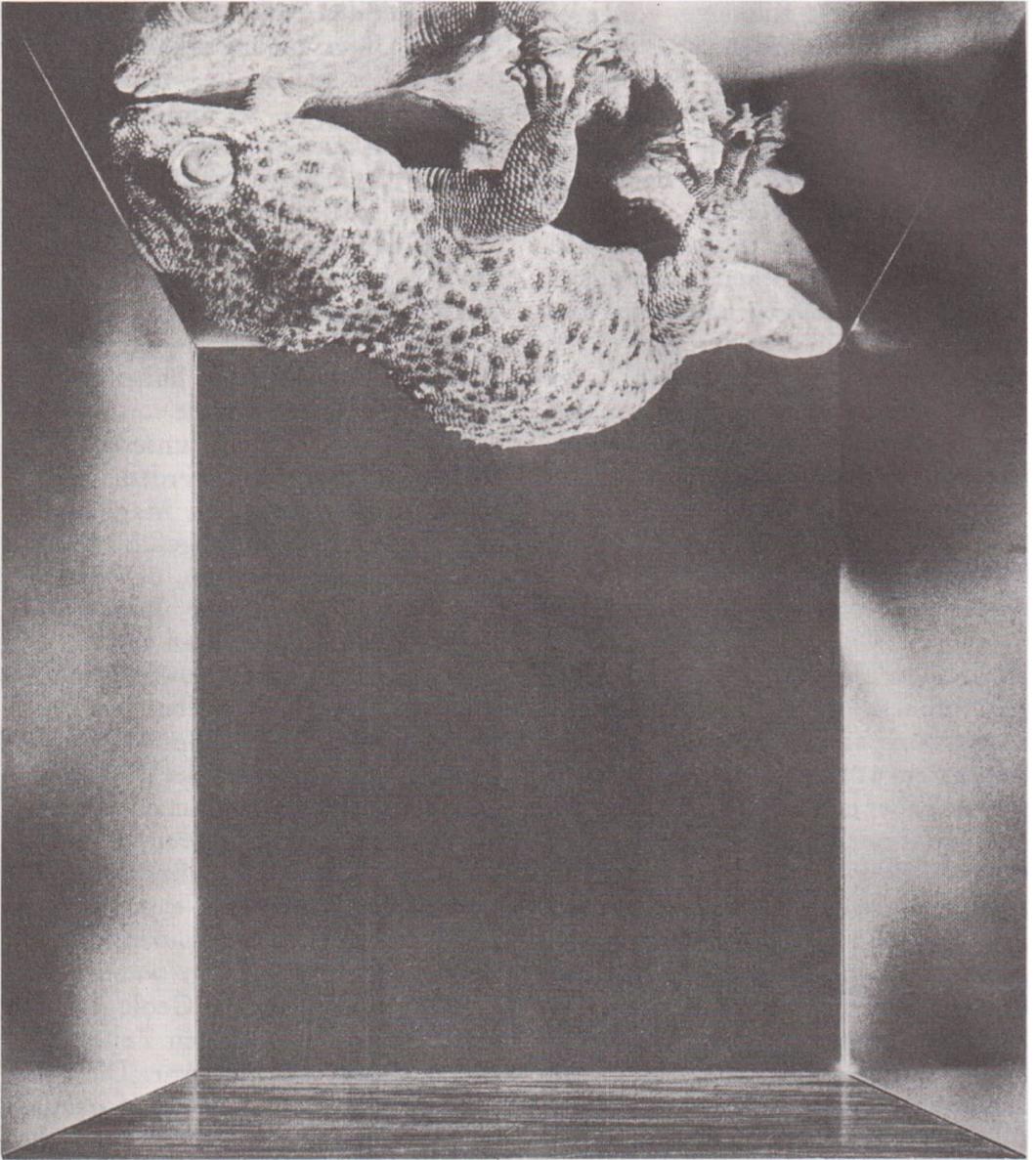
gel und ließ sie 80 Kilometer von ihrem Taubenschlag auffliegen. Wies der winzige elektromagnetische Nordpol in Richtung der Schädeldecke, flogen die Tauben den richtigen Weg. Wurden jedoch an der Spule die Pole der Stromquelle vertauscht, wodurch der Nordpol in Richtung des Schwanzes wies, flogen die freigelassenen Tauben geradewegs in die entgegengesetzte Richtung. Heute weiß man bereits, daß Vögel den Erdmagnetismus fühlen. Zuwenig ist jedoch noch darüber bekannt, wie sie ihn aufnehmen und wie sie sich mit seiner Hilfe orientieren.

Fortbewegung mit dem Kopf nach unten

Es wäre doch sicherlich ein merkwürdiger Anblick, wenn die Menschen in einem Büro an der Zimmerdecke entlanglaufen würden. In der Tierwelt ist so etwas aber eine alltägliche Sache. Mit dem Kopf nach unten laufen beispielsweise die Fliegen mit Hilfe ihrer am Fußende befindlichen winzigen blasenartigen Haftlappen. Dieser Saugmechanismus funktioniert nach dem gleichen Prinzip, das Gummigeschosse von Kinderluftgewehren an der Wand haften läßt. Die Luft entweicht unter den hohlen Gummischeiden, so daß der äußere Luftdruck die Scheiben an die Wand drückt. Bei den federleichten Fliegen ist diese Methode irgendwie noch verständlich. Doch worin besteht der Trick des überall in Südostasien gutbekannten Geckos? Diese Tiere jagen mit ihrem verhältnismäßig schweren Körpergewicht mit Leichtigkeit an der Zimmerdecke nach Insekten. Sie sind selbst an einer spiegelglatten Glasfläche imstande, sich, den Kopf nach

unten, mit den Füßen festzuklammern! Neueste Untersuchungen haben gezeigt, daß Geckos gleichfalls winzige Haftscheiben besitzen. An ihren Zehen befinden sich quer ausgerichtete Borstenhaakenreihen. Diese 0,09 Millimeter langen und 0,01 Millimeter starken Borsten bilden ein weiches „Bürstenpolster“. Am Ende jeder Borste befinden sich außerdem noch winzige 200 Nanometer starke Vertiefungen, die selbst an glattesten Oberflächen haftenbleiben. Ein solches Gefüge konnte von der fortgeschrittenen Technik unserer Tage noch nicht hergestellt werden. Gegenwärtig werden zwar mit Magnetschuhen Experimente durchgeführt, es ist aber nicht ausgeschlossen, daß das von den Geckos „erfundene Patent“ zur endgültigen Lösung führen wird.

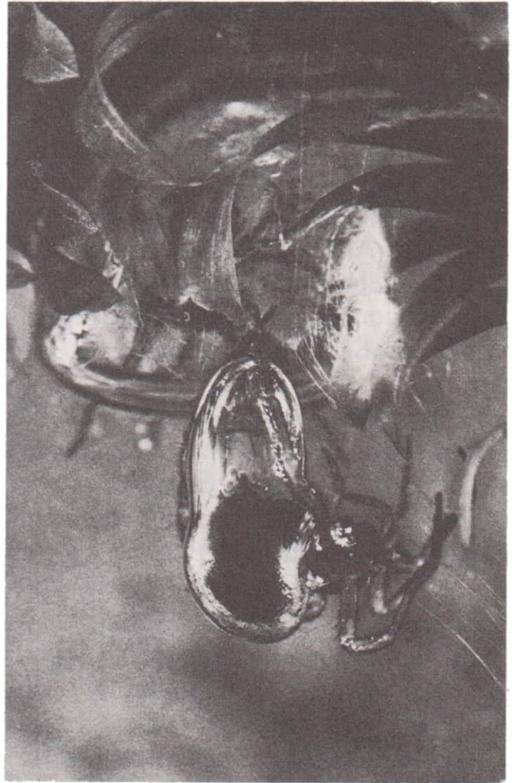
In der Tierwelt gibt es außerdem eine reichliche Anzahl von lebenden Bohreinrichtungen. Der englische Wissenschaftler und Erfinder der Rechenmaschine Charles Babbage machte bereits im vergangenen Jahrhundert auf ein besonderes Phänomen aufmerksam. Er stieß in der Nähe von Neapel, in Pozzuoli, auf alte Marmorsäulen, die von Bohrmuscheln angebohrt waren. Daraus schlossen später die Geologen, daß diese Gegend in früheren Zeiten vom Meereswasser bedeckt war. Diese besonderen Bohrmuscheln leben nämlich im Meer, wobei einzelne Arten mechanisch, andere hingegen chemisch bei ihren Bohrungen vorgehen. Die Steindattel ätzt mit einer bisher unbekanntenen Säure Löcher ins Felsgestein, befestigt dünne Fäden in diesen Bohrlöchern und bewegt dann mit dieser sogenannten Muschelseide (Byssusfäden) ihren Muschelkörper hin und her: Dadurch beseitigt sie das weich gewordene Steinmaterial. In der Familie der Doppelp-



Mit Hilfe der sich an den Zehen befindlichen Haftscheiben vermag der Gecko selbst an senkrechten Glasscheiben emporzuklettern. Es ist nicht ausgeschlossen, daß Ingenieure ähnliche „selbsthaftende“ Konstruktionen entwickeln könnten, gelänge es ihnen, solch feine Fasern, wie sie diese Haftscheiben besitzen, herzustellen.

schleichen, bei den Ringelechsen, sind gleichfalls Bohrmeister anzutreffen. Obwohl sie fußlos sind, bewegen sie ihren walzenförmigen Körper regenwurmähnlich, wodurch sie leicht nach vorn und hinten wandern können. Beim Anlegen eines neuen Ganges drücken sie ihren spindelförmigen Kopf in den Boden und bohren sich in das Erdreich, wobei sie ihre unterirdischen Gänge durch kreisförmiges Drehen und Auseinanderziehen ihres Körpers weiten und festigen.

Im Zeitalter der Kunststofftextilfaser gehört die Spinndüse zu den alltäglichen Erfindungen. Der Kunststoff fließt in mehr als 100 dünnen Fädchen durch die winzigen Löcher der Spinndüse, worauf die Fädchen aneinanderkleben, und, in der Luft erhärtet, den endgültigen Garnfaden bilden. Diese Herstellungstechnologie wurde von den Spinnen schon viel früher „erfunden“. Der Bonner Universitätsprofessor E. Kullmann entdeckte mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops den besonderen Spinnmechanismus der zur Ordnung der Webspinnen gehörenden Gliederfüßer. Aus den Untersuchungen ging hervor, daß das Produkt der Spinndrüse aus den winzigen „Düsen“ der Spinnwarze, welche die Spinndrüse bedeckt, ins Freie gedrückt wird und an der Luft zum festen, elastischen Faden erstarrt. Aus jeder Düse wird ein 10 bis 20 Nanometer starker Faden gepreßt. Wenn beide Spinnwarzen in Funktion sind, stellt die Spinne aus insgesamt 16 000 bis 40 000 Einzelfäden einen Garnfaden her. Ein ähnlich feines Gefüge wird von maschinell hergestellten Spinndüsen nicht annähernd erreicht. Und was dabei noch erstaunlicher ist: Jede einzelne lebendige Düse der Webspinne ist wie ein winzigkleines Fotostativ. Bei Been-



Die Wasserspinne bringt gerade eine neue Dosis Luft in ihr Unterwasser-„luftschiff“, das ihr als ständige Wohnung dient. Öffnet sie ihre gekreuzten Beine, schießt aus ihrem Körper die Luftblase durch die nach unten gerichtete Öffnung der „Taucherglocke“ in die Höhe und zerplatzt dort.

digung des Spinnvorgangs schiebt die Spinne ihre Düse so zusammen wie der Fotograf das Stativ seines Fotoapparats.

Von Menschen, die ins Wasser tauchen wollten, wurde vor langer Zeit die Taucherglocke erfunden. Wenn jemand solch einen nach unten geöffneten Behälter über den Kopf gestülpt bekommt, kann die Luft aus der „Glocke“ im Wasser nicht entweichen, sondern sie sammelt sich im inneren oberen Teil der Kuppel, so daß der Taucher unter Wasser atmen kann. Nach der gleichen Me-

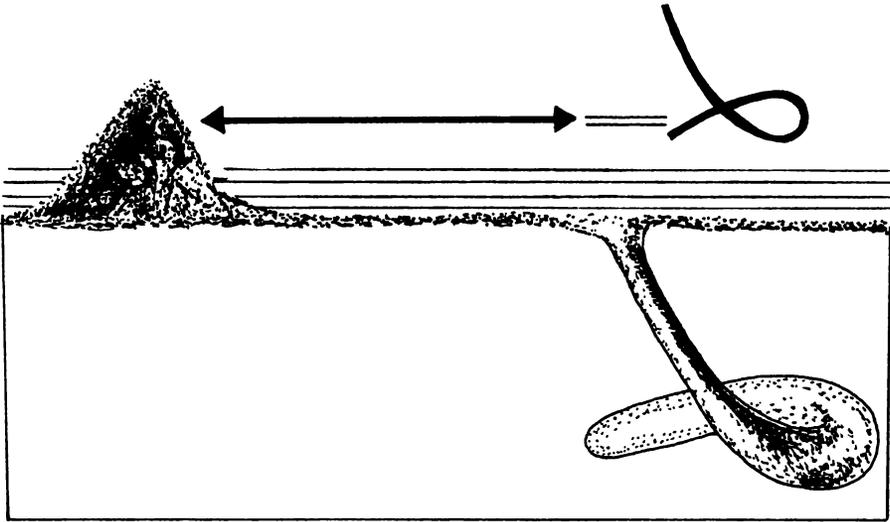
thode legt die Wasserspinne schon seit Jahrmillionen ihre ständige Wohnung an. Sie fertigt mit feinen Fäden in ähnlicher Form ein Netz zwischen Wasserpflanzen, wie es früher für Luftschiffe üblich war. Danach befördert sie von der Wasseroberfläche Luftblasen unter das Netz. Als Folge dieser Luftauffüllung entsteht unter dem Wasser eine Taucherglocke, in der die 17 bis 18 Millimeter große Spinne ihr ganzes Leben verbringt.

In immer mehr Büroräumen und Fabriken werden Klimaanlage eingebaut, die in den Räumen im Sommer wie im Winter angenehme Temperaturen gewährleisten. Auch in der Natur gibt es derartige „Lufttechniker“, die in vollkommener Weise die schwierigen Probleme der Luftregulierung gelöst haben. Eine afrikanische Termitenart, die *Macrotermes natalensis*, lebt in mehr als 2 Millionen Exemplaren in einem mittelgroßen Nest. Es ist verständlich, daß diese Termiten Bedarf an frischer Luft haben. Die Termitenburg ist 40 bis 50 Zentimeter dick, und die zementartigen Wände sind von einer großen Anzahl winziger Luftgänge durchzogen. Die Luft steigt von den tiefer liegenden Gängen nach oben und gibt die Wärme- und Kohlendioxidteile durch die schmalen „Kühlrippen“ ins Freie ab. Auf diese Weise stellen die Termiten einen Temperaturunterschied von 6 Grad Celsius im Nest zwischen dem „Keller“ und dem „Dachboden“ her. Die Luft bewegt sich in den Gängen mit einer Geschwindigkeit von 2 Millimetern in der Sekunde, was einer geringen Luftbewegung entspricht, und sicherlich kann sich keine einzige Termiten über Windzug beklagen.

Im Winter kann das Kühlwasser in den Kraftfahrzeugen leicht einfrieren.

Der vorsorgliche Kraftfahrer wird deshalb auf Frostschutzmittel zurückgreifen, um die Gefahr des Einfrierens zu umgehen. Die Ameisen wenden die Gefahr in ähnlicher Weise ab, indem sich ihr Körper bei einem Kälteeinbruch auf diese Gefahr einstellt: Sie durchsetzen ihre Körperflüssigkeit mit Glycerin. Jetzt vertragen die winzigen Insekten bedeutend niedrigere Temperaturen, ohne dabei zu erstarren oder zu erfrieren. Hundertfüßer wenden gegenüber ihren Angreifern ein besonderes Abwehrmittel an, in dem im Grunde genommen nichts anderes als giftige Blausäure enthalten ist. In jedem Körpersegment des Hundertfüßers *Apheloria corrugata* befinden sich zwei winzige Kolben: Der größere, die innere Kammer, ist insgesamt 0,7 Millimeter lang. Er enthält 0,001 Kubikmillimeter Benzaldehyd. Nähert sich ein Angreifer von irgendeiner Seite, öffnen sich die Körpersegmente, und die Flüssigkeit sickert in den benachbarten „Kolben“. Die hier vorhandenen Verbindungen treten in Aktion, und durch ihre Reaktion entsteht Blausäure. Das an den seitlichen Ventilen ausströmende giftige Gas hält die angreifenden Ameisen mindestens 20 Minuten lang fern.

Unzählige Ereignisse berichten über Schiffbrüchige, die, in den Wellen treibend, vom Durst gequält werden. Warum? Wasser ist ja in Unmengen vorhanden, und trotzdem kommt man vor Durst um. Sicherlich deshalb, weil das Meerwasser 3 Prozent Salz enthält und das menschliche Blut höchstens 1 Prozent verträgt. Gelangt viel Salz ins Blut, muß man ständig Wasser trinken, denn nur so kann sich der Organismus dem erforderlichen Verdünnungsverhältnis angleichen — wobei man aber daran zugrunde gehen kann. Seevögel



Der unterirdische Gang der Reiterkrebse ist genauso lang wie die Entfernung von seinem Eingang bis zu der aus Sand gebauten „Pyramide“. Der Krebs muß freilich unter den vielen anderen gleich aussehenden Pyramiden unterscheiden können, welche Richtung er vom Höhleneingang zu seiner Pyramide einschlägt. Weiß er das nicht, müßte er so lange im Kreis herumwandern, bis er auf sein Bauwerk stößt.

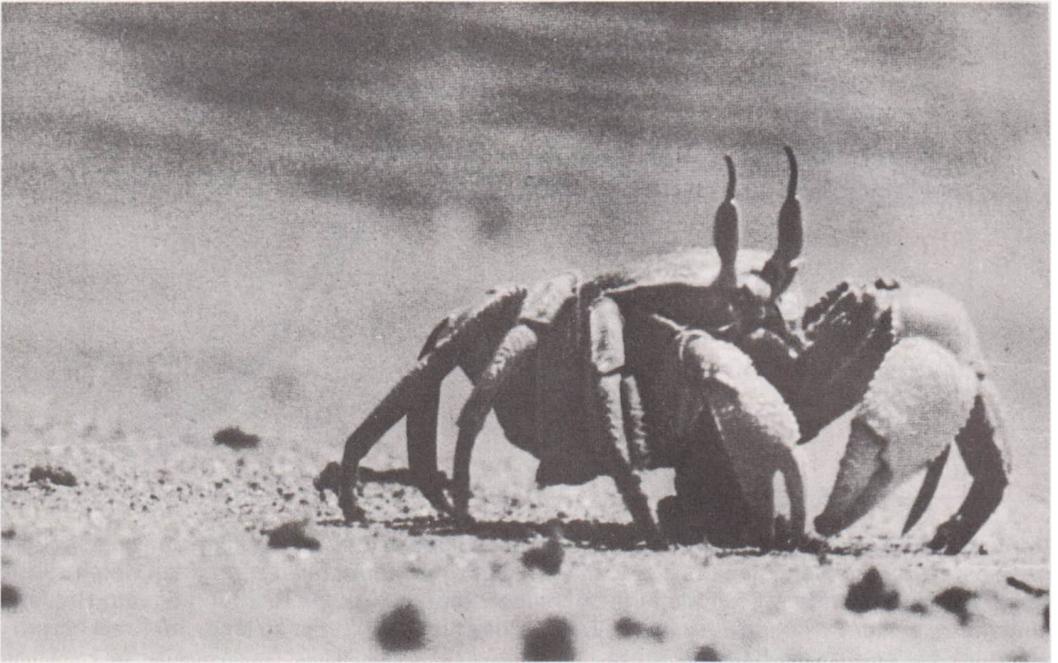
trinken trotzdem das salzhaltige Meereswasser, obwohl sich in ihrem Blut nicht mehr Salz befindet als in dem des Menschen. In welcher Weise wird das überschüssige Salz aus dem Meereswasser ausgeschieden?

Auf Grund der Untersuchungen des aus Norwegen stammenden Forschers K. Schmidt-Nielsen konnte festgestellt werden, daß sich im Schädel der Seevögel oberhalb der Augen besondere Drüsen befinden. Dieses eigenartige Filtersystem sondert das Salz nach dem Prinzip der Gegenströmung mittels winziger Kanäle aus dem Blut aus. Das Salz wird in Form von konzentriertem Salzwasser durch die Nasenöffnungen ausgeschieden. Im Verlauf eines Experiments wurden von einer Möwe 134 Kubikzentimeter Meereswasser getrunken, wobei sie keinerlei Schaden erlitt. Sie schied das Salz innerhalb von 3 Stunden aus. Vergleichsweise war das solch eine

Menge, als hätte ein Mensch 9 Liter Meereswasser getrunken.

Experimentelle Mathematik

In den Jahrmlionen ihrer Stammesentwicklung haben die Tiere eine Vielzahl mathematischer Aufgaben gelöst. Das bekannteste Beispiel hierfür ist die Wabenzellenform der Biene. Die sechseckige Form der „Weisen“ gilt bereits von vornherein als Muster der Vollkommenheit, da diese Prismenform unter Verwendung des geringsten Materialeinsatzes den größtmöglichen Rauminhalt bietet. Dieses Grundprinzip wird heute auch von Architekten angewandt. Wie soll ein sechseckiges Prisma verschlossen werden, um mit der geringsten Menge Wachs den größten Füllraum für Honig zu erhalten? Diese Aufgabe wurde von den Bienen in vollende-



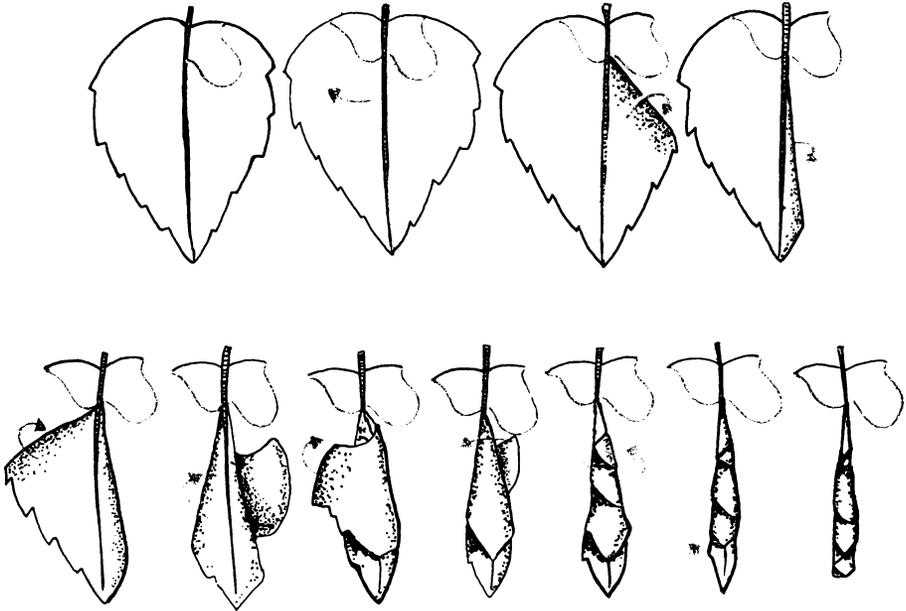
Der Reiterkrebs findet ohne Schwierigkeiten seine Sandpyramide am Meeresufer. Das „Zählen“ seiner Schritte wird vielleicht dadurch erleichtert, daß er weder nach vorn noch nach hinten kriecht, sondern seitlich krabbelt.

ter Weise gelöst: Die drei Rhombusflächen werden am Ende der Wabe „aneinandergeschweißt“, wobei jede Fläche an der Seite des Prismas einen Winkel von 120 Grad bildet. Als Mathematiker diese sogenannte Maximum-Minimum-Aufgabe berechneten, stellte es sich heraus, daß die Bienen diese Aufgabe richtig „gelöst“ haben.

Am Strand des Roten Meeres kann der Tourist fast überall auf spannhohle Bodenerhebungen blicken. Hier leben die Reiterkrebse; sie locken die Weibchen in ihre unterirdische Wohnung, indem sie mit der Errichtung derartiger „Bauwunder“ auf sich aufmerksam machen. Wie können aber die Krebse ihre Wohnungen unter den vielen anderen unterscheiden? Dazu verhilft ihnen die

Mathematik. Jeder Krebs legt seine kleine Burg so an, daß die Strecke von ihr bis zum Eingang der unterirdischen Behausung genau der Länge des schraubenförmigen Ganges der unterirdischen Wohnung entspricht. Wie die Tiere dies ermitteln, bleibt ein Rätsel, doch es ist durchaus vorstellbar, daß sie die entsprechende Länge in irgendeiner Weise empfinden.

Die tropischen Kegelschnecken mit ihren ausgefallenen Musterformen setzen die Museumsbesucher in Erstaunen. So viele Schnecken, so viele Musterformen. Außer den individuellen Formen ist allen Schnecken eine einheitliche Aufbaumethode gemein: die ineinandergreifenden Reihen der Dreiecke, die sich mit dunklen Farbrändern scharf ab-



Zwei meisterhafte Schnitte – und alles andere geht sozusagen von selbst. Der Birkenblattroller praktiziert dies bei den besonders geformten Schnittkrümmungen seit Jahrtausenden, wodurch dann das Blatt leicht „engerollt“ werden kann.

zeichnen. Wie hat sich dieses Muster herausgebildet? grübelten zwei englische Forscher. Sie stellten zunächst fest, daß dort, wo sich die beiden Farbstreifen am Schneckengehäuse treffen, kein einziger weiterläuft. Beim Wachsen des Schneckenhauses lagern sich besondere Farbreste an den Rändern ab, die sich erst in sichtbare Farben verwandeln, wenn die Dichte im Laufe des Wachstums der Schnecke eine bestimmte Stärke erreicht hat. Dieser Vorgang wurde unter Berücksichtigung der entsprechenden Daten in eine elektronische Rechenanlage eingespeist, worauf vom Computer ähnliche Musterformen gezeichnet wurden, wie sie an den Seiten der Kegelschnecken zu finden sind. Die Schnecke selbst trägt also in

keiner Weise zu dieser Musterbildung bei. Die „Mathematik“ ist hier lediglich das Ergebnis des Zusammenspiels der Wechselwirkung bestimmter Faktoren; in diesem Fall können wir bereits die „Kybernetik“ der Natur bewundern.

Zum Schluß wollen wir noch einen echten Mathematiker, den kleinen Birkenblattroller, erwähnen. Dieser 0,5 Zentimeter lange schwarzglänzende Käfer rollt aus Birkenblättern trichterförmige Tüten für seine Eier zusammen. Zuerst schneidet er die eine Seite des Blattes S-förmig bis zur mittleren Hauptrippe ein und dann in entsprechender Weise die andere Seite des Blattes. Danach rollt er die eine Blathälfte ein und wickelt die andere Seite darüber. So entsteht eine ideale Trich-

tertüte. Die Konstruktion der beiden Schnittlinien ist keine einfache Aufgabe, was jeder nachprüfen kann. Erst dem holländischen Wissenschaftler Huygens gelang es im 17. Jahrhundert mit Erfolg, eine entsprechende Kurvengleichung aufzustellen. Dem zur Familie der Rüsselkäfer gehörenden Birkenblattroller ist diese Lösung bereits seit Jahrmillionen bekannt. Wahrlich, er

hatte aber auch genügend Zeit zum „Experimentieren“. Wie viele Patente und Erfindungen liegen in der Tierwelt noch im verborgenen? Wer weiß es? Wer aber mit offenen Augen durch die Natur wandelt, kann sicher sein, daß er noch viele bemerkenswerte und interessante Anregungen findet, wodurch er selbst in die Reihen der Erfinder treten kann.

Inhalt

Zurück zur Natur	5	Auge in Auge mit dem Licht	119
Lebende „Unterseeboote“	8	Im Wasser versunkene Glas- kugeln	124
Elastische Ruder	11	An der Grenze zwischen Luft und Wasser	133
Schwebende Pelerine	14	Zwei Augen sehen in drei Rich- tungen	139
Was lehren uns Fische?	20	Tausendäugige Insekten	143
Achtung! Wir tauchen!	25	Wo ist die Rote?	151
Lebende Taucherglocken	30	Wenn die Nacht herniedersinkt	155
Mit gutem Wind zu fremden Ufern	33	Licht mit Luziferin	160
Mit trockenem Fuß über das Wasser	36	Tanzende Aufklärer	162
Vergebliche Suche nach dem Rad	39	Klänge um die Erde	169
Wieso kippt das Pferd nicht um?	41	Schwimmende Raspeln und Trommeln	170
Beine in der Luft	43	Was hört der Fisch?	174
Schreitende Maschinen	52	Sechsbeinige Geiger	181
Entschwundene Schritte	56	Sie übertreffen das Klavier	186
Lebende Katapulte	62	Die Botschaft des „magischen Auges“	191
Der Schnellkäfer drückt den Abzug ab	66	Zwei Melodien aus einer Kehle	194
Springende Dosen	69	Empfindsame Ohren	199
Wellen auf dem Festland	71	Der Mensch „redet mit“	203
Flügel auf dem Rücken des Piloten	79	Woher kommt der Schall?	208
Was hat die Fliege in ihren Achselhöhlen?	81	Erkundung des Raumes	211
Die Flügel beschreiben eine Acht	85	Stumme Symphonie	215
Der Frack des Tanzmeisters	91	Erstarrte Schnelläufer	216
„Entzweigebrochene“ Vogel- schwingen	94	Der Schrei kehrt zurück	219
Flaumleichte Bauelemente	99	Summende Fledermäuse	224
Abmagerungskur während des Fluges	102	Ein Pingpongspiel im Ohr	229
Menschenmuskeln und Vogel- geschwindigkeit	106	„Bildhaftes“ Hören	236
Achterbahn in der Luft	109	Verräterische Signale auf dem Wasser	240
Es fliegt . . . , es fliegt . . . der Fisch	115	Das Luftabwehrsystem der Schmetter- linge	245

Rufe unter Wasser 251
Der Delphin geht auf Jagd 252
Der „Schallreflektor“ 255
Klopfender Ultraschall 261
Verborgene Ohren 263
„Jetzt bist du an der Reihe!“ 265

**Beine mit Geruchs- und
Geschmacksorganen** 271
Witternde Fische 274
Ausrufezeichen am Pfad 281
Wenn Zucker nicht süß schmeckt 287

Verräterische Schwingungen 293
Es schwingt das Netz 293
Wenn der Wind weht 296
„Abgetastete“ Wellen 299

„Wer kann was?“ in der Tierwelt 305
Außergewöhnliche Sinnesorgane 305
Mit dem Kompaß um die Erde 308
Fortbewegung mit dem Kopf nach
unten 311
Experimentelle Mathematik 315