

Georg Glaeser · Werner Nachtigall

Die Evolution biologischer Makrostrukturen

Ein
Fotoshooting

 Springer

Die Evolution biologischer Makrostrukturen



Männchen der Frühen Adonislibelle (*Pyrrhosoma nymphula*). Die Männchen packen mit ihren Hinterleibszangen die Weibchen in der Kopf- oder Vorderbrustregion (Seite 148).

Georg Glaeser · Werner Nachtigall

Die Evolution biologischer Makrostrukturen

Ein Fotoshooting



 Springer

Georg Glaeser
Department of Geometry
University of Applied Arts Vienna
Vienna, Austria

Werner Nachtigall
Scheidt, Deutschland

ISBN 978-3-662-57825-4
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57826-1>

ISBN 978-3-662-57826-1 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Stefanie Wolf
Coverfoto: Georg Glaeser

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany



Unter dem linken Auge des Einsiedlerkrebse (*Clibanarius misanthropus*) ist das paddelartige Beinglied (vgl. Seite 56) zu erkennen, mit dem verbrauchtes Atemwasser aus der Kiemenhöhle gepumpt wird.

Der Blick auf ein Tier oder eine Pflanze kann unterschiedlich sein

Viele Menschen lieben die Schönheit der Natur. Wer biologisch näher interessiert ist, schaut genauer hin, nimmt womöglich sein Fernglas oder eine Lupe. Eine „eigene Spezies“ unter den Naturliebhabern ist der Naturfotograf: Er will das Gesehene nicht nur dokumentieren, sondern künstlerische Aspekte dazunehmen, ohne dass die wesentlichen biologischen Einzelheiten verloren gehen. Ziel ist ein aussagekräftiges und ästhetisch gestaltetes Foto.

Der „naiv freudvolle Blick“ auf die Natur

brachte den Mathematiker Georg Glaeser und den Biologen Werner Nachtigall zusammen. Beide sind begeisterte Naturfotografen und kennen einander schon vom zweiten Band der „biologischen Foto-shootings“, dem Buch über den Tierflug. Dabei wurde augenfällig, wie viele makroskopische, ja mikroskopische, Details hier hineinspielen – man denke nur an die Feinstruktur der Vogelfeder –, die aber bei der Darstellung von Flugvorgängen zunächst nicht näher berücksichtigt werden konnten.

Der Makrobereich – wenig bekannt, aber oft entscheidend

Für das vorliegende Buch haben sich die beiden Autoren nun genau diesen so unerhört vielseitigen Makrobereich vorgenommen, eine verborgene Welt, die nur wenige im Detail kennen, die aber genauso real ist wie unsere gängige Welt der großen Gestalten.

Vergleichen der unterschiedlichen Ausbildung von Organen

Das erste Hinschauen enthüllt erst einmal die Gestalt eines Tieres oder einer Pflanze. Die biologische Disziplin der Vergleichenden Morphologie befasst sich mit ihrer Beschreibung. Das erste Buch dieser Serie (Glaeser/Paulus: *Die Evolution des Auges*) zeigt, wie faszinierend so ein Vergleich am Beispiel der unterschiedlichen Ausbildung von Sehorganen sein kann.

Analysen von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

Tiere und in Teilen auch Pflanzen bewegen sich fort, teils mit hohen Geschwindigkeiten und gelegentlich mit unglaublichen Beschleunigungen. Das ist ein Feld für die Hochgeschwindigkeitsfotografie. Im Buch *Die Evolution des Fliegens* haben Glaeser, Paulus und Nachtigall versucht, dem Leser und Betrachter am Beispiel des Flugs etwas von der Faszination der Bewegung zu vermitteln. Teleobjektiv und Serienkamera waren die Hilfsmittel.

Makrostrukturen unter der Lupe der Technischen Biologie

Makrostrukturen sind in den Biowissenschaften Strukturen jedweder Art, die mehrere Millimeter oder ganz wenige Zentimeter groß sind und an denen eine Funktion erkennbar ist. Für das genaue Betrachten der Makrostrukturen braucht man eine Lupe, manchmal auch die schwache Vergrößerung eines Mikroskops. Gerade die Strukturen auf der Oberfläche von Lebewesen enthüllen sich damit in verwirrender und zugleich faszinierender Vielzahl.

Wir haben versucht, eine typische Auswahl davon unter dem Aspekt der Technischen Biologie zu beschreiben und dem Betrachter fotografisch näher zu bringen. Dabei kommen die Makro- und die Mikrokamera zum Tragen.

Evolution und Makrostrukturen

Feinstrukturen sind genauso den Vorgängen der Evolution unterworfen, wobei diese Prozesse nicht selten an den Rand des physikalisch Möglichen führen. Dieser Aspekt soll in diesem Buch immer wieder angesprochen und diskutiert werden.

Die biologische Evolution wird gerne als „Höherentwicklung“ dargestellt. Dabei verläuft sie nicht zielgerichtet, und ist schon gar nicht auf ein höheres Ziel ausgerichtet. Evolution bedeutet lediglich, dass ein betrachtetes System im Laufe der Generationen *andersartig* wird – in sehr kleinen Ausprägungen morphologischer, aber auch physiologischer und verhaltensphysiologischer Art.

Alles, was genetisch weitergegeben wird, kann variiert werden

Das kommt dadurch zustande, dass sich Erbinheiten (Gene auf Chromosomen) zufällig ändern können (solche Mutationen können etwa durch natürliche Strahleneinwirkung erfolgen) und dann durch die Vorgänge der Rekombination bei der Fortpflanzung zufällig auf die Nachkommen verteilt werden. Man kann davon ausgehen, dass derartige kleine Änderungsvorgänge im Erbgut bei jedem Individuum unablässig ablaufen.

Kein Nachkomme ist vollständig identisch mit seinen Eltern

Die Änderungen sind im Allgemeinen so unscheinbar, dass man bei seinen Nachkommen beim bloßen Hinsehen nichts davon merkt. Jeder Nachkomme ist in jedem einzelnen Fall „etwas Anderes“. Hat die geringfügige Änderung größere Fortpflanzungschancen zur Folge, spricht man von *evolutivem Erfolg*.

Im Grunde sind es also physikalische Parameter, die der Evolution Chancen geben, aber auch Grenzen setzen. Die Wichtigkeit der physikalischen Randbedingungen für Evolutionsvorgänge wird bisweilen unterschätzt.

Anregungen aus der Natur für die Technik

Viele Beispiele in diesem Buch gehören in den Bereich der Technischen Biologie. Diese versucht, das Sosein von biologischen Gegebenheiten unter Nutzung der Kenntnisse aus Technischer Physik und Technik zu erklären, jedenfalls besser verständlich zu machen als es ohne das Einbringen von Know-how aus diesen Disziplinen möglich wäre. Bei manchen Beispielen war das ganz offenkundig. So hätte man einen biologischen Roman darüber schreiben können, wie der Daumenfittich der Haustaube spezielle Flugmanöver ermöglicht; mit der physikalisch-technischen Abhängigkeit des Auftriebsbeiwerts vom Anstellwinkel ist dagegen eine kurze und bündige Beschreibung auf wenigen Zeilen möglich.

Bionik

Die umgekehrte Betrachtungsrichtung, die Bionik, ist in den letzten Jahrzehnten geradezu aufgeblüht. Die Natur hält eine unendliche Fülle von Anregungen bereit, die in die Technik hineinwirken können. Man muss allerdings die Übertragung auf angemessene Weise durchführen.





Von den in diesem Buch genannten Beispielen ist eine ganze Reihe schon bionisch umgesetzt worden. So etwa die Van-der-Waals-Haftung der Geckofüße (Seite 38) bei Klebebändern, die auch unter Wasser und auf öligen Oberflächen haften, das Daumenfittich-Federbüschelchen von Vögeln (Seite 101) in hochauftriebserzeugenden Vorflügeln bei Flugzeugen, der Bewegungsmechanismus in der Strelitzien-Blüte mit seinem Biegedrillmoment (Seite 152) bei sich selbstständig verstellenden Abschattungen für Fassaden.

Der Aufbau des Buchs

Ist wieder nach dem bewährten „Doppelseitenprinzip“ konzipiert: Im Normalfall ist eine Doppelseite einem bestimmten Thema gewidmet. Fotografien und/oder Skizzen erklären Sachverhalte, oft komplettiert durch eine mögliche Erklärung, wie sich die zugehörige Evolution abgespielt haben könnte. Der Vorteil des Doppelseitenprinzips ist, dass man das Buch nicht konsequent vom Anfang bis zum Ende durchlesen muss. Beginnt man willkürlich an irgendeiner Stelle, wird man beim zweiten Durchlesen natürlich auch die entsprechenden Querverweise nachschlagen.

Literaturzitate finden Sie in diesem Buch im Anhang. Obwohl wir uns textlich kurz gefasst haben, um die Bilder zur Wirkung bringen zu können, haben wir uns um Lesbarkeit bemüht. So haben wir Formeln und Massierungen von Zahlen vermieden und stattdessen auf geraffte Texte gesetzt. An mehreren Stellen sind auch Zeichnungen in einheitlichem Stil eingefügt. Diese hat Werner Nachtigall mit einem dicken Augenbrauenstift auf Runzelpapier gemacht, sodass automatische Einzelpunkte entstehen. Diese Vorlagen wurden dann stark verkleinert. So ergeben sich Skizzen mit einem ganz eigenen graphischen Charakter.

Die Texte stammen größtenteils von Werner Nachtigall, die Fotos mehrheitlich von Georg Glaeser, der auf das Fotografieren von Lebewesen in freier Wildbahn spezialisiert ist. Allerdings wurde auch auf das reichhaltige Archiv von Werner Nachtigall zurückgegriffen, wo auch Tier- und Pflanzenpräparate im Detail festgehalten sind. Gelegentlich kommen sogar Elektronenmikroskop-Aufnahmen dazu, die natürlich ausschließlich von solchen Präparaten stammen. Fotos am lebenden Objekt hatten jedoch nach Möglichkeit Vorrang.

Dank

gebührt Hannes F. Paulus, dem Koautor der beiden ersten „Fotoshootings der Evolution“, für seine kompetente Unterstützung bei der Artenbestimmung und so manchen Hinweis. Weiters danken wir für die Mitarbeit am Buch in alphabetischer Reihenfolge und ohne akademische Titel Daniel Abed-Navandi, Peter Calvache, Gudrun Maxam, Tamara Radak und Eugenie Maria Theuer. Frau Stefanie Wolf vom Springer Spektrum Verlag hat das Projekt sehr engagiert betreut.

Die Autoren wünschen ein genussvolles Lesen mit möglichst vielen „Aha-Erlebnissen“!



Kapitel 1: Form, Bewegung, Hebel

Einzelne Formteile durch Hebel bewegen 1

Was immer die Natur „konstruiert“, sie muss es erst einmal „in Form“ bringen. Formteile können eine schützende Funktion haben, doch sind sie selten wirklich starr. In Bewegung gebracht werden sie durch Muskelzug oder durch Änderungen des Innendrucks. Dabei spielt das Hebelprinzip eine Rolle, wobei sich etwa ungleicharmige Hebel finden, wenn es darum geht, einerseits weit schwingende Bewegungen zu erzeugen, andererseits große Kräfte zu übertragen.

Formteile	2
Gelenkige Panzer und Hebel	4
Spiralrollung	6
Schutz durch Abkugeln	8
Ameisen in Interaktion	10
Versteifung durch Innendruck	12
Schwell- und Streckapparate	14
Ausstülpbare Fühler	16
Sehen im Makrobereich	18
Hydraulik im Spinnenbein	20
Passives und aktives Wachstum	22
Scharnier- und Kugelgelenke	24
Beineinlenkung	26
Kinematische Ketten	28
Stülpmaul	30
Klickmechanik und Stachel	32
Das Gelenksystem der Insektenfüher	34

Kapitel 2: Haften, Filtern, Bohren

Strukturen miteinander verkoppeln 37

Bauteile müssen mechanisch belastbar sein. Bestehen sie aus Zelelementen, so ist dafür zu sorgen, dass diese gut aneinanderhaften. Oft müssen auch sehr unterschiedliche Strukturen miteinander verkoppelt werden, zum Beispiel ein Fliegenfuß und eine Blattoberfläche. Funktioniert die Verbindung zwischen Bauteilen, können auch komplizierte Strukturen aufgebaut werden, etwa Reusen und Bohrer. Diese sollen mit ihrem Material nun gerade keine Haftung eingehen. Auch Pollenhaftung im Haarkleid gehört in diese Kategorie.

Haftapparate	38
Klebrige Spinnennetze	40
Klebetropfchen des Sonnentaus	41
Koppelungsmechanismen	42
Sollbruchstellen	44
Grabschaufeln	46
„Sandreifen“	48
Bürsten	50
Bauch- und Beinsammler	52
Körbchensammler	53
Staubfilter und Dichtungstreifen	54
Reusen und Filter	56
Erdbohrer	58
Bewegliche Legebohrer und Giftstachel	60



Kapitel 3: Greifen, Dehnen, Falten

Nahrung greifen, verstauen, unterbringen 63

Bei der Fortbewegung und beim Nahrungserwerb spielt das Prinzip „Greifen“ eine zentrale Rolle. Man denke an das Hangeln eines Orang-Utans im Zweiggewirr oder an das blitzartige Beutegreifen einer Gottesanbeterin. Aufgenommene Nahrung muss verstaut werden, wofür sich Behälter dehnen. Momentan nicht gebrauchte Strukturen müssen auch irgendwie untergebracht werden; oft werden sie dafür zusammengefaltet, wie etwa die häutigen Flügel von Käfern.

Greifwerkzeuge	64
Kneifzangen	66
Injektionsspritzen und -kanülen	68
Greif- und Schabapparate	70
Widerhakensysteme	72
Federn und Schrauben	74
Dehnungsreserve	76
Membrankonstruktionen	78
Faltwerke	80

Kapitel 4: Signalisieren, schwimmen, fliegen, explodieren

Fluide sind im Prinzip gleichartig 83

Wenn sich Lebewesen bewegen, kann das auf dem Land geschehen, im Wasser oder in der Luft. Entsprechend unterschiedlich sind die Bewegungsorgane und damit auch ihre Makrostrukturen. Wasser und Luft sind, physikalisch betrachtet, Fluide und damit im Prinzip gleichartig. Somit ergeben sich auch für die Evolution gewisse gleichartige Randbedingungen, etwa die widerstandsmäßig optimierte Ausformung bewegter Körper, wie man sie beispielsweise bei Wasserkäfern sowie fliegenden und schwimmenden Vögeln findet.

Leuchtorgane und Signalflaggen	84
Oberflächenspannung (1)	86
Oberflächenspannung (2)	88
Strömungsanpassung	90
Die schnellsten Räuber unter Wasser	92
Vortriebsapparate	94
Schwimmen mit Schlagflossen	96
Fallschirme und Gleiter	98
Flügelkaskaden und Vorflügel	100
Explosionsmechanismen	102
Streudosen	104
Kokons	106
Am seidenen Faden	108



Kapitel 5: Speichern, Baulichkeiten, Baustoffe Zellulose, Chitin, Kalk als Baustoffe

111

Auch Tiere und Pflanzen „bauen Räume“, in denen sie zum Beispiel Substanzen speichern. Da gibt es Leichtbauten und Hochbauten, aber auch schwere Erdbauten. Sie alle müssen stabil sein; manchmal ist große Zugfestigkeit gefragt. Als Baustoffe verwenden Pflanzen in der Regel Zellulose-Substanzen, Tiere Chitin oder kalkhaltige Konstruktionen, wie zum Beispiel Knochensubstanz bei Wirbeltieren oder Kalkskelette bei Korallen.

Pflanzliche Tierfallen	112
Wasserspeicher	114
Lehmbauten	115
Schutzgehäuse	116
Baustoff Chitin	118
Stockwerks- und Spantenbauweise	120
Knochenkonstruktionen (1)	121
Knochenkonstruktionen (2)	122
Pflanzliche Leichtbauten	124
Pflanzliche Hochbauten	126
Flatterstabilität und Zugfestigkeit	128

Kapitel 6: Packungen, Anlagen, Entfaltungen Raumoptimiertes Stapeln

131

Als Verpackungen für empfindliche Strukturen, zum Beispiel für embryonale Anlagen, findet sich in der Natur eine Vielzahl von Elementen, gerade auch im Makrobereich. Flächenfüllungen und Raumpackungen – etwa bei Früchten und Samen – zeigen, wie die Natur raumoptimiert stapelt. Im Reifezustand müssen sich all diese Strukturen entfalten. Das kann durch Wachstumsvorgänge oder Druckerhöhung geschehen, auch durch Spannungsausgleich – siehe Blütenmechaniken.

Verpackungen	132
Raumpackung von Teilfrüchten und Samen	134
Raumpackungen (2)	136
Entfaltungseinrichtungen	138
Vorgefertigte Anlagen	140
Bestäubungsmechanismen (1)	141
Bestäubungsmechanismen (2)	142
Umweltsensoren	144
Antennen	146
Libellen – Weltmeister im Manövrieren	146



Kapitel 7: Man entdeckt immer wieder Neues Technische Biologie und Bionik

145

In den letzten Jahren hat die Erforschung des Makrokosmos mit all seinen unterschiedlichen Ausformungen und Anpassungen vielfältige Auswirkungen im Übergangsbereich von der Natur zur Technik gehabt. Die Natur unter strukturfunktionellen Aspekten zu erforschen, das ist Aufgabe der Technischen Biologie. Die Umsetzung der dadurch gewonnenen Erkenntnisse in die Technik besorgt die Bionik. In diesem letzten Abschnitt sind Beispiele für diese Problemkreise zusammengestellt.

Die Strelitzien-Blüte und ihr Biegedrillknicken	152
Die Ameisenbär-Kralle	153
Die Flügel großer Rochen	154
Flossensäume und Rückstoßprinzip	156
Superhydrophobie ...	158
... und das Schwimmfarn-Prinzip	159
Korrosionsunempfindliche Sandfisch-Schuppen	160
Der berühmte Lotus-Effekt	161
Der Elefantenrüssel ...	162
... und ein neuartiger technischer Greifarm	163



Zu den Bildern der Kapitel-Überschriften	164
Ausgewählte Literatur	165
Index	166

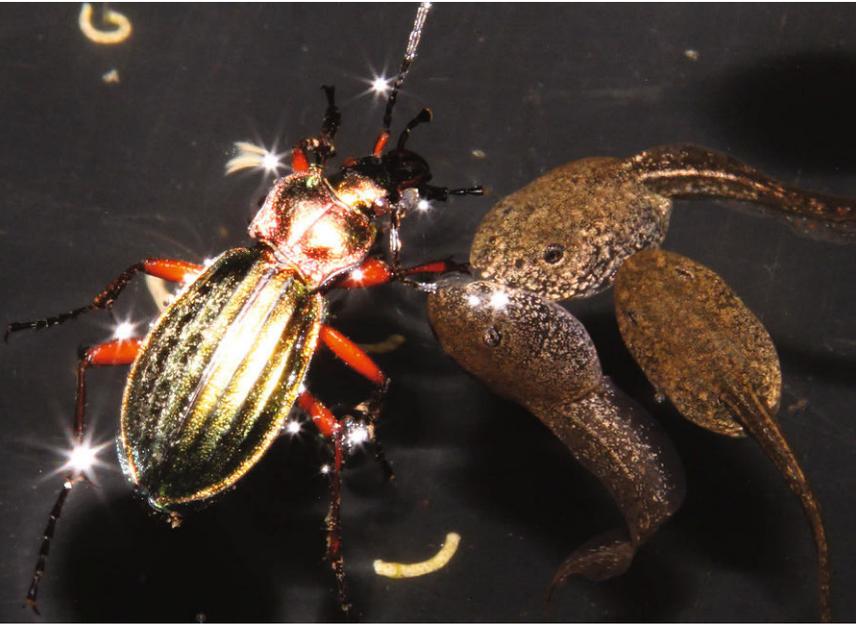




1 Form, Bewegung, Hebel

Einzelne Formteile
durch Hebel bewegen

Was immer die Natur „konstruiert“: Sie muss es erst einmal „in Form“ bringen. Formteile können eine schützende Funktion haben, doch sind sie selten wirklich starr. In Bewegung gebracht werden sie durch Muskelzug oder durch Änderungen des Innendrucks. Dabei spielt das Hebelprinzip eine Rolle, wobei sich etwa ungleicharmige Hebel finden, wenn es darum geht, einerseits weit schwingende Bewegungen zu erzeugen, andererseits große Kräfte zu übertragen.



Brustpanzer eines Laufkäfers

Dieser Panzer überdeckt die Brustregion, an deren Unterseite die drei Laufbeinpaare ansetzen. Er besteht – wie alle Insekten-Formteile – aus dem Werkstoff Chitin und ist aus mehreren embryonalen Anlagen zu einem in sich geschlossenen, stabilen Formstück verschmolzen. Dieses hat die Gestalt einer flachen Schale mit verstärkenden Randwülsten. An ihrer Innenfläche setzt eine Reihe von Muskeln an.

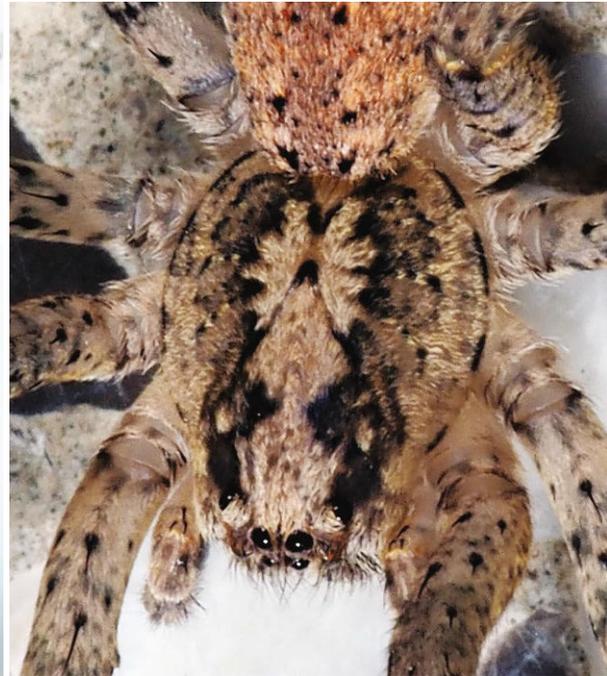
Solche Schalen sind auf Zug und Druck belastbar und beulungsstabil. Die Laufkäfer leben auf dem Boden, wühlen sich aber häufig auch in lockere Erde ein. Der Brustpanzer wirkt dabei zum einen wie eine Schaufel, bewahrt aber auch zum anderen die inneren Organe vor dem Druck der umgebenden Erdteilchen. Entsprechend hat ihn die Evolution massiver ausgebildet als bei nicht grabenden Formen, die sogar ans Wasser gehen können.





Kopf-Brust-Stück einer Spinne

Gliedertiere, zu denen die Insekten, Spinnen, Tausendfüßler und Krebse gehören, häuten sich in mehr oder minder regelmäßigen Abständen; nur während der Häutung wachsen sie. Die unter der alten Chitinhülle neu angelegte Außenschicht ist noch weich und dehnungsfähig und wird durch Erhöhung des Innendrucks etwas „aufgeblasen“. Erst dann härtet sie aus. Die Häutungstücke (unten) spiegeln die Körperformen in allen Einzelheiten wider. Beispielsweise befinden sich am Kopf-Brust-Stück einer Spinne die verstärkten und vertieften Leisten, an denen Muskeln ansetzen, ferner scheinbar



re Löcher, die „Augen“. In Wirklichkeit handelt es sich aber um zarte Membranen aus durchscheinendem Chitin: Die Augenoberfläche wurde mitgehäutet. In ähnlicher Weise werden beispielsweise die schlauchartigen Tracheenausstülpungen von Insekten mitgehäutet. An Häuten von Libellenlarven sieht man sie heraushängen, an weiße Reißleinen erinnernd. Der Baustoff Chitin dehnt sich nach dem Aushärten nicht mehr. Wenn das Tier während seiner Entwicklung wachsen will, muss es sich also zwischendurch häuten: Nachdem die Evolution bei einer Tiergruppe einmal auf den Baustoff Chitin gesetzt hat, sind Häutungen vorprogrammiert.

Gelenkige Panzer und Hebel

Beweglich verbundene Garnelenpanzer

Jedes einzelne Segment ist für sich gepanzert, aber die einzelnen Stücke sind gelenkig verbunden. Das kann man beim Essen eines „Krabbencocktails“ gut bemerken: Was man dafür einkauft, sind ja keine Krabben, sondern die hintere Hälfte mittelgroßer Garnelen. Dieser Hinterleib wird bei der Flucht in Sekundenbruchteilen fast bis zur Spirale gekrümmt, wodurch das Tier blitzschnell rückwärts springt, aber auch – insbesondere bei raschen Schwimmschlägen – blitzartig geradeaus gestreckt. Im Bild unten ist die Tanzgarnele *Cinetorhynchus rigens* zu sehen, die solche „tail flips“ recht häufig vor den Augen des Fotografen ausgeführt hat, Allerdings dauern solche Bewegungen nur wenige Hunderstel Sekunden: Die Felsgarnele braucht für den Vorgang in der Bildserie links nur 1/100 Sekunde (es wurde mit 1000 Bildern pro Sekunde gefilmt)! Auf der nächsten Seite sieht man ein bemerkenswertes teilweises Übereinstimmen dieser Bewegung bei einem großen Meeressäuger. Der Dugong unduliert mit der Wirbelsäule bis zur der Schwanzflosse, die Garnelen führen tail flips aus bzw. paddeln mit metachronen Bewegungen der Hinterleibsanhänge.

Wie bei einer Ritterrüstung

Gelenkig verbundene Panzerstücke hat die Evolution bei Gliedertieren häufig herausgebildet. Sie sind entweder ineinander verfalzt oder durch mehr oder minder dünne Gelenkhäute verbunden. Wie bei einer Ritterrüstung schützen sie die einzelnen Körperteile, gewährleisten aber weitgehende Beweglichkeit. Sie vereinen also gegenläufige Anforderungen und bieten damit ein evolutives Spielfeld für Optimierungen.

Das Werkzeugset der Garnelen

Zur Felsgarnele *Palaemon elegans* rechts (siehe auch S. xii): Nahe der Mundöffnung sind zwei Scherenpaare zu erkennen. Die vorderen Scheren mit der blaugelben Bänderung sind kräftig, die hinteren durchsichtig und sehr zart. Mit diesem Werkzeugset kann das Tier mikroskopisch kleine Nahrung, die im Algenrasen lebt, ergreifen, aber auch den eigenen Körper von störendem Aufwuchs reinigen. An den kurzen Hinterleibsbeinen kleben bei reifen Weibchen befruchtete Eier. Diese Beine schlagen regelmäßig hin und her und fächeln damit den empfindlichen Embryos stetig frisches Wasser zu.





Beschleunigung beim Dugong

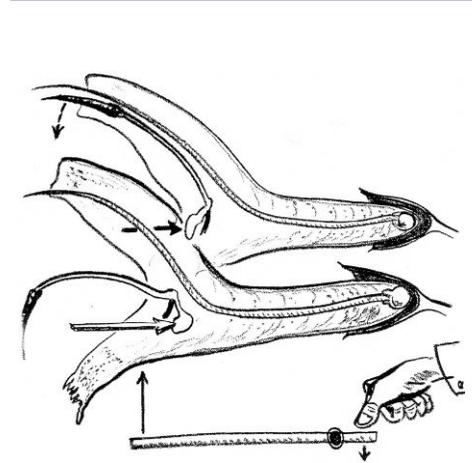
Der durchschnittlich 3 m lange Dugong vollführt eine teilweise vergleichbare Bewegung des Hinterleibs wie Garnelen und Lobster, um eine rasche Ortsänderung durchführen zu können: Auch dieses große Säugetier krümmt den Hinterleib fast bis zur Spirale, um ihn dann rasch geradeaus zu strecken. Wegen seiner Größe geschieht diese Bewegung um ein Vielfaches langsamer als bei den Garnelen.

Ungleicharmiger Hebel in der Salbeiblüte

Wenn unseren Wiesensalbei (*Salvia pratensis*) ein bestäubendes Insekt anfliegt, eine Biene oder eine Hummel, so senken sich die Staubblätter wie von Zauberhand und pudern die Oberseite des Tiers mit Blütenstaub ein. Sobald es nun zu einer älteren Blüte fliegt, an der die Fruchtblätter weit ausgewachsen sind und der Stempel mit der Narbe nach unten hängt, überträgt es den Pollen auf die Narbe und vollführt damit die Bestäubung.

Die Kippmechanik der Staubblätter funktioniert folgendermaßen: An einer Stelle sind die Blätter an einem zarten, verdrehbaren Auswuchs aufgehängt. Nach unten verbreitern sie sich in eine kräftige Platte, nach oben ziehen sie sich in den langen Staubfaden aus, an dessen Ende die Staubbeutel sitzen.

Stochert das Insekt nun mit seinem Rüssel in der dünnen Blütenröhre herum, so muss es sich erst den Weg freischaffen, das heißt die breite, untere Platte der Hebelmechanik nach hinten-oben drücken. Damit senkt sich automatisch der Staubbeutel nach vorne-unten. Da die Übersetzung groß ist, also ein sehr ungleicharmiger Hebel vorliegt, genügen schon kleine Bewegungen an der Platte, um den Staubbeutel auf großer Bahn schwenken zu lassen.



Eingerollter Doppelfüßer

Die Doppelfüßer (Diplopoda) sind eine sehr alte Klasse. Es gibt sie schon seit dem Karbon, und heute umfassen sie immer noch 7200 Arten. Da sie viele Segmente besitzen, werden sie umgangssprachlich gerne zusammen mit den Hundertfüßern als „Tausendfüßer im weiteren Sinne“ zusammengefasst. Ihre Segmente sind aber im Querschnitt zumeist rund, nicht abgeflacht. Eine Gruppe mit der hier abgebildeten Gattung *Julus* heißt denn auch „Schnurfüßer“. Jedes Segment trägt zwei Paare von „Füßen“ (Beinen) kurz hintereinander, was ungewöhnlich ist; andere Gruppen von Gliederfüßern tragen stets nur ein Paar pro Segment. Des Rätsels Lösung: Bei den äußerlich sichtbaren Segmenten der Doppelfüßer handelt es sich um „Doppelsegmente“, die aus je zwei ursprünglichen Segmenten verschmolzen sind. In einem solchen Doppelsegment sind auch alle inneren Organe doppelt angelegt. Beim genauen Hinschauen sieht man noch eine feine Verschmelzungslinie, etwa am unteren Bild an den Glanzlichtern. Bei Gefahr rollen sich Doppelfüßer ein, so dass die Beine zwischen den Windungen eingelegt und damit geschützt sind. Das gelingt aber nicht immer vollständig, wie die obere Abbildung zeigt.

