

Werner Müller

Lebenswelt Meer

Reportagen aus
der Meeresbiologie
und Vorstellungen
über die Entstehung
des Lebens



Springer

Lebenswelt Meer

Werner Müller

Lebenswelt Meer

Reportagen aus der Meeresbiologie und
Vorstellungen über die Entstehung des
Lebens



Springer

Werner Müller
Universität Heidelberg
Heidelberg, Deutschland

ISBN 978-3-662-52851-8
DOI 10.1007/978-3-662-52852-5

ISBN 978-3-662-52852-5 (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 Berlin Heidelberg 2017

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.

Planung: Stefanie Wolf
Einbandabbildung: © Werner Müller

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Inhaltsverzeichnis

1	Leben im Meer: fremdartig, gefährdet, faszinierend .	1
1.1	Was uns als Leser erwartet und was nicht	1
1.2	Zur globalen Bedeutung des Lebensraumes Meer	3
1.3	Die allzeit gegenwärtige Gefährdung: Beispiel Überfischung und die nicht-geheimnisvolle Quallenplage	4
1.4	Das Meer als Ursprung des Lebens?	6
2	Alle Mann an Bord: Delfine!	9
3	Delfine und ihre Wal-Verwandtschaft beim Tauchen .	15
4	Fischen mit Ultraschall, Fernunterhaltung mit Infraschall, Ortung bioelektrischer Felder	19
4.1	Ortung mittels Ultraschall	20
4.2	Fernkommunikation mittels Infraschall	23
4.3	Schallkanonen zerstören das Gehör der Delfine und Wale	24
4.4	Ortung dank der Wahrnehmung von elektrischen Feldern	28
4.5	K.o.-Schläge mit Strom	31

5	Navigation mit dem Magnetkompass?	35
5.1	Fernorientierung im Magnetfeld der Erde?	36
5.2	Die geheimnisvollen Wanderungen der Aale . . .	41
6	Das einzigartige Wattenmeer und seine Gezeiten . . .	45
6.1	Weltkulturerbe Wattenmeer	47
6.2	Mond, Sonne und die Gezeiten	54
6.3	Rätselhafte Funde des Strandwanderers	62
6.4	Eine Wattwanderung – aber mit geschulter Führung!	68
6.5	Auf dem Krabbenkutter – nicht nur Shrimps . . .	89
6.6	Im Nordsee-Aquarium und -Museum: Wir erfahren Unerwartetes	94
6.7	Mammutzähne aus der Nordsee?	97
6.8	Von Ängste-erzeugend bis bezaubernd: Rote Flut, giftiges Grün, Meeresleuchten in der Nacht	100
7	Die Form der Lebewesen spiegelt ihre Lebensweise wider	103
7.1	Pflanzenhaft erscheinende Lebewesen	104
7.2	Bilateral-Symmetrie und der Fische-jagende Hai und Delfin	111
7.3	Kopf und Symmetrien können beim Wechsel der Lebensweise verlorengehen	117
7.4	Radiär-Symmetrie und das Leben einer nicht-vegetarischen Rose	118
7.5	Die bizarren, fünfstrahlig-radiären Sterntiere, Gorgonenhäupter und ihre Verwandten	124
7.6	Seelilien – Überbleibsel längst vergangener Perioden der Erdgeschichte	129
7.7	Sekundäre bilaterale Symmetrie und scheinbare Quallen in fremden Tierstämmen	131

7.8	Die bizarren Sterntiere – unsere entfernte Verwandtschaft?	132
8	Filterier – Akteure eines weltumspannenden, ozeanischen Klärwerks	135
8.1	Filterierer von Mikroplankton sind bequem und brauchen allenfalls ein Mini-Gehirn	136
8.2	Schwämme setzen zum Filterieren einen Milliarden von Jahren alten Urtyp von Zellen ein	138
9	Vorsorge fürs Weiterleben: mal Klonen, mal Sex	143
9.1	Klonen als Teil von Lebensläufen, in der Natur nicht grundsätzlich verpönt	144
9.2	Durch Klonen zum Superorganismus	146
9.3	Klonen oder doch besser Sex? Was ist jeweils vorzuziehen?	155
9.4	Schwangere Männchen und andere Kuriositäten bei sexueller Fortpflanzung	156
10	Schwärmen in Massen und Schwärmen mit dem Mond	161
10.1	Laichen in Massen; was soll das?	162
10.2	Eine Frage im Vornherein: echte Mondperiodik oder Gezeitenperiodik?	164
10.3	Synchronisation im Rhythmus der Gezeiten	165
10.4	Ein Pionier-Laborwürmchen beweist erstmals die Existenz Mondlicht-abhängiger Lebenszyklen	169
10.5	Das Paradebeispiel der Meere: der Palolo	173
10.6	Das verheißungsvolle Leuchten für Christoph Columbus	174
10.7	Das spektakuläre Laichen der Korallen	175

11	Lebensräume: freie Meere für vagabundierende Freibeuter – oder feste Standorte?	177
11.1	Leben im Pelagial: Wie verhindert man Absinken in den Abgrund – und was macht eine Qualle mit ihren 24 Augen?	178
11.2	Leben an festen Standorten: Wie findet man einen geeigneten Platz für das ganze Leben?	181
11.3	Der Nutzen und das leidige Biofouling-Problem	188
12	Lebenswelt Korallenriff	191
12.1	... wie Riffe entstehen	194
12.2	Ein Leben in Wärme und mit Symbionten	196
12.3	Noch wenig bekannt: Korallen im kalten Tiefenwasser	197
12.4	Bürgerkrieg in Kolonien und im Riff	197
13	Leuchten im Dunkeln	201
13.1	Licht kann man selbst erzeugen, oder man borgt sich eine Lichtquelle	207
14	Überraschung in der Tiefsee: Leben ohne Licht, aber mit heißer Chemie	209
14.1	Die Sensation: extrem heiße unterseeische Geysire, schwarze und weiße Raucher	211
14.2	Die normale, dürrtige Speisekarte für das Nacht Mahl in der stockdunklen Tiefsee	213
14.3	Die heiße Chemie der Raucher und ihre Nutznießer	215

15	Vorstellungen über die Entstehung des Lebens auf der Erde	223
15.1	Welche Bauelemente müssen vorab vorhanden sein, dass Lebewesen, wie sie heute auf der Erde existieren, entstehen konnten?	226
15.2	Grundbausteine des Lebens ohne Zutun von Lebewesen in Poren der Kaminschlote gebildet?	228
15.3	Von den Bauelementen zu einer Urzelle	233
15.4	Ein Ausblick und eine letzte Bemerkung	236
	Glossar	239
	Literatur	241
	Sachverzeichnis	249

1

Leben im Meer: fremdartig, gefährdet, faszinierend

Zusammenfassung

In diesem einführenden, erweiterten Vorwort, das man durchaus lesen sollte, erfahren wir Allgemeines über das Meer und seine Bewohner, und wir erfahren, was uns als Leser im Weiteren erwartet, und was nicht. Es erwartet uns eine fremdartige Welt, zwar auch manch bekannte, mehr aber seltsame Lebewesen, deren Gestalt und Lebensweise uns Rätsel aufgibt. Wir erfahren, wie gefährdet viele Meeresbewohner sind, ohne aber Missstände und Katastrophen, die wir Menschen derzeit verursachen, zum Hauptthema werden zu lassen, sondern Wissenswertes und Erstaunliches über die Natur.

1.1 Was uns als Leser erwartet und was nicht

Wir sind vom Binnenland, haben als Urlauber am Mittelmeer und der Küste der Nordsee unsere ersten realen Kontakte mit dem Meer und seinen vielgestaltigen, uns oftmals noch gänzlich fremden Lebewesen, und gewinnen nach und nach Interesse an Meeresbiologie. Wir erleben in der realen Natur, was wir in den Abend- und Sonntagsstunden

als durch TV-Sendungen zappende Zuschauer so beiläufig und flüchtig über das Meer und seine Bewohner mitbekommen haben. Nun, am realen Strand, gibt uns der Kosmos-Führer erste Einblicke über „Düne, Strand und Wattmeer“, über die „Tiere und Pflanzen unserer Küsten“, und wir beteiligen uns an einer Wattwanderung und einer Ausfahrt mit dem „Krabbenkutter“. Im Nordseemuseum unseres Ferienortes erfahren wir manch Unerwartetes und Eindrucksvolles über die Nordsee, ihre Geschichte und ihre Fauna.

Im Binnenland besuchen wir ein Sea-Life-Aquarium. Im dortigen Buchladen blättern wir durch prachtvolle Bildbände in vielerlei Größen, Ausstattung und Preislagen, finden in den Regalen fabulier-gewaltige Thriller der Romanschriftsteller, von Herman Melvilles Moby Dick, dem weißen Pottwal, der einst in seiner Notwehr dem Kapitän eines Walfangbootes das Bein abgerissen hatte und von ihm nun mit blindem Hass verfolgt wird, bis zu den über 600 Seiten langen „Nachrichten aus einem unbekannten Universum“ (Schätzing 2009), wir finden DVDs von schon mal gesehenen unterhaltsamen, mitunter berauschenden Filmen aus Serien wie „Planet Erde“ und weitere DVDs von TV-Sendungen über Tauchexpeditionen und -reviere der Tropen. Bildbände und Filme bescheren uns Einblicke in die farbenprächtige Welt der Korallenriffe, zeigen uns in den Weiten der Ozeane Buckelwale, die aus den Tropen in die Arktis wandern, und im trüben Blau der Unterwasserwelt nur verschwommen sichtbare, in die Tiefsee abtauchende Pottwale. Tiefsee-Tauchboote mit ihren Scheinwerfern, Greifarmen und Kameras zeigen uns die geheimnisvollen Welten der Tiefsee mit ihren mitun-

ter skurrilen Lebensformen, leuchtenden Organismen und rauchenden unterseeischen Vulkanen.

Dieses Buch will dieses Panorama nicht mit einer weiteren bunten Bilderflut bereichern; es will ergänzendes und vertiefendes Wissen über die besonderen Lebensumstände in den Meeren vermitteln; es stehen nicht Show und Farbenpracht im Vordergrund, sondern Erklärungen – doch nicht in der wissenschaftlichen Fachsprache der professionellen Meeresökologen und Zoologen, vielmehr will dieses Buch dem Naturliebhaber, Lehrer, Schüler und angehenden Biologiestudenten in allgemeinverständlichen Worten Wissen über die besonderen Bedingungen vermitteln, die das Meer seinen Bewohnern bietet, und über die großen Anforderungen, die es ihnen abverlangt. Mit ausgewählten Beispielen will dieses Buch dem Leser einen Einblick in spannende Fragestellungen der Meeresforschung gewähren. Selbstredend können hier nicht die ganze Meeresbiologie und Ozeanografie zur Sprache kommen.

Es werden Themen herausgegriffen, welche der Autor aus eigener Anschauung, Forschung oder Lehrtätigkeit kennt und die er gern auch interessierten Nicht-Biologen mitzuteilen versucht, um ihnen die große Bedeutung der Meere und ihrer Bewohner für unsere Erde, ihre Vergangenheit und Zukunft, nahezubringen.

1.2 Zur globalen Bedeutung des Lebensraumes Meer

Das Meer bedeckt heute zwei Drittel der Erdoberfläche, enthält 96 % des Welt-Wasservolumens und ist dank der

Photosynthese-Aktivität von Myriaden mikroskopisch kleiner Blaubakterien und im freien Wasser schwebenden, mikroskopisch kleinen Algen die größte Quelle des in der Photosynthese aus der Spaltung von Wasser (H_2O) erzeugten Sauerstoffs O_2 . Den gibt das Meer auch an die Atmosphäre weiter.

Geophysiker schätzen, dass in der Vergangenheit der Erde 70 % des atmosphärischen Sauerstoffs aus der lichtdurchfluteten Zone des Meeres empor geperlt waren und in die Atmosphäre entlassen worden sind. Wegen seines Salzgehaltes von 3,5 Gewichtsprozenten (35 g Salz pro kg Meerwasser) kann Meerwasser allerdings von der Mehrzahl der Landpflanzen und Landtiere nicht aufgenommen werden; sie sind auf das wenige Süßwasser (3,5 % des gesamten Wasservolumens der Erde) angewiesen. Doch solche lexikalischen Angaben seien hier nur am Rande erwähnt; uns interessieren andere Aspekte.

1.3 Die allzeit gegenwärtige Gefährdung: Beispiel Überfischung und die nicht-geheimnisvolle Quallenplage

Viele TV-Sendungen berichten es, und sie können dies eindrucksvoller tun als jedes Buch: Plastikmüll überschwemmt die Ozeane, unzählige, hoch-technisierte Fischtrawler orten mit modernster Sonartechnik jeden Fischwarm und holen mit ihren kilometerlangen Schleppnetzten alljährlich Millionen Tonnen Fische aus dem Meer; und sie vernichten

tonnenweise ihren verschwiegene Beifang. Der Bestand der Haie ist weltweit gefährdet. Internetbeiträge berichten Erschreckendes. Hier einige Zitate:

„Fast überall werden heute mehr Fische gefangen als natürlich nachwachsen können. Weltweit gelten 30 % der kommerziell genutzten Fischbestände als überfischt und 57 % als maximal genutzt (Stand: Juli 2012). In den europäischen Gewässern ist die Situation besonders schlimm: Hier werden 47 % der Bestände als überfischt klassifiziert“, und weiter: „Die politisch festgesetzten Fangquoten überschritten die wissenschaftlichen Empfehlungen in den letzten zehn Jahren um durchschnittlich 41 %. Das ist dann zwar legal, aber bei weitem nicht mehr nachhaltig. Und das ist nur ein Ergebnis einer kurzsichtigen und nicht nachhaltigen Politik (www.wwf.de).“

„Laut dem Zweijahres-Bericht (*The state of World Fisheries and Aquaculture* 2006) der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der UNO (FAO) zum Fischfang, der im März 2007 veröffentlicht wurde, sind 52 % der Meeresfisch-Bestände so intensiv befischt, dass eine Steigerung nicht mehr möglich ist.“ Und: „Der Restbestand an Blauwalen betrage nur noch 1,7 %, derjenige an Thunfisch 10 %. Man müsse deshalb, so Greenpeace, 40 % der Meere unter Schutz stellen und vor allem den bisherigen Fischbestand halten“ (Wikipedia, „Überfischung“, Zugriff im April 2016).

„In Peru töten Fischer jährlich bis zu 15.000 Delfine und Kleinwale – um sie anschließend zu Haiködern zu verarbeiten. Die Haibestände sind bereits drastisch überfischt, die Delphinjagd grausam und längst illegal“ (www.oceancare.org).

An dieser Stelle sei ergänzend nur eines klargestellt: Dass weltweit die Schwärme der Quallen zunehmen, ist für den Biologen und Ökologen nicht geheimnisvollen Ursachen zu verdanken, oder gar mit dem allzeit verfügbaren Argument des Klimawandels abgetan. Die Plage ist schlichtweg Folge der Überfischung. Im ungestörten Meer vertilgen Fischwärme, Riesenhaie, Mantas und Bartenwale Abermillionen von Tonnen tierisches Plankton. Je mehr diese Räuber reduziert werden, desto mehr Nahrungskonkurrenten der Quallen um tierisches Plankton verschwinden. Quallen freut dies; sie gedeihen prächtig, auch ohne dass ihnen El Nino und Klimawandel große Hilfe leisten müssten; denn seit eh und je sind Quallen an alle Klimazonen der Erde angepasst.

Es sollen hier in diesem Buch aber nicht Erschreckendes und von Menschen verursachte globale Katastrophen im Vordergrund stehen. Hier wird die Biologie der Lebewesen in unser Blickfeld gerückt, wenn auch hier und da ein Hinweis auf Unerfreuliches unvermeidlich ist.

1.4 Das Meer als Ursprung des Lebens?

Das Meer gilt im Kreise der professionellen Naturwissenschaften als Ursprung und Hort des Lebens auf der Erde, wenn auch manche TV-Sendungen mit Blick auf die große Zahl der Esoterik-Gläubigen gerne das Leben aus den Tiefen des Weltalls herbeizaubern möchten. Das Thema ist auch auf der Erde spannend genug und wird uns zu unterseeischen Vulkanen führen. Dies zu begründen und heutige Vorstellungen über den Ursprung des Lebens in verständ-

licher Form darzustellen, ist ein Ziel dieses Buches. Doch wird das Thema erst in einem letzten Kapitel dargeboten, zuvor sollen das gegenwärtige Leben im Meer, seine Besonderheiten und Vielfalt geschildert und beleuchtet werden. Dies kann selbstredend nicht vollumfassend geschehen; doch werden wir vom Watt bis in die Tiefsee vordringen und vielerlei Aspekte der gegenwärtigen biologischen Meeresforschung ansprechen.

2

Alle Mann an Bord: Delfine!

Zusammenfassung

Wir sind im Urlaub auf einem Schiff im Mittelmeer, sehen, wie die Delfine in Bögen schwimmen: Kopf auftauchend, eintauchend, auftauchend und so fort, und wir fragen uns, was soll dieser Delfin-Schwimmstil? Wer zeigt ihn noch in der Tierwelt? Ach ja, die Pinguine, aber kein Fisch. Warum wohl? Lesen Sie weiter und Sie erfahren die Antwort.

Wir sind als Passagier auf einem Schiff auf dem Mittelmeer, sagen wir auf der Fahrt von Kreta nach Akrotiri auf der Hauptinsel Thira von Santorin. Zu den freudig erregenden Erlebnissen einer Fahrt auf dem Mittelmeer gehört der Ruf: Delfine in Sicht! Auf Kreta hatten wir im Palast von Knossos die rekonstruierte Wandmalerei von Delfinen gesehen, deren Original, wie der Museumsführer sagte, in der minoischen Zeit vor 3500 Jahren entstanden sei. Nun also Delfine in Sicht, Delfine als lebende Originale! Alle Passagiere sind zur Stelle. Finger werden zeigend ausgestreckt, Ferngläser vor die Augen gehalten. Im ersten Augenblick sind in der Ferne nur die eine oder andere Finne (Rückenflosse) oder Fluke (Schwanzflosse) zu sehen. Bald jedoch nähern sich einige Delfine dem Schiff – es mögen Exemplare des „Gemeinen“ Delfins (*Delphis delphis*) oder des als

Flipper bekannten Großen Tümmlers (*Tursiops truncatus*) sein – und schwimmen in den vom Schiffsbug erzeugten, sich hinter dem Schiff V-förmig ausbreitenden Bugwellen oder in der halbkreisförmigen Heckwelle, um sich vom Sog des Wassers und auf den Wellenkämmen surfend bequem mittragen zu lassen.

Bald ist es den Delfinen zu langweilig. In eleganten Bögen auf- und abtauchend (Abb. 2.1) schwimmen sie im munteren Wettstreit mit dem Schiff um die Wette, entlang von Backbord oder Steuerbord, mal das Schiff mit Geschwindigkeiten bis zu 55 km/h überholend, dann sich wieder zurückfallen lassend. Mitunter zeigt der eine oder andere Delfin im Übermut einen hohen Sprung ganz aus dem Wasser.

Der Reiseleiter oder kundige Passagier nebenan erklärt: Dieses Schwimmen in Bögen sei besonders effizient, schnell und kräftesparend. Ein nachdenklicher Passagier überlegt: Mag schon sein, doch die Hydrodynamik des Schwimmens gehört zu den besonders schwierigen Sparten der technischen Physik; ich könnte das nicht begründen, vertraue aber den Fachleuten; sie werden wohl recht haben. Aber ich frage mich: Warum schwimmt so ein Delfin, nicht aber ein Hai oder Knochenfisch? Nicht einmal die als pfeilschnelle Schwimmer bekannten Schwertfische und Thunfische schwimmen in Bögen, periodisch ihren Körper aus dem Wasser hebend? Gewiss, es gibt fliegende Fische, doch die katapultieren sich mit einem heftigen Schwanzschlag aus dem Wasser, breiten ihre verlängerten Brustflossen wie Flügel aus und segeln im Gleitflug bis zu 30 s lang und 400 m weit durch die Luft. Sie tun dies aber nicht periodisch wiederholend, um bei Wanderungen schnell voranzukommen,

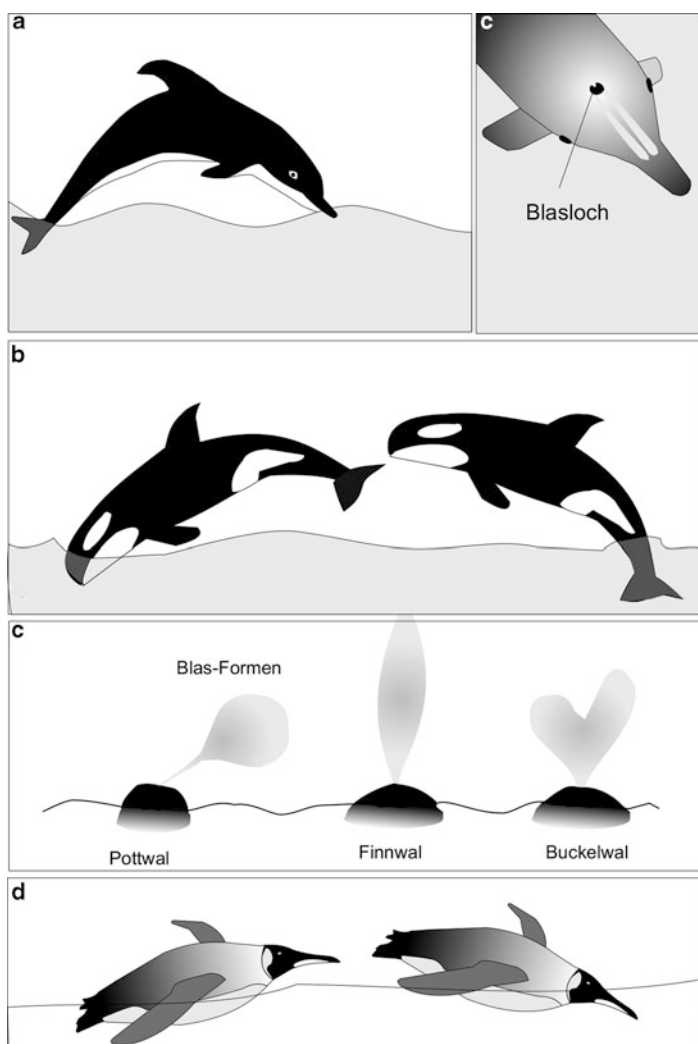


Abb. 2.1 Schwimmtechnik Delfinstil und Blas

sondern nur fallweise, um sich für ein paar Augenblicke der Sicht eines jagenden Räubers zu entziehen.

Wer denn noch, wenn schon kein Hai und kein Knochenfisch, schwimmt in Bögen: Körper aus dem Wasser auftauchend – ins Wasser eintauchend – aus dem Wasser – ins Wasser –, oder zumindest: – Kopf aus dem Wasser – ins Wasser – aus dem Wasser – ins Wasser?

Es fallen uns ein: Orcas, die Schwert- oder Killerwale, die größte Delfinart, es fallen uns weiter ein: Pinguine und – der Mensch, wenn er sich im Schmetterlingsstil (*butterfly*) übt und dem Schwimmwettkampf stellt. Aus gutem Grund wurde dieser Schwimmstil jahrzehntelang und offiziell als Delfinstil bezeichnet und wird auch heute noch bisweilen so genannt. An den Pazifikküsten Nordamerikas mag man gelegentlich auch kalifornische Seelöwen in diesem Stil schwimmen sehen. Was ist all diesen, Delfinen, Walen, Pinguinen, Seelöwen und Mensch, gemeinsam?

Sie alle atmen Luft!

Kurz vor dem Auftauchen bläst man als guter Schwimmer, ob Mensch oder Delfin, mit einem heftigen Stoß die verbrauchte, CO₂-reiche Luft aus und zieht, Mund oder Nasenlöcher über Wasser, in Bruchteilen einer Sekunde sauerstoffreiche Luft in die Lunge. Delfine öffnen und verschließen dabei periodisch ihr auf die Stirn verlagertes, unpaariges Nasenloch (Blasloch, Abb. 2.1).

Zur Klarstellung: Delfine und Orcas gehören wie der Pottwal zu den Zahnwalen, die Fische und Tintenfische jagen; sie haben ein unpaariges Blasloch; andere Wale wie der in TV-Berichten oft gezeigte Buckelwal, der Finnwal und größte Gigant aller Zeiten, der Blauwal, gehören zu den Bartenwalen, die Schwärme von Plankton und kleinen

Krillkrebse einfangen und keine ausgesprochenen Tief-taucher sind; sie haben paarige Blaslöcher. Das Ausstoßen der verbrauchten Luft erzeugt bei größeren Walen eine mit kondensierendem Wasserdampf und feinen Öltröpfchen vermischte Fontäne, das Blas. Warum aber sehen wir große Wale nicht im Delfinstil schwimmen? Gewiss, sie können auf langen Schwimmstrecken periodisch ihre Blaslöcher über die Wasseroberfläche heben, nicht aber den Kopf, der unbeweglich mit dem Rumpf fest verbunden ist. Den massiven, tonnenschweren Vorderkörper aus dem Wasser zu heben, wäre ein energiezehrendes Unterfangen; denn je größer die Masse, desto größer der Auftriebsverlust über Wasser und damit desto größer die plötzliche Gewichtszunahme in der Luft.

Halten wir fest: In Bögen schwimmen Luftatmer, die nicht zu schwer sind, um in regelmäßigem Rhythmus ihre Nasenöffnung(en) über Wasser zu bringen, es sind dies vor allem Pinguine und Delfine.

3

Delfine und ihre Wal-Verwandtschaft beim Tauchen

Zusammenfassung

Unsere Gedanken und Erkundigungen zur Schwimmtechnik von Delfinen und anderen Mitgliedern der Walfamilie führen uns ohne Umschweife zum Thema Tauchen. Wir fragen: Wie bewältigen Wale als Säugetiere mit Lungen langes Tauchen in die Tiefe? Sie können nur Apnoe-Taucher sein, die ohne einen Atemzug – das bedeutet der Begriff A-pnoe – ihren gesamten Tauchgang bewältigen. Wir erfahren Unwartetes, auf jeden Fall Erstaunliches. Delfine und Wale tauchen mit gänzlich ausgeatmeter Lunge, Pottwale gar bis zu 80 min und hinab bis zu einer Tiefe von 3000 m. Wie schaffen sie das? Es hat auch damit zu tun, dass Pottwal-Muskelfleisch fast schwarz ist.

Beim Menschen liegt der Weltrekord bei 145 m Tiefe, die in ca. 15 min erreicht werden. Da werden von Walen ganz andere Leistungen berichtet (Müller et al. 2015b):

- Finnwal Tauchtiefe 500 m, Tauchdauer 20 min,
- Blauwal Tauchtiefe 100 m, Tauchdauer 45 min,

- Entenwal Tauchtiefe 1300 m, Tauchdauer 120 min,
- Pottwal Tauchtiefe bis 3000 m, Tauchdauer 80 min.

Die Atemtechnik der Meeressäuger muss folglich den besonderen Anforderungen des Tieftauchens angepasst sein. Vor dem Tauchgang hyperventiliert der Delfin, das heißt er erhöht seine Atemfrequenz von 1 bis 3 pro Minute bei ruhigem Schwimmen auf das bis zu Fünffache vor einem Tauchgang.

Die Lungen und die ganze Atemapparatur eines Wals sind Hochleistungsorgane. Bei jedem Atemzug kann ein Wal 80 bis 90 % des gesamten Luftvolumens der Lunge gegen Frischluft austauschen, bei uns liegt dieser Wert bei 15 bis 20 %. Dieser große Volumenaustausch wird unterstützt durch einen besonders leistungsfähigen Austausch der Atemgase. Das Netz der Blutkapillaren um die Lungenalveolen ist weit dichter als in unserer Lunge, das Blut wird mit hoher Geschwindigkeit von CO_2 entlastet, die roten Blutkörperchen werden blitzschnell mit Sauerstoff beladen und über die pulsierenden Blutadern in die Muskulatur geleitet, wo sie ihren Sauerstoff den Muskelzellen übergeben. Diese enthalten viel Myoglobin, das dem Hämoglobin der roten Blutkörperchen ähnlich ist, aber eine höhere Affinität (Haftkraft) für Sauerstoff hat.

Noch eine Besonderheit hat der Wal erfunden. Ein Ventil am Eingang der Lunge verhindert, dass Wasser in die Lunge dringt, wenn er unter Wasser seine Speise verschluckt. Besondere Einrichtungen ermöglichen Zahnwalen wie Delfinen, Orcas und Pottwalen, unter Wasser Ultraschall zu erzeugen (siehe unten Kap. 4), ohne dabei das hierfür nötige kleine Quäntchen gespeicherter Luft zu verlieren.

Wie der tauchende Mensch und jedes andere luftatmende Tier sieht sich auch ein Wal, der einen Tauchgang unternimmt, mit dem Problem konfrontiert, dass bei zunehmendem Wasserdruck sich zunehmend mehr Stickstoff im Blut löst. Beim Hochsteigen aus der Tiefe könnte der Stickstoff in vielen Bläschen ausperlen und diese die Blutkapillaren, vor allem die feinen Kapillaren im Gehirn, verstopfen. Beim Wal kann traniges Öl in durchbluteten Behältern des Schädelraums den Stickstoff abfangen. Das Stickstoff-gesättigte Öl wird in den Nasengang gepresst und mit dem Blas in die Luft gepustet. Freilich, mit zunehmender Wassertiefe steigt der Wasserdruck, um 1 bar pro 10 m Tauchtiefe, und das hat gravierend Konsequenzen.

Einige Zahnwale, allen voran der Pottwal, sind Tiefseetaucher; und diese tauchen mit ausgeatmeter, nahezu gänzlich kollabierter Lunge. Luftgefüllte, nicht von einem dicken, stahlharten Knochenpanzer umhüllte Hohlräume würden bei den ungeheuren Drücken in der Meerestiefe ohnedies total kollabieren: Ein bar Luftdruck auf der Wasseroberfläche plus je ein bar Wasserdruck pro 10 m Tauchtiefe ergeben in 1000 m Tiefe 101 bar (Autoreifen 2 bis 3 bar). Bei 1000 m Tiefe entspricht der Druck von 101 bar dem Gewicht von 100 kg/cm^2 . Beim Pottwal ermöglichen schräg gestellte, gelenkige Rippen und ein besonders elastisches Zwerchfell eine totale Kompression der Lunge. Wie aber kann der Pottwal in bis zu 3000 m Meerestiefe bis zu einer Stunde Tintenfischen nachjagen, gar minutenlang mit Riesenkalmaren ringen, ohne Luft zu holen? Pottwale speichern eben, wie auch andere tauchende Säugetiere, Sauerstoff in weit größerem Maße als wir in ihrem Blut und ihren Muskeln. Der Pottwal hat Blutreser-

ven in besonderen Blutgefäßen, z. B. in der weiten, vom Unterleib zum Herzen ziehenden unteren Hohlvene (Vena cava posterior) und in schwammartigen, von verknäulten und vernetzten Kapillaren gebildeten „Wundernetzen“ in der Nähe von Herz und Gehirn. Die Muskeln der Pottwale sind tiefrot bis schwarz vom hohen Gehalt an Myoglobin, das ebenso wie das Hämoglobin der roten Blutkörperchen Sauerstoff bindet, diesen aber auch bei Bedarf zur Energiegewinnung (oxidativer Stoffwechsel = „Verbrennung“) freigibt.

Der Stoffwechsel wird zudem, soweit technisch möglich, beim Tauchgang herab gedrosselt, Herzschlag und Kreislauf werden verlangsamt, jedenfalls beim Delfin und Orca, die, in großen Schwimmbecken gehalten, mit Messgeräten bestückt und zu langen Tauchgängen dressiert werden können. Einem Pottwal, der in über 1000 m Tiefe mit einem Riesenkalmar ringt, ist noch kein Wissenschaftler mit Messgeräten zu Leibe gerückt.

4

Fischen mit Ultraschall, Fernunterhaltung mit Infraschall, Ortung bioelektrischer Felder

Zusammenfassung

Millionen von Jahren vor dem Menschen der heutigen Zeit, der für seine Marine den Ultraschall-Sonar entwickelt hat, haben manche Tiere Ultraschall-Sonar zur Orientierung und Ortung gesuchter Objekte erfunden, so die Fledermäuse als „Vögel der Nacht“, so auch die Delfine und Zahnwale wie der Pottwal zur Ortung ihrer Beute und zur Orientierung im trüben Wasser und in stockdunklen Tiefen des Meeres. Warum eignet sich Ultraschall hierzu, und weshalb können Delfine zwar Heringe orten – aber leider nicht die Netze der Fischer? Wir erfahren auch, dass Infraschall in den Weiten des Meeres viele Kilometer weit reichen und von „singenden“ Walen zur sozialen Kommunikation erzeugt werden kann. Wir erfahren jedoch auch, dass die starken Schallkanonen, wie sie die Erdölprospektoren in vielen Regionen der Weltmeere einsetzen, das Gehör der Delfine und Wale zerstören können, eine mögliche Ursache für das tödliche Stranden der Tiere.

Orientierung und Beutefang kann auch mittels hochempfindlicher Voltmeter erfolgreich sein, wie Haie und Rochen beweisen. Ihre Elektrosensoren sind über ihren Körper in Linien angeordnet, in höchster Dichte auf der Schnauze. Mit diesen Elektrosensoren können im Sand des Untergrundes versteckte Beutefische geortet werden. Bei Berührung eines Zitterrochens werden recht drastisch auch für uns Menschen die Elektroschocks wahrnehmbar, die elektrische Rochen (Torpedorochen) zur Lähmung ihrer Beute oder zur Abwehr von Feinden austeilen.

4.1 Ortung mittels Ultraschall

Mancher Leser weiß es schon: Delfine und alle anderen Zahnwale orten Fische mit Ultraschall, technisch ausgedrückt, mit Sonar. Man spricht auch von Echoortung. Delfine stoßen Klicklaute aus, deren Frequenz um die 12.000 Hz schwankt und oberhalb des Hörvermögens älterer Menschen liegt. Man kennt Echoortung mit Ultraschall auch von Fledermäusen, und der Fachmann erläutert: Ultraschall breitet sich anders als gewöhnlicher Schall geradlinig aus (Abb. 4.1). Die Klicklaute der Fledermaus und des Delfins sind vergleichbar dem Strahl einer Taschenlampe, mit der die Umgebung gescannt und nach fliegender oder schwimmender Nahrung abgesucht wird, wobei freilich die „Taschenlampe“ des Delfins nicht kontinuierlich Licht aussendet, sondern blinkend. Die Frequenz der Laute ist so abgestimmt, dass Fische von der Größe eines Thunfisches bis zur Größe von Heringen und Sardinen im zurückkommen Echo abgebildet sind. Allerdings wird Ultraschall rasch

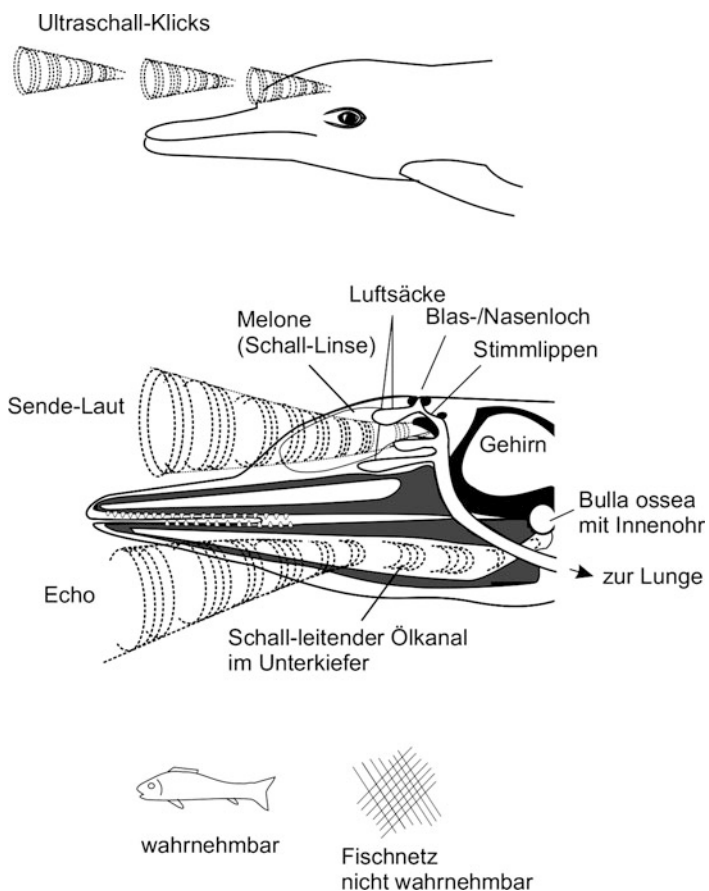


Abb. 4.1 Sonar = Ultraschallortung beim Delfin

gedämpft und so reicht das Ortungsvermögen mittels Ultraschall nicht sehr weit, etwa 2 bis 5 m. Immerhin arbeitet Sonar auch im Stockdunkeln und kommt dem Pottwal auch in der immerwährenden Dunkelheit der Tiefsee zugute.

Die Lust auf Fische, die der Delfin mit seinem Sonar im trüben Wasser und bei Nacht orten kann, verleitet ihn, auch in den riesigen Treibnetzen der Fischtrawler seine Mahlzeit abzuholen. Tagsüber locken darüber hinaus die vielen im Netz gefangenen, zappelnden Fische so manche Delfine und ihre nordischen Verwandten, die Schweinswale, durch das silbrige Aufblitzen der Schuppen an und wecken die Neugier der Meeressäuger. Die Fadenstärke von Fischnetzen liegt jedoch unterhalb der Auflösungsgrenze ihres Ortungssystems. Dies ist anders als bei Fledermäusen, die Laute höherer Frequenz aussenden und damit eine höhere Auflösung ihres akustischen Bildes erreichen, freilich auf Kosten der Reichweite. Die Reichweite eines Fledermaussonars, es sind nur ein paar Meter, würde dem Delfin und Pottwal nicht ausreichen. Sie nehmen mit ihren tieferen Schallfrequenzen zwar Fische wahr, nicht aber das Fischnetz. Nicht selten verfängt sich deshalb ein Delfin im Netz, kann nicht mehr Luft holen und erstickt. Bojen entlang der Netze mit Lautsprechern, die Ultraschallsignale aussenden, sollen solche Unglücksfälle verhindern. Sie tun es nicht mit ausreichendem Erfolg, und so mancher Fischfänger will sich auch die Ausgaben für solche Warneinrichtungen ersparen, und so landen viele tote Delfine als Beifang auf dem Schiffsdeck.

Viel Mühe musste man sich machen, um herauszufinden, wie unter Wasser die Laute erzeugt werden und ihr Echo zum Gehörorgan gelangt. Anatomische Befunde wiesen darauf hin, dass der Delfin, wenn er beim Tauchen sein

Blasloch und den Eingang zur Lunge verschließt, in kleinen, als Luftsäcke dienenden Seitenkammern der Luftröhre einen kleinen Luftvorrat mit unter Wasser nimmt. Mittels Videoaufnahmen mit implantierten, mit Minikameras und Minisendern bestückten Endoskopen und durch winzige Luftdruckmessgeräte in Hohlräumen des Körpers fand man heraus, dass der Delfin zur Lauterzeugung die gespeicherte Luft mit Muskeln in schneller Folge periodisch zwischen den Luftkammern hin und her presst. Zwei Paar Stimmklappen ragen in den Luftraum und versetzen die Luftsäule in Schwingungen. Die so erzeugten Schallwellen durchdringen das Gewebe, werden in der (beim Pottwal riesigen) ölgefüllten Anschwellung auf der Stirn, Melone genannt, wie mit einer Linse gebündelt und nach außen ins umgebende Wasser abgestrahlt (Abb. 4.1). Für den Empfang der zurückkommenden Schallwellen werden nicht wie bei Landtieren Trommelfelle eingesetzt; die würden bei hohem Wasserdruck platzen. Vielmehr ist es der Unterkieferknochen, der den Schall aufnimmt und zum Gehörorgan leitet.

4.2 Fernkommunikation mittels Infraschall

Wale erzeugen nicht nur Ultraschall, sondern in ihren Gesängen auch für uns hörbare Laute, die art- und individualspezifisch sind und reichlich variiert werden. So manche Forscherin und so mancher Forscher glaubt, Wale hätten eine eigene Sprache. Nur verstehen tut sie keiner. Darüber hinaus erzeugen Wale zur Kommunikation auch Infraschall. Der ist so tief, dass er unterhalb unseres Hörver-

mögens liegt. Am oberen Ende der für uns wahrnehmbaren Frequenzskala folgt Ultraschall, am unteren Ende Infraschall. Während Ultraschall rasch gedämpft wird, reicht Infraschall weit. Sprungschichten in den Ozeanen zwischen warmem Oberflächenwasser und kaltem, dichterem Tiefenwasser bewirken, dass in den Ozeanen Infraschall-Laute Hunderte von Kilometern weit tragen. Man vermutet, dass Walschulen sich über Hunderte von Kilometern orten und verständigen können.

4.3 Schallkanonen zerstören das Gehör der Delfine und Wale

Wer das enorm breite Schallspektrum von Ultraschall über „normalen“, mit unserem Gehör wahrnehmbaren Schall bis zum für uns nicht mehr wahrnehmbaren Infraschall nutzen will, muss einen hochentwickelten und außergewöhnlich empfindlichen Gehörsinn haben. Das Gehör der Zahnwale ermöglicht ihnen Orientierung auch in der Nacht und in den ewig dunklen Tiefen. Das Gehör hat für Delfine und Wale die gleich hohe Bedeutung wie für blinde Menschen. Umso erschreckender, was der Bericht aussagt, den Wissenschaftler aus Frankreich, Italien, der Schweiz und den USA erstellt und jüngst veröffentlicht haben (Presseberichte vom 21.01.2016, u. a. Spiegel-online).

Es gibt mehrere Quellen von unnatürlich hohen Schallpegeln.

1. Da ist der von Tausenden von Schiffsmotoren und Schiffsschrauben erzeugte Lärm. Im Mittelmeer beispielsweise seien täglich etwa 1500 Schiffe unterwegs.
2. Da sind seismische Geräte, die bei der Marine zur Ortung von U-Booten und Unterwasserklippen zum Einsatz kommen. Fischtrawler und Fischkutter sind heutzutage mit starken, Ultraschall erzeugenden Sonargeräten zur Ortung von Fischschwärmen ausgerüstet. Von solchen Sonargeräten gefährdet sind nicht nur die mit ihnen entdeckten Fischschwärme, sondern auch die Meeressäuger. Aufgeschreckt durch das Sonargeräusch tauchen Delfine und Wale zu schnell auf. Folge davon ist die Dekompressionskrankheit, die zum Tod führen kann.

Möglicherweise kommt künftig das im Auftrag des Verteidigungsministeriums der Vereinigten Staaten für die Marine entwickelte *Long Range Acoustic Device* (LRAD) vermehrt zum Einsatz. Es ist ein akustisches Gerät, mit dem sowohl normale Lautsprecher-Durchsagen als auch schrille, schmerzhaft laute Töne abgesetzt werden können. Von der Marine sind solche Geräte versuchsweise zur Piratenabwehr vor der somalischen Küste eingesetzt worden, mit mäßigem Erfolg. Nach der Vorstellung einer Reederei soll das LRAD zur Warnung vor Windkraftanlagen in den zurzeit zahlreich in Nord- und Ostsee in Aufbau befindlichen Offshore-Windparks eingesetzt werden. Die ohnedies vom Lärm der Schiffe und den Sonar-Ortungsgeräten der Fischkutter verstörten nordischen Delfinverwandten, die im Deutschen den unglücklichen Namen „Schweinswale“ tragen, werden ihr eigenes Sonarsystem kaum mehr erfolgreich zum Fischfang einsetzen können.

3. Im Mittelmeer, und nicht nur dort, dort aber durch eine systematische Datenerhebung untersucht, kommt eine weitere Quelle enormen Schalldrucks hinzu: Wenn der Meeresgrund nach Öl- und Gasvorkommen abgesehen wird, geschieht das mit Schallkanonen. Der von ihnen erzeugte explosive Schall durchdringt die unterschiedlichen geologischen Schichten des Meeresbodens. Die seismischen Reflexionen geben Hinweise, ob sich unter dem Meeresboden Öl- oder Gasvorkommen befinden könnten. Der Schall, den die Kanonen in die Tiefe abfeuern, ist mehr als 10.000-mal so laut wie ein Presslufthammer in einem Meter Abstand, und er ist viel lauter als ein startender Düsenjet, schätzen Mitarbeiter der Naturschutzorganisation *Ocean Care*. „Der Wahnsinn dieser Aktivitäten ist, dass diese Schallexplosionen über einen oft wochen- bis monatelangen Zeitraum alle zehn Sekunden stattfinden, um wissenschaftliche Daten zu erlangen und das ist unter Wasser für die Tiere die Hölle. Sie meiden verschallte Gebiete, der verstörende Lärm hat Auswirkungen auf Nahrungs- und Paarungsverhalten, er kann auch physische Schäden verursachen oder sogar zum Tod führen.“

Der Einsatz von Schallkanonen habe enorm zugenommen, berichten *Ocean Care* und der Rat zur Verteidigung von Naturschätzen (NRDC). 2005 seien davon nur knapp 4 % der Oberfläche des Mittelmeeres betroffen gewesen, 2013 bereits 27 %. Hinzu kommen Bauarbeiten, Häfen, Bohrinseln: Unter Wasser herrscht vielerorts großer Lärm. Am 21. Januar 2016 wurde der schon erwähnte Bericht einer internationalen Wissenschaftlergruppe durch

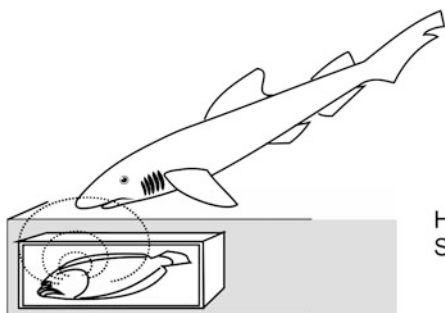
eine Karte ergänzt, die Lärm-Hotspots im Mittelmeerraum zeigt. Der Bericht, im Auftrag des Abkommens zum Schutz von Walen und Delfinen im Mittelmeer und im Schwarzen Meer erstellt, hat die Lärmquellen im Zeitraum von 2005 bis 2015 erfasst. Dafür wurden Daten von 1446 Häfen, 228 Ölplattformen, 830 seismischen Explorationsgebieten, sieben Millionen Schiffspositionen, von offiziell zugänglichen Angaben zu militärischen Aktivitäten und 52 Windfarmprojekten erfasst. Selbst gemessen haben die Forscher allerdings nicht, wie sollten sie auch an Tausenden von Orten über viele Jahre hinweg messen – ihre Daten beruhen auf Hochrechnungen. Eine vergleichbare Studie über das Gebiet der Nord- und Ostsee soll folgen. Momentan gilt für Rammarbeiten beim Bau von Windkraftanlagen in der Nordsee in deutschen Gewässern eine Schallenergie-Höchstgrenze, um die Belastung für die sensiblen Schweinswale und andere Meeressäuger in Grenzen zu halten.

Gerade Delfine und Wale, die zur Orientierung auf ihr Gehör angewiesen seien, litten unter dem Lärm, so die Aussage der Wissenschaftler. Viele Strandungen von Spitzschnauzen-Delfinen (neuerdings öfter als Schnabelwale bezeichnet) könnten auf Schädigungen des Hörsinnes zurückzuführen sein. Eine potenzielle Störung der Tierwelt durch elektromagnetische Wellen wurde noch nicht in Betracht gezogen.

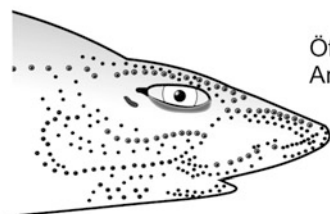
4.4 Ortung dank der Wahrnehmung von elektrischen Feldern

Auch Fische müssen schlafen. In felsigem Gelände und in Riffen suchen viele Fische Höhlen und Spalten auf, um dort ihrem Ruhebedürfnis nachzugehen und die Akkus ihres Nervensystems und ihrer Muskeln während des Schlafes nachzuladen. Videoaufnahmen zeigen, dass Weißspitzen-Riffhaie in Felsspalten schlafende Opfer auch in der Dunkelheit der Nacht orten, und sie sind dazu in der Lage dank ihrer Fähigkeit, elektrische Felder zu orten, die von tierischen Lebewesen ausstrahlen. In der Tat weisen Versuche darauf hin, dass verschiedene Hai- und Rochen-Arten bei ihrer Futtersuche neben ihrem vorzüglichen Geruchssinn, ihrem Gehörsinn und ihren Augen potenzielle Opfer auch aufgrund der elektrischen Felder orten, welche diese unwillkürlich und unvermeidlich aussenden. Allerdings muss sich der Hai oder Rochen kürzer als einen Meter dem Opfer genähert haben, um dessen extrem schwache elektrische Wechselfelder wahrnehmen zu können. Immerhin durchdringen diese auch Sand. Aus kurzer Distanz von 15 cm kann ein Dornhai oder Katzenhai eine im Holzkasten unter Sand verborgene Scholle orten, die elektrische Ströme von $4 \mu\text{A}$ aussendet (Abb. 4.2). Warum tut das eine Scholle?

Unser Herzschlag und gleichermaßen der Herzschlag eines Fisches ist begleitet von elektrischen Aktivitäten, die über die Muskelfasern des Herzens laufen und die Kontraktion der Fasern koordinieren; diese Aktivitäten sind uns als EKG (Elektrokardiogramm) bekannt. Und auch die rhyth-



Hai, eine versteckte Scholle ortend



Öffnungsporen der Lorenzinischen Ampullen am Kopf eines Haies

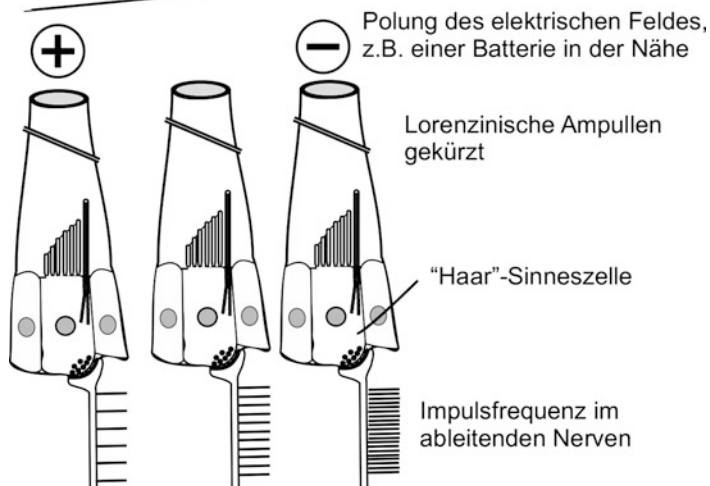


Abb. 4.2 Elektrosensoren des Haies

mischen Muskelkontraktionen, mit der Fische Atemwasser an ihren Kiemen vorbeiströmen lassen, werden ausgelöst und koordiniert durch elektrische Signale, welche über die zuleitenden Nerven und die Muskelfasern hinweg laufen, dabei elektromagnetische Felder induzieren, die sich über den Körper hinaus in der Umgebung ausbreiten. Im elektrisch leitenden Seewasser – Meerwasser heißt nun mal in unserer Sprache irreführend Seewasser – breiten sich diese Signale allseitig aus und können mit hochempfindlichen Elektrometern (Voltmeter) gemessen werden.

Haie und Rochen besitzen Voltmeter, verstreut über ihre Haut, am dichtesten sind sie im Kopfbereich lokalisiert. Die auffälligsten sind die Lorenzinischen Ampullen; dies sind mit einer Gallerte gefüllte Kanäle, die mit einer Pore in der Haut beginnen, sich in die Unterhaut erstrecken und an ihrem Ende zu einer Ampulle erweitern. An der Basis der Ampullen sitzen sogenannte Haarzellen, wie sie vom Strömungssinn in den Seitenlinien der Fische und auch von unserem Innenohr bekannt sind. Wie die Prozesse in den Sinneszellen in den molekularen Details ablaufen, ist noch nicht bekannt. Jedenfalls bilden die von den Sensoren zum Gehirn ziehenden Nerven in ihren Aktivitäten die Polung elektrischer Felder ab. Nähert man den negativen Pol einer Stromquelle, einer Batterie beispielsweise, der Pore einer Lorenzinischen Ampulle, erhöht der zum Gehirn ziehende Nerv seine Sendefrequenz, bei Annäherung des positiven Pols senkt er die Frequenz (Abb. 4.2).

Auch Tintenfische sind der Gefahr ausgesetzt, von Haien entdeckt zu werden. Man hat jüngst die elektrischen Impulse des zwar ruhenden, doch unvermeidlich ein- und ausatmenden, gewöhnlichen Tintenfisches *Sepia officinalis*

(s. Abb. 6.4) aufgezeichnet und sie Schwarzsipitzenhaien (*Carcharhinus*) und Hammerhaien (*Sphyrna tiburo*) über eine ins Wasser eingetauchte Elektrode vorgespielt. Diese attackierten sogleich die Elektrode. Nahm der Tintenfisch einen nahenden Hai wahr – es genügte, ihm das Videobild eines Hais vorzuspielen – so nahm er eine besondere Schutzstellung ein. Er erstarrte, atmete weniger und bedeckte Körperöffnungen und weitere Partien seines Körpers mit seinen Armen. Dies reduzierte die in die Umgebung ausstrahlende Feldstärke der elektrischen Impulse bis zu 90 %. Auf so schwache Felder reagierten die Haie nur noch halb so oft mit Angriff, aber gänzlich verborgen war das potenzielle Opfer so nicht (Bedore et al. 2015).

Die Empfindlichkeit der Elektrosensoren ist unglaublich hoch. Nach Messungen der Impulsfrequenz der zum Gehirn ziehenden Nerven würden Haie es merken, ob eine 1,5-Volt-Batterie an- oder abgeschaltet ist, deren einer Pol im Atlantik vor New York und deren anderer Pol vor Florida eingetaucht wäre. Sie erkennen noch eine Spannung von zehn Milliardstel Volt/cm. Es wird vermutet, die Elektrosensoren könnten auch beteiligt sein bei der Wahrnehmung des Erdmagnetfeldes. Dies wird am Ende des nachfolgenden Abschnittes diskutiert.

4.5 K.o.-Schläge mit Strom

Es geht um Zitterrochen der Gattung Torpedo. Weshalb Zitter? Man fasse einen an. Taucher erzählen aber nicht nur vom Zittern ihrer Hände und Arme beim Anfassen eines Zitterrochens; sie empfinden einen heftigen Faustschlag, der

sie zu Boden werfen kann. Zitterrochen besitzen elektrische Organe, die Stromschläge hoher Stärke austeilen können.

Diese Organe sind aufeinander geschichtete Pakete aus plattenförmigen, umgewandelten Muskelzellen, genannt Elektroplaxe. Auf ein Signal hin, welches ein Nerv auf eine Seite eines Elektroplax leitet, wird diese Seite plötzlich elektrisch negativ (für biologisch Bewanderte: es entsteht ein großflächiges Aktionspotential). Ein Elektroplax wird in Bruchteilen von Sekunden zu einer Batterie mit negativer Ladung auf der oberen Fläche und einer positiv geladenen Gegenfläche auf der Unterseite. Im elektrisch leitenden Gewebe und umgebendem Meerwasser entlädt sich diese Batterie in Sekundenbruchteilen. Die Spannungen übereinander gestapelter Elektroplaxe addieren sich wie die Spannungen in Serie angeordneter Batterien, die Stromstärken addieren sich nach der Zahl parallel geschalteter Batterien (Abb. 4.3b). Im Zitteraal, der in salzarmem und deshalb schlecht leitendem Süßwasser lebt, können sich die Spannungen bis zu 900 V aufaddieren. Im salzreichen und daher sehr gut leitenden Meerwasser ist dies nicht möglich – negativer und positiver Pol der Elektroplax-Batterie sind praktisch kurzgeschlossen – dafür können wie bei jedem Kurzschluss hohe Stromstärken entfaltet und geleitet werden. Es ist so, als würde man die zwei Drähte eines Elektrokabels für einen kurzen Moment ins Seewasser stecken: Es gibt Funken. Bei Spannungen von ca. 60 V treten im Umfeld des Fisches Stromstärken bis zu 30 A auf. Solche Stromschläge können Angreifer in die Flucht schlagen oder als Futter gesuchte Fische lähmen. Taucher vergleichen das Gefühl eines solchen Unterwasser-Elektroschocks mit dem eines sehr kräftigen Faustschlags. Ein solcher Schlag kann zur Bewusstlosigkeit des unvorsichtigen Tauchers führen.

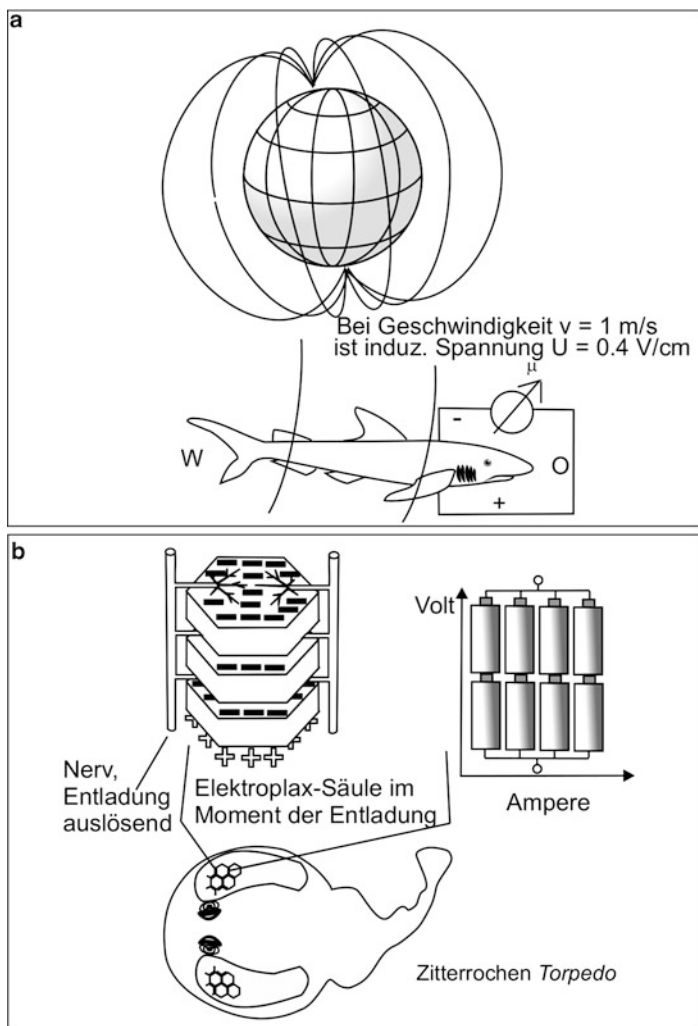


Abb. 4.3 **a** Hypothetische elektrische Spannung über dem Körper eines in W-O-Richtung schwimmenden des Haies, **b** Elektrisches Organ eines Rochens zur Erzeugung hoher Stromstärken. (Nach Müller et al. 2015b)

5

Navigation mit dem Magnetkompass?

Zusammenfassung

Alle scheinen es zu wissen, manche Wissenschaftler, die Hypothesen wie experimentell bewiesene Tatsachen darstellen, Wissenschaftsjournalisten und Fernsehmoderatoren sowie so: Über Tausende von Kilometern ziehende Tiere, Zugvögel und Meeresbewohner gleichermaßen, besäßen als ein besonderes Sinnesorgan einen Magnetkompass, der es ihnen ermögliche, sich im Magnetfeld der Erde zu orientieren. Diese zwar naheliegende, doch experimentell nur sehr schwer beweisbare Hypothese ist noch am besten begründet, wenn wenigstens nachgewiesen wird, dass ein Tier die Richtung und Stärke eines Magnetfeldes auch wahrnehmen kann. Für Meeresorganismen ist ein solcher Nachweis bislang nur für junge Meeresschildkröten und Delfine erbracht worden. Die Wanderwege der Aale sind nach wie vor geheimnisvoll.

5.1 Fernorientierung im Magnetfeld der Erde?

Wer Hunderte und Tausende von Kilometern wandert und keine Landmarken zu sehen bekommt, sondern nur eintöniges Wasser, das auch noch recht trüb sein kann, besonders in den Plankton- und Krillreichen arktischen und antarktischen Gewässern, ein solcher Fernwanderer hat Probleme, sich zu orientieren und zu navigieren. Navigieren heißt: Ferne Ziele ansteuern, die man mit den normalen Fernsinnesorganen nicht direkt wahrnehmen, also nicht sehen, nicht hören und nicht riechen kann.

Doch ferne Regionen zu erreichen, setzt nicht immer auch eine Fernorientierung voraus, schon gar nicht im Meer. Manche Meeresbewohner könnten sich schlichtweg von Meeresströmungen über Tausende von Kilometern tragen lassen. Diese Möglichkeit wird in Erklärungshypothesen selten beachtet. Für das zuhörende Publikum sind Navigationshilfen wie Sonne, Mond und Sterne, und eben auch das Erdmagnetfeld, viel attraktiver.

Die Sonne am Firmament zur Orientierung zu nutzen, wäre in den fast stets bewölkten arktischen und antarktischen Gefilden und nachts nicht eben eine hilfreiche Wahl, und ebenso gilt dies für Sterne, zumal Sonne und Sterne unablässig ihre Position am Himmel ändern, das Sternbild sich auch mit den Breitengraden sehr verschieden darstellt, am Nordhimmel ganz anders als am Südhimmel. Klar, dass deshalb seit langem vermutet wird, dass sich Fernwanderer in den Ozeanen am Erdmagnetfeld orientieren. Ein Magnetkompass funktioniert zu jeder Tages- und Nachtzeit,

das ganze Jahr über, auf der Nordhalbkugel und der Südhalbkugel der Erde. Doch Vermutungen sind kein Beweis, vor Gericht nicht und auch nicht in der Wissenschaft, die zudem den Einwand vorbringt, dass das Magnetfeld der Erde im Laufe geologischer Zeiträume seine Ausrichtung und Polung ändern kann. Immerhin, über einige Jahrtausende ist das Erdmagnetfeld im Rahmen der Mindestgenauigkeit eines Kompasses stabil. Nur, wie soll man einen Beweis herbeischaffen? Wer könnte das Erdmagnetfeld gezielt ändern und beobachten, wie sich die Wanderstrecken der Fernwanderer ändern?

Vermutet wird geomagnetische Navigation für viele Meeresorganismen:

- Langusten (*Palinurus argus*) vor den Bahamas verlassen ihre Wohnhöhlen und wandern zunächst einzeln, dann in langen Karawanen bis zu 12 km zu bestimmten Sammelplätzen. Ihre nächtlichen Exkursionen beenden sie mit ihrer Heimkehr in ihre angestammten Wohnhöhlen. Sie halten ihren Kurs auch im trüben Wasser oder geblendet ein.
- Lachse und Meerforellen finden aus den Weiten der Hochsee zurück in Flüsse und Bäche, wo sie einst das Licht der Welt erblickten. Den geheimnisumwitterten Aalen widmen wir einige Zeilen weiter unten einen gesonderten Abschnitt.
- Selbstredend wird Magnetfeldorientierung auch für Delfine und ihre Walverwandten angenommen. Doch erst jüngst wurde gezeigt, dass Delfine im Prinzip Magnetfelder wahrnehmen und orten können. Sie ließen sich darauf dressieren, zwischen zwei gleichgestalteten und

gleichgroßen Objekten zu unterscheiden, die beide einen Neodym-Block (ein seltenes Metall) enthielten, der eine Block stark magnetisiert, der andere hingegen entmagnetisiert (Kremers et al. 2014).

- Meeresschildkröten finden nach langen Jahren, in denen sie sich mit Meeresströmungen durch die Ozeane treiben lassen, zu jenem Sandstrand zurück, an dem sie einst aus dem Ei geschlüpft, aus der Sandgrube gekrochen waren und das Licht der Welt erblickt hatten.

Die experimentelle Forschung hat bisher (2016) nur für frisch geschlüpfte Meeresschildkröten und Brieftauben im Dressurversuch den Nachweis einer Orientierung nach der Richtung magnetischer Feldlinien erbringen können. An den Küsten Floridas geborene Meeresschildkröten (*Chelonia mydas*) lassen sich vom Golfstrom bis vor die Küsten Portugals treiben. Sie müssen jedoch nach dem Schlüpfen erst einmal ihr Transportvehikel, den Golfstrom, erreichen. Im Experiment wurden junge Schildkröten in einen Rundtank eingebracht, der mit einer großen Elektromagnetspule (Helmholtz-Spule bzw. Helmholtz-Käfig, Abb. 5.1) umhüllt war. Computer berechneten die Steuerung von Leistung und Orientierung des Magnetfeldes. Im Tank schwammen die jungen Schildkröten bevorzugt in die Richtung, wo sie im freien Wasser den Golfstrom erreicht hätten. Wurde die Stärke des Feldes auf einen Betrag erhöht, wie er vor Portugal gemessen wird, schwammen sie bevorzugt nach Osten. Meeresschildkröten können, so schloss man, Positionsinformation aus der lokalen Stärke des Magnetfeldes gewinnen. Das zuständige Sinnesorgan ist unbekannt. Momentan (2016) konkurrieren für

Brieftauben und Zugvögel zwei Hypothesen. Die eine Hypothese vermutet den Sensor im Gleichgewichtsorgan des Innenohrs, die zweite Hypothese meint, Vögel (wie auch Fliegen) würden mit ihren Augen das Magnetfeld der Erde sehen können. Beiden Hypothesen gemeinsam ist, dass als physikalischer Sensor nachweisbare Nanokristalle aus Eisen-Protein-Komplexen angenommen werden, die wie die Nadel eines Taschenkompasses vom Magnetfeld der Erde bewegt werden. Dadurch reizten sie Sinneszellen des Gleichgewichtsorgans oder lichtempfindliche Zellen der Netzhaut. Gene für die Herstellung solcher Nanosensoren sind im Tierreich weit verbreitet (Qin Siying et al. 2016, Müller et al. 2017).

Hypothetisch wird noch eine ganz andere Art der Orientierung im Erdmagnetfeld erwogen. Zieht man einen elektrischen Leiter rasch durch ein Magnetfeld, werden in ihm elektrische Spannungen und damit auch elektrische Ströme induziert. Lebewesen sind Leiter. Schwimmen sie rasch in Ost-West- bzw. West-Ost-Richtung und durchqueren die in Süd-Nord-Richtung verlaufenden Feldlinien des Erdmagnetfeldes in ausreichend großer Geschwindigkeit, treten auf ihrer Haut Spannungen im Bereich von $\mu\text{V}/\text{cm}$ auf. So schwach solche Spannungen auch sind, die enorme Empfindlichkeit biologischer Voltmeter könnte für ihre Registrierung genügen. Die Spannungen liegen jedenfalls im Messbereich der mikroskopischen Elektrosensoren, die Knorpelfische (Haie und Rochen) über ihre Haut verstreut enthalten. Immerhin ist im Experiment eine Reaktion der Elektrorezeptoren von Haien und Rochen auf Magnetfelder in Erdmagnetfeldstärke gemessen worden. Wir wissen

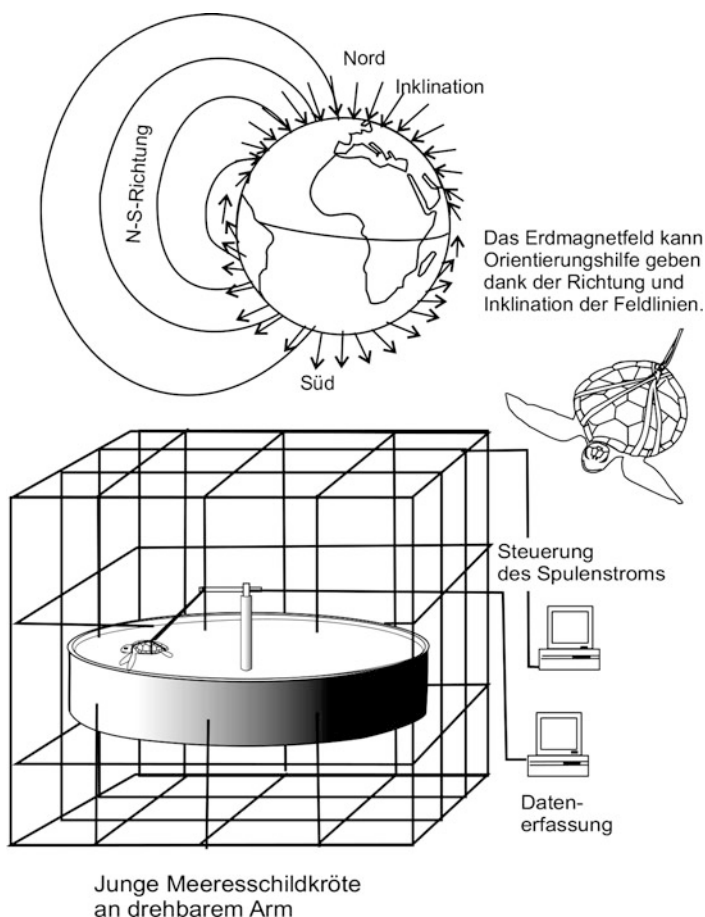


Abb. 5.1 Magnetfeldorientierung bei jungen Meeresschildkröten (*Caretta caretta* und *Chelonia mydas*). Ihre Schwimmrichtung im Tank wurde über einen drehbaren Stab vom Computer registriert. Ein Stromdurchflossener Helmholtz-Käfig neutralisierte das Erdmagnetfeld und erzeugte ein künstliches Feld vorgewählter Ausrichtung und Stärke. (Nach Müller et al. 2015b)

freilich nicht, ob sie und andere Lebewesen der Meere diese Chancen der Orientierung tatsächlich nutzen.

5.2 Die geheimnisvollen Wanderungen der Aale

Europäische Aale laichen, wie alle für die allgemeine Leserschaft gedachten Quellen und Medien, ob Wikipedia oder Lehrbücher, zu wissen glauben, in der Sargasso-See vor der Karibik. Gewiss ist: In der Sprache der Fischkunde (Ichthyologie) gehören Aale zu den katadromen Arten, und als solche durchlaufen sie die Embryonalentwicklung im Meer, verbringen dort auch noch ihre frühe Jugend, wandern dann zum weiteren Heranwachsen in Süßwasserläufe und kehren zum Laichen ins Meer zurück (Abb. 5.2).

Die frühe Lebensgeschichte wird nach Fängen in engmaschigen Planktonnetzen rekonstruiert. Nach den frühesten Stadien, die ins Netz gingen und als Aallarven identifiziert werden konnten, sollen alle amerikanischen und europäischen Aale in der Sargassosee zur Welt kommen. Die Sargassosee liegt südöstlich von Florida und umgibt die Bermuda-Inseln. Die Hypothese, die Sargassosee sei der Laichplatz, geht auf den Dänen Johannes Schmidt zurück, der vor über 100 Jahren dort Junglarven (Weidenblattlarven, *Leptocephalus*-Stadien) fischte. Auch neuere Funde von driftenden Larven machen wahrscheinlich, dass nahe den Bahamas ein größeres Geburtsareal ist. Woher die Eltern kamen, ob nur aus dem nahen Amerika, ob auch aus dem fernen Europa, und wie die Aale aus den Flüssen Europas

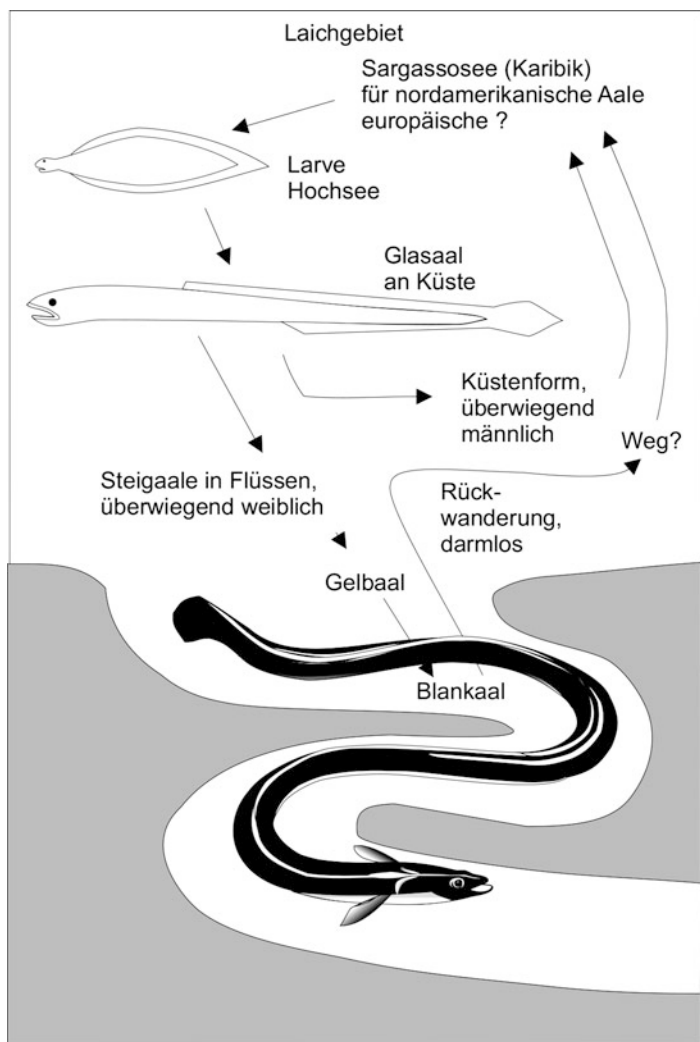


Abb. 5.2 Wanderung und Gestaltwandel der Aale. (Nach Müller et al. 2015b)

den fernen Laichplatz im Meer finden, die Larven in umgekehrter Richtung nach Europa gelangen, ist nicht bekannt; Aussagen sind bloße Spekulation; definitive Beweise stehen noch aus. So ist selbst die Annahme, auch die europäischen Aale laichten in der Sargassosee, auch 2016 noch Hypothese. Gegenwärtig verfügbare Telemetrie-Systeme (*pop-up satellite archival transmitter*) erlaubten es, in Irland freigelassene Aale bis 1300 km zu verfolgen. Die Fundorte lagen breitgestreut auf einer Route Richtung Azoren. Doch ist es gegenwärtig nicht möglich, Aale über die gesamte Strecke von mehr als 5000 km bis in die Karibik zu verfolgen. Auch hat noch niemand Aale in freier Natur laichen sehen.

Wo auch immer inmitten des Atlantiks die Aallarven schlüpfen, sie gehen einem abenteuerlichen Leben entgegen. Die durchsichtigen, planktonischen Larven, früher als eigene Tierarten betrachtet, lassen sich vermutlich mit dem Golfstrom entlang der Ostküste Nordamerikas in Richtung Europa treiben, um zu den Flussmündungen an den Westküsten Europas und Nordafrikas zu gelangen.

Ein Jahr soll es dauern, bis die Aale vor die Mündungen der amerikanischen Flüsse getrieben seien, drei Jahre bis zum Erreichen der europäischen Küste. Während ihrer Verfrachtung im Atlantik machen die Aallarven eine Metamorphose zum Glasaal durch und in der Schelfzone vor den Küsten eine Umwandlung zum Steigaal. In den Süßwasserflüssen wächst der eingewanderte weibliche Steigaal zum Blankaal heran, auch Silberaal genannt. Die männlichen Aale verbleiben hingegen in ihrer Mehrzahl in der Küstenregion des Meeres. Voll herangewachsen, ziehen die Flussaale wieder meerwärts. Männliche Meeraale wie auch weibliche Flussaale verlieren ihren Darm und lassen auf seine Kosten die Gonaden heran-

reifen. Man nimmt an, die rückwandernden, laichbereiten Aale seien über ein Jahr unterwegs, bis sie ihren Laichplatz, möglicherweise in der Sargassosee, erreichen. Sie nehmen auf ihrer ganzen Wanderschaft keine Nahrung auf; ihr Darm ist ja rückgebildet; ihr Energievorrat besteht in öligem Fett, das bis zu 30 % des Körpergewichts ausmacht. Erstaunlich die navigatorische Leistung. Einmal mehr wird das Magnetfeld der Erde als Wegweiser vermutet, doch da gibt es einen Haken: Die europäischen Aale wandern ja von Ost nach West. Die Feldlinien des Erdmagnetfeldes geben aber nicht Auskunft, auf welchem Längengrad man sich befindet. Es gilt der alte Seemannsspruch „Meine Breite kenne ich, aber nicht meine Länge“ Sagt: Man kann gut (z. B. mit dem Sextanten) den Breitengrad (Entfernung zu den Polen) bestimmen, auf dem man sich befindet, nicht aber den Längengrad (z. B. den Ort entlang des Äquators oder eines Polarkreises). Der Erfindungsgeist von Jungforschern bleibt herausgefordert.

6

Das einzigartige Wattenmeer und seine Gezeiten

Zusammenfassung

Das weltweit einzigartige Wattenmeer der Nordsee, von der UNESCO als Weltnaturerbe ausgewiesen, ist mit seinem Wechsel von Ebbe und Flut, der hier riesige Gebiete periodisch trockenlegt und wieder überflutet, ein außergewöhnlicher Lebensraum. Wir versuchen zu verstehen, wie die Anziehungskräfte von Sonne und Mond sowie zusätzliche Fliehkräfte die Gezeiten hervorbringen. Wir erfahren auf einer Strandwanderung, auf einer geführten Wattwanderung, auf einer Ausfahrt mit dem Krabbenkutter und im Nordseemuseum, wie die Lebewesen des Wattenmeeres mit besonderen Strategien das Überleben unter den harschen Bedingungen des Watts meistern. Wir sehen Bekanntes, erfahren aber durch kundige Führung viel Unerwartetes. Was denn sind Entenmuscheln? – eben keine Muscheln –, was ist Seemoos, die Laterne des Aristoteles, und eine Tote-Seemannshand? Und wir erfahren zum Schluss, was es mit der „roten Flut“ und dem Meeresleuchten auf sich hat.

Haben wir uns bei der Sicht der Delfine in Gedanken in die Weiten der Ozeane mit seinen größten Bewohnern, den Walen, entführen lassen, so bleiben wir jetzt an der Küste, die jedermann zugänglich ist. Wir machen in diesem Jahr Urlaub an der Nordsee, vielleicht an einem Küstenort wie an einem der vielen „-siel“-Orte entlang der niedersächsischen Küste, von Greetsiel nahe der niederländischen Grenze über Carolinensiel bis Horemersiel. Oder wir machen Urlaub in St. Peter-Ording an der Küste Schleswig-Holsteins. Oder aber, wie Millionen anderer Binnenländer, auf einer der ostfriesischen Inseln, auf Borkum, Juist, Norderney, Baltrum, Langeoog, Spiekeroog oder Wangerooge, oder auf einer der nordfriesischen Inseln, auf Pellworm, Nordmarsch-Langeneß, Amrum, Föhr oder Sylt. In der Ortschaft List auf Sylt am Nordostende der Insel kann der Student in der Forschungsanstalt des Alfred-Wegener-Instituts Kurse über Meeresökologie besuchen. Doch auch der Normalurlauber kann sich informieren. Führungen über „Meeresforschung für jedermann“ werden allen interessierten Inselgästen angeboten. Der Inselgast hat darüber hinaus Gelegenheit, im Erlebniszentrum Naturgewalten nahe dem Alfred-Wegener-Institut viel Wissenswertes über die Nordsee, über Wetterereignisse, Leben in Watt und Dünen, Küstenschutz und erneuerbare Energien zu erfahren. Manch andere Orte entlang der Küste haben Museen, in denen der Urlaubsgast erfahren kann, welch einzigartiger Lebensraum vor ihnen liegt.

6.1 Weltkulturerbe Wattenmeer

So mancher, der als Urlauber die Strände der Nordsee aufsucht und sich vielleicht auch zu einer Wattwanderung bewegen lässt, ist sich nicht im Klaren darüber, dass er an einem Lebensraum angekommen ist, der weltweit nicht seinesgleichen hat. Es gibt entlang der riesigen Uferzonen aller Ozeane nur wenige großräumige Areale, die dem Wattenmeer der Nordsee gleichen und regelmäßig im Rhythmus der Gezeiten trockenfallen und wieder überspült werden. Vielleicht große Sandbänke im Mündungsdelta großer Ströme wie Mississippi und Jangtse, aber kaum so große Areale wie das über 10.000 km² umfassende Wattenmeer der Nordsee. Vor allem sind Watt-ähnliche Gebiete der Subtropen und Tropen nicht den äußerst harschen Bedingungen des Nordseewatts ausgesetzt. In tropischen Flachwassergebieten gedeihen Mangrovenwälder, die Überflutungen von 3 m Höhe und harte Winter, wie sie an der Nord- und Ostsee ertragen werden müssen, nicht überstehen würden.

Die Nordsee ist, von einer schmalen Zone vor der südlichen Küste Norwegens abgesehen, ein Flachmeer und wird von Geografen zu den Schelfmeeren gezählt. Sie ist im Durchschnitt 95 m tief, und in weiten Bereichen wie der Doggerbank und der Deutschen Bucht vor der Elbe- und Wesermündung nur etwa 30 m tief. Daher sind auch die Uferbereiche flach, fallen bei Ebbe in der Regel trocken und sind der Witterung mit ihren unwirtlichen Regengüssen und Stürmen nicht zuletzt deshalb so stark ausgesetzt, weil der Tidenhub, der Höhenunterschied zwischen Ebbe und Flut, in der Nordsee überdurchschnittlich groß ist.

Es hat gute Gründe, weshalb die angrenzenden Länder, Dänemark, Schleswig-Holstein, Hamburg, Niedersachsen und die Niederlande das Wattenmeer ihrer Bereiche zu Schutzgebieten erklärt haben und die UNESCO 2009 diese Gebiete zum Weltnaturerbe und Biosphärenreservat ausgewiesen hat: Riesige Gebiete, die tagaus, tagein periodisch bei Ebbe vom Meer freigegeben und widrigen Wetterlagen ausgesetzt werden, und dann wieder zur Zeit der Flut vom salzigen Meer eingenommen werden. Und das Wattenmeer gehört trotz aller Widrigkeiten zu den biologisch produktivsten und am dichtesten von Lebewesen besiedelten Gebieten der Erde. Dies ist umso bemerkenswerter, als nach Schätzungen von Meeresbiologen die Gesamtproduktivität der Ozeane kaum die der Landmassen erreicht.

Das Watt der Nordsee hat seine Einmaligkeit eben auch dadurch erhalten, dass es, wie gesagt, in besonderem Maße enormen Naturgewalten und extremen Unbilden der Witterung ausgesetzt ist. Die mächtigen Gezeitenströme und häufigen Stürme wühlen Sand und Schlick auf und transportieren Millionen von Tonnen von Material kilometerweit von einem Ort an den anderen. Ein Blick auf eine Aufnahme der NASA aus dem Weltraum (Abb. 6.1) lässt erahnen, welch gewaltige Massen an losem Sand durch die Nordsee geschwemmt werden. Das Südwestende der ostfriesischen Inseln verliert jährlich Tonnen von Material, am Nordostende wird Sand abgelagert. Ebenso verliert das Südende von Sylt alljährlich Terrain; anderswo hingegen werden Inseln verlängert und es tauchen plötzlich neue Sandbänke auf. Diese Verlagerung spiegelt die Hauptrichtung wider, in der die Flutströme die Nordsee umkreisen. Die vorherrschenden West- und Südwestwinde treiben die



Abb. 6.1 Nordsee, Deutsche Bucht, Landsat-Aufnahme, Flutströmung nachträglich eingezeichnet. (US gov, © frei)

Flutströmung voran und werfen Brandungswellen auf die Luvseite, das heißt auf die West- und Südwestseite der Inseln; ihre Ost- und Nordostseiten jedoch liegen oft auf der windabgewandten, der Leeseite. Hier kann der Sand wieder zur Ruhe kommen; die Inseln verlagern sich so bis zu 30 m pro Jahr nordostwärts. Neu angeschwemmte Sandbänke sammeln weiter durch den Wind angewehten Sand, wachsen so in die Höhe und werden zu Inseln, die allenfalls noch bei hohen Sturmfluten ganz unter Wasser geraten. So hat sich in den letzten Jahrzehnten entlang der Küste Schleswig-Holsteins die Reihe der nordfriesischen Inseln durch neue Inseln erweitert, die derzeit Seehunden und Seevögeln Rastplätze bieten, aber noch nicht von Menschen besiedelt sind: Jungnamensand, Japsand, Norder- und Süderoogsand vor den seit langer Zeit besiedelten Inseln Pellworm und Hooge. Im Nordseemuseum werden wir allerdings erfahren, dass in den letzten Jahrtausenden die Nordsee sehr viel mehr Land verschlungen als neues geschaffen hat.

In allen diesen Gebieten legt das Niedrigwasser Sand- und Schlickwatt frei (Abb. 6.2, 6.3 und 6.4). Felswattgebiete sind selten; in der Nordsee gibt es ein kleines Felswattgebiet nur bei Helgoland in der Nähe der langen Anna. Hier kann starkes Niedrigwasser den von der Erosion abrazierten felsigen Untergrund freilegen. Felsiger Untergrund ist für Tange (Großalgen), Grünalgen wie den Meersalat, Rotalgen und Braunalgen wie den Blasentang, und vielerlei Tierarten ein gesuchter Untergrund; wir werden darauf zurückkommen, wenn wir ein Verständnis für Riffbildung zu gewinnen suchen (Kap. 13). Das Felswatt bei Helgoland ist aus gutem Grund für den Urlaubsgast nicht zugänglich. Und nur



Abb. 6.2 Wattenmeer. **a** Die Bucht Königshafen bei List/Sylt mit Halbinsel Uthörn (Luftbild, vermittelt vom Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven), *dunkle Flecken unten rechts* Muschelbänke. **b** Sandwatt mit Priel (Luftbild, vermittelt von der Sielmann-Stiftung)



Abb. 6.3 a Schlickwatt bei Baltrum. (Foto © Karin Krammer, mit ihrer Genehmigung). b Sandwatt. Ausgeschiedene Sandreste des Wattwurms *Arenicola marina*. (© holidaycheck, Fotograf nicht genannt)



Abb. 6.4 Gegensätze im Wattenmeer. **a** auf hartem Untergrund: Seepocken, Blasentang, Strandschnecken. (© G+J Fotocommunity „guenti“). **b** Bäumchenröhrenwurm. (© holidaycheck, Fotograf nicht genannt)

wenige unserer Leser werden die ausgedehnten Felswattgebiete in der Bretagne und entlang den Küsten Englands, Irlands und Nordamerikas besuchen; deshalb werden diese in diesem einführenden Buch nicht gesondert in Augenschein genommen.

Jedermann, der an die Küsten der Nordsee kommt, wird gewahr, dass sie in besonderem Maße den Gezeiten, an der Küste Tide geheißen, ausgesetzt sind. Der Tidenhub, wie der Höhenunterschied des Wasserstandes zwischen Ebbe und Flut, in der Sprache der Küste zwischen Niedrigwasser und Hochwasser, beträgt in der Nordsee bis über 3 m. Das Areal zwischen dem Festland und den vorgelagerten Inseln kann bei Ebbe, besonders bei einer Nipptide, in weiten Gebieten gänzlich trockenfallen, bei Springtiden wiederum sind manche sonst offen liegende Sandinseln der Überflutung ausgesetzt. Tiden, Nipptiden und Springtiden? Als Besucher, die an Naturphänomenen interessiert sind, suchen wir nach einer Erklärung, zumal wir vorhaben, eine Wattwanderung mitzumachen. Wann sind günstige Zeiten? Vorerst haben wir das vage Allgemeinwissen, dass das irgendwie mit dem Mond zu tun hat.

6.2 Mond, Sonne und die Gezeiten

Es sind nicht nur die Fischer mit ihren Kuttern, die ihren Aktivitätsrhythmus nach dem Tidenkalender ausrichten müssen. Organismen des Wattenmeeres und der Küste entlang des Ärmelkanals, die in besonders starkem Maße dem Wechsel von Ebbe und Flut ausgesetzt sind, müssen sich lebensnotwendig diesem Wechsel anpassen. Man zieht sich

bei ablaufendem Wasser in sein Gehäuse oder seine Höhle zurück oder vergräbt sich im Sand.

Auch in Gebieten ohne nennenswerten Tidenhub kann es zweckmäßig sein, vom Mond abhängige Ereignisse als Zeitgeber zu nutzen. In den tropischen Meeren gibt es nicht viele potenzielle Zeitgeber. Darauf gehen wir später in Kap. 11 ein.

An den Küsten des Nordatlantiks und der Nordsee kommen Tiden in Abständen von 12 h und 25 min. Die heutige um 12:00 Uhr auflaufende Flut wird folglich am morgigen Tag um fast eine Stunde (2×25 min) verschoben um 12:50 Uhr eintreffen. Wie kommt es zum periodischen Wechsel von Ebbe und Flut?

Der die Erde umhüllende Wassermantel der Ozeane unterliegt verformenden Kräften:

1. durch die Massenanziehung (Gravitation) von Mond (und Sonne) auf die Erde.
2. durch Fliehkräften, die aus der Rotation des Zwei-Körper-Systems Erde+Mond resultieren.

Zu (1). Für das Zustandekommen der Gezeiten mit Ebbe und Flut ist vor allem die Anziehungskraft des Mondes maßgebend; denn die Sonne hat zwar eine millionenfach größere Masse als der Mond, wegen ihrer großen Entfernung aber nur knapp die halbe Anziehungskraft. Da die von einer Masse ausgehende Gravitation mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, wirkt die Anziehungskraft des Mondes auf Mond-nahe Wassermassen wesentlich stärker als auf Mond-ferne. Der Mond erzeugt in dem ihm zugewandten Ozean täglich einen Flutberg. Die sich drehende

Erde zeigt jedoch dem Mond laufend einen anderen Ort, bzw. einen anderen Längengrad. Nehmen wir als Beispiel die Insel Sylt. Gemäß der Eigendrehung der Erde sollte der Flutberg, der heute um 12:00 Uhr die Insel streifte, von der Anziehungskraft nach 24 h um die ganze Erde geschleppt worden sein und wieder auf Sylt zurollen. Allerdings ist die Position des Mondes im Vergleich zur Erde nicht exakt ortsfest. Der Mond kreist ja, wenn auch langsam, im Verlauf eines 28-Tage Monats (genauer: in 27 Tagen, 7 h, 43 min) um die Erde, hat also morgen eine etwas andere Position als heute, erkennbar daran, dass er morgen um ca. 50 min später als heute aufgeht. Somit erreicht auch jeder mit dem Mond um die Erdkugel laufende Wellenberg einen bestimmten Punkt der Erde jeden Tag 50 min später als am Vortag (Abb. 6.5).

Zu (2). Der Mond ist jedoch mit seiner Anziehungskraft unmittelbar nur für einen Flutberg pro Tag zuständig. Wie eben gesagt, sollte der nächste vom Mond mitgeschleppte Flutberg im Abstand von 24 h plus 50 min folgen. Doch die nächste Flut trifft bereits zur Hälfte der erwarteten Zeit ein, nach 12 h und 25 min. Warum? Es kommen Fliehkräfte ins Spiel, die aus Rotationsbewegungen von Erde plus Mond resultieren.

Die Bedeutung von Fliehkräften ist schwerer zu verstehen. Die Rotation der Erde um ihre eigene Achse können wir aus dem Spiel lassen; denn sie bewirkt rotationssymmetrische Fliehkräfte, die rings um den Äquator gleich groß sind. Bedeutsam für die Entstehung periodisch wechselnder Kräfte und damit von periodischen Gezeiten ist eine zusätzliche Fliehkraft, die sich aus der Rotation des Erde+Mond-Paares um einen gemeinsamen Schwerpunkt S

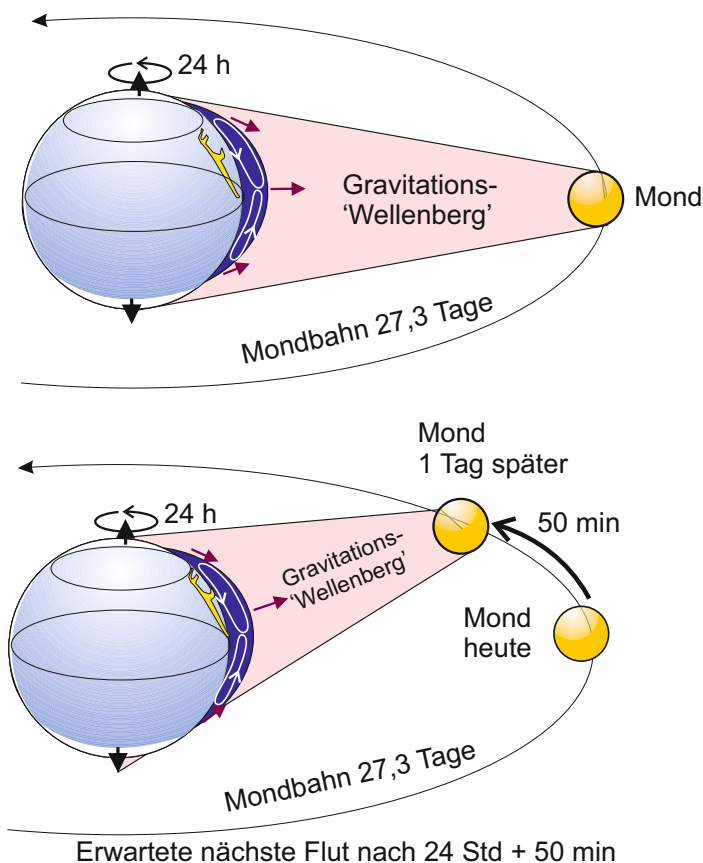


Abb. 6.5 Gezeiten 1: Der durch die Gravitation des Mondes bedingte Flutberg und seine Wanderung

ergibt (Abb. 6.6). Erde und Mond tanzen, wenn sie im Laufe des Jahres als Paar gemeinsam um die Sonne ziehen, im langsamen Walzertakt um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Da die Erde die ca. 81-fache Masse des Mondes hat, liegt dieser Schwerpunkt noch innerhalb der Erdkugel nahe ihrer Peripherie. Um diesen S-Punkt rotiert das Erde-Mond-Paar unablässig einmal in 28 Tagen (genauer 27 Tagen, 7 h, 43 min) um die gemeinsame Drehachse. Das Paar rotiert, wenn auch langsam, unablässig; darum wirkt diese Kraft ebenso wie die Schwerkraft des Mondes beständig.

Durch die ständige Rotation des Erde-Mond-Paares um den Schwerpunkt S entsteht also auf der Erde neben der rotationssymmetrischen Fliehkraft eine zusätzliche Fliehkraft, die asymmetrisch ist und der Mondposition stets exakt entgegengesetzt ist, weil nun mal die schwerere Erde auch größere Fliehkräfte erzeugt. Die aufsummierten Fliehkräfte überwiegen also stets auf der dem Mond abgewandten Seite. Dem Gravitations-bedingten Flutberg auf der einen Seite der Erdkugel folgt ein Fliehkraft-bedingter zweiter Flutberg auf der gegenüberliegenden Seite der Erdkugel. Dass die beiden Flutberge nicht stationär sind, sondern die Erde umkreisen, ist der täglichen Erdrotation geschuldet. Da zwei Wellenberge unterwegs sind, überstreicht folglich am Tag zweimal ein Flutberg (Hochwasser) eine bestimmte Stelle der Erde, jeweils gefolgt von einem Ebbetal. Ein Tal muss folgen, weil ja Wasser zu den Flutbergen abgezogen wird.

Zu Springfluten und Nipptiden kommt es, wenn die Stellung der Sonne die Anziehungskraft des Mondes verstärkt oder vermindert (Abb. 6.7). Durch den monatlichen Umlauf des Mondes kommt es alle 14 Tage zur Springtide.

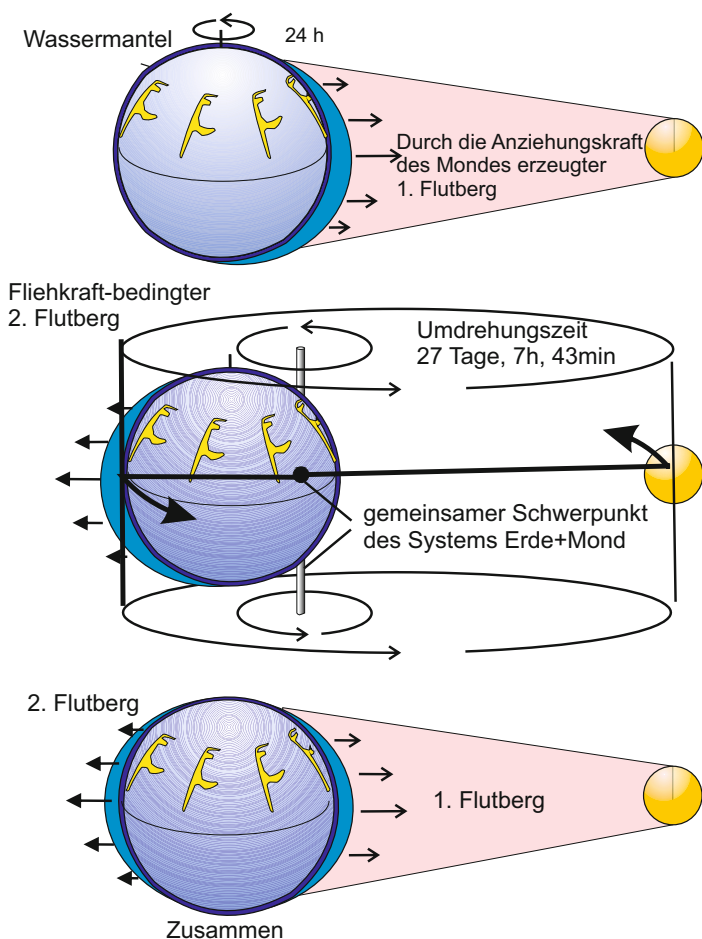


Abb. 6.6 Gezeiten 2: Erzeugung zweier Flutberge pro Tag, erstens durch die Gravitation des Mondes und zweitens durch eine Fliehkraft, die aus der Rotation der Masse [Erde + Mond] um einen gemeinsamen Schwerpunkt (als Achse dargestellt) resultiert

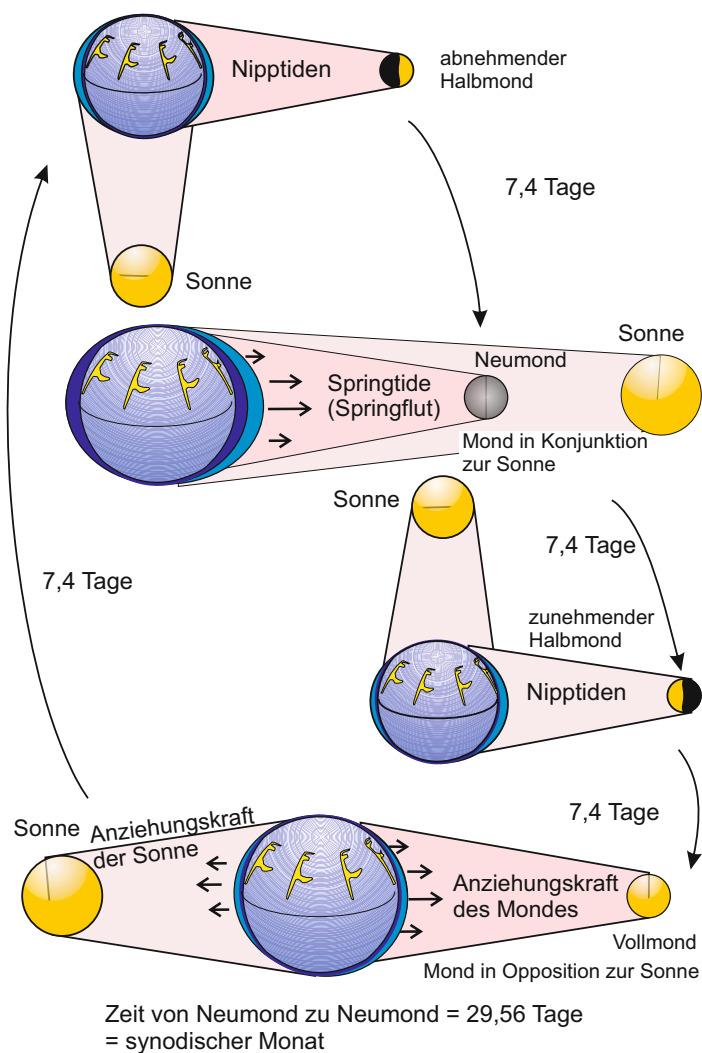


Abb. 6.7 Gezeiten 3: Springtiden

Die Auswirkung auf die Tide verzögert sich allerdings in der Deutschen Bucht um ein bis drei Tage gegenüber der Position der Gestirne. Weitere geophysikalische Variable lassen wir aus dem Spiel; wir überlassen es Fachleuten, dies alles und auch noch die speziellen örtlichen Gegebenheiten zu berücksichtigen, wenn sie einen Tidenkalender erstellen.

Ein auf einen Küstenbereich zulaufender Flutstrom wird zum „auflaufenden“ Wasser. Das aufgelaufene Wasser kehrt nach einer kurzen Ruhephase von ca. 1 h um und wird zum „ablaufenden“ Wasser, bis nach einer kurzen Ruhepause die Wasser wieder zurückpendeln. Die Flutfront erreicht alle 12 h und 25 min den oberen Wendepunkt an der Küste. Man darf sich jedoch nicht auf seine Uhr verlassen, sondern sollte einen Tidenkalender oder örtliche Gezeitentabelle zu Rate ziehen; denn es kommen noch orts- und zeitspezifische Gegebenheiten von hohem Gewicht hinzu. Ein Flutstrom wird in seinem Verlauf von Meeresströmungen beeinflusst, von Landmassen aufgehalten und abgelenkt.

In der Nordsee kommt es zu einer „Kreisel tide“. Die alle 12,77 h über Schottland hereinströmenden Wasserberge streifen wie ein Uhrzeiger die Küsten entlang – allerdings entgegen dem Uhrzeigersinn. Der Flutstrom gleitet erst entlang der britischen Küste von Nord nach Süd und dreht dann in der südlichen Nordsee von Süd nach Nord (Abb. 6.1). Hochwasser erreicht Amrum früher als Sylt, das am südlichen Ende von Sylt gelegene Hörnum früher als das am Nordende gelegene List. Die über den Ärmelkanal hereinströmenden Wassermassen erzeugen durch Stau effekte die hohen Tidenhübe der Bretagne und Normandie, wirken sich aber an der Nordseeküste nur noch gering aus. Hingegen sind Winde zu beachten. Starke Ostwinde halten

entlang der Westküste Schleswig-Holsteins Fluten ab, verstärken die Ebbe, Westwinde hingegen verstärken die Flut, verhindern das Abfließen des Wassers. Für Wattexkursionen sind Tage mit NO-Wind besonders günstig, bei starkem SW-Wind hingegen sind Wattwanderungen nicht selten unmöglich.

6.3 Rätselhafte Funde des Strandwanderers

Erst mal machen wir, wie das bei Urlaubern so üblich ist, eine Wanderung entlang des Sandstrandes. Kurz vor unserer Ankunft war ein Sturm über die Nordsee gefegt. Der Strand ist entlang der oberen Flut- und Brandungslinie von dunklem Anwurf gesäumt. Dort im Spülsaum finden wir nach einem Sturm vielerlei aus den Tiefenwassern angeschwemmte grüne, braune und rote Tange und so manche Relikte von normalerweise im Tiefenwasser verborgenen Lebewesen. Wir haben uns im Buchladen zuvor schon gedruckte Wattführer besorgt. Gut, falls wir auf unserem mitgeführten Smartphone ein App geladen haben, das uns im Bedarfsfall ergänzende Auskünfte gibt, beispielsweise das *beach explorer* App, das im Rahmen des Bundesprogramms Biologische Vielfalt entwickelt und dank der Unterstützung des Bundesamtes für Naturschutz kostenfrei heruntergeladen werden kann.

Man findet, natürlich, all die vielen Muschelschalen, man findet aber mitunter auch recht Seltsames, das auch ein Biologie-Kundiger nicht sogleich identifizieren kann. Beispielsweise die ledrigen, vierzipfligen Eischalen von

Knorpelfischen, die hellen Eischalen der Katzenhaie und die schwarzen der Dornhaie oder Nagelrochen (Abb. 6.8). Wir finden mitunter die als Wetzsteine für Wellensittiche beliebten, kalkigen Schulpe der Sepia-Tintenfische. Nur ausgesprochen Fossilien-kundige Strandwanderer wissen, dass die im Kalkgestein der Jura- und Kreidezeit wie in den Solnhofener Platten so zahlreichen, braunen bis schwarzen Donnerkeile, auch Teufelsfinger geheißen, Innengehäuse (Schulpe) der ausgestorbenen Belemniten-Tintenfische sind (Abb. 7.4). Zwar findet man Donnerkeile am Strand nur sehr selten, vielleicht aber finden wir ein Exemplar der zwar nicht eben spektakulären, aber besonders rätselhaften „Laterne des Aristoteles“ (Abb. 6.8), benannt nach dem vor 2400 Jahren geborenen griechischen Philosophen, Naturforscher und Autor der ersten zoologischen Lehrbücher, Aristoteles. Und gewiss gehören Seepocken (Abb. 6.9) zu den ersten marinen Gebilden, die wir zu sehen bekommen; denn sie siedeln zuhauf überall in der Spritzwasserzone auf beliebigen harten Untergründen, auf Steinen, Beton, Metall und Holz. Was es mit diesen von Strandwanderern kaum beachteten Gebilden Unerwartetes auf sich hat, werden wir später von unserem Wattführer erfahren.

Wir finden, besonders in den Sommermonaten, wabbelige Schirme der transparenten, mit weißen „Ohren“ (= Ei- oder Samenbehälter) geschmückten Ohrenquallen (*Aurelia aurita*) und gelb-orange gestreifte Schirme der Kompassquallen (*Chrysaora hyoscella*, Abb. 6.14). Wir begegnen aber auch gestrandeten Exemplaren der zu Recht gefürchteten, weil bei Berührung brennend nesselnden, blauviolett schimmernden Blauen Nesselquallen (*Cyanea lamarckii*) mit ihrem bis zu 35 cm weiten Scheibendurchmesser. Hin-

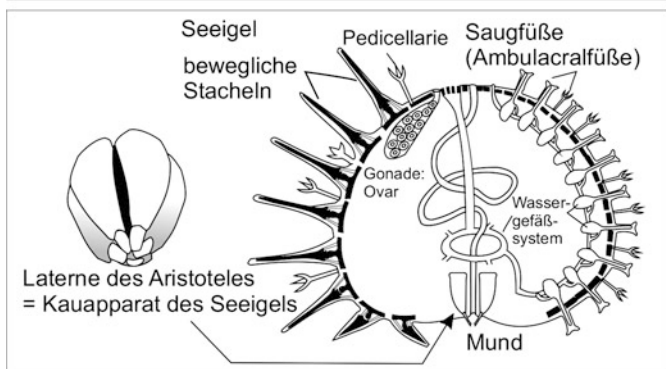
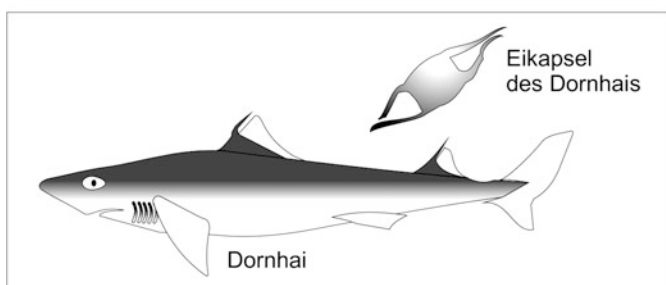
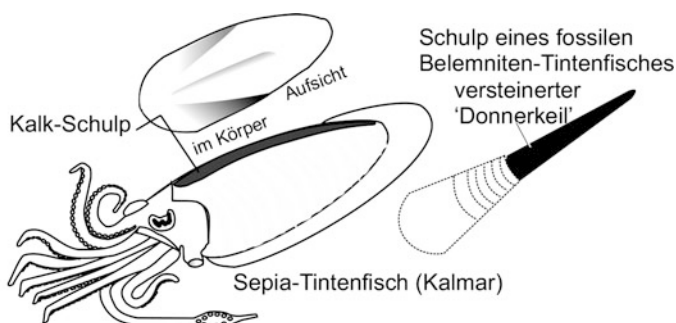


Abb. 6.8 Seltsame Funde am Spülsaum des Strandes: Kalkschulp, Eikapsel, Laterne des Aristoteles und Erklärung zu deren Herkunft

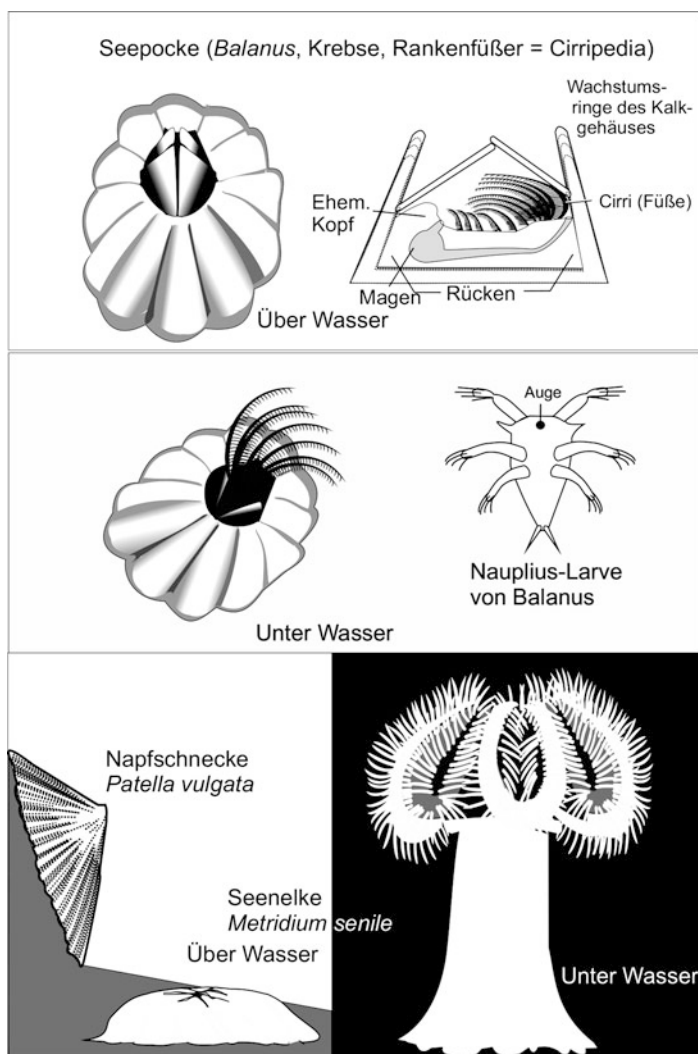


Abb. 6.9 Bewohner der Grenzzone Wasser-Land, periodisches Trockenfallen und zeitweisen Regen ertragend

gegen sind die etwa 3 cm kleinen, glasigen, kugeligen bis ovalen „Seestachelbeeren“ (*Pleurobrachia*, Stamm Ctenophora) gänzlich harmlos. Und wir finden – und dies vor allem – all die vielen Gehäuse von Schnecken und Schalen von Muscheln.

Muschelschalen? Neben vielerlei Muscheln, wie sie Kinder und Strandwanderer finden und sammeln, und deren Bilder zu zeigen und Namen zu nennen wir unseren mitgeführten Büchern oder *beach*-Apps überlassen, kann man mitunter auch Rätselhaftes finden.

So finden wir, an Treibholz geheftet, ein Bündel seltsamer, muschelähnlicher Gebilde (Abb. 6.10). Ein neugieriger und kluger Strandwanderer, der vorbeikommt, nennt sie „Entenmuscheln“.

Er erinnert uns an den mittelalterlichen Glauben, an fernen Küsten würden Meer-Enten oder Meer-Gänse auf Bäumen heranwachsen und angespülte Äste mit Entenmuscheln seien abgebrochene Zweige mit embryonalen Entenvögeln, die als unreife Früchte noch nicht heruntergefallen seien. So erzählen es alte Holzschnitte (z. B. aus John Gerard's Herbal 1587, in Abb. 6.10). Nun sollen diese Früchte, wie der Strandwanderer meint, in Wirklichkeit Krebse sein. Wirklich? Wir werden morgen unseren menschlichen Wattführer befragen. Im Augenblick fragen wir uns angesichts der vielen Muscheln und Schneckenschalen: Warum so viele harte Kalkschalen? Unsere Erklärung: Der von Strömung und Wellengang aufgewirbelte Sand wirkt als Scheuermittel, vor dessen aufreibender Kraft sich Wattbewohner in irgendeiner Weise schützen müssen. Harte, verschleißbare Schalen und tiefe Gänge im Wattboden sind eine von der Natur gefundene Lösung

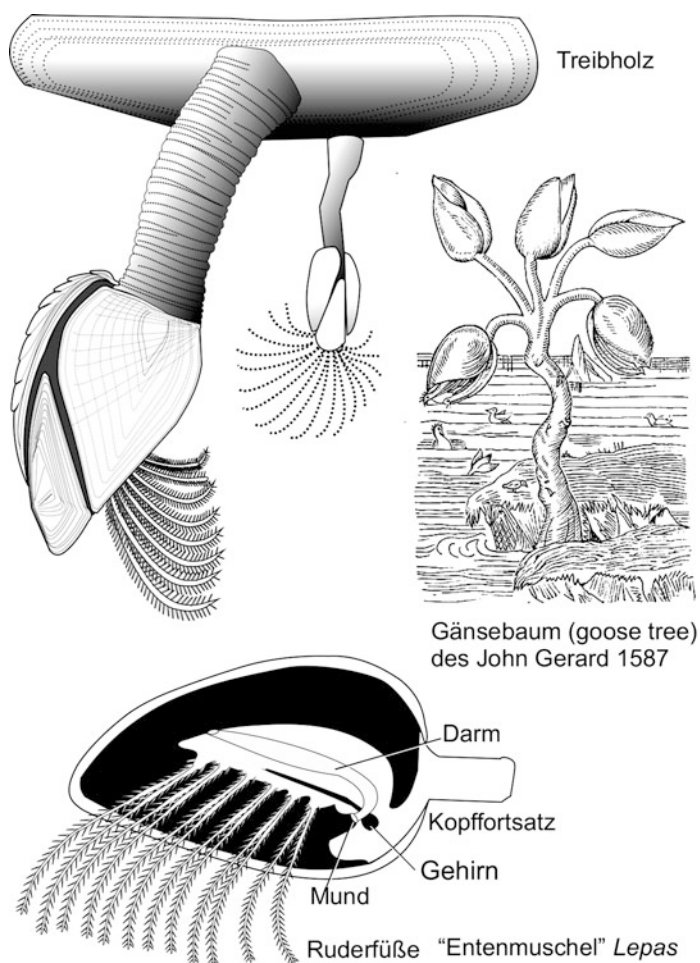


Abb. 6.10 Die „Entenmuschel“ – ein Ruderfußkrebs, und seine im Mittelalter angenommene Herkunft

(Abb. 6.11). Die bei Ebbe trockenfallenden Flächen sind aber auch dem Regen, der heißen Sommersonne und der Eiskälte des Winters ausgesetzt. Bei anhaltendem Regenwetter – wahrlich keine Seltenheit an der Nordsee – sind die oberflächennahen Organismen einem osmotischen Schock ausgesetzt, wie er kein Lebewesen an Land oder in Süßgewässern erdulden muss. Gut bewegliche tierische Lebewesen wie Fische und Krebse ziehen sich bei ablaufendem Wasser, das heißt bei einsetzender Ebbe, in tiefere Wasser zurück. Was wir wohl zu sehen bekommen, wenn wir, so unsere Planung, morgen eine Wattwanderung und in den weiteren Tagen eine Ausfahrt mit dem Krabbenkutter machen werden?

6.4 Eine Wattwanderung – aber mit geschulter Führung!

Wir melden uns für eine Wattwanderung an. Der Tag ist günstig, es ist nahezu windstill, es regnet nicht und Niedrigwasser ist heute für die helle Tageszeit angesagt. Wir folgen einem ortskundigen Führer, der mit Spaten und Eimer ausgestattet ist; darüber hinaus, wie es Gesetz und Vorschriften befehlen, mit einer wasserdichten, genauen Armbanduhr, gut verpacktem Mobiltelefon, mit GPS-Gerät, Kompass, Signalpfeife, Fernglas, Verbandstasche und Seil (Seil als Leitseil im Nebel und falls mal ein Vorauseilender oder abseits Gehender im Schlick oder Mahlsand zu versinken droht). An „schwarzen Flecken“, wo Fäulnisprozesse übelriechenden Schwefelwasserstoff freisetzen,

wird uns der Wattführer gnädig vorbeileiten, ebenso wie er die berüchtigten Mahlsande weiträumig umgehen wird. Gleich bei einsetzender Ebbe ziehen wir in unseren Gummistiefeln vom örtlichen Kutterhafen ausgehend los und notieren, was uns der Wattführer zeigt.

In der Spritzwasserzone, an Bühnen des Hafens, an Betonklötzen und großen Steinen, welche die Eiszeit-Gletscher einstmals von Skandinavien herangeschleppt hatten und regelmäßig bei Flut überspült werden, sehen wir unzählige **Seepocken** (*Balanus*, Englisch *barnacle*), festsitzende, wie Miniaturvulkane aussehende und mit einem Doppeldeckel verschlossene Kalkgehäuse, in denen mit dem Kopf und Rücken am Untergrund festgewachsene Ruderfußkrebse ihr Zuhause haben (Abb. 6.9). Nur bei Flut öffnen diese das Gehäuse und winken mit ihren Ruderfüßen Plankton herbei. Obzwar Seepocken auch längeres Trockenfallen überstehen, weisen sie uns als erste auf eine Besonderheit des Wassers als Lebensraum hin. Im Wasser, besonders reichlich im Meerwasser, schweben Myriaden von Mikroorganismen, die man heraus filtrieren kann. Das gibt es so eben nicht an Land; da fliegen nicht Schwärme von Kleinstlebewesen durch die Luft, die man mit Fangapparaten oder feinmaschigen Netzen herausfischen könnte. Und nun erfahren wir auch, was es mit den „**Entenmuscheln**“ (Gattung *Lepas*) auf sich hat. Auch das sind, wie uns der Wattführer auf unsere Frage hin bestätigt, zu unserem Erstaunen Krebse aus der Klasse der Ruderfuß- oder Rankenfußkrebse (Abb. 6.10). Wie Seepocken sind sie von verschleißbaren Kalkschalen umhüllt, öffnen diese unter Wasser – eine evolutions-geschichtliche Parallele zu den echten Muscheln –, strudeln aber Plankton nicht wie

Muscheln mit bewimperten Kiemen, sondern mit ihren befiederten Füßen herbei. Auch sie schwimmen als Larven wie die Naupliuslarven der Seepocken frei im Wasser und setzen sich, so sie denn einen Hartboden finden, im Zuge einer Metamorphose mit ihrem Rücken und Kopf am Untergrund fest. Anders als die Seepocken lassen Entenmuscheln am Kopfende einen langen, beweglichen Stiel herauswachsen. Unser Wattführer erzählt: Kolonien einer verwandten Art von Entenmuscheln finde man an den felsigen, brandungsumtosten Klippen der spanischen Atlantikküste (Galizien); dort werden sie von wagemutigen Männern gesammelt, um sie teuren Restaurants als teure Delikatessen (Spanisch *percebes*) zu verkaufen.

An Mauern und Pfählen, die nur bei starker Ebbe und nur für kurze Zeit nicht von Wasser bespült sind, harren **Seenelken** (*Metridium senile*, Abb. 6.9) auf vorbeiziehende Plankton-Schwärme, um mit ihren vielen, dünnen und verästelten Tentakeln ebenfalls mikroskopisch kleine Lebewesen heraus zu fischen. Seenelken sind für Zoologen Vertreter der Korallentiere, auch wenn sie ebenso wie Seerosen einzeln und nicht in Kolonien miteinander verwachsener Individuen leben und auch keine Kalkstrukturen erbauen. Fallen Seenelken bei Ebbe trocken, ziehen sie ihren Fangapparat ins Körperinnere und verschließen dieses, ähnlich wie wir mit den Lippen unseren Mundraum verschließen. Sie spucken das Wasser aus ihrem inneren Hohlraum und ziehen sich zu einem Pfannkuchen-flachen Gebilde zusammen.

Wir sehen an Felsgesteinen angespresste **Napfschnecken** (Gattung *Patella*, Abb. 6.9), die sich bei Niedrigwasser nach dem Saugnapfprinzip fest an den Untergrund ansau-

gen und jeder Witterung trotzen. Bei beginnender Ebbe kehren Napfschnecken von ihren Weidegängen zurück an ihren stets gleichen Standort und saugen sich, ihren breiten Fuß als Saugnapf einsetzend, an ihrem Untergrund fest. Die Gehäuse sind durch die jahrelange Treue der Tiere zu ihrem Standort und durch angepasstes Wachstum ihres Schalenrandes so exakt an den Untergrund angeschmiegt, dass sie wasserdicht auf ihm kleben. Auch längerer Regen, eine Katastrophe für viele Meeresbewohner, kann sie nicht mehr behelligen. Die Pantoffelschnecken (Gattung *Crepidula*) mit ihrem gewölbten Gehäuse machen es den Napfschnecken nach und saugen sich bei Niedrigwasser mit ihrem breiten Fuß an Hartsubstraten fest. **Strandschnecken** (Gattung *Littorina*, Abb. 6.11) besiedeln nicht nur den Wattboden; kleinere Arten kriechen über die Hochwasserlinie hinaus in die Spritzwasserzone, wo sie wie die Seepocken stundenlanges Trockenfallen ertragen. Auch sie können mit ihrem Fuß an festen Untergründen haften, tragen aber auch auf ihrem Fuß einen hornartigen Deckel, den sie bei Bedarf als Haustür einsetzen, um ihr Haus zu verschließen. Nur bei Flut gehen diese Mollusken, Napf- wie Strandschnecken, auf ihre Weidegänge. Bei Flut auch entlassen sie ihre Eier ins freie Wasser, wo sie sich zu winzigen, geflügelten und feenhaft schwebenden Veligerlarven des Planktons entwickeln (Abb. 7.4).

Auf schlickigen, von gelbbraunen, mikroskopisch kleinen Kieselalgen (Diatomeen) bedeckten Böden sind stellenweise die kleinen Wattschnecken (*Hydrobia ulvae*) in riesigen Mengen versammelt; während große Schnecken wie die Wellhornschnecke flache Zonen meiden und sich in tieferem Wasser aufhalten.

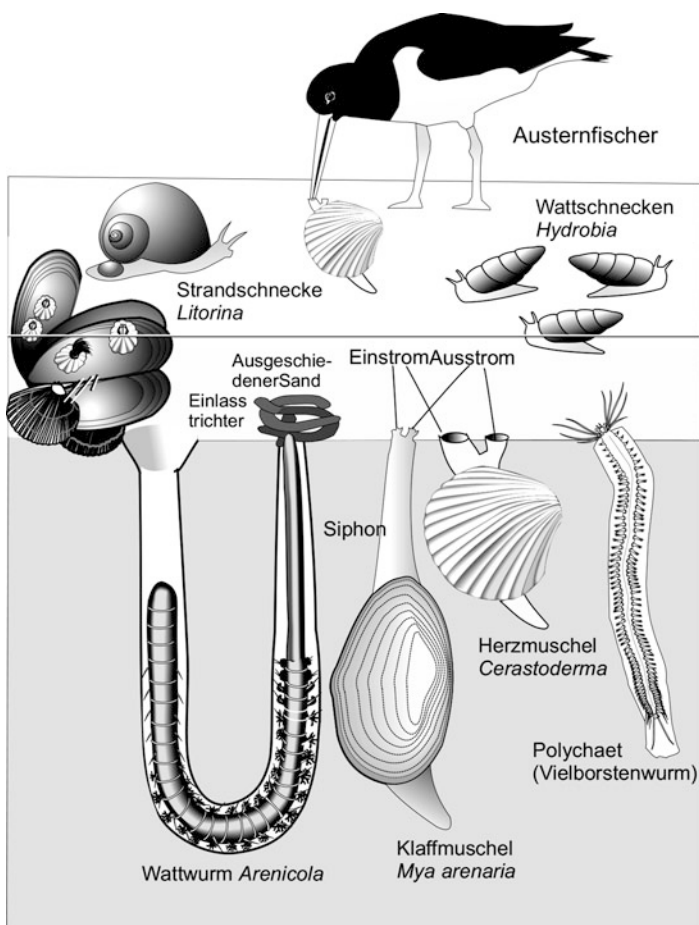


Abb. 6.11 Wattenmeerboden mit typischen Bewohnern

Wir sehen als weitere Vertreter der Mollusken **Miesmuscheln**, die sich mit zähen Byssusfäden an Steinen und an Nachbarmuscheln festmachen, verankern und ihre beiden Schalen bei Ebbe zusammengepresst halten. Ihr Vermögen, schon während ihrer Verwandlung von der winzigen Schwimmlarve zur jungen Muschel sich mit Byssusfäden an jedem Festkörper, und sei es nur eine schon sesshaft gewordene andere Muschel, zu verankern, führt im Laufe von Jahren zum Aufbau großer Muschelbänke nicht nur an felsigen Küsten, auch im Watt der Nordsee. Freilich, in weiten Gebieten der Nordsee sind in den letzten Jahrzehnten die essbare Miesmuschel (*Mytilus edulis*) ebenso wie die europäische **Auster** (*Ostrea edulis*) von der pazifischen Auster (*Crassostrea gigas*) verdrängt worden. Pazifische Austern werden, wie der Wattführer erklärt, heute in großem Maßstab nachgezüchtet, in Drahtkörben gemästet und tonnenweise geerntet und verkauft.

Wir sehen aber keine lebenden **Herzmuscheln** (*Cerastoderma edule*, früher *Cardium edule*) und sonstige Muscheln, deren Schalen wir am Strand gesammelt hatten, ebenso wenig wie die kleinen, farbenfrohen, mit rötlichen konzentrischen Ringen verzierten Plattmuscheln (*Macoma baltica*), die Großen Klaffmuscheln (*Mya arenaria*), die hartschaligen, mit dunkler Oberhaut überzogenen Islandmuscheln (*Arctica islandica*) und die langgestreckten amerikanischen Scheidenmuscheln (*Ensis directus*). Alle diese Muscheln sind, solange sie leben, nirgends auf dem Wattboden zu sehen.

Lebende Herzmuscheln und manch andere Muscheln kommen jedoch vereinzelt zum Vorschein, wenn der Wattführer mit seinem Spaten den Wattboden umgräbt; denn

die meisten Muscheln leben in Röhren im Boden des Watts (Abb. 6.11). Mit ihren harten Schalen sind sie dort geschützt, wenn Gezeitenströme und Sturmwellen den Wattsand umschichten und der in Bewegung geratene Sand als Scheuersand im Laufe der Zeit jede freiliegende Muschel- und Schneckenschale zu Sand zermahlt. Mit ihren Röhren, Siphons genannt, die sie zur Oberfläche des Wattbodens hochschieben, saugen die Muscheln durch eine Einströmung Atemwasser ein, und mit ihm auch feinstes Mikro- und Nanoplankton, das sie mit ihren als Filter dienenden Kiemen heraus fischen.

An die Grenze zum Land wagen sich auch **Strandkrabben** (*Carcinus maenas*), aus dem Wasser; denn auch sie vertragen kurzfristiges Trockenfallen dank eines Wasserfilms, der unter ihrem Chitinpanzer die Kiemen nass hält. Sie suchen allerlei Verzehrbares in Bodennähe. Nur selten bis an den Strandsaum wagen sich Schwimmkrabben (*Liocarcinus holsatus*), deren letzte Beinpaare an ihren Enden zu Paddeln verbreitet sind. Krabben, zoologisch Kurzschwanzkrebse, erstaunen, weil sie seitlich gehend davonlaufen. Spaß machen die **Einsiedlerkrebse** (*Eupagurus bernhardus*), die leere Schneckengehäuse besiedeln, sich bei Bedrohung in ihre Gehäuse zurückziehen, den Eingang mit ihren Scheren verschließen, sich bei Ebbe in Priele oder Gezeitentümpel zurückziehen. Als Jungtiere hausen sie in leer gewordenen Gehäusen der Strandschnecken (*Littorina*). Wird den wachsenden Krebsen das Gehäuse zu klein, erklärt unser Wattführer, ziehen sie in die großen Gehäuse der Wellhornschnecke (*Buccinum*) um. Da oft Wohnungsmangel herrscht, gibt es unter den Einsiedlern heftige Kämpfe. Sie ergreifen mit ihren Zangen die Zangen des Nachbarn;

mit rhythmischem Zucken versuchen sie trickreich, den Nachbar aus seinem Haus herauszuziehen, was uns Menschen nicht gelingen will, ohne dem Krebs Scheren und Beine auszureißen.

Manche von Einsiedlern bewohnten Schneckengehäuse und ebenso manche Muschelschalen und Steine sind von seltsamen Gebilden bewachsen oder überzogen, die mit ihrer Höhe von bis zu 30 cm wie Miniatur-Sträucher und -Bäume eines japanischen Bonsai-Gartens aussehen. Es handelt sich jedoch nicht um Pflänzchen, sondern um **Hydropolyen**, die sich vom Krebs herumtragen lassen.

Manche Hydropolyen sehen eben mit ihren fein verästelten und gefiederten Zweigen aus wie kleine Sträucher, so das sogenannte **Seemoos** (Abb. 6.12, Zypressenmoos, *Sertularia cupressina*), das auch auf mancherlei Hartsubstrat wie Steinen oder Muschelschalen siedelt.

Seemoos-Sträucher sind nach den Seenelken der zweite Vertreter des Tierstammes der Nesseltiere (Cnidaria), die wir zu Gesicht bekommen. Nesseltiere sind Organismen, die als Polypen oder Quallen (Medusen) in Erscheinung treten und deren Mund mit Fangarmen umkränzt ist, die mit Nesselzellen bestückt sind.

Diese enthalten die – mitunter zu Recht – gefürchteten Nesselkapseln. Diese schleudern bei Kontakt mit einem Opfertierchen mit explosiver Gewalt lange, dünne Schläuche aus, die mit Klebstoffen überzogene sind oder lähmende Nervengifte aus ihrer endständigen Öffnung ausspucken und die sich oft mit Widerhaken im Opfer verhaken. Die aus einer Kapsel herausschießenden Schläuche mancher Kapseltypen erstarren blitzartig zu Injektionsnadeln, die lähmendes Gift in den Angreifer oder das unvorsichtige

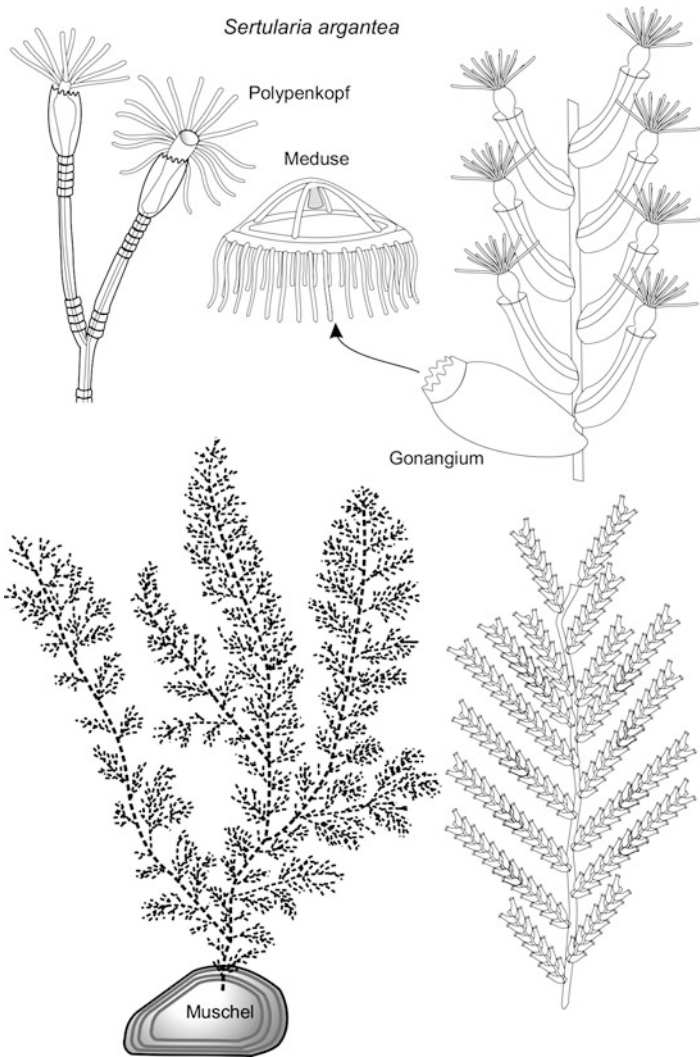
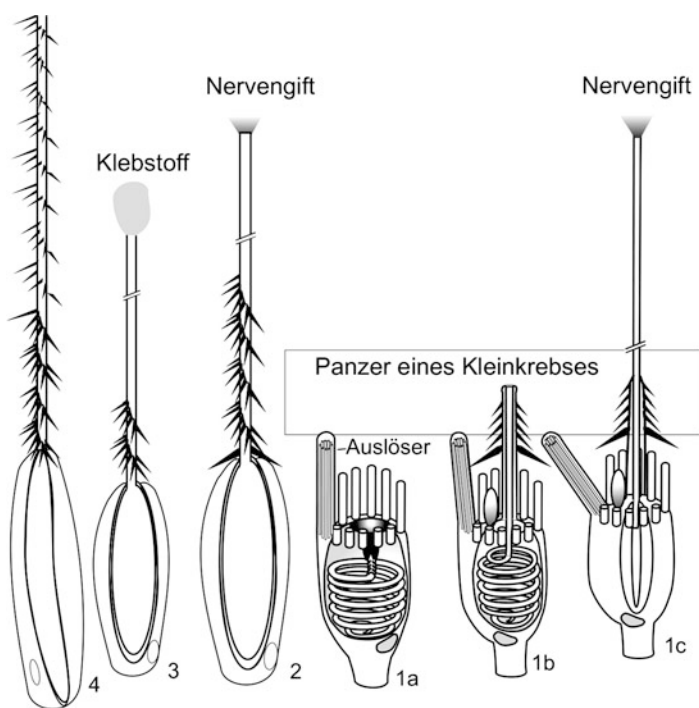


Abb. 6.12 Das „Seemoos“ *Sertularia*, eine Hydrozoenkolonie

Opfer spritzen (Abb. 6.13). Glücklicherweise haben jedoch nur wenige Arten wie die berühmten Würfelquallen tropischer Meere Injektionsnadeln, die unsere dicke menschliche Haut durchdringen und Gifte freisetzen, die bei uns fürchterlich brennende Schmerzen erzeugen können und sogar lebensgefährlich sind. Nicht so, jedenfalls, das Seemoos.

Das strauch- oder baumförmige Seemoos (*Sertularia cupressina*) und ähnlich gestaltete verwandte Arten wie das Korallenmoos (*Hydrallmannia falcata*) haben eine stabile Struktur dank einer festen „Rinde“ aus hartem, unverwüstlichem Chitin, demselben Material, aus dem der harte Panzer der Insekten und Krebse besteht. Seemoos wird, wie unser Wattführer erklärt, gesammelt, getrocknet, oft grün eingefärbt, so verkauft und im Modellbau als Bäume und Sträucher zur Dekoration der Eisenbahnanlage verwendet. Im Modellbau sei Seemoos auch als Meerschaumbaum oder Neptunpflanze bekannt. Freilich, ein schlauer Mitwanderer unserer Gruppe zuckt zweifelnd mit den Achseln und klärt uns auf: Zwar werde in der Tat auch getrocknetes und eingefärbtes Zypressenmoos für den Modellbauer verkauft. Die Mehrzahl der vom Handel angebotenen, als Seemoos oder Meerschaum bezeichneten reichverzweigten Gebilde seien jedoch in der Wüste Gobi gesammelte, echte Pflanzen, und mit seinem Smartphone findet er den Namen *Teloxys aristata* (auch *Dysphania aristata* oder *Chenopodium aristatum* genannt).

Wir konzentrieren uns wieder auf Funde im Watt. In Gezeitentümpeln, die in ihrer Senke Seewasser zurückhalten, finden wir in den Sommermonaten bisweilen noch kläglich zuckende Quallen; vom Schiff aus jedoch bieten sie einen beeindruckenden Anblick (Abb. 6.14).



Nesselzellen = Cnidocyten = Nematocyten; Typ 1: Stenotele, Typ 2: Mastigophore, 3 Glutinante 4 Isorhiza einer Koralle

Abb. 6.13 Nesselzellen der Nesseltiere = Cnidaria

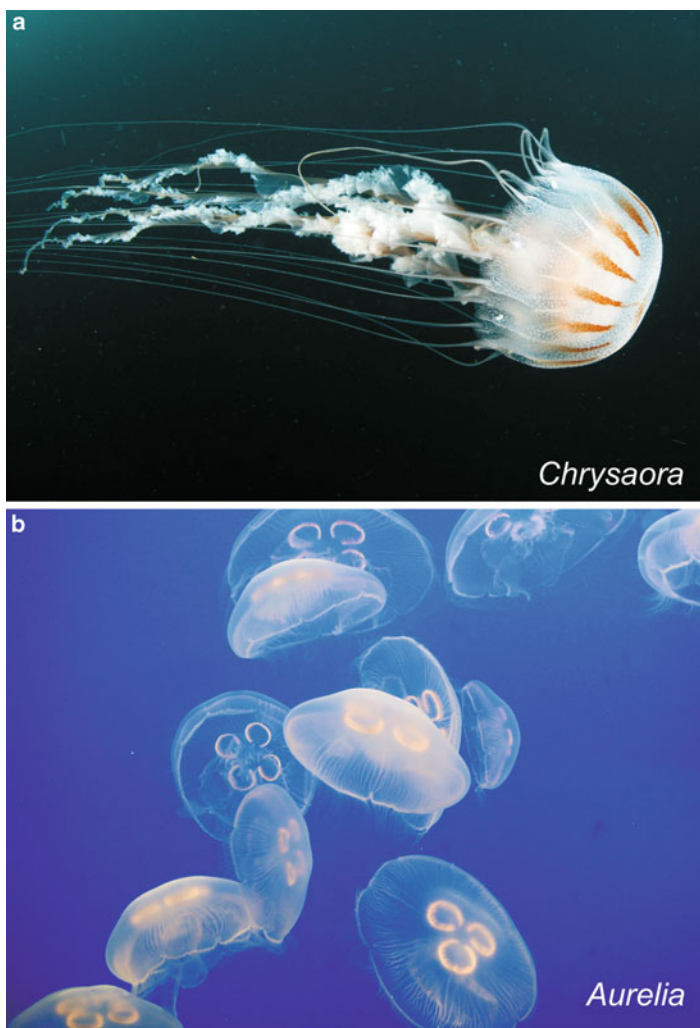


Abb. 6.14 Häufige Quallen in der Nordsee. **a** *Chrysaora hyoscilla*, Kompassqualle, **b** *Aurelia aurita*, Ohrenqualle. (© Credit NOAA.gov, Foto Anna Fiolek)

Viel Spaß machen wieder Einsiedlerkrebse mit ihren Gehäusen, die in solchen Tümpeln auf bessere Zeiten mit rückkehrender Flut warten, oftmals unter Tangbüscheln verborgen. Viele der Gehäuse, ob kleine Littorinagehäuse oder große Wellhorngehäuse, sind von einem pelzartigen, rötlich oder weiß schimmernden Überzug bedeckt, einer **Kolonie von Polypen** (Abb. 6.15 und 6.16). Diese werden in Strandführern (z. B. des Kosmos-Verlages) als „Stachelpolypen“ bezeichnet; ihre wissenschaftliche Bezeichnung *Hydractinia echinata* heißt, aus dem Altgriechischen ins Deutsche übersetzt, „igelige Wasser-Strahlentiere“. Diese Bezeichnung ist dem Umstand zu danken, dass Kolonien, die vom Krebs über lange Zeit über den sandigen Boden geschleift werden, zu ihrem Schutz zwischen den Polypen Stacheln aus Chitin entwickeln. Bei unsanftem Transport ziehen sich die Polypen hinter den Schutzwall der Stacheln zurück.

Man findet die bunten Kolonien von *Hydractinia* nur auf Einsiedler-bewohnten Schneckengehäusen. Es herrscht eine Symbiose. Der Krebs sorgt dafür, dass die Kolonie Nahrung findet, so als könnte sie selbst herumwandern und den sandigen Boden durchwühlen. Das besorgt der Krebs und stößt so manches Kleintier auf. Und der Krebs sorgt auch dafür, dass beide, die Kolonie wie auch er selbst, rasch befreit sind, wenn sie von Sand überspült werden. Im Winter, und auch im Sommer bei anhaltend schlechtem Wetter, zieht sich der Einsiedler mit seinem Gehäuse und seinen Symbionten in tiefere Wasser zurück. Dem Transporteur kommt zugute, dass die Kolonie dank ihrer Fähigkeit, sich eine Fundament-Platte aus Chitin zu schaffen und diese über den Mündungsrand des Schnecken-

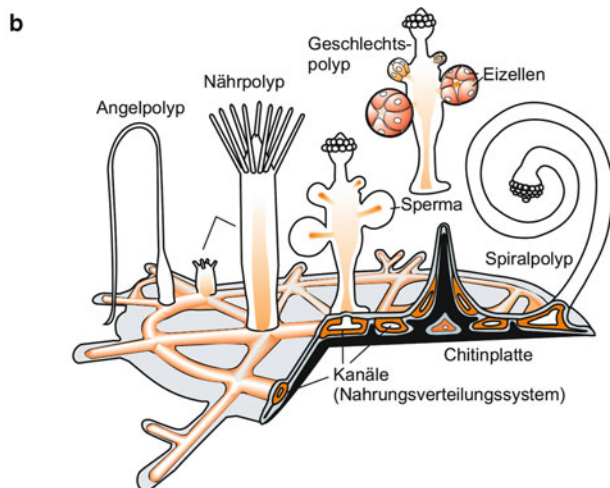


Abb. 6.15 Hydrozoen. **a** Kolonie von *Hydractinia echinata* auf einem vom Einsiedlerkrebs *Eupagurus* bewohnten Gehäuse der Strandschnecke *Littorina*. **b** Organisation der Kolonie mit Aufgabenverteilung unter den verschiedenen Polypentypen. (Eigene Bilder ©WM)

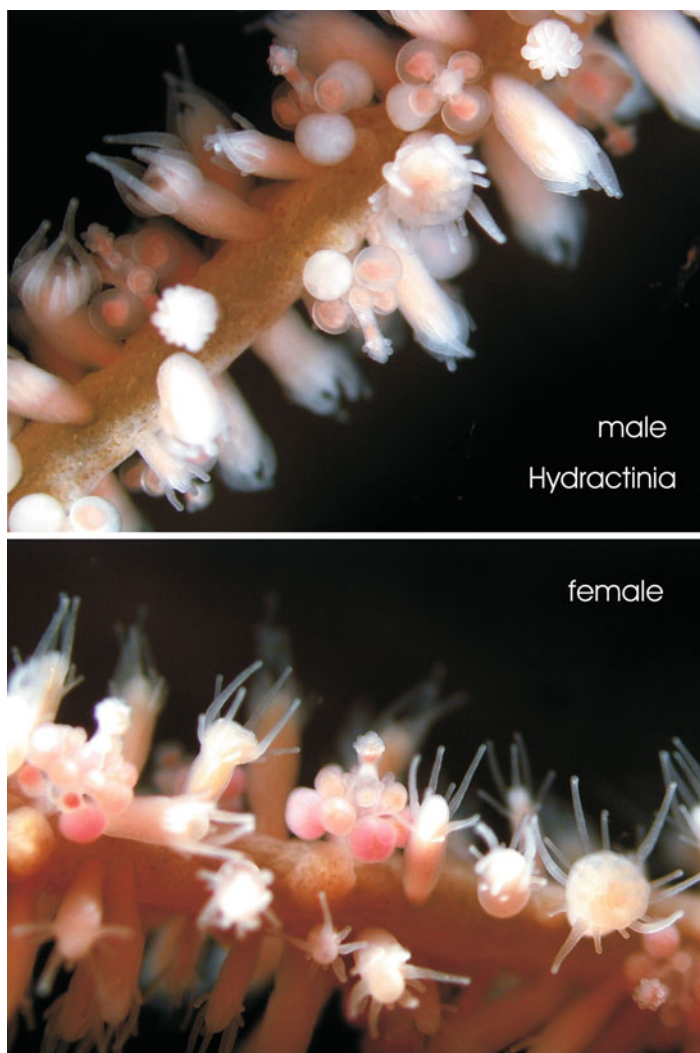


Abb. 6.16 *Hydractinia*, männliche und weibliche Laborkolonie.
(Foto Geschenk von Yuki Katsakura)

gehäuses zu erweitern, die Wohnung des Krebses künstlich verlängern und damit den Zeitpunkt für seinen Umzug in ein größeres Haus hinausschieben kann. Und es kommt dem Transporteur zugute, dass die Polypen mit ihren giftigen Nesselkapseln manchen Angreifer oder Eindringling abschrecken können. Um den Eingang des Gehäuses bildet die Kolonie gar besondere Spiralpholypen aus, die sich schlagartig entrollen und mit ihren mit zahlreichen Nesselkapseln bestückten Köpfen auf den Eingang herab schlagen, wenn der Krebs sich bei Gefahr plötzlich in sein Gehäuse zurückzieht.

Besonders kundige Wattführer oder professionelle Biologen wissen zu berichten: Unter einer Lupe betrachtet bestehen solche Kolonien aus Hunderten von Polypen, die an ihrer Basis durch ein Röhrengeflecht nach Art von Blutgefäßen miteinander verbunden sind. Die Mehrzahl der Polypen ist mit Fangtentakeln ausgerüstet und gleicht einzeln lebenden Süßwasserpolygonen. Zwischen solchen Nährpolypen stehen Polypen mit reduzierten Tentakeln und seitlich angehefteten, kugeligen Behältern, die rote Eier oder weißes Sperma enthalten (Abb. 6.16). Sind Eier oder Sperma herangereift, öffnen sich an einem frühen Morgen bei Sonnenaufgang die Behälter und entlassen ihre Eier und Spermien ins freie Wasser. Dort findet alsdann die Befruchtung der Eier und deren Entwicklung zu einer Larve statt (Abb. 9.2). Wie eine Larve das Gehäuse eines Einsiedlers findet und besiedelt, um dort eine neue Kolonie zu gründen, wird erzählt, wenn es darum geht, wie Korallenriffe entstehen; denn da gibt es gleiche Probleme und Lösungen.

Das Hauptproblem ist: Wie findet man als winzige, ohne hochentwickelte Sinnesorgane ausgestattete Larve ein be-

siedlungsfähiges Hartsubstrat? Die Polypenkolonie von *Hydractinia* ist bei manchen Forschern auch deshalb beliebt; weil sie, im Labor gezüchtet, als Pionierart der Stammzellenforschung gute Dienste leistet (Müller et al. 2012a, 2012b, 2015a; Plickert et al. 2012).

Seesterne, Seeigel und Verwandte (Echinodermen). Exemplare des an seiner Oberfläche rötlich bis blauviolett erscheinenden „gemeinen“ Seesterns (*Asterias rubens*) konnten wir schon im Hafenbecken beobachten. Sonst in tieferem Wasser auf Hartböden zuhause, lassen sie sich bei ihrer Futtersuche manchmal auch an höhere Orte locken. An manchen Stellen des Hafenbeckens treten sie in Scharen auf und umklammern mit ihren fünf Armen an Pfählen haftende Miesmuscheln, die sie zum Fressen gern haben. Sie haben die seltsame Fähigkeit, ihren Magen aus ihrem Mund herausquellen zu lassen und über ihre Opfer, bevorzugt Muscheln, zu stülpen, deren Kalkschalen durch Säure aufzulösen, den Weichteil zu verdauen, bis sie den zu Brei gewordenen Rest der Muschel einschlürfen können. Ihre Ausflüge über die Niedrigwasserlinie hinaus in die frische Luft sind allerdings mit einem beträchtlichen Risiko verbunden. Zwar vertragen auch Seesterne mal bei kühlem Wetter ein- oder gar mehrstündiges Trockenfallen, nicht aber das Zerhacktwerden von den scharfen Schnäbeln der Silbermöwen.

Im flachen Watt sind Seesterne selten, Strandseeigel (*Psammechinus miliaris*) häufiger. Den normalerweise nur in tieferen Wassern auf Hartböden vorkommenden essbaren Seeigel (*Echinus esculentus*) werden wir vermutlich auf unserer bevorstehenden Kutterfahrt zu sehen bekommen. Bricht man sein kugelförmiges Kalkgehäuse auf, fällt der als Laterne des Aristoteles bekannte, kalkige Kauapparat

heraus (Abb. 6.10). Ebenso wie essbare Seeigel kommen die leicht zerbrechlichen Schlangensterne (*Ophiura fragilis*) nur selten aus den Tiefen hoch und versammeln sich in Gezeitentümpeln. Mehr über die seltsamen Echinodermen erfahren wir im folgenden Kap. 7. Im Augenblick geht es mehr um die Besonderheiten des Watts als um zoologische Formenkenntnis und Systematik, und wir konzentrieren uns auf die Ausführungen unseres Wattführers.

Seesterne und Seeigel wandern ebenso wie Einsiedlerkrebse bei ungünstiger Witterung mit der Wasserfront in tiefere Zonen ab. Sie lassen sich dabei gern vom Wasserstrom in den Prielen treiben. Aber Seeigel und Seesterne können zu langsam sein, um der Wasserfront zu folgen. Eiskalter Regen im Winter oder gar Eisgang, so nennt man Eisbildung im Watt, sind stets eine Katastrophe; sie zerstören unzählige Lebewesen des Watts. Jahrelang waren nach einem Eiswinter im Watt der Nordsee keine Seeigel mehr zu finden. Dozenten der Biologie, die Kurse zur Embryonalentwicklung der Tiere abhielten, mussten den beliebten Programmpunkt „Entwicklung des Seeigels“ streichen; dies war umso bedauerlicher, als die Entwicklung des Seeigels seit Jahrzehnten das Lehrbuch-Beispiel für Befruchtung und frühe Embryonalentwicklung war und auch heute noch ist (Fischer 2013).

Meeresringelwürmer (Abb. 6.17). Wenn unser Wattführer seinen Spaten ansetzt, dann dort, wo er sicher ist, ein sichtbares Lebewesen zutage zu fördern. Kleine Kothäufchen auf dem Wattboden verraten ihm jederzeit ergiebige Stellen; denn dort findet er den bei Anglern als Köder beliebten **Wattwurm** oder **Pierwurm** (*Arenicola marina*, Tierstamm Annelida, Untergruppe Vielborstenwürmer,

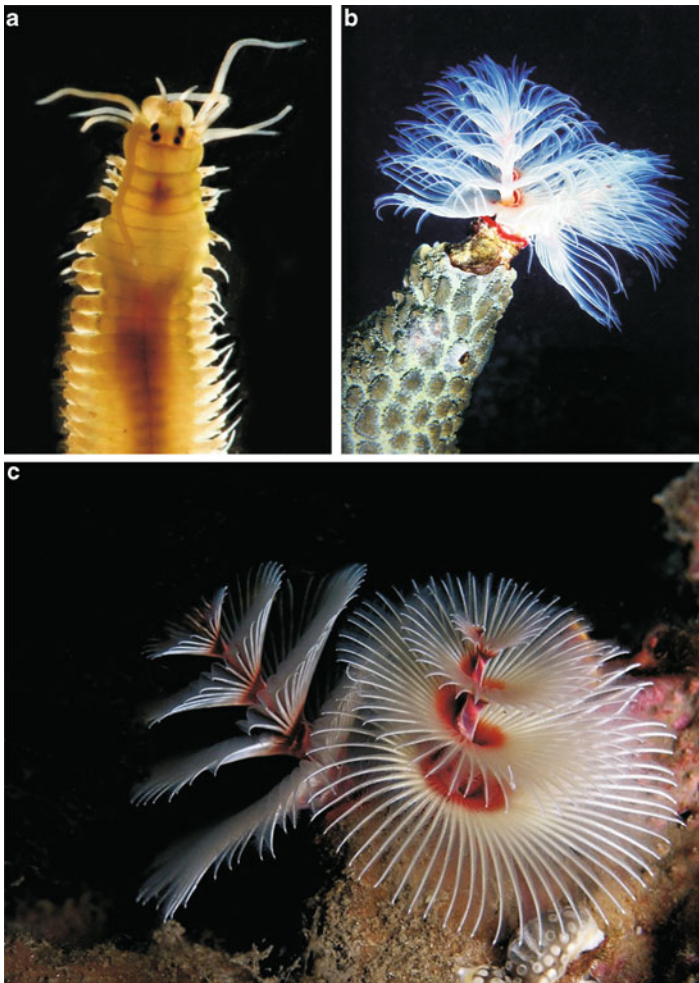


Abb. 6.17 Verschiedene Polychaeten. **a** Ein Nereide. (Foto © Peter J. Bryant, University of Irvine, California, mit seiner Genehmigung), **b** ein Sabellide (eigenes Archiv), **c** ein Serpulide, *Spirobranchus giganteus*. (Foto © Nick Hobgood, Creative-Commons-Lizenz 3.0)

Abb. 6.11). Seine bis in 30 cm Tiefe hinab reichende, U-förmige Röhre nie verlassend, saugt er mit seinem Mund Schlickmaterial ein, das über den Einsturztrichter in die Öffnung der Röhre herabrinnt. Der Wurm verdaut das im Schlicksand reichlich vorhandene organische Material wie die mikroskopisch kleinen gelbgrünen Kieselalgen (Diatomeen) sowie die unzähligen weiteren Mikroorganismen des Schlicks (Sandlückenfauna) und stößt den unverdaulichen Rest am anderen Ende der Röhre wieder aus. Diese zahlreichen Kothäufchen sind zum Merkmal des nährstoffreichen Watts geworden. Bis zu 50 solche Pierwürmer können pro Quadratmeter den Wattboden besiedeln. Der Umsatz an Material, das durch ihre Körper gefördert wird, ist auf 4000 Tonnen pro Hektar hochgerechnet worden.

In Wohnröhren aus pergamentartigem Wandmaterial, die der Bewohner selbst produziert und mit einem Putz aus verklebtem Sand verstärkt, lebt ein anderer Vertreter der Anneliden, der Bäumchenröhrenwurm (*Lanice conchilega*). Das Vorderende seiner bis zu 40 cm langen Röhre ragt einige Zentimeter über den Sandboden (Abb. 6.4). Aus der Öffnung der Röhre ragt bei Flut ein aus fädigen Tentakeln bestehender Planktonfangapparat. Andere Röhrenwürmer wie der kleine Posthörnchen- oder Spiralwurm (*Spirorbis spirorbis*), der in großer Dichte braune Tange besiedelt, sowie der auf Hartmaterialien wie Steinen und großen Muschelschalen siedelnde, in Kalkröhren hausende Dreikantröhrenwurm (*Pomatoceros triqueter*), strecken Kronen mit zahlreichen, spiralig angeordneten Tentakeln aus ihrer Röhre ins Wasser. Sie reinigen den Wasserkörper von vielerlei Mikroorganismen. Freilich, die schönsten solcher Tiere, wie den Weihnachtsbaumwurm (*Spirobranchus*

giganteus) findet man nicht im Watt der Nordsee, sondern in tropischen Meeren (Abb. 6.17). Im Watt hingegen leben auch die frei beweglichen, räuberischen, großen Vielborstenwürmer (Polychaeten) der Gattung *Nereis*, wie die grün schillernde *Nereis virens* und die braun-graue *Nereis diversicolor*. Diese verlassen bei Flut ihre Röhre im Boden oder ihre Verstecke in den Tangen und gehen mit ihren bis zu 120, mit borstigen Stützelementen verstärkten Paddelbeinen auf die Weide und Jagd, insbesondere in der Nacht. Mit ihren aus einem ausstülpbaren Rüssel ausfahrbaren scharfen Kieferzangen und Zähnen können sie Algen zernagen wie auch erbeutete Kleintiere zerkleinern. In Farmen Englands und der Niederlande werden Nereiden als Fischfutter und Angelköder gezüchtet. Nereis-Verwandten, Aufsehen erregenden Arten werden wir begegnen, wenn wir Mondlicht-gesteuerte Lebenszyklen vorstellen (Kap. 11).

Wattvögel. Wer mit einem Fernglas ausgerüstet ist, kann auf seiner Wattwanderung so manche Küstenvögel beobachten, die mit ihren langen Schnäbeln im Wattboden nach Ringelwürmern, kleinen Schnecken und Muscheln herumstochern. Der Wattführer zeigt auf Austernfischer (Abb. 6.11), Regenpfeifer verschiedene Arten von Schnepfen, Brachvögel, Strandläufer. Wir überlassen es Ornithologen, sie alle zu bestimmen. Zur Zugzeit im Herbst und Frühjahr wird das Wattenmeer darüber hinaus von Millionen ziehender Vögel überflogen. Ringelgänse, Saatgänse und Blässgänse fallen auf ihrem Zug von und nach Sibirien zu Millionen im Watt und in den Marschen ein, um Zwischenhalt zu machen und vorübergehend Graugänsen Gesellschaft zu leisten. Eben dies gehört zu den Beson-

derheiten des Nordseewatts: es ist Durchzugsgebiet von Abermillionen von Zugvögeln.

6.5 Auf dem Krabbenkutter – nicht nur Shrimps

Wir ergänzen unsere Erkundigungen über die Fauna des Wattenmeeres, indem wir uns Inselgästen anschließen, die mit einem „Krabbenkutter“ ausfahren wollen. Wir werden Gast sein auf einem der größeren Kutter, die über die meiste Zeit des Jahres mit ihren Grund-Schleppnetzen (Abb. 6.18) den Sandboden in 20 bis 30 m Tiefe nach Plattfischen abfischen und „Krabben“ nur zur Ferienzeit fürs Urlaubsvolk sammeln.

Ungute Gefühle unterdrücken wir; denn wir wissen, dass solche Grundnetze den Boden durchwühlen, auch Babyfische einfangen und zahlreichen Beifang zerquetschen und an Deck heraufholen, wo sie der Sonnenhitze oder dem Regen ausgesetzt sind oder von Schuhen zertreten werden. Grundnetze werden über den Boden geschleift. Eiserne Rollen an dem Tau entlang der Unterkante der weiten Öffnung des trichterförmigen Netzes scheuchen alles auf, was in Bodennähe und in den oberen Bodenschichten lebt. Das feinmaschige Netz sammelt Garnelen ein wie auch, leider, Jungfische und mancherlei Beifang.

Ungute Gefühle sind auch deshalb angebracht, weil nun mal der Kutter im Wattenmeer des Nationalparks fischen wird, und dies durchaus noch immer legal. Nur wenige besonders geschützte Areale wie eine Königshafen genannte Bucht bei List auf Sylt sollten Fischkutter meiden (was man-

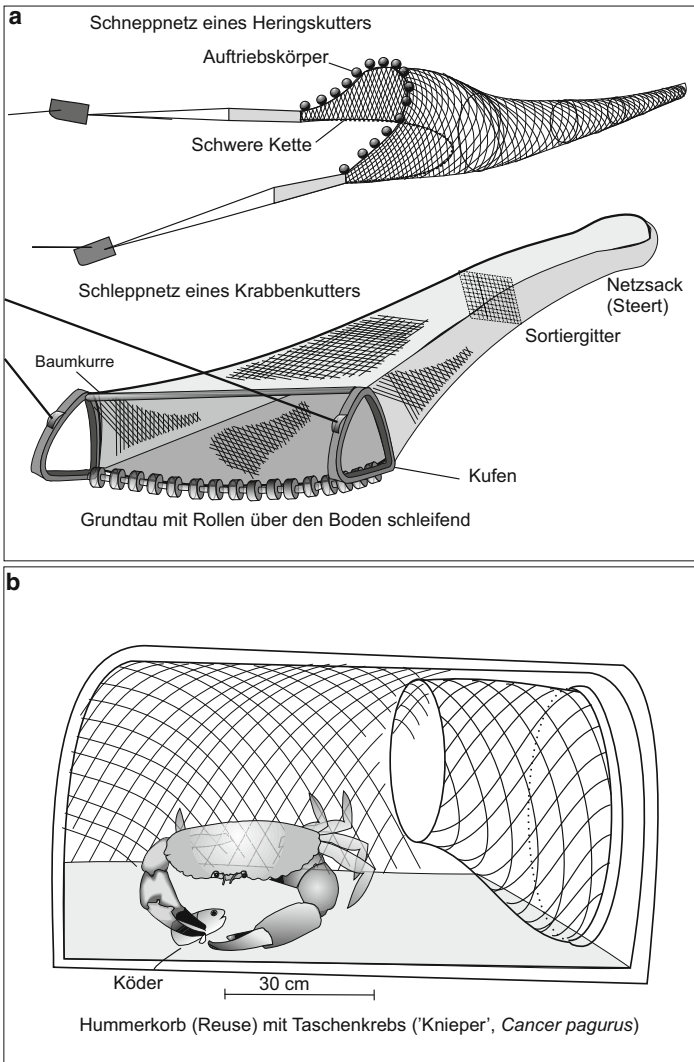


Abb. 6.18 Im Wattenmeer viel benutzte Fanggeräte

che jedoch nach meiner eigenen Beobachtung in der Dämmerung und im Nebel „versehentlich“ nicht beachten).

„Krabben“ nennt der Volksmund die Sand- oder Nordsee-Garnelen (*Crangon vulgaris*), eine Bezeichnung, die in Fachbüchern kurzschwänzigen Krebsen wie den Strandkrabben vorbehalten ist. Heute setzt sich mehr und mehr das neudeutsche Wort **Shrimps** (Englisch *shrimps*) durch. Nordseegarnelen huschen zu Millionen über den sandigen und schlickigen Untergrund, mikroskopisch kleine Algen einsammelnd. Die großen Mengen für den Markt werden in den Sommermonaten vor den Flussmündungen gefischt. Unser Kutter fährt mit ablaufendem Wasser aus dem Hafen und hinaus in Gefilde, die auch bei Ebbe noch mit so viel Wasser bedeckt sind, dass er mit seinem Kiel nicht auf eine Sandbank aufläuft. Der Kapitän hat vor, das Netz noch in 30 m Tiefe durch Priele und sandige Böden zu ziehen, in Erwartung eines von ihm und seiner Mannschaft erhofften, brauchbaren Beifangs. Vom GPS-Gerät geleitet, findet der Kapitän den gesuchten Priel leicht. Die Baumkurre senkt das Grundnetz ab. Wir überstehen die rollenden Bewegungen des Kutters, während er sein Grundnetz langsam über den Boden zieht, ohne seekrank zu werden. Ist das Netz eingeholt, werden Besatzung und Gäste lebhaft. Mit den bald rosa bis rotbraun gekochten „Krabben“ befassen sich die anderen Gäste des Kutters, wir beschauen den Beifang.

Nun kommt vieles hoch, was wir bei der Wattwanderung nur spärlich zu Gesicht bekamen: Seesterne, Seeigel, Gehäuse von Wellhornschncken mit noch lebenden Schnecken oder von Einsiedlern bewohnt.

Wenig Beachtung bei der Schiffsbesatzung wie bei den meisten Gästen des Kutters sind krusten- oder klumpen-

förmige Gebilde, die auf Muschelschalen oder Steinen aufgeklebt erscheinen und die nur biologisch bewanderte Gäste als zum Tierreich gehörende Organismen ansprechen können. Sie reden von Schwämmen, Seerinden oder Moostieren, von Seescheiden und beim Anblick eines bleichen, handgroßen Klumpens von einer „Tote-Seemannshand“ (Tote Meerhand, Tote Mannshand, Englisch: *dead man's fingers*). Von Kundigen werden diese gespenstischen, jetzt auf Deck unansehnlichen Gebilde überraschend als Weichkorallen (*Alcyonium digitatum*) klassifiziert. Wir suchen in unserem Smartphone, auf dem wir Apps über Meeresfauna geladen haben, und erfahren, sie würden auch als Nordische Korkkorallen bezeichnet und seien Vertreter der mit acht Tentakeln pro Polypenkopf ausgestatteten Octokorallen (Abb. 6.19). Dies freilich können wir im Augenblick auf dem Kutter nicht verifizieren; denn sie haben alle ihre Polypenköpfe eingezogen. Erst wenn wir beim Besuch eines Aquariums erleben, wie Weichkorallen (die freilich zumeist aus tropischen Meeren eingeführt sind) zu wunderschönen Gestalten erblühen, zollen wir ihnen die gebührende Aufmerksamkeit.

Noch größer ist unsere Überraschung, wenn sich so manche unappetitlichen Klumpen auf dem Kutterdeck im Aquarium als Seescheiden (Abb. 7.2) entpuppen und wir auf dem Schild neben dem Schaufenster lesen, dass sie im System der Zoologie demselben Tierstamm angehören (Chordaten), zu dem auch wir Menschen gehören.

Die Besatzung schippt das alles über Bord zurück ins graue Wasser, sammelt aber für sich selbst ein, was man gern nachhause für die Küche mitbringt: Große Taschenkrebse (*Cancer pagurus*), das sind echte Krabben (Abb. 6.18b), die

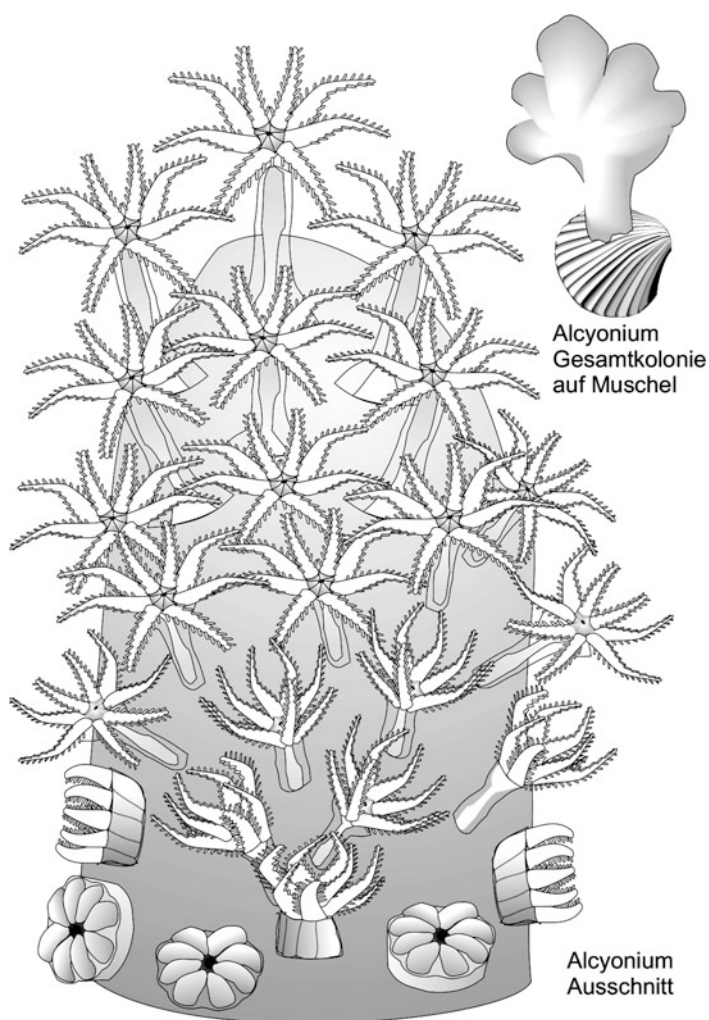


Abb. 6.19 Die koloniale Weichkoralle *Alcyonium digitatum*, bei Fischern „Tote-Seemannshand“ genannt, entfaltet unter Wasser und bevorzugt nachts ihre zahlreichen Polypenköpfe

im friesischen Volksmund Knieper genannt werden und auf dem Speiseplan der Gastronomie in den letzten Jahrzehnten den in der Nordsee nahezu ausgerotteten Hummer ersetzen. Die Besatzung sammelt für sich in bereitstehenden Eimern weiterhin ein: den bunten Knurrhahn, ein begehrter Speisefisch, Dorsch, die Küstenform des Kabeljaus (*Gadus morhua*), und verwandte Arten, die nur der Fischer unterscheiden kann, wie Schellfisch, Wittling, Köhler und Pollack, in den Sommermonaten bisweilen Makrelen, und – dies vor allem, Plattfische – Seezungen, **Schollen**, Flundern, Klieschen, Steinbutte. Diese Plattfische liegen die meiste Zeit auf dem Sandboden, oft im Sand verborgen, doch die Rollen des Grundnetzes sind schonungslos und vertreiben sie aus ihrem Versteck. Wie wir beim baldigen Besuch eines Aquariums erfahren werden, hat es mit der Position der Augen und der Kiemenöffnung eine besondere Bewandtnis.

6.6 Im Nordsee-Aquarium und -Museum: Wir erfahren Unerwartetes

Ein großes Becken ist mit Sand bedeckt; es zeigt Fische, die nahe dem Untergrund oder im Sandboden des Wattenmeeres leben. Die Aufmerksamkeit der Besucher gilt vor allem dem großgefleckten Katzenhai und den Rochen, wenn sie sich mal vom Untergrund lösen, um eine Runde zu schwimmen. Dies gilt auch für Schollen und andere Plattfische, wenn sie gelegentlich eine Schwimmrunde dre-

hen, um die Aufmerksamkeit der Zuschauer auf sich zu lenken. Erst beim genaueren Hinsehen werden wir der Augen gewahr, die aus dem Sand hervorschauen und die wir zuvor als kleine, dunkle Steine missdeutet hatten.

Mit wellenartigen Bewegungen ihres Flossensaums können sich die Plattfische in Sekundenschnelle im Sand eingraben. Nur ihre Kulleraugen und der Kiemeneingang ragen über die Oberfläche. Beide Augen befinden sich auf der sandfarbenen Oberseite. Das wäre nicht weiter verwunderlich; denn so ist es auch bei den Rochen, die sich mit den Plattfischen den Bereich des sandigen Bodens teilen müssen und oftmals nur noch mit ihren Augen und ihrem Spritzloch (Abb. 6.20) aus ihrem Sandbett hervorlugen. Bei Plattfischen jedoch ist die Oberseite nicht wie beim Rochen die anatomische Rückenseite, sondern eine Flanke. Die embryonale, anatomische Rücken- und Bauchseite ist zum schmalen Saum geworden; Rücken- und Afterflosse sind zu einem umlaufenden Saum verlängert. Die Larve der Plattfische schwimmt noch in normaler Körperhaltung aufrecht im Wasser. Wenn sie zum Bodenleben übergeht, legt sie sich auf die Seite. Diese ist die linke (bei Butten) oder die rechte (bei Schollen und Seezungen) Flankenseite der Larve, während die gegenüberliegende Flankenseite zur hellen Unterseite des bodenbewohnenden Fisches wird. Eine Scholle liegt also nicht mit ihrer Bauchseite auf dem Boden, und es ist nicht ihre Rückenseite, die oben ist und die Augen trägt, sondern die rechte Körperseite. Die Scholle liegt, wie gesagt, auf ihrer linken, weißen Seite und beide Augen sind auf die rechte, gesprenkelten Seite gerückt, die ihr Farbmuster zur Tarnung dem Untergrund angleichen kann. Solche Formverwandlungen (Metamorphosen) beim

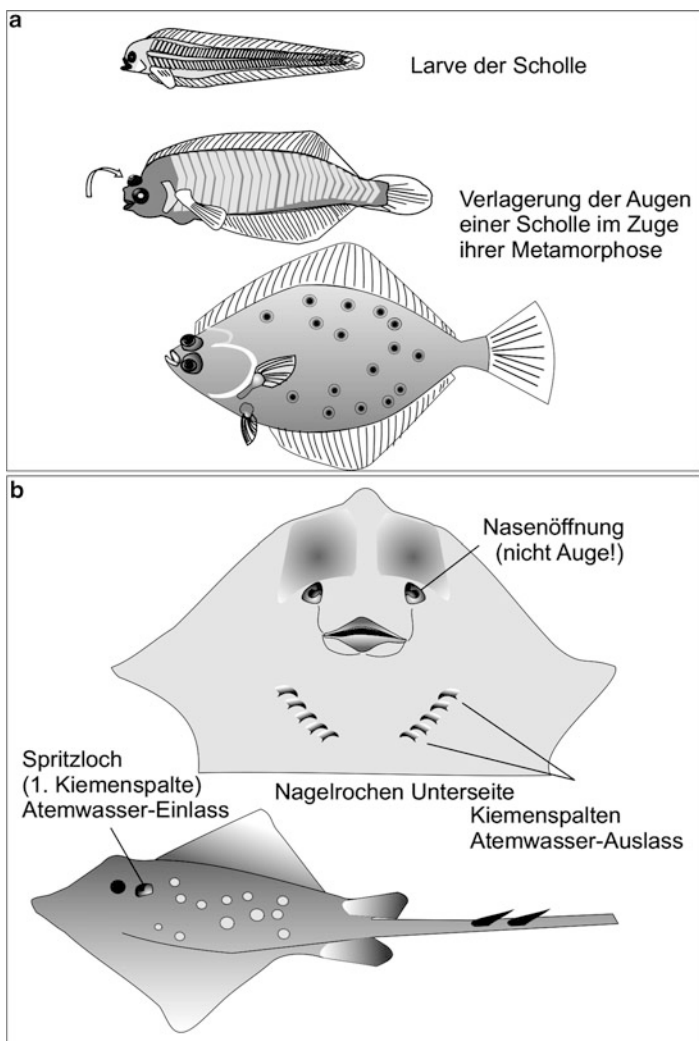


Abb. 6.20 Bekannte Fische des Wattenmeerbodens

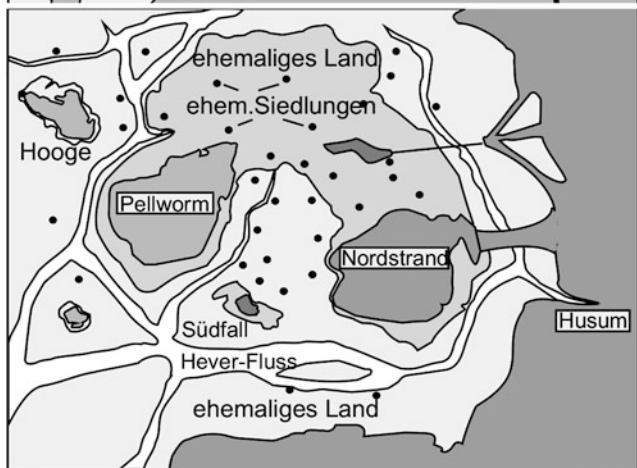
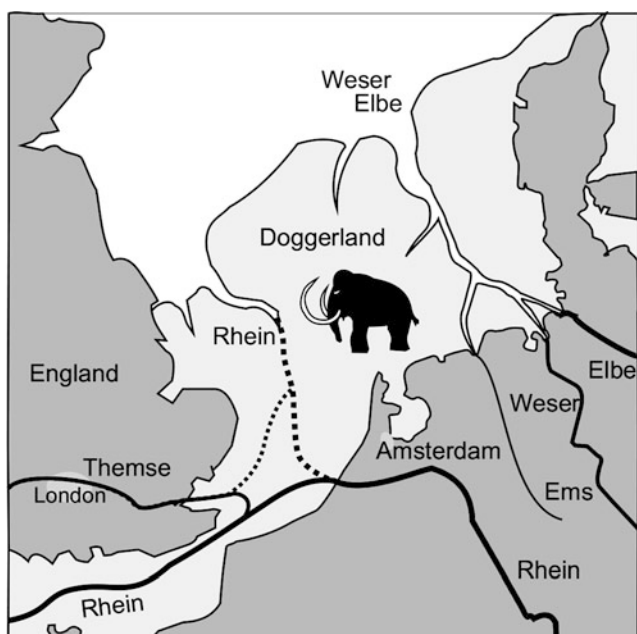
Übergang vom Larvenstadium zur Erwachsenegestalt zeigen uns: Die Form eines Lebewesens wird von seiner Lebensweise mitbestimmt. Diese Zusammenhänge werden wir im folgenden Kap. 7 bedenken und erläutern.

6.7 Mammutzähne aus der Nordsee?

Unser Urlaubsort hat, wie viele andere auch, ein Museum, das Wissenswertes über die Fauna und Flora der Region zeigt, auf die Landschaftsgeschichte eingeht, allerlei Vorkommnisse aus dem Bereich der Seefahrt zu berichten weiß und dazu mancherlei Gerätschaften zur Navigation und zur Rettung Schiffbrüchiger zeigt, und das dem Besucher erklären will, wie, im Prinzip jedenfalls, der periodische Wechsel von Ebbe und Flut zustande kommt.

Mammutzähne, Mammutknochen und weitere fossile Relikte von Landtieren wie Geweihe von ausgestorbenen Riesenhirschen aus der Nordsee? Dazu gezackte Harpunen-Spitzen aus Mammut-Elfenbein geschnitzt und jüngst aus Torfklumpen heraus präpariert, Torfklumpen, die das Grundnetz eines Fischers aus der Tiefe der Nordsee hervorholt hat? In der Tat, die Nordsee ist eine reiche Fundgrube für Fossilien eiszeitlicher Landtiere und ihrer Jäger. Mit ihren Grundnetzen haben Herings- und Krabbenkutter so allerlei aus dem Untergrund hochgefördert, insbesondere, wenn ihre Fanggründe im Bereich der Doggerbank lagen. Wandtafeln des Museums klären uns auf.

Während der Eiszeiten war so viel Wasser als Gletscher-eis in der Arktis und Antarktis gebunden, dass der Meeres-



◀ **Abb. 6.21** *Oben* Doggerland vor ca. 12.000 Jahren (nach dem britischen Paläontologen Clement Reid 1913), *unten* Beispiel von Landverlust seit 1600 (nach alten Karten, z. B. J. Bleau)

spiegel gegenüber heute um 120 bis 150 m tiefer lag. Während der letzten, der Weichsel-Würm-Eiszeit, drangen die Gletscher der Arktis nicht mehr bis in das Gebiet der heutigen Nordsee vor. Das Gebiet war eine Trockensteppe. Auch während der Wiedererwärmung des globalen Klimas und des Wiederanstiegs des Meeresspiegels blieben große Teile der heutigen Nord- und Ostsee noch lange eisfrei und trocken. Vor etwa 12.000 Jahren, einer Zeit, in der nach Auskunft der Archäologen in Europa die mittlere Steinzeit herrschte, war das Gebiet eine von Grasland und Torfmooren bedeckte Tundra-Steppe. Zwischen England und Dänemark lag das Doggerland, in dem Jäger Großwild jagten, darunter eben auch Mammuts und Riesenhirsche.

Im Verlauf von 2000 Jahren drang das Meer nach und nach von Nord nach Süd vor. Ein Zwischenstadium zeigt Abb. 6.21. Wir erahnen, welche gewaltigen Konsequenzen es haben wird, wenn der Meeresspiegel weiter steigen wird. Es ist jedoch nicht so sehr der langsame und kontinuierliche Anstieg der täglichen Hochwasserstände, der das Land verschlungen hat; es waren die Sturmflut-Katastrophen, von denen alte Chroniken berichten. Wikipedia hat eine lange Liste solcher Sturmfluten zusammengestellt. Nach alten Chroniken und archäologischen Funden sind im Gebiet der heutigen nordfriesischen Inseln in der Winter-Sturmflut von 1362, der sogenannten zweiten Marcellusflut, bis zu 100.000 Menschen ums Leben gekommen, viele Inseln und an die 40 Dörfer und Gehöfte gingen verloren, dar-

unter auch das sagenumwobene Rungholt. Deichbauten gaben zwar mehr und mehr Schutz, doch auch noch 1825 gingen mehrere Halligen unter. Helgoland soll bis 1216 eine große Insel mit neun Kirchspielen gewesen sein, was freilich eine höchst umstrittene Legende ist. Zweifelsfrei ist, dass ein letzter Rest des einstigen weiß-grauen Muschelkalk-Vorlandes, die heutige Düne, 1721 durch eine Sturmflut von der roten Hauptinsel getrennt wurde.

Wann kommt es zu schweren Sturmfluten? Stürme von Westen drücken Fluten an Land, und diese sind nach den Regeln der Gezeiten einige Tage um Voll- und Neumond besonders hoch; man spricht von Springtiden (Abb. 6.7). Das Museum versucht, mit einem Poster die Entstehung der Gezeiten zu erklären. Aus gutem Grund, hatten wir uns schon zuvor um ein Grundverständnis bemüht (Anfangsteil dieses Kap. 6); denn es bedarf einiger Minuten, um mehr zu erfassen, als dass der Mond hier seine Anziehungskraft walten lässt.

6.8 Von Ängste-erzeugend bis bezaubernd: Rote Flut, giftiges Grün, Meeresleuchten in der Nacht

Zum Abschluss unseres Besuchs am Wattenmeer der Nordsee sei auf drei Naturphänomene hingewiesen, die der zeitweise Gast kaum jemals selbst miterleben muss oder darf und von denen er allenfalls aus Presseberichten erfährt. Alle drei Phänomene haben ihre Ursache in Mikroorganismen des Planktons.

Das erste der gefürchteten Vorkommnisse ist die „rote Flut“, eine von den zehn Plagen, mit denen nach Aussage der Bibel der alt-testamentarische Gott den widerspenstigen Pharao gezwungen hat, das Volk Israel aus Ägypten ziehen zu lassen. Ursache dürfte die „Blutregenalge“ *Haematococcus pluvialis* des Nils und anderer Süßgewässer gewesen sein. Rote Fluten können aber zeitweise auch in den Meeren, so auch in der Nordsee auftauchen und werden von der Bevölkerung als Anzeichen drohenden Unheils gedeutet. Ursache ist die zeitweise Massenvermehrung einzelliger Algen im Plankton, besonders der Art *Euglena sanguinea*, dem roten Augentierchen, und bestimmter Dinoflagellaten. Diese verdanken, wie auch die Blutregenalge, ihre rote Farbe ihrem Gehalt an dem Carotin Astaxanthin, das auch das Lachs-fleisch rot färbt (oft künstlich aufgebessert). Eine rote Flut ist zu Recht gefürchtet; denn einige der Dinoflagellaten sind hochgiftig.

Das zweite, in den Sommermonaten zunehmend öfter auftretende, ebenfalls zu Recht gefürchtete Ereignis ist die blau-grüne „Algenblüte“, die nicht nur von einzelligen Algen, wie *Euglena* und Dinoflagellaten, sondern auch noch von Cyanobakterien (Blaubakterien, *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Anabaena*) verursacht wird. Die von diesen Mikroorganismen erzeugten, unsichtbaren Gifte werden von manchen Muscheln, Garnelen und Fischen vertragen, sammeln sich in der Nahrungskette an und können so auf dem Esstisch der Menschen landen. Die Palette der Gifte ist groß. Manche sind starke Lebergifte (Microcystine) oder Nervengifte (Saxitoxine, Azaspiracid, erzeugt von dem winzigen Dinoflagellaten *Azadinium spinosum*). Vergiftungen können beim Menschen tödlich sein.

Hingegen ist das dritte Phänomen, von dem hier berichtet wird, menschenfreundlich; denn es ist zauberhaft und kann mächtig Spaß machen. Manchmal blitzen in der Nacht die Wellen der Brandung blau auf. Ursache sind einzellige Algen wiederum aus der Gruppe der mit je zwei Geißeln ausgestatteten Dinoflagellaten, speziell die Arten *Noctiluca scintillans* und *Noctiluca miliaris*. Sie sind zur Biolumineszenz, zur Erzeugung von Licht, befähigt, eine Gabe, die bei unserer Exkursion in die Tiefsee (Kap. 14) zur Geltung kommen wird. *Noctiluca* ist nicht grün, sondern transparent und lebt, anders als der ebenfalls leuchtfähige Dinoflagellat *Gonyaulax*, nicht photo-autotroph, also pflanzlich, sondern heterotroph, also Tier-gemäß. Im Labor zeigen diese Lebewesen ihre Fähigkeit zum Leuchten tagesperiodisch nur nachts. Zum Leuchten müssen und können sie mechanisch angeregt werden, und darin liegt der Reiz. Der Autor dieses Buches kennt das Phänomen von seinen Aufenthalten am meeresbiologischen Institut auf Helgoland. Es war ein Vergnügen besonderer Art, in ruhigen, warmen Sommernächten in den Nordhafen zu springen, und das Wasser um sich aufblitzen zu lassen. Meeresbiologen deuten das Phänomen so: Potenzielle, fresslustige Räuber sollen durch die plötzlichen Lichtblitze abgeschreckt werden.

7

Die Form der Lebewesen spiegelt ihre Lebensweise wider

Zusammenfassung

Ein Besuch im füllig ausgestatteten Großaquarium der Sea-Life-Gruppe oder des Zoos beeindruckt, aber verwirrt auch, besonders der Blick in jene Aquarien, die Organismen aus tropischen Korallenriffen zeigen. Diese bunte Welt vielgestaltiger Formen, viele wie Pflanzen aussehend! Manche sind derart fremdartig, dass allenfalls Spezialisten auf Anhieb sagen können, in welchen Tierstamm eine Gestalt gehört. Wir versuchen, eine gedankliche Ordnung in die Vielgestaltigkeit zu bringen, und stellen fest: Die Gestalt eines Lebewesens spiegelt seine Lebensweise wider.

Da gibt es die Jäger wie den Hai und viele andere Tiere, die gezielt voranschwimmen, Kopf mit Fernsinnesorganen voran, mit einer Rücken- und einer Bauchseite, linke und rechte Körperseiten spiegelbildlich zueinander. Eine solche Organisation nennt man Bilateral-Symmetrie.

Da sind andere Formen wie Quallen und die festsitzende Seerose, die passiv darauf warten, dass Mikroplankton als Futter von irgendwo daher schwebt. Solche Formen sind äußerlich, viele auch innerlich, radiär-symmetrisch. Ausnahmen zwingen zum Nachdenken und zur Erforschung der

Geschichte dieser Lebewesen. So haben Seesterne bilateral-symmetrische Larven und mit Seelilien uralte, festsitzende lebende Verwandte. Manche Formen haben, sesshaft geworden, ihren Kopf verloren, andere sind zu einer Quallen-haften Lebensweise übergegangen, so gewisse Tintenfische der Tiefsee. Wir lernen Medusen und Gorgonenhäupter kennen, und Seegurken, die wie Staubsauger Mikroorganismen aufsaugen. Lies und erfahre noch mehr Seltsames.

7.1 Pflanzenhaft erscheinende Lebewesen

Wir gönnen uns den Besuch eines großen Aquariums mit Meerwasserbecken, beispielsweise eines Aquariums der Sea-Life-Gruppe oder eines großen Zoos. Gewiss sind all die beneidenswerten Fernreisenden besser dran, die in tropischen Meeren schnorcheln und tauchen können. Doch der Besuch eines gut ausgestatteten Aquariums ist nicht nur preiswerter; ein Aquarium kann auch auf engem Raum viel zusammen vorstellen.

In wohl allen Aquarien sieht man neben bekannten Lebewesen wie Haien, Rochen, Fischen, neben Krebsen wie Krabben, Hummern und Langusten, neben Schnecken und Muscheln auch viele andere Lebensformen, die uns durch ihre Gestalt an ihrer Zugehörigkeit zum Tier- oder Pflanzenreich zweifeln lassen. Wir sehen Seerosen, Seenelken, verzweigte Steinkorallen mit ihren blütenähnlichen Polypenköpfen, wir sehen in der Wasserströmung hin und her wedelnde, reich verzweigte Weichkorallen mit ihren

„Blüten“ und wir entdecken die „Blumenkronen“ von Röhrenwürmen – Formen, die wir zwar vereinzelt auch schon im Wattenmeer-Museum zu sehen bekamen, die uns mit ihren verzweigten Gestalten und nun, da sie ihre gekrönten Köpfe ausgestreckt haben, eher an blühende Pflanzen erinnern als an die uns vertraute Tierwelt des Landes. Manche zierlichen Bäumchen und Sträucher erinnern den Erbauer von Modelleisenbahnen an das „Seemoos“, das – wie oben schon erzählt – im Fachgeschäft für Modellbauer gekauft und zur Dekoration der Anlage mit Bäumen und Sträuchern benutzt werden kann. Das Schild neben dem Becken nennt sie vielleicht Zypressenmoos, sagt aber auch, es seien „Hydrozoen“, auf Deutsch Wassertiere (Griechisch *hydor* = Wasser, *zoon* = Tier).

Und seltsam, bei längerem Verweilen vor dem Aquarium und genauem Hinschauen sehen wir, wie sich die Blüten der Zweige immer mal wieder plötzlich in kelchartige Gehäuse zurückziehen, dann wieder ausstrecken. Besonders die vielen seltsamen Gebilde, die als Weichkorallen klassifiziert sind, faszinieren (Abb. 7.1). Sie werden auf dem erklärenden Schild den Anthozoen zugeordnet, und Anthozoen heißt, vom Altgriechischen ins Deutsche übersetzt: Blumentiere. Im Moment konzentrieren wir uns auf eine, die aus tropischen Meeren (Indopazifik, Rotes Meer) stammt und ihre Köpfe nie einzieht, aber lebhaft bewegt: Auf den ersten Blick ist es ein Strauß gelber Blumen, dann jedoch beugt und biegt sich mal diese, mal jene Blumenkrone hierhin und dorthin, und die vermeintlichen Blüten grapschen mit ihren beweglichen Blütenblättern nach etwas Unsichtbarem im Wasser. Die Blütenblätter verwandeln sich, wenn wir durch das als Vergrößerungsglas wirkende, gewölbte Schaufenster

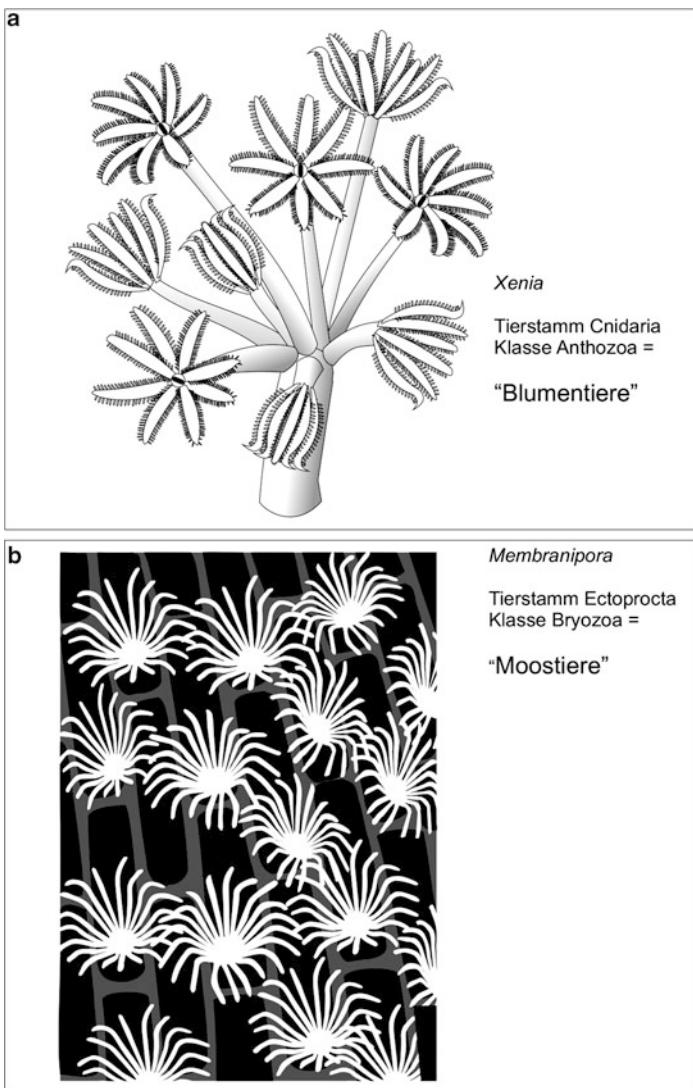


Abb. 7.1 Im Aquarium. **a** *Xenia*, eine Weichkoralle (Octocorallia),
b *Membranipora*, eine Moostierkolonie

schauen, in die gefiederten Tentakel von Polypenköpfen. Der vermeintliche Blumenstrauß ist eine Weichkoralle der Tropen; das Schild neben dem Schaufenster nennt sie *Xenia* (Abb. 7.1a), auf Deutsch die „Fremdartige“.

So wir, wenn nicht in der Realität, so doch in unserer Fantasie, durch ein stärkeres Vergrößerungsglas schauen, können wir entdecken, dass der unscheinbare graue Überzug über einem Stein oder einer Muschelschale sich als ein Blumenbeet darstellt, das als Moostier-Kolonie ausgewiesen ist (Abb. 7.1b). „Blumen“-tiere, „Moos“-tiere, Wortschöpfungen, die Pflanzenhaftes mit „tier“ verbinden.

Wir sehen auch bunte Klumpen, blattartige Gebilde oder Überzüge über Steinen, welche auf den erklärenden Schildern als Schwämme bezeichnet werden, was wir verstehen; andere, ähnlich gestaltete sind als „Seescheiden“, „Manteltiere“ oder wieder als „Moostiere“ (diese auch als „Seerinde“) ausgewiesen. Sie sind uns wie den meisten anderen Besuchern gänzlich fremd. Verwirrend, mal „Seemoos“, mal „Moostiere“. Und dann auch noch täuschend ähnlich ausschauende, ebenfalls Hartgebilde überziehende Teppiche mit abstrakten Ornamenten, die als koloniale Stern-Seescheiden ausgewiesen werden (Abb. 7.2). Und die sollen gar zum gleichen Tierstamm gehören wie der Mensch? Ganz verwirrt sind wir (und sogar nicht wenige Zoologen, die nicht Spezialisten für marine Wirbellose sind), wenn baumförmige Strukturen sich Gorgonien nennen und als Angehörige des Tierstammes der Cnidarier und Verwandte unserer auf dem Krabbenkutter gefundenen „toten Seemannshand“ vorgestellt werden, während andere, ähnlich gestaltete Bäumchen als Gorgonenhäupter einem ganz an-

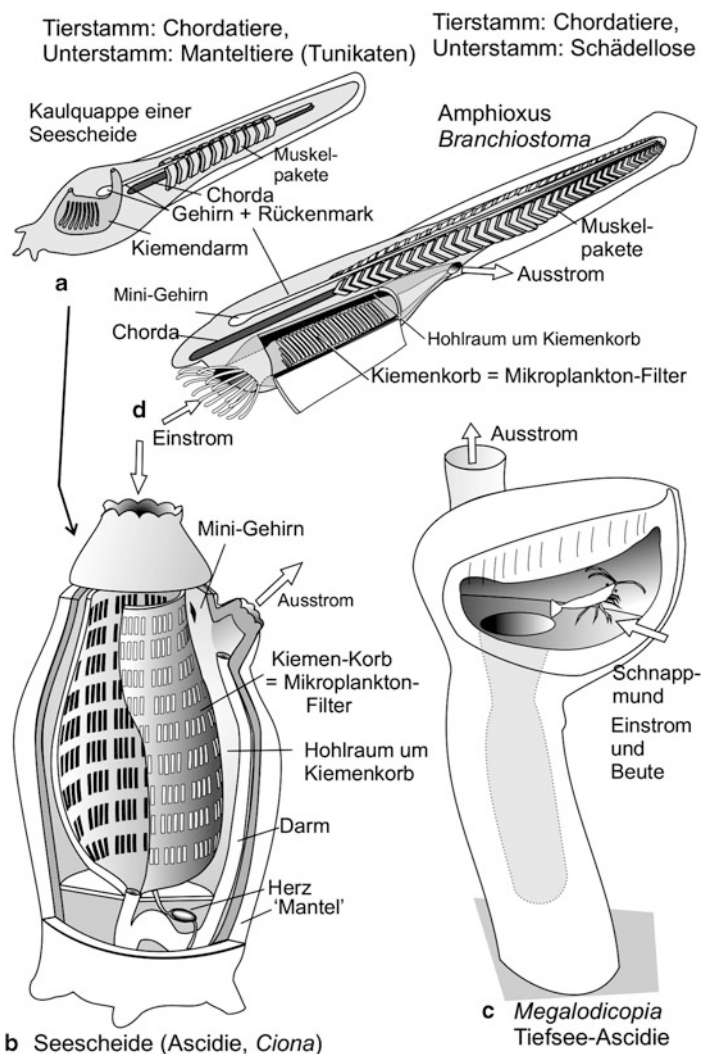


Abb. 7.2 a,b,c Seescheiden (Ascidien), Tierstamm Manteltiere (Tunikaten), c eine räuberische Tiefseeform, d Amphioxus (*Branchiostoma*), das Lanzettfischchen

deren Tierstamm, den Echinodermen, zugeordnet werden. Wir kommen darauf zurück (Abb. 7.5).

All diese festgewachsenen Gebilde erinnern doch eher an Miniaturchristbäume, an Farne, verzweigte Korbblütengewächse wie die Kamille, an kleinwüchsige Rosensträucher oder an Moose als an tierische Lebewesen, und so mancher Besucher fragt sich: Sind das nicht doch Pflanzen oder Übergangsformen zwischen Pflanzen und Tieren?

Korallen? „Blumen des Meeres“, so werden sie gerne von Aquarianern genannt. Da sehen wir Formen, deren lange Tentakeln fröhlich in der Strömung flottieren; manche fallen mit grasgrünen Tentakeln ins Auge (Variante von *Euphyllia glabrescens*). Überhaupt: Viele Arten sind in Teilen oder in Gänze grün oder blaugrün, heißen gar *green flower*, *blueberry pie*. Manche Arten haben ihre Tentakeln in aufgeblähte Blasen verwandelt (extrem bei der tropischen *bubble* = *bladder* = *pearl coral*, *Plerogyra sinuosa*, Abb. 12.1). Andere sind derart umgestaltet, dass nur der Korallenspezialist sie noch als Korallen identifizieren kann. Die Aquarianer handeln auch mit Finger-, Hirn-, Bartkorallen, mit Pilz- und Tellerkorallen. Solche Aquarianer haben ihre eigene Sprache entwickelt; sie benutzen die Kürzel SPS und LPS (nicht zu verwechseln mit LPS der Biochemie) für *small polyp sclerantinia* und *large polyp sclerantinia*, wobei die LPS in der Regel grüne Tentakel haben. Sie reden von Zoa(s) und Paly(s) und meinen Krustenanemonen der Zoanthus- und Palythoa-Gruppe. Vorsichtige Aquarianer warnen, von Biochemikern und Pharmazeuten aufgeschreckt, zu Recht, dass Palythoas sehr giftig seien; ihr Gift Palytoxin gilt als eines der stärksten Nervengifte.

Korallen werden wir als Riffbaumeister näher in Augenschein nehmen und den Grund ihrer grünen Farbe erfahren. So mancher Leser weiß: Tropische Korallen besitzen in ihren licht-exponierten Zellen einzellige Grünalgen als Symbionten. Im Augenblick ist die große Vielgestaltigkeit und Vielfarbigkeit der Korallen eher verwirrend. Sie tragen, für sich allein betrachtet, momentan wenig dazu bei, Ordnung in unserem Geist zu schaffen; eher sehen wir momentan ein Chaos.

Andere Gestalten, die wir in Meeresaquarien zu sehen bekommen, sind sternförmig und heißen auch **Seesterne**, **Sonnensterne** oder **Schlangensterne**; ihre beweglichen weißen Füßchen und langsamen Wanderungen verraten immerhin, dass es wohl echte tierische Lebewesen sind, doch an Land, im Bach oder Teich haben wir sie noch nie gesichtet. Wir versuchen, uns schlau zu machen, und blättern in Broschüren und Flyern, die im Shop des Aquariums ausliegen und die professionelle Biologen oder Aquarianer verfasst haben. Bald wird uns klar: Man müsste Lehrbücher der Zoologie zu Rate ziehen. Versucht man in die vielgestaltigen Formen, die wir am Wattenmeer und jetzt im Aquarium gesehen haben, Ordnung zu bringen, ohne gleich ein Lehrbuch der Zoologie zu wälzen oder uns gar um Stammbäume zu kümmern, welche heutzutage auf der Basis der DNA-Fingerabdrücke (DNA-Barcode) ihrer Mitglieder mit Computern rekonstruiert werden, kann man – was freilich kein gedruckter Führer oder zoologisches Lehrbuch so explizit sagt – zwei oft wahrnehmbare Grundtypen von Gestalten ausmachen: bilateral-symmetrische und radiär-symmetrische Formen.

7.2 Bilateral-Symmetrie und der Fische-jagende Hai und Delfin

Bilateral-Symmetrie heißt auf Deutsch Zweiseiten-Symmetrie. Viele Meeresorganismen wie Haie (Abb. 7.3), Fische, Delfine und Wale, aber auch Krebse und wurmförmige, wie Tausendfüßler mit zahlreichen Füßchen ausgestattete, schlängelnd über den Boden laufende Gestalten sind, wie der Zoologe sagt, bilateral-symmetrisch. Ob Robbe, Fisch, Languste oder auf dem Boden kriechender Meeresborstenwurm, sie alle haben gemäß der uns gewohnten Form eines Tieres vorn einen Kopf mit Augen und Maul, am hinteren Körperpol oft einen Ruder- oder Steuerschwanz; ihre Rückenseite ist oftmals dunkel oder sandfarbig, ihre Bauchseite hingegen ist hell und unterscheidet sich auch in anderen Eigenschaften von der Rückenseite. Es gibt eine Kopf-Schwanz- und eine Rücken-Bauch-Körperachse, in der Sprache der Geometrie gesagt, haben sie zwei Asymmetrie-Achsen, die senkrecht aufeinander stehen. Darüber hinaus kann man entlang der Kopf-Schwanz-Achse und entlang der Mittellinie gedanklich eine Symmetrieebene einfügen; denn die Mehrzahl der äußerlich sichtbaren Organe wie Augen, Flossen entlang der Bauchseite oder die gegliederten Beine der Krebse sind doppelt vorhanden und links und rechts der Mittellinie spiegelbildlich zueinander angeordnet, während Organe, die direkt auf der Mittellinie selbst stehen, wie Maul und Rückenflossen, nur unpaar vorkommen. Freilich, dies gilt nicht für innere Organe, jedenfalls nicht für alle; es gilt nicht für unser Herz, die Leber, den Darmkanal. Wir sprechen von Regeln, Regelmäßigkeiten, und wir betrachten die äußere Gestalt.

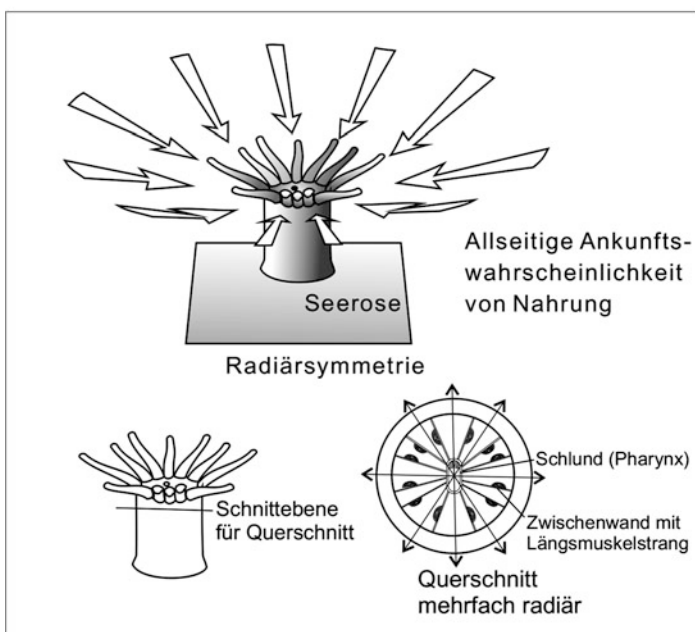
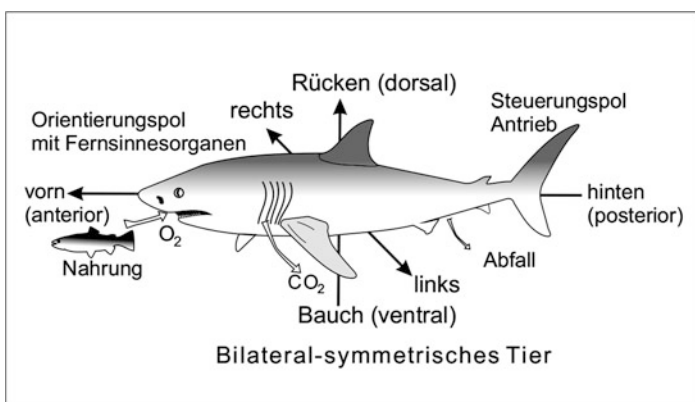


Abb. 7.3 Symmetrien

Eine bilateral-symmetrische Grundorganisation ist charakteristisch für Lebewesen, die sich gezielt vorwärts bewegen, ihrer Nahrung nachschwimmen oder ihren Feinden davonzueilen bemüht sind. Vorn befindet sich der Orientierungspol mit den Fernsinnesorganen, den Augen und den Organen des Geruchsinnes, sowie die Eingangsöffnung des Verdauungskanals; denn man schnappt am besten vorne zu oder stößt mit dem Vorderpol im Untergrund, um verborgenes Getier zum Fressen aufzustöbern. Da sich die Öffnung des Verdauungskanals nahe dem Vorderpol befindet, sind auch die Geschmacksinne zur Prüfung der Nahrung dort lokalisiert.

Bei solchen Formen befinden sich die Öffnungen für all die Materialien, die man als Abfälle in die Umwelt loswerden und hinter sich lassen will, in der Regel nahe dem hinteren Körperpol. Die Rückenseite solcher Lebewesen ist oftmals dunkel eingefärbt oder sandfarben, damit sie aus dem Blickwinkel eines in den oberen Wasserschichten jagenden Räubers oder eines aus der Luft herab äugenden Vogels, einer Möwe, einer Lumme oder eines Eissturmtauchers, sich möglichst nicht vom Untergrund abhebt. Umgekehrt soll sich für einen von unten angreifenden Räuber die helle Bauchseite möglichst nicht vom hellen Himmel und der spiegelnden Wasseroberfläche unterscheiden. Das sehen wir bei Delfinen ebenso wie bei Haien, Heringen, Makrelen oder Kalmaren. Manche Meeresorganismen hellen, wie wir im Kap. 14 zu sehen bekommen, bei Bedarf ihre Unterseite mittels Leuchtorganen auf, um sie optisch der hellen, gar sonnenbeschienenen Wasseroberfläche anzugleichen.

Bilateral-symmetrisch sind darüber hinaus so manche Larven und Kleinlebewesen des Meeres, von denen der Nicht-Zoologe einen solchen Körperbau nach der Gestalt ihrer Eltern oder ihrer Geschwisterarten nicht erwartet. Beispielsweise haben die teils glasklaren, teils opaken oder bunten, schlauch- bis flaschenförmigen Seescheiden (Ascidien, Tierstamm Tunikaten = Manteltiere) zur Freude der Evolutionsbiologen kleine Kaulquappen-ähnliche Larven (Abb. 7.2a), und diese weisen die Manteltiere als Verwandte der Wirbeltiere aus. Im Zuge ihrer Metamorphose werden die Tierchen dauerhaft sesshaft. Von nun an lässt ihr Körper allenfalls noch eine bilaterale Symmetrie erahnen, doch wir sehen keinen Kopf.

Sekundäre Kopfbildung eines zum Räuber gewordenen Sesshaften. Erforscher der Tiefsee sehen mit ihrer vom Tauchboot aus gesteuerten Videokamera so manche bizarren Gebilde, die beim erstmaligen Anblick Rätsel aufgeben. Das Boot kreuzt im Monterey Canyon vor der Küste Californiens in 200 bis 1000 m Tiefe. Der Bildschirm der Kamera zeigt eine transparente Seescheide, nichts Ungewöhnliches. Doch da schnappt die durchsichtige Gespenstergestalt plötzlich mit einem riesigem Maul und mächtigen zahnlosen „Kiefern“ zu, um eine kleine Garnele zu erhaschen und zu verspeisen (Abb. 7.2c). Bei näherer Betrachtung der Videoaufnahmen werden gewitzte Forscher gewahr, dass es sich um eine neue Art von Seescheide handelt, der sie den Namen *Megalodicopia hians* geben (Griechisch *megalos* = groß, *di* = zwei, zweifach, *copia* = Proviant). Es ist die, welche sich in zweifacher Weise Proviant verschafft, als Filtrierer und als Räuber. Ihre Einlassöffnung ist optisch zu einer Karikatur eines Kopfes geworden, dem freilich Augen fehlen. Die

Gespenstergestalt schnappt zu, wenn sich ein Tierchen ihrem Riesenmaul nähert. Wie sie es schafft, das Nähern einer Beute wahrzunehmen, ist unbekannt.

„Geflügelte Engel“ flattern bilateral symmetrisch. Man betrachte die unbehausten, marinen Nacktschnecken aus der Ordnung der Hinterkiemensschnecken (Opisthobranchier), von denen große Arten als „Seehasen“, andere Arten mit ihren oft sehr bunten, keulen-, büschel- oder kronenförmigen Kiemen auf dem Rücken als Prachtschnecken bezeichnet werden. Ein Kuriosum der Natur: Die Rückenanhänge mancher Arten werden mit den Nesselkapseln der von ihnen verspeisten Nesseltiere bestückt und zur eigenen Abwehr von Räubern eingesetzt. Der Zoologe nennt diese artfremden, geklauten Nesselzellen passend „Kleptocniden“ = gestohlene Nesselkapseln.

Marine Schnecken ohne Gehäuse zeigen ebenso wie die unbeliebten terrestrischen Nacktschnecken keinerlei Neigung zu einem spiraligen Körperbau. Gänzlich ungewöhnlich und unerwartet: Es gibt unter der Rubrik marine Nacktschnecken auch die transparenten Flügelschnecken (Pteropoda) und Ruderschnecken (Gymnosomata, mit Gattung *Clione*), die mit Flügeln durch das Plankton schweben und mit ihrer bilateralen Symmetrie und feenhaften Gestalt ihre Zugehörigkeit zur Schneckenfamilie kaum mehr errahnen lassen (Abb. 7.4).

So engelgleich (Englisch *sea angels*) diese Flügelschnecken oder „Seeschmetterlinge“ auch erscheinen mögen, so sind sie doch Räuber und jagen bevorzugt Kleinkrebse des Planktons. Sie bestätigen unsere Regel: Selbst ihre Kalkschalen sind, wenn vorhanden, bei diesen jagenden Räubern bilateral-symmetrisch.

Tierstamm Mollusken

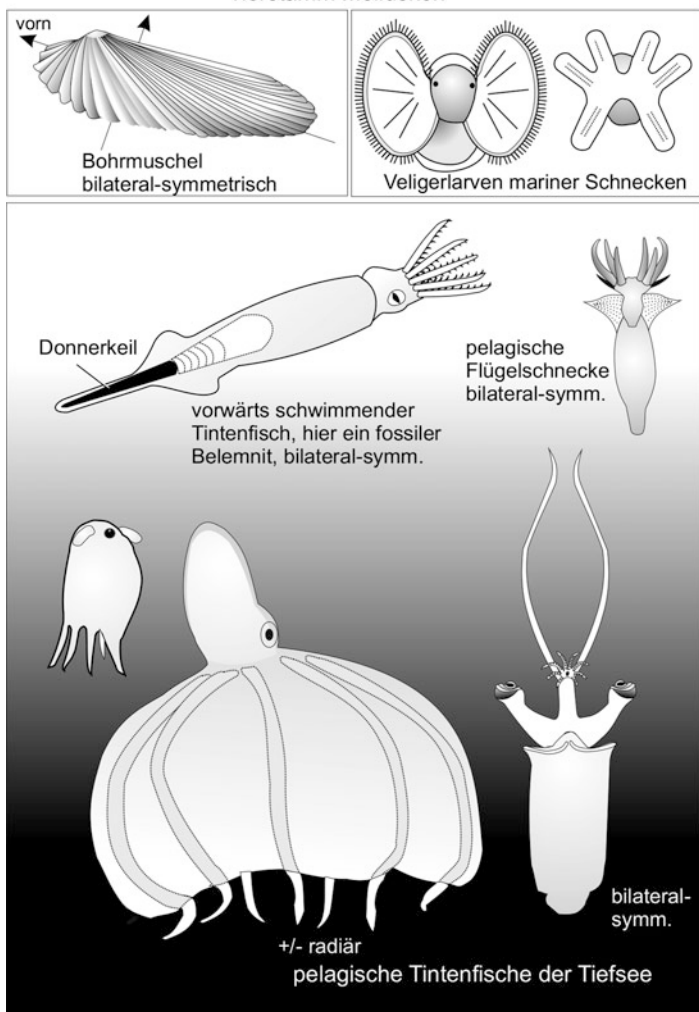


Abb. 7.4 Mollusken: Schnecken (Gastropoden) und ihre planktonischen Larven, Muscheln, Tintenfische (Cephalopoden)

7.3 Kopf und Symmetrien können beim Wechsel der Lebensweise verlorengehen

Wir sahen dies bei der Metamorphose der Kaulquappen-ähnlichen Larve der Seescheide. Es gibt so manche tierischen Gestalten, die sich nicht in die zwei in Abb. 7.3 skizzierten Gruppen, bilateral- versus radiär-symmetrisch, einordnen lassen. Dazu gehören nahezu all jene Muscheln und Schnecken, deren Schalen wir als Strandwanderer gesammelt hatten. Sie sind, wie wir bei unserem Aufenthalt am Wattenmeer erfuhren, ihrem Lebensraum mit seinen scheuernden Treibsanden durch ihre harte Kalkschale angepasst. Und sie leben als Filtrierer von Mikroplankton und Nanopartikeln wie Bakterien; jagen also keiner Beute nach, können auf einen Kopf verzichten. Nun aber gibt es vereinzelt auch Muscheln, deren Schalen bilateral-symmetrisch sind. Es sind die Schalen von Bohrmuscheln (Abb. 7.4), und diese arbeiten sich gezielt voran, um sich in Kalkgestein oder in Holz einzubohren. Sie lassen, anders als andere Muscheln, ein Vorderende erkennen, das sich vom Hinterende deutlich unterscheidet. Sie sind im Zuge ihrer Evolution bilateral-symmetrisch geworden. Andererseits haben Tiefseetauchboote, zur Verblüffung auch professioneller Zoologen, in der Tiefsee feenhaft durchsichtige Tintenfische beobachtet (Abb. 7.4), die in ihrer Lebensweise und Gestalt Quallen ähneln, und diese sind radiär-symmetrisch.

7.4 Radiär-Symmetrie und das Leben einer nicht-vegetarischen Rose

Man denke an die Blüten an den Zweigen eines Apfelbaums und zugleich an eine Seerose im Aquarium. Die Apfelblüten sind wie auch die Blüten des Birn-, Pflaumen-, Pfirsich- und Kirschbaums nach dem Grundschemata der Rosengewächse gestaltet – mit fünf grünen Kelch- und fünf weißen oder rosafarbenen Kronblättern im Kreis um den zentralen Stempel angeordnet. Die Seerosen, auch Seeanemonen genannt – es gibt eine große Anzahl von ihnen (beispielsweise die Purpurrose oder Pferdeaktinie *Actinia equina* und die Seedahlie *Urticina felina* u. a. in der Nordsee) –, sehen mit ihren kreisförmig angeordneten Tentakeln gestaltmäßig Blüten ähnlich und werden von den Biologen zur Klasse der Anthozoen, auf Deutsch Blumentiere, gezählt. Die Benennung „Blumentiere“ mag zum Fehlschluss führen, dass sie pflanzenhaftes mit Tierartigem verbinden. Den Namen Blumentiere, zu denen auch die Korallen gehören, verdanken diese Organismen jedoch lediglich ihrer äußerlich blumenartigen Gestalt, nicht einer pflanzenhaften Lebensweise. Im Gegenteil: Der Zoologe zählt die Blumentiere zum Tierstamm der weit überwiegend räuberischen, fleischfressenden Nesseltiere. Auch der regenerationsfreudige Süßwasserpolytyp *Hydra*, der seinen Namen dem ebenfalls regenerationsfreudigen, schlangenköpfigen Ungeheuer Hydra der griechischen Mythologie verdankt, und viele „blütenreiche“ Hydrozoen der Meere sowie die teils zu Recht gefürchteten Quallen zählen zu den Nesseltieren. Die Bezeichnung Nesseltiere weist auf jene mikroskopisch kleinen Explosivwaf-

fen hin, mit denen diese animalischen Lebewesen ihre ganz und gar nicht vegetarische Ernährung sichern; denn in ihren Tentakeln (Fangarmen) sind Abertausende von diesen mikroskopisch kleinen, giftigen und wie Miniatur-Harpunen wirkenden Nesselzellen eingebaut (Abb. 6.13). Mit zahlreichen, gleichzeitig abgefeuerten Harpunen erbeuten diese so täuschend blumenhaft aussehenden und festsitzenden Lebewesen vorbei schwimmende mikroskopisch kleine Krebse, Fischlarven und ähnliches Kleingetier. Auch ihr Inventar an weiteren Zellen weisen die Blumentiere als echte Tiere aus: Sie besitzen Sinneszellen, Nervenzellen (Abb. 9.3) und Muskelfasern, können sich zusammenziehen und in mannigfacher Weise seitlich neigend bewegen, beispielsweise, um mit ihren Tentakeln einen harpunierten kleinen Fisch zum Munde zu führen und zu verschlingen.

Häufiger als Seerosen begegnen uns an der Nordsee Seenelken (*Metridium senile*, Abb. 6.9). Sie sind zu einer weniger räuberisch anmutenden Ernährungsweise übergegangen. Ihre schlanken Tentakel sind reichlich vermehrt und fein aufgegliedert und bilden eine Art wuscheliger Haarschopf um den Mund. Mit diesen wuscheligen Tentakeln filtert die Seenelke mikroskopisch feines Plankton aus dem vorbeiströmenden Wasser. Klebrige Schleimschichten um die Tentakel fangen das Plankton ein. Ruderartig schlagende, mikroskopisch kleine Wimpern (Cilien) fördern die eingefangenen Kleinstlebewesen ihren Tentakeln entlang zum Mund.

Nun aber: obwohl Pflanzenreich hier, Tierreich dort, so gibt es doch in der Architektur der Apfelblüte und der Seerose geometrische Gemeinsamkeiten (Abb. 7.3). Schaut man von oben auf diese Gestalten, sieht man im Zentrum

ein einzelnes Organ, den Stempel der Blüte oder den Mund der Seerose. Dieses Zentralorgan markiert den oberen Pol einer zentralen Oben-unten-Achse. Um diese Achse herum sind alle äußerlich sichtbaren Organe wie die fünf Blütenblätter der Apfelblüte oder die vielen Tentakel der Seerose wie die Speichen eines Rades im Kreis strahlig angeordnet, und ebenso die inneren Organe wie die fünf Samengehäuse der Apfelblüte und die Falten im Innenraum der Seerose mit ihren Längsmuskeln (welche die Seerose befähigen, bei Ebbe oder Gefahr ihre Tentakelkrone einzuziehen). Man kann auch sagen: Diese Organe sind auf Kreisradien angeordnet, daher „radiäre“ Symmetrie. Die Anatomen sprechen von Symmetrien, weil man durch Schnitte von oben nach unten entlang der Radien den Körper in Segmente zerlegen kann, die Spiegelbild-symmetrisch je eine gleichartige rechte und linke Hälfte haben, und man kann dies in mehrfacher Weise tun, so wie man einen Fahrradreifen oder eine Autofelge in mehrfacher Weise in symmetrische Hälften zerlegen könnte.

Die Körperarchitektur einer Seerose spiegelt ebenso wie die Architektur bilateral-symmetrischer Tiere ihre Lebensweise wider. Eine Seerose kennt ein Unten, dort, wo der Hartboden ihrer Haftscheibe Halt gibt, und sie kennt ein Oben, wo sie ihren Kranz von Tentakeln ins freie Wasser emporstrecken kann und wo sie zweckmäßigerweise auch ihren Mund positioniert hat. Darüber hinaus gibt es für die Seerose keine naturgegebene Vorzugsrichtung. Ihre bevorzugten Futtertiere, kleine Krebse und Fischlarven, können unvorhersehbar von allen Seiten heran schwimmen oder von Wasserströmungen herangetragen werden. Für die Seenelke gilt ebenso wie für die Seerose, dass sie in

der Evolution kein Wissen erwerben konnte, aus welcher Richtung an künftigen Standorten das ergiebigste Plankton heran strömt.

Eben dies gilt aber auch für die vielen Organismen, die sich Meeresströmungen anvertrauen und passiv über weite Strecken verfrachten lassen wie Quallen (Englisch *jelly fish*). Diese gehören ebenso wie die Seerosen dem Tierstamm der Nesseltiere an, aber nicht dem Unterstamm der Anthozoa, sondern dem gesonderten Unterstamm der Schirmquallen (Scyphozoen). Zu den radiären Gebilden zählen naturgemäß auch die winzigen Quallen-ähnlichen Medusen der Hydrozoen. Diese sind, anders als die schrecklichen Medusen der antiken Mythologie, zauberhafte, weitgehend durchsichtige und frei schwebende glockenförmige Gestalten mit vier – oder einem Mehrfachen von vier – radiären Tentakeln und inneren Organen (siehe Umschlagfoto). Diese feenhaften Gebilde sind Individuen, die von Kolonien sesshafter Hydropolyphen erzeugt werden, sich ablösen, ihre Freiheit gewinnen und davon schwimmen. Von ihren Familienbanden gelöst, kommt ihnen die Aufgabe zu, mittels Eiern und Spermien die nächste Generation zu erzeugen. Zugleich sollen diese freigelassenen Individuen dafür sorgen, dass ihre Nachkommen die Chance haben, neue Lebensräume zu finden. Eben dafür lassen sie sich von Meeresströmungen forttragen. Zwar erzeugen die Hydromedusen ebenso wie ihre größeren Verwandten, die Quallen, durch rhythmische Kontraktionen ihres Glockenschirms Auftrieb, um nicht zu Boden zu sinken, sie können aber kein fernes Ziel aktiv ansteuern und sie wissen nie im Voraus, woher Kleinkrebse des Planktons oder Fischlarven heran schweben könnten, die sie mit ihren Tentakeln ein-

fangen und ihrem Mund zuführen möchten. Die Frage, wie ihr Nachwuchs – es sind winzige, schlichte Larven – einen neuen Lebensraum finden kann, wird uns noch beschäftigen (Kap. 12).

Neben Quallen und Medusen, Vertretern des Tierstammes der Nesseltiere, können Meeresforschern so manche befremdliche Organismen begegnen, die sich von Meeresströmen treiben lassen und die äußere Gestalt der radiären Quallen annehmen, obwohl sie ganz anderen Tierstämmen angehören, beispielsweise seltsame, erst in den letzten Jahren in der Tiefsee entdeckte Tintenfische, die zum Einfangen von Plankton einen großen Schirm, gestützt von ihren Tentakeln, aufspannen (Abb. 7.4), oder QualLEN-förmige Lebewesen, deren nächste Verwandtschaft als gurkenförmige Seewalzen schlammigen Meeresgrund durchwühlen (Abb. 7.5). Andererseits sind keineswegs alle planktonisch lebenden Organismen radiär gestaltet. Die Abkunft in der Evolutionsgeschichte, und damit das Inventar ihrer Gene, sind von größerer Bedeutung als ihre derzeitige Lebensweise. Zu den planktonischen Formen, die bilateral-symmetrisch gebaut sind, gehören die transparenten, feenhaft schönen, mikroskopisch kleinen Larven der Seeigel und Seesterne. Damit kommen wir zu Lebewesen, die für Zoologen zum Seltsamsten gehören, das sie kennen.

Bilateralsymmetrie versus Radiärsymmetrie
bei Stachelhäutern (Echinodermata)

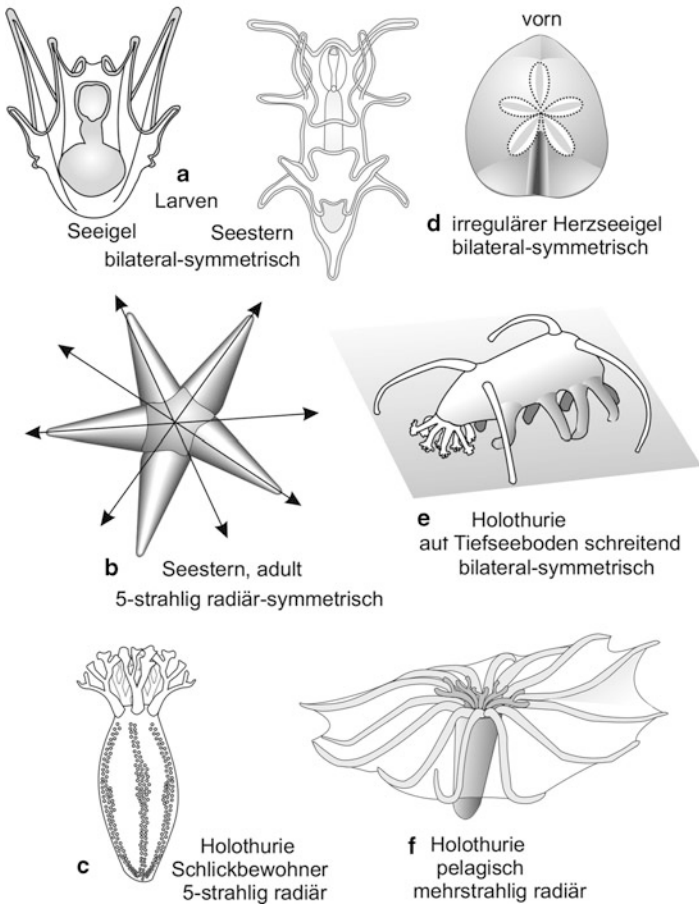


Abb. 7.5 Echinodermen („Stachelhäuter“)

7.5 Die bizarren, fünfstrahlig-radiären Sterntiere, Gorgonenhäupter und ihre Verwandten

Wir kennen sie von unserem Ausflug ins Watt. In heutiger Zeit kennt sie aber jeder, jedenfalls nach ihrer äußerlichen Gestalt: Seesterne und Seeigel. Seesterne und ihre Verwandten, die vielstrahligen Sonnensterne und beweglichen Schlangensterne, kriechen gemächlich in Aquarien herum, und mit den stacheligen Seeiegeln hat schon so mancher schmerzhaft Erfahrungen gemacht, wenn er ohne Badeschuhe durch Tümpel im Watt lief oder nach dem Schwimmen im Mittel- oder Roten Meer über Gestein und Uferfelsen ans Trockene gelangen wollte.

Zoologen der alten Schule wie auch Mediziner pflegten eingedenk ihrer klassisch-humanistischen Schulbildung wissenschaftliche Namen häufig mit alt-griechischen Silben oder Worten zu prägen, denen sie eine lateinische Endung anhängten (weshalb Lateinlehrer Schüler für ihr Fach mit der Aussage ködern konnten, die Sprache der Medizin und Wissenschaft sei Latein). Diese Zoologen prägten für die genannte Tiergruppe den Namen Echinodermata (Echinodermen), von Griechisch *echinos* = Igel und *derma* = Haut, auf Deutsch, ungenau übersetzt, Stachelhäuter. Selten liest man noch den netteren Begriff „Sterntiere“. Vertreter dieser Tiergruppe gibt es nur im Meer; und die Echinodermen haben mit den blumenhaften Seelilien (Abb. 7.7) und den erst 1986 entdeckten Meeresgänseblümchen Vertreter, die auch die große Mehrzahl der professionellen Zoologen noch nie lebend gesehen hat.

Nahezu alles, was in unseren Augen ein Tier ausmacht, fehlt. Wir sehen keinen Kopf, keine mit unseren Augen wahrnehmbaren Augen, finden im Inneren kein Gehirn, kein Herz und kein Blut, das in Adern flösse, geschweige denn Organe wie Kiemen oder Lungen, Wirbelsäule, Leber oder Nieren. Und doch stellt der Zoologe im Stammbaum aller Tiere die Echinodermen in die Nähe der Wirbeltiere, setzt sie also an eine Position im Stammbaum nicht allzu weit entfernt von dem Tierstamm der Chordatiere (Stamm Chordata), zu denen als Unterstamm auch die Wirbeltiere (Vertebrata) und damit wir Menschen gehören. Weshalb, wird später erläutert.

Erst schauen wir, was am lebenden Tier mit bloßem Auge zu sehen ist. Wir beobachten einen „gemeinen“ Seestern, *Asterias rubens*, der im Mittelmeer, im Atlantik und auch in der Nordsee häufig vorkommt und deshalb oft auch in Aquarien zu sehen ist. Die „Arme“ des Seesterns sind in Fünffzahl um einen Kreismittelpunkt angeordnet – wieder werden wir an die Blüte der Rosengewächse erinnert, und wie bei manchen Rosengewächsen kann es bei verwandten Arten auch mal eine Mehrzahl von fünf sein wie bei den Sonnensternen, die altersabhängig bis zu 15 Arme besitzen. Obwohl wir keinen Vorderpol mit Kopf ausmachen können, kann der Seestern durchaus gezielt auf sein Opfer, beispielsweise eine Muschel oder Schnecke, zu kriechen, um dann seinen Magen aus dem zentral auf seiner Unterseite gelegenen Mund aus- und über sein Opfer umzustülpen (Zoologen sprechen von extraintestinaler Verdauung = Verdauung außerhalb des Magendarmtraktes).

Wie und wohin wandert ein fünfstrahliges Tier? Wenn der Seestern mal die Scheibe des Aquariums hochkriecht,

sehen wir mit bloßen Augen auf seiner Unterseite zahlreiche schlauchförmige, bewegliche Füßchen mit Saugnäpfen an den Enden. Mit seinen zahlreichen Füßchen kann er auch an Glasscheiben hochklettern, wobei nach einer geheimen Absprache einer der 5 Arme die Führung übernimmt. Die Saugnäpfe werden mittels eines internen hydraulischen Apparates bewegt. Auch beim kugelförmigen Seeigel können wir zwischen fünf bis zehn Reihen beweglicher Stacheln fünf bis zehn Doppelreihen von Saugnapffüßchen sehen. Dazwischen hat er auch noch bewegliche, Pinzetten-artige Greifzangen (Pedicellarien), mit denen er seinen Körper säubert.

Unter den Schlangensternen gibt es bizarre Formen, die selbst Zoologen, so sie nicht Spezialisten der Systematik sind, in Verwirrung setzen können, zumal man sie auch in bestens ausgestatteten Aquarien nur selten zu Gesicht bekommt: Es sind die mit 5 bis 15 strauchartig verzweigten Armen ausgestatteten **Gorgonenhäupter**, auch Medusen-häupter genannt. (Abb. 7.6). Besonders verwirrend ist, dass die Gorgonenhäupter auf Korallen sitzen und herumkriechen können, die **Gorgonien** heißen.

Namensgebend für beide zoologisch gänzlich verschiedene Gruppen sind die Gorgonen, Schreckgestalten mit Schlangenhaaren der griechischen Mythologie, mit der gefürchteten Gorgone Medusa als bekanntester Hexe, deren Anblick jeden Mann zu Stein erstarren ließ, und deren Haupt der mit einer Tarnkappe geschützte Halbgott Perseus abschlug. Mit dem Medusenhaupt in der emporgestreckten Hand ließ Perseus seine Feinde zu Stein erstarren und verwandelte den Titanen Atlas in das Atlasgebirge.

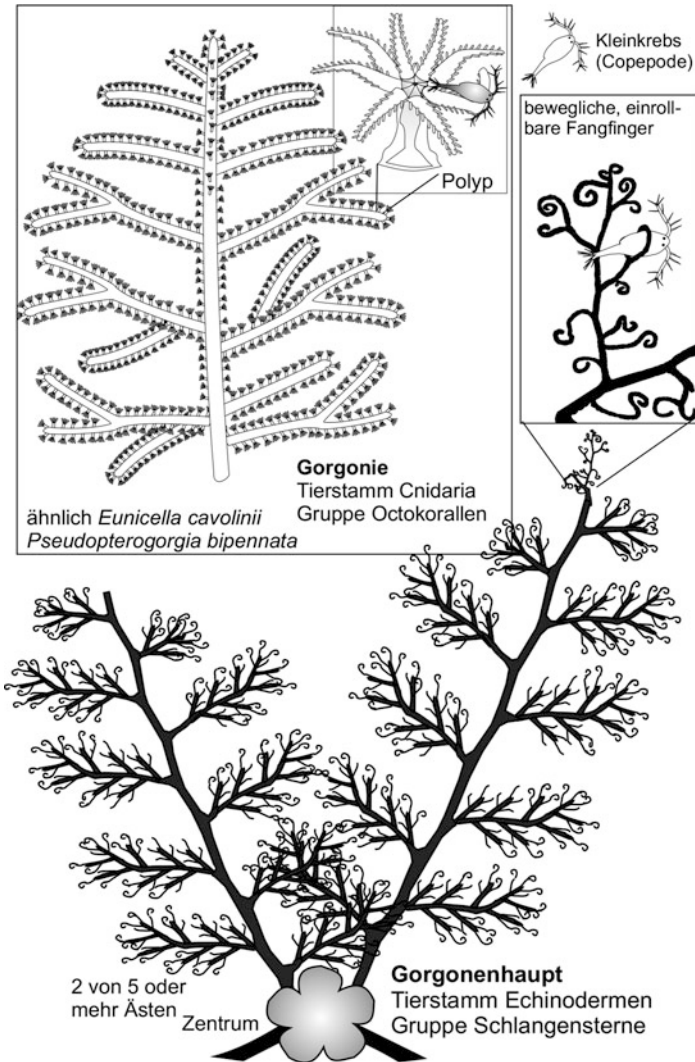


Abb. 7.6 Gorgonien und Gorgonenhäupter

Und nun schaue man die mikroskopisch zierliche, transparente Meduse (s. Bild auf dem Umschlag) an. Wie konnte ein Mensch da an das schreckliche Medusenhaupt einer Gorgone denken?

Wenn wir nun bedenken, was zuvor über die Beziehung von Körperform und Lebensweise gesagt wurde, sind wir irritiert. Zwar ist die zierliche, planktonisch lebende Meduse gemäß unserer Deutung radiär-symmetrisch, nicht aber die ebenfalls im Plankton schwebenden Larven der Echinodermen; sie sind bilateral-symmetrisch. Die hingegen radiär gebauten Adultformen (erwachsene Formen) – wir kennen sie nun als Seesterne und Seeigel – kriechen Nahrung suchend über den Meeresboden oder Korallenriffe. Sie sollten gemäß dieser Lebensweise doch bilateral-symmetrisch sein, sind es aber nicht. Wie ist dieses Paradoxon aufzulösen? Oder stimmt das zuvor Gesagte eben doch nicht?

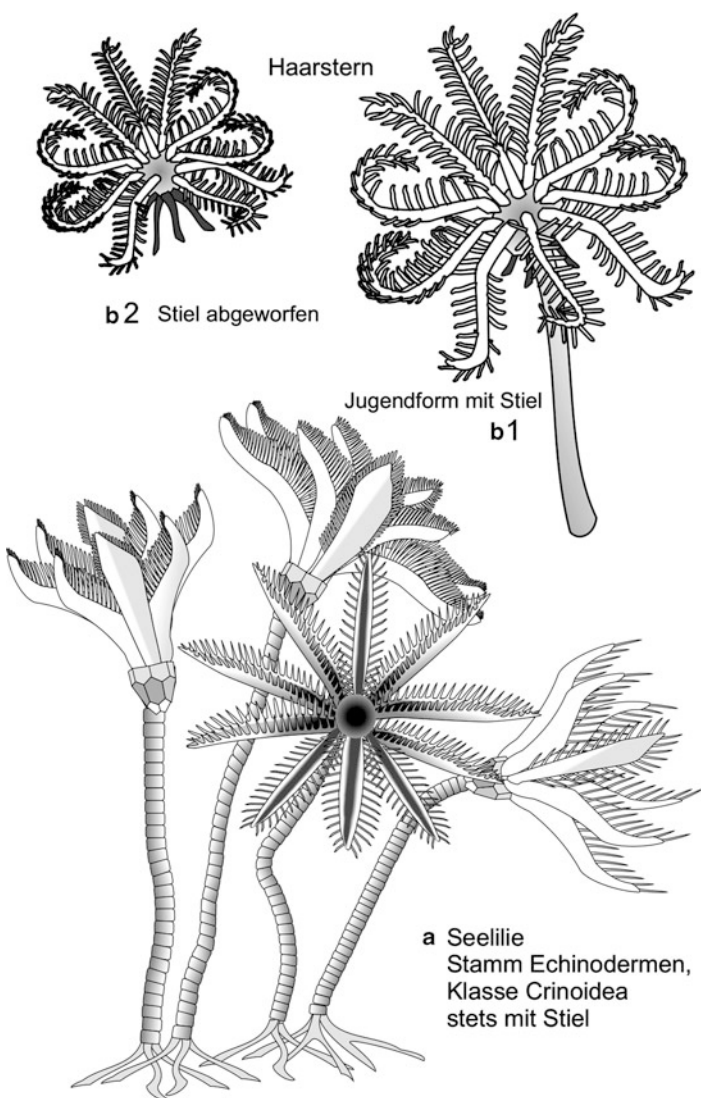
Dass aus den befruchteten Eiern in einer ersten Lebensphase bilateral-symmetrische Larven (Abb. 7.5) hervorgehen, stört den Evolutionsbiologen nicht – es gibt im Plankton neben radiären Formen auch manch andere Formen mit anderen Symmetrieverhältnissen – es freut ihn sogar sehr; denn solche Embryonen und Larven weisen in ihrem Werdegang oft auf die evolutionsgeschichtliche Herkunft einer Tiergruppe hin. Siehe die Larve der Seescheiden, welche diese so primitiv erscheinenden Formen als Chordatiere ausweisen und als eine Schwestergruppe der Wirbeltiere (Abb. 7.2). Als Vorfahren der Echinodermen vermuten fantasiereiche Evolutionsbiologen bilateral-symmetrische Ur-ahnen, sie nennen sie Urbilateria. Eine Gruppe von ihnen soll zur sesshaften Lebensweise übergegangen und in dieser Phase ihrer Geschichte eine Radiär-Symmetrie erworben

haben. In einem späteren Erdzeitalter jedoch sollen manche von diesen sekundär wieder zum Leben als Nomaden übergegangen sein, ohne sogleich erneut bilateral-symmetrisch zu werden. Geschichten nicht von Wissenschaftlern, sondern von fantasievollen Märchenerzählern?

7.6 Seelilien – Überbleibsel längst vergangener Perioden der Erdgeschichte

Da gibt es ja die Seelilien (*Crinoidea*, Abb. 7.7). Der Fossilien-sammler findet ihre Überreste in Mengen in den Kalksediment-Gesteinen Jahrmillionen alter Erdepochen, besonders leicht zugänglich und zahlreich im Kalkgestein des Jura und der Kreide (z. B. im Posidonienschiefer von Holzmaden, Schwäbische Alb). Diese fossilen Seelilien lebten entweder in Kolonien an Treibhölzer angeheftet oder als Einzeltiere im Meerwasser driftend, also planktonisch, manche auch im Sandboden verankert auf dem Meeresgrund. Zur Freude der Zoologen findet man auch heute noch lebende Vertreter der Seelilien in der Tiefsee bis minus 6000 m, beispielsweise vor der Küste Norwegens, im Krater erloschener unterseeischer Vulkane des Atlantiks und im indischen Ozean. Diese sind mit einem halben Meter Höhe kleiner als das Gros der fossilen Arten, deren Stiel bis 20 m lang werden konnte. Seelilien sind mit ihrem beweglichen Stiel auf harten Untergründen festgewachsen oder im Sand verankert.

Der Stiel trägt eine kelchförmige Krone mit bis zu 20 gefiederten und verzweigten „Armen“, die darauf spezialisiert



◀ **Abb. 7.7** Seelilien und Haarsterne, Echinodermen der Untergruppe Crinoidea. **a** Seelilien, stets mit Stiel. **b** Haarsterne, in der Jugend mit Stiel (**b1**), später ohne und frei lebend (**b2**); so auch die reich gefiederten Haarsterne (*Comatulida*, Englisch *feather stars*); diese gehören, anders als die ähnlich gestalteten Schlangensterne, wie die Seelilien zu den Crinoidea und sind in ihrer frühen Jugend noch sesshaft

sind, heran schwebendes Plankton einzufangen (Abb. 7.7). Der Planktonfang geschieht wie bei der Seenelke: Die Federästchen sind klebrig; schlagende Wimpern (Cilien), wie wir sie auch in unserer Luftröhre zum Auskehren und Hochtransport eingeatmeter Staubpartikel haben, befördern die eingefangenen Partikeln zum Mund. Seelilien pflegen also den Lebensstil von Seenelken und beide sind architektonisch radiär.

Die Vorstellung ist also die, dass die heutzutage frei lebenden Arten wie Seesterne und Seeigel von abgelösten Kronen vormaliger Seelilienarten hervorgegangen sein dürften. Und diese Vorstellung ist nicht nur passend ausgedachte Fantasie: Manche Seelilien werfen mit der Zeit ihre Kronen ab; diese leben alsdann auf dem Meeresboden. Und es gibt eng verwandte Arten, die nur in der frühen Jugendphase einen kurzen Stiel entwickeln.

7.7 Sekundäre bilaterale Symmetrie und scheinbare Quallen in fremden Tierstämmen

Einige Vertreter der frei gewordenen Stachelhäuter sind in Übereinstimmung mit ihrer kriechenden Lebensweise se-

kundär doch wieder bilateral-symmetrisch geworden: Es gibt irreguläre, heißt asymmetrische Seeigel, die ein Vorn und ein Hinten kennen (Abb. 7.5). Im Amerikanischen als *sand dollars* bekannt, durchpflügen sie Sandböden. Und es gibt sekundär wieder bilateral-symmetrisch gewordene Holothurien, im Deutschen „Seegurken“ (im Englischen entsprechend *sea cucumbers*) genannt, oder See- walzen, manche auch Seeäpfel. Sie gehören ebenfalls zu den Stachelhäutern, kriechen mit ihrem zumeist walzenförmigen Körper und mit Tentakeln um den Mund in Massen über den Meeresboden, saugen ihn wie Staubsauger ab und durchwühlen ihn wie die Wildschweine unsere Wiesenböden. Die Innereien vieler Seegurken werden in Ländern Ostasiens (besonders in Japan) und des Mittelmeeres (Spanien) als Delikatesse verspeist. Andererseits verwandelten sich einige Holothurien (z. B. Arten der Gattung *Enypniastes*) in Quallen-ähnliche Gebilde, welche sich Meeresströmungen anvertrauen.

7.8 Die bizarren Sterntiere – unsere entfernte Verwandtschaft?

Und warum sollen nun diese bizarren und urtümlichen Kreaturen Verwandte – wenn auch entfernte – der Wirbeltiere sein? In der Entwicklung der Echinodermen vom Ei zur Larve entsteht ein erster Mund, Urmund genannt. Der wird aber zum After der Larve, während der endgültige, sekundäre Mund später am anderen Ende des Darmkanals durchbricht. Und so ist es auch bei den urtümlichen

Wirbeltieren, den Amphibien. So ist dies auch bei anderen wirbellosen Meeresbewohnern, den Manteltieren wie den Seescheiden (und für Biologen: der oft genannte Amphioxus = *Branchiostoma*, Abb. 7.2d). Man fasst all diese Tierstämme unter dem Überbegriff der Deuterostomier = Neumünder zusammen (Abb. 9.1a). Die heutzutage gewichtigsten Argumente liefert jedoch die Molekulargenetik: In der Struktur vieler charakteristischer Gene spiegelt sich die genetische Verwandtschaft aller Neumünder eindeutig wider.

Die Evolution ist eine zielblinde Künstlerin, die aufs Geratewohl Baupläne abändert, aber in ihrem Spieltrieb von den vorhandenen, in langen geologischen Zeiträumen erworbenen und bewährten Bauplänen ausgehen muss.

8

Filtrierer – Akteure eines weltumspannenden, ozeanischen Klärwerks

Zusammenfassung

Organismen, die sich ihre Nahrung als Filtrierer von Mikrop plankton besorgen, sich also mit dem begnügen, was heran schwebt oder aus dem Wasser herausgefiltert werden kann, können sich ein bequemes Leben leisten. Sie brauchen effektive Filter, um Nanoplankton wie Bakterien aus dem Wasser zu filtern, aber können sesshaft leben, brauchen keine Fernsinnesorgane und folglich auch kein komplexes Gehirn. Schwämme, die zu den wichtigsten Akteuren des ozeanischen Klärwerks gehören, haben einen Zelltyp, der schon als Einzeller vorkommt, sich im Tierreich vielfach bewährt hat und auch die Sinnesleistungen unseres Innenohrs ermöglicht.

Wir verfolgen jetzt nicht die Schwärme von Garnelen (Krill) und Sardinen, die von Meeresströmungen getragen und zusätzlich aktiv schwimmend riesige Strecken durchmessen und denen Walhaie und Bartenwale aktiv nachjagen müssen. Es geht jetzt um kleinste Futterpartikel in der Größe hinab bis Bakterien, die von sesshaften oder nur gering beweglichen Tieren aus dem Wasser herausgefiltert werden.

8.1 Filtrierer von Mikroplankton sind bequem und brauchen allenfalls ein Mini-Gehirn

Zum Einfangen von Mikroplankton gibt es zwei Strategien. Eine erste ist, einen Planktonfänger aus dem Körper oder einer Wohnröhre auszufahren, auszubreiten und der Wasserströmung auszusetzen. Diese Fänger sind oft als eine Art Federkrone und äußerlich einander sehr ähnlich gestaltet. Die feinsten Ästchen dieser Federn sind von Schleim überzogen, oder es ist ein Nano-Spinnennetz zwischen diesen Ästchen ausgespannt, in denen sogar Bakterien hängenbleiben. Solche Fangsysteme haben vielerlei Organismen zur Verfügung, die ganz verschiedenen Tierstämmen angehören. Es wären zu nennen: Viele Korallentiere und Quallen (Stamm Cnidaria), Moostiere (Stamm Ectoprocta = Polyzoa), Röhren-bewohnende Meeresborstenwürmer (Stamm Annelida), Seelilien, Haarsterne und Seegurken (Stamm Echinodermen) und weitere marine Tiergruppen, die nur Spezialisten kennen und von denen der Nichtfachmann nie etwas hört. Eben dieses verborgene Leben in den Tiefen der Meere macht es selbst dem geschulten Betrachter oftmals unmöglich, ohne Mikroskop und Kenntnis der inneren Anatomie herauszufinden, um welche Tiergruppe es sich im Einzelnen handelt.

Für Biologen stellt sich bei solchen Ähnlichkeiten die Frage: Homologie oder Konvergenz? Sie fragen, sind solche Strukturen von gemeinsamen Vorfahren geerbt (Homologie)? Oder sind diese Fangsysteme im Laufe von Jahrmillionen mehrfach unabhängig voneinander entwickelt

worden, weil die Lebensweise solche Strukturen begünstigt hat (Konvergenz durch natürliche Selektion? Schulbeispiel für Konvergenz ist die ähnliche, stromlinienförmige Gestalt der Fische, der Ichthyosaurier und der Delfine). Im vorliegenden Fall sprechen alle Argumente der Kenner der Details für Konvergenz.

Zurück zum Thema Filtrieren von Nanopartikeln. Die zweite Strategie ist es, Wasser durch eine Körperöffnung, oft als Röhre ausgezogen und Siphon genannt, einzusaugen, das Wasser durch Filter strömen zu lassen und dann, von Bakterien gereinigt, wieder aus dem Körper zu entlassen. Beispiele sind die Muscheln, Seescheiden und Schwämme. Schwämme haben wir bisher vernachlässigt, doch nun soll ihnen die gebührende Aufmerksamkeit gehören, weil sie nun mal einen enorm großen Beitrag im inneren Klärwerk der Ozeane liefern.

Es kommt all diesen Organismen eine Besonderheit des Wassers als Lebensraum zugute: Im Wasser können, anders als in der Luft, Myriaden mikroskopisch kleiner Lebewesen wie Bakterien, einzellige Algen, Hefepilze und Protozoen gedeihen und sich vermehren. Filtriert man diese heraus, braucht man sich der Mühe, seiner Nahrung nachzujagen, nicht zu unterziehen. Fernsinnesorgane zur Ortung potenzieller Beute sind nicht nötig, folglich braucht man auch kein Gehirn, oder kein besonders leistungsfähiges. Das Zentralnervensystem ist zu einer mikroskopisch kleinen Ansammlung von Nervenzellen, einem Mini-Gehirn, reduziert, so bei den Seescheiden und bei Amphioxus (Abb. 7.2), oder ein ausgeprägtes Zentralnervensystem fehlt von vornherein. Alle nötigen Funktionen wie reflexartige Bewegungen von Tentakeln oder Verschließen der Körper-

zugänge bei Gefahr werden von Nervennetzen (Abb. 9.3) und dezentralen, durch Ringleitungen miteinander verbundenen Ansammlungen von Nervenzellen erfüllt, so bei den Polypen und Quallen der Cnidarier, so auch bei den Echinodermen.

8.2 Schwämme setzen zum Filtrieren einen Milliarden von Jahren alten Urtyp von Zellen ein

Auch Schwämme gehören zum Tierreich, werden üblicherweise an die Basis der vielzelligen Tiere gestellt und haben sich bei all ihrer vermeintlich primitiven Organisation und Lebensgestaltung über Milliarden von Jahren seit dem Erdaltertum behauptet, vor allem dank eines bisher noch nicht von der Medizin erschlossenen Reichtums an anti-mikrobiellen Substanzen. Sie können sich nicht nur gegen aggressive Bakterien wehren, sie ernähren sich von ihnen.

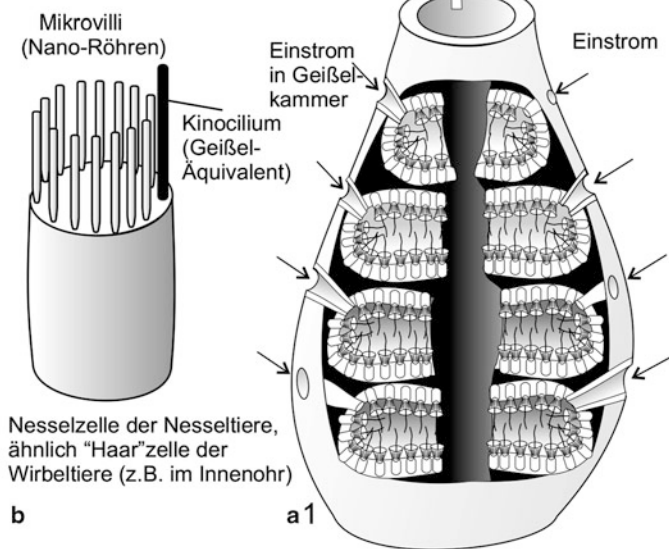
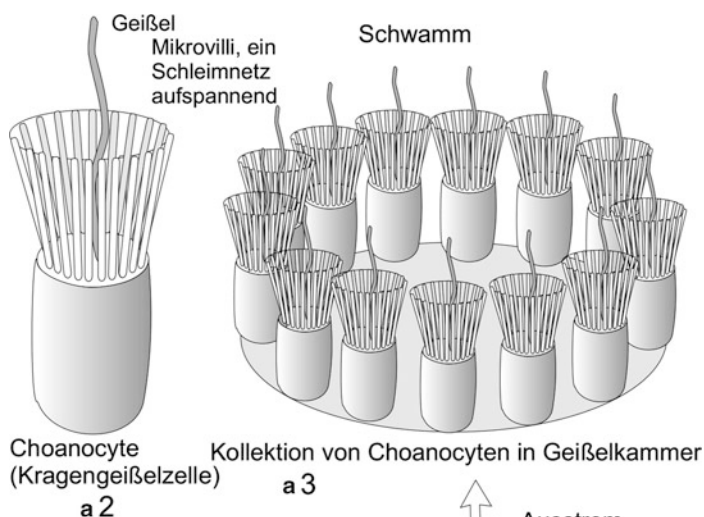
Schwämme gehören zu den Lebewesen mit inneren Filtersystemen, mit Einström- und Ausströmöffnungen, ganz ähnlich den Seescheiden. Ein Highlight der Evolutionsbiologie muss erwähnt werden: Der Wasserdurchsatz wird angetrieben, und Bakterien aus dem Wasserstrom herausgefischt, von einem ganz besonderen Typ von Zellen, den Choanocyten, auf Deutsch Kragengeißelzellen (Abb. 8.1).

Auf der Oberseite dieser Zellen ragt ein kronenförmiges System von Stützstäben (Fachausdruck Mikrovilli oder Stereovilli) empor, zwischen denen ein feinmaschiges Netz aus Schleimfäden aufgespannt ist. Darin verfangen sich Kleinst-

partikel, so auch Bakterien, die dann von diesen Zellen einge- und im Zellinneren verdaut (Endocytose) werden.

Nahezu identische Zellen gibt es als einzellige Flagellaten im Mikropilankton selbst (Choanoflagellaten). Verblüffende Ähnlichkeit haben auch spezielle Zellen in vielen Tiergruppen; ihnen fehlt freilich das Bakterien-Fangnetz. Zwischen den Schwämmen an der Basis des Tierreichs und uns Menschen steht eine Reihe von Organismen, bei denen ähnliche Zellen als Sinneszellen Dienste tun. Es zählen dazu die Nesselzellen der Cnidarier; es zählen dazu Sinneszellen in den Seitenlinien der Fische, die für die Wahrnehmung von Wasserströmungen und Wasserschall zum Einsatz kommen, und es zählen dazu die Mini-Voltmeter in der Haut der Fische, die elektrische Felder wahrnehmen können. Man findet Zellen mit ähnlichen Kronen von Stäben auch in Säugetieren und mit ihnen auch im Menschen, und zwar in den Gleichgewichtsorganen (Maculae) in unserem Innenohr, und, in abgewandelter Form, im Gehörgang (Cochlea). Dort in unserem Innenohr heißen diese Zellen „Haarzellen“, von einstigen, nur mit Lichtmikroskopen alter Bauart ausgestatteten Anatomen missverständlich so benannt, weil sie auf ihrer Oberfläche eben einen Schopf aus feinsten Nanoröhrchen haben, die im Lichtmikroskop wie Haare aussehen.

Man fragt sich: Gibt es da eine kontinuierliche Entwicklungslinie oder sind dies Parallelentwicklungen? Wieder stehen wir vor der Alternative: Homologie oder Konvergenz? Wie bei den doch sehr unterschiedlich gestalteten, im ganzen Tierreich vorkommenden Augen heißt die Antwort „sowohl als auch“. Zur Herstellung von Augen gibt es, wie Molekularbiologen berichten, einen Basissatz von Genen,



◀ **Abb. 8.1** Schwamm. **a1** Gesamtstruktur eines einfachen Typs. **a2, a3** Choanocyten (Kragengeißelzellen). **b** Nesselzelle eines Cnidarians

der über die Jahrmilliarden der Evolution über die Generationsfolgen und ihre Verzweigungen hinweg weitergereicht wurde; dazu kamen aber in den verschiedenen Evolutionslinien jeweils zusätzliche Gene hinzu, welche Abwandlungen und den artspezifischen Ausbau der diversen Augentypen ermöglichten (Müller und Hassel 2012a, 2015a). Schon seltsam, welch verschlungene Wege die Evolution geht.

9

Vorsorge fürs Weiterleben: mal Klonen, mal Sex

Zusammenfassung

Bei zahlreichen Bewohnern des Meeres gibt es nicht nur Sex. Vielfach geschieht die Fortpflanzung ungeschlechtlich, das heißt durch natürliches Klonen. Die so entstandenen Nachkommen können sich voneinander trennen, wie bei den sich so vermehrenden Seerosen. Oder sie bleiben zusammen und bilden eine Kolonie. Obwohl alle Mitglieder einer solchen Kolonie genetisch identisch sind, kommt es oftmals zu einer Arbeitsteilung, die Einzelwesen verlieren ihre Eigenständigkeit, nehmen unterschiedliche Gestalt an und erfüllen im Dienst der Gemeinschaft unterschiedliche Funktionen; es entsteht ein Superorganismus. Dies ist beispielsweise so bei Staatsquallen, aber auch bei Manteltieren wie den Salpen, Vertretern der Chordatiere, zu denen auch der Mensch gehört. Kommt es zu Sex, können kuriose Partnerschaften entstehen. Bei Seepferdchen werden Männchen schwanger, bei manchen Anglerfischen angeln sich die Weibchen ein junges Tier, das mit ihnen verwächst und zum versklavten Zwergmännchen wird.

9.1 Klonen als Teil von Lebensläufen, in der Natur nicht grundsätzlich verpönt

Nehmen wir als Beispiel die Ohrenqualle *Aurelia* (Abb. 9.1b). Die Art existiert wie die meisten als Quallen bekannte Tierarten in zwei adulten Erscheinungsformen, als unscheinbarer sesshafter Polyp und als befreit umhertreibende Qualle. Beide werden als eigenständige Generation angesehen, und Biologen sprechen von Generationswechsel, hier in Form einer Metagenese – einer Nacheinander-Entstehung (Griechisch: *meta* = nach, *genein* = erzeugen).

Im gegenwärtigen Zusammenhang ist von Bedeutung, dass sich der Polyp durch Klonen fortpflanzt – alle die von ihm erzeugten, sich ablösenden Ephyra-Larven sind genetisch identisch und tragen die genetische Ausstattung ihres Erzeugers.

Lehrbücher der Biologie, besonders ältere Ausgaben, sprechen von „vegetativer Fortpflanzung“ und erläutern, diese Art der Fortpflanzung sei im Pflanzenreich häufig (daher „vegetativ“). Besser ist der Ausdruck „ungeschlechtliche Fortpflanzung“; denn nicht das Pflanzenhafte ist von Bedeutung, sondern die genetische Einheitlichkeit der Nachkommen. Es wird dann die Aufgabe der Qualle sein, sich sexuell fortzupflanzen; denn nur auf diesem Weg wird es Planula-Larven geben, die einen neuen Lebensraum finden könnten.

Wir betrachten einen weiteren Lebenszyklus eines Nesseltieres, den Lebenszyklus des im Wattenmeer gefundenen und vorgestellten hübschen „Wasserstrahlen-Tieres“

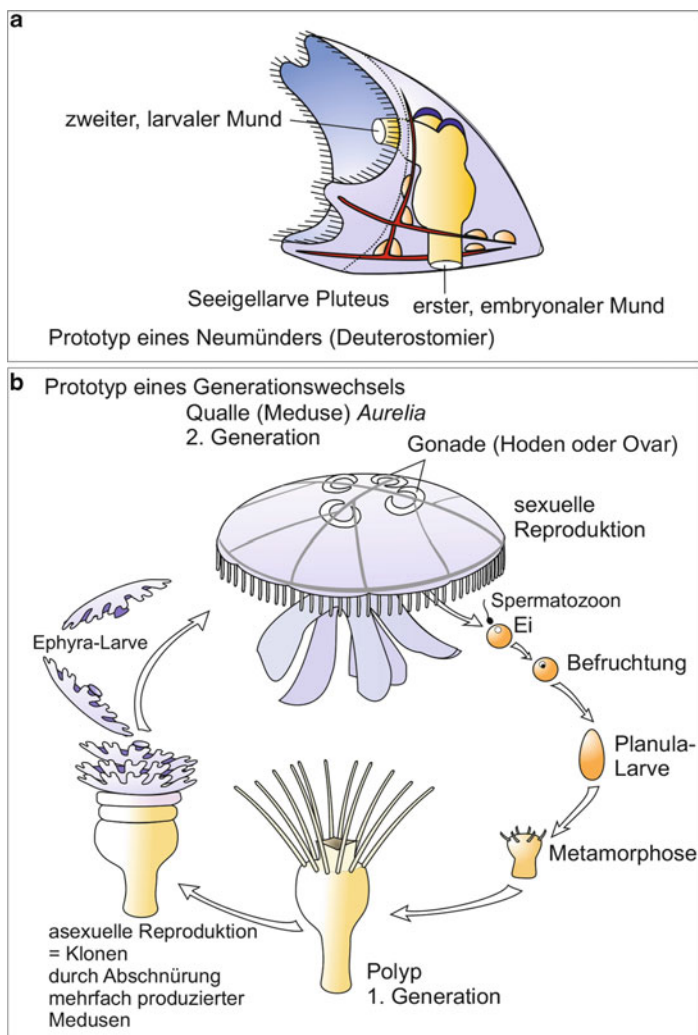


Abb. 9.1 **a** Pluteus, die Seeigellarve, als Prototyp eines Neumünders (Deuterostomiers). **b** Lebenszyklus mit Generationswechsel der Ohrenqualle *Aurelia*

Hydractinia echinata aus der Unterklasse der Hydrozoen (Abb. 6.15 und 6.16). Sein Lebenszyklus (Abb. 9.2) ist gegenüber dem der Ohrenqualle in mehreren Punkten verändert. Eine Medusengeneration ist hier, anders als bei nahe verwandten Arten, reduziert zu kugelförmigen Samen- oder Eibehältern. Diese entlassen frühmorgens bei Sonnenaufgang ihre Eier oder Spermien im Vertrauen darauf, dass diese zueinander finden und die Eizellen von den Spermien befruchtet werden. Ist dies erfolgreich geschehen, findet im freien Wasser die Embryonalentwicklung statt zu einer winzigen, spindelförmigen Larve, wie bei der Ohrenqualle und bei Korallen Planula genannt, und diese soll sich auf einem günstigen Untergrund festheften und sich zu einem Polypen umwandeln.

Wie die die winzige Planula ohne Augen, Ohren und Nase einen geeigneten Lebensraum findet, untersuchen wir später im Kap. 12. Im Augenblick interessiert uns die Bildung der Kolonie. Diese beruht auf natürlichem Klonen durch Knospen.

9.2 Durch Klonen zum Superorganismus

Mehrfach sind wir nun auf Organismen gestoßen, die aus Kolonien von Einzelwesen bestehen. Im Wattenmeer hatten wir neben Kolonien von *Hydractinia* das Zypressenmoos *Sertularia* (Abb. 6.12) gesehen, sowie die Weichkoralle *Alcyonium* (Abb. 6.20), die von der Mannschaft des Krabbenkutters „Tote Seemannshand“ genannt worden war.

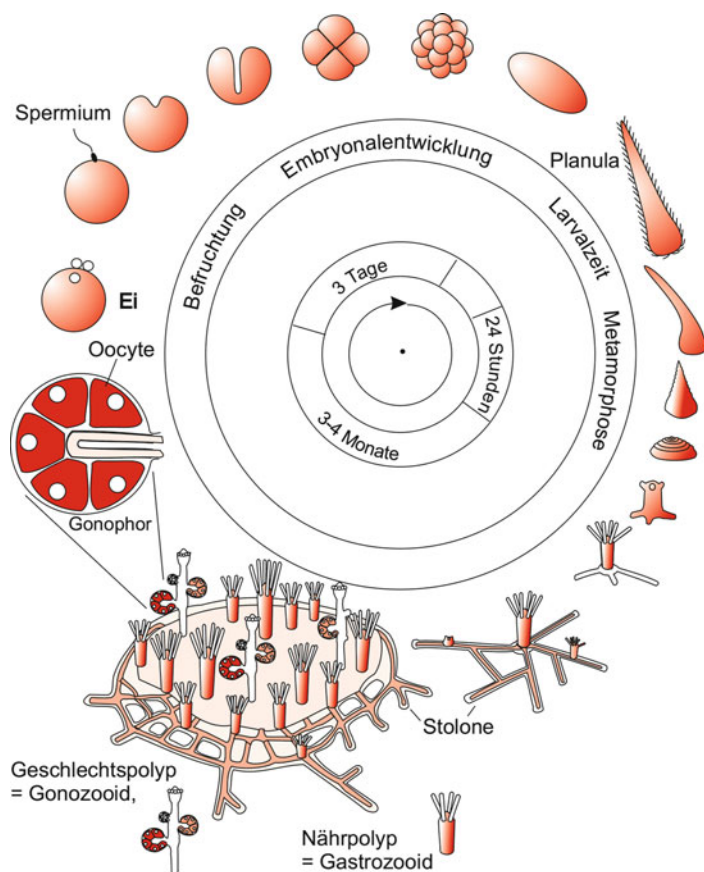


Abb. 9.2 Lebenszyklus des Hydrozoons *Hydractinia*. (© WM)

Wir sahen in den Aquarien weitere Korallen und Moostiere (Abb. 7.1). Die Fähigkeit, Kolonien von Einzelwesen zu gründen, die in lebenslanger Gemeinschaft zusammenbleiben und zusammenstehen, basiert auf Klonen, und dieses wiederum auf normalen Zellteilungen – der Biologe sagt: auf Mitosen. Solche Lebewesen, die sich auf natürliche Weise klonen, kann der Biologe oft auch gut im Labor klonen (Abb. 9.3a), so auch zur Vermehrung von Korallen zur Regeneration zerstörter Riffe.

Würden bloß die bisher genannten Organismen Kolonien bilden, könnte man meinen, Verlust der Eigenständigkeit und die Lebensentscheidung zu Wohngemeinschaften mit seinesgleichen sei Ausdruck einer „niederen“ Stellung im System der Zoologie. Doch es gibt auch koloniale Seescheiden (Abb. 9.4), und Seescheiden (Ascidien) ordnet der Zoologe dem gleichen Tierstamm zu wie die Wirbeltiere einschließlich uns Menschen.

Doch nicht nur auf einem festen Untergrund siedelnde, sesshafte (sessile) Kolonien sind geklonte Lebewesen. Auch einzeln lebende Seerosen oder frei im Wasser schwebende koloniale Formen können auf natürlichem Wege geklont sein, so die im Plankton herumtreibenden Staatsquallen vom Tierstamm der Nesseltiere und die ebenfalls in Meeresströmungen treibenden, transparenten Salpen vom Tierstamm der Manteltiere (Tunikaten, Abb. 9.4).

Überfliegt man die in diesem Buch zusammengestellten Abbildungen, findet man mehrfach Kolonien miteinander verbundener Einzelwesen, bei denen es schwerfällt, die Einzelwesen als „Individuen“, das heißt als „Unteilbare“, zu bezeichnen; denn oft haben die Einzelwesen die Fähigkeit eingeübt, autonom, d. h. unabhängig von anderen zu leben.

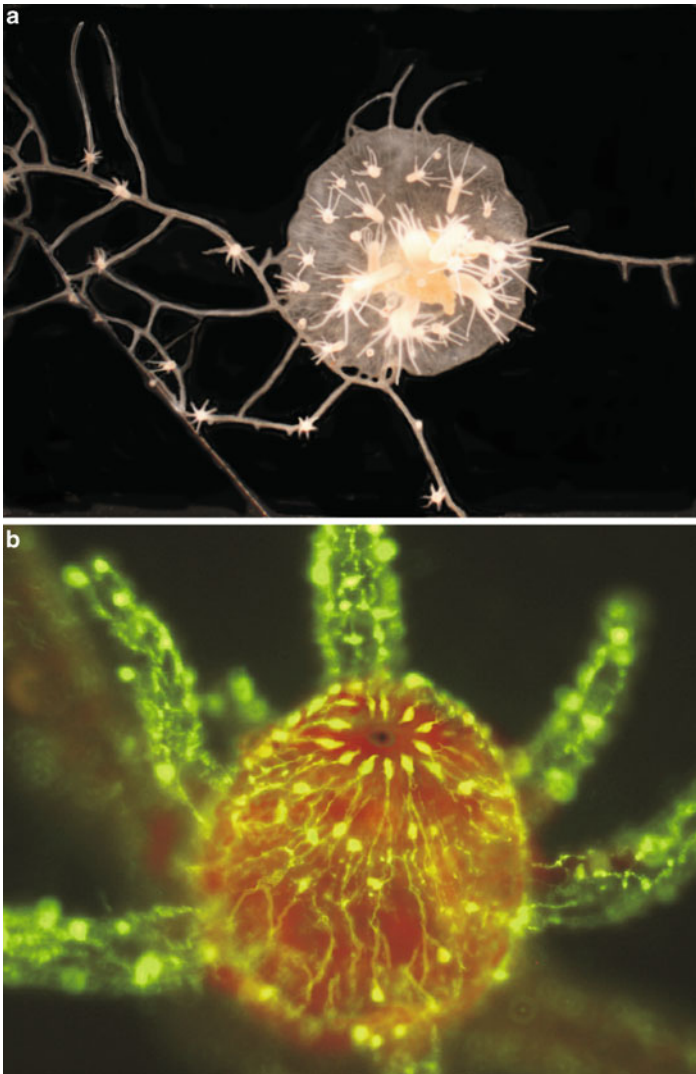


Abb. 9.3 *Hydractinia*. **a** künstlich im Labor geklonte Kolonie, **b** Nervennetz in einem Polypen. (© WM)

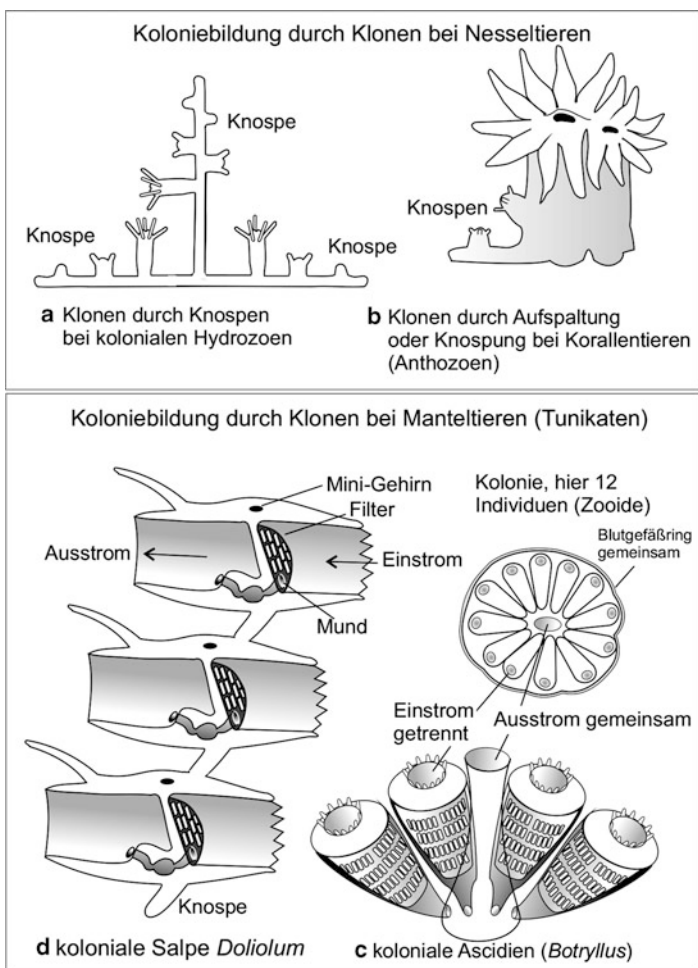


Abb. 9.4 Natürliches Klonen durch ungeschlechtliche Fortpflanzungsweisen

Polypen der Nesseltiere sitzen in aller Regel auf den Zweigen einer baumförmigen Struktur, von der sie sich nicht ablösen können (Abb. 6.12 und 6.20). Die Basis dieser baum- oder strauchartigen Gebilde war einst von einem Gründerpolypen geschaffen worden. Wie Gewächse der Botanik wachsen diese Gebilde an ihrer Spitze und ihren Zweigenden unentwegt weiter und bilden nach und nach Knospen, die sich zu Polypen entfalten.

Alle Individuen sind genetisch identisch wie eineiige Zwillinge. Trotz gleicher Ausstattung mit Genen können sich solche Einzelwesen zu unterschiedlichen Gestalten entwickeln und unterschiedliche Funktionen übernehmen, in Parallele zur sogenannten Zelldifferenzierung in unserem Körper: Hautzellen, Drüsenzellen, Muskelzellen, Sinneszellen oder Nervenzellen werden verschieden, weil sie zwar alle die gleichen Gene haben, aber im Einzelfall jeweils andere Sätze von Genen aus dem Gesamtspektrum aller ihrer Gene, ihrem Genom, einschalten. Parallel dazu können geklonte Wesen trotz gleicher Gesamtheit von Genen unterschiedlich werden. Und wie unsere Körperzellen verlieren sie dabei oftmals ihre Eigenständigkeit.

Superindividuen der Hochsee: segelnde Galeeren und Schleppangel-Boote In Büchern der Zoologie vereinigt man diese Wesen unter der Überschrift „Staatsquallen“. Sie bestehen ähnlich einem Bienen- oder Ameisenstaat aus einer Vielzahl von Einzelwesen, denen unterschiedliche Aufgaben zugewiesen sind. Anders als in den Insektenstaaten haben die Einzelwesen der Staatsquallen nicht alle ihren Ursprung in einem befruchteten oder unbefruchteten Ei, sondern sind von einem Gründerindividuum durch Knospung ge-

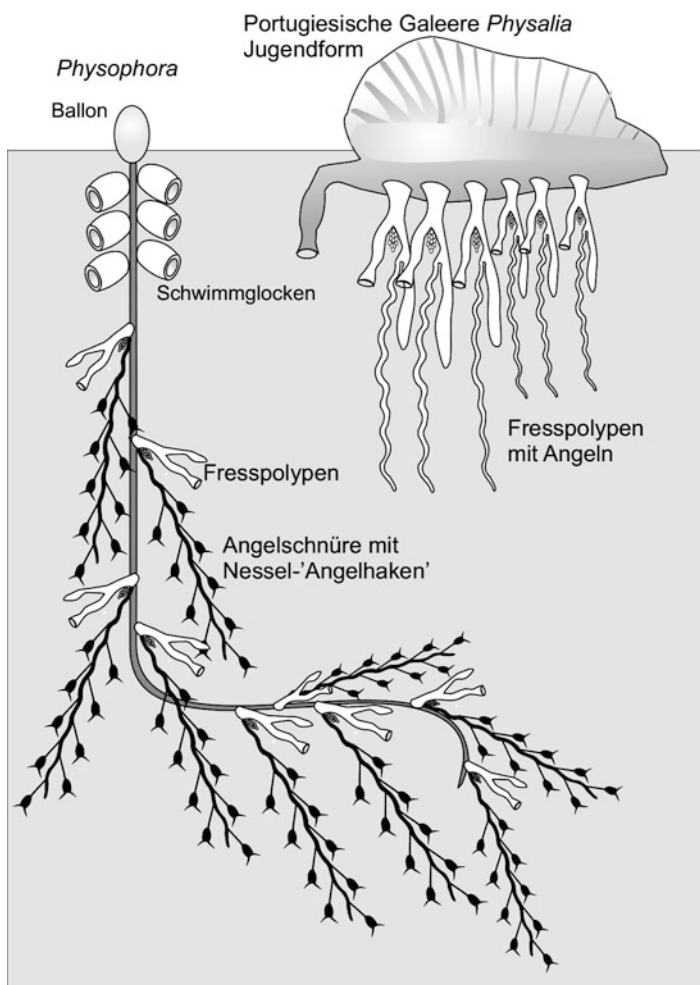


Abb. 9.5 Staatsqualen. Portugiesische Galeere, Jugendform (nach *Encyclopaedia Britannica*), Physophora. (Nach verschiedenen alten Quellen schematisierend zusammengestellt)

klont und bleiben zeitlebens miteinander verwachsen. Es kommt zu einer Arbeitsteilung, die so weit geht, dass die Ursprungsgestalt der Einzelwesen, ob Polyp oder Qualle, allenfalls in jugendlichen Exemplaren (Abb. 9.5) noch erkannt oder errahnt werden kann.

Staatsquallen als lebende Wesen sind selbst im Kreise der Meeresbiologen kaum bekannte, weitgehend transparente, in Meeresströmungen treibende Wesen. Deutungen der oftmals nur undeutlich gesehenen Strukturen entsprangen auch der Fantasie der Zeichner, so in unserer Abb. 9.5. Einiges ist bekannt von der Portugiesischen Galeere, die als Segelboot über die Meere treibt und bisweilen strandet. Ihr bläulich schimmerndes Segel wird durch Aufblähen mit Gas gehisst. Ein durch Muskelzellen beweglicher Kamm könnte, so vermuten manche, zum Manövrieren verstellt werden.

Eine Mehrzahl sehr unterschiedlicher Staatsquallen legt wie Schleppangelboote lange, mit „Angelhaken“ versehene Angelschnüre aus. Die Funktion der Angelhaken wird von Nesselzellen erfüllt (Abb. 9.5).

Auch im Wattenmeer leben Superorganismen Wir sehen nochmals auf Abb. 6.15. Die Geschlechtspolypen in einer *Hydractinia*-Kolonie sind darauf angewiesen, von den Nährpolypen über ein netzförmiges System von Kanälen mit Nahrung versorgt zu werden. Die Einzelwesen sind zu Organen eines Überindividuums geworden. Ebenso sind die Einzelwesen der kolonialen Seescheiden (*Botryllus*, Abb. 9.4) durch ein Blutgefäßsystem zu einer überindividuellen Gemeinschaft verbunden.

Gewebe-Unverträglichkeit kann genetische Einmaligkeit und Integrität der kolonialen Formen wahren Den genannten zwei Arten, *Hydractinia* und *Botryllus*, obgleich gänzlich unterschiedlichen Tierstämmen zugehörig, haben beide, wohl unabhängig voneinander, eine merkwürdige Besonderheit erworben: Es gibt bei ihnen eine genetisch programmierte Gewebeunverträglichkeit – wie sie beim Menschen von der Transplantationsmedizin bekannt ist. Was soll Unverträglichkeit gegenüber Transplantaten und Zellen wie bei Blutinfusionen bei diesen Organismen? Es hat einiger Forschung bedurft, um die Erklärung zu finden. Potenziell können zwei Kolonien, die nebeneinander auf dem gleichen Substrat wachsen, miteinander fusionieren, doch sie tun dies nur, wenn sie gewebeverträglich sind, das heißt, wenn sie genetisch identisch oder doch sehr eng miteinander verwandt sind. Der Grund: Beide Arten besitzen Stammzellen, die umher wandern und von einer Kolonie in die Nachbarkolonie überwechseln könnten. Und aus diesen Stammzellen können Keimzellen, Eier oder Spermien, entstehen, und damit Nachkommen. Eine Kolonie in Kontakt zu einer anderen ist der Gefahr ausgesetzt, von fremden Keimzellen unterwandert und parasitiert zu werden. Die unterwanderte Kolonie würde fremden Nachwuchs erzeugen. Wie ein Kuckuck könnte eine Nachbarkolonie fremde Eltern für den eigenen Nachwuchs sorgen lassen. Gewebe-Unverträglichkeit zwischen genetisch verschiedenen Kolonien verhindert dies. Wir kommen auf das Phänomen im Kapitel Riffe, Abschnitt Bürgerkriege, darauf zurück. Jetzt führt uns das Thema Fortpflanzung zurück zum Thema Lebensläufe.

9.3 Klonen oder doch besser Sex? Was ist jeweils vorzuziehen?

Wann setzt die Natur auf Klonen, wo sie doch auch die sexuelle Fortpflanzung kennt? Durch Klonen lässt sich ein Lebensraum, so er denn endlich gefunden ist, rasch besiedeln. Man braucht nicht einen Partner suchen und um seine Gunst werben. Es braucht keine heikle, stets gefährdete Fortpflanzung über Eier und Spermien, von denen der größte Teil zugrunde gehen wird. Und Knospen können von den schon entwickelten Mitgliedern der Kolonie mit Nahrung versorgt werden. Wie viele der aus befruchteten Eizellen hervorgehenden Baby-Nachkommen verhungern oder gehen sonst wie zugrunde! Warum nun aber trotzdem auch sexuelle Fortpflanzung? In der Geschichte des Lebens hat die sexuelle Reproduktion die Oberhand gewonnen. Bei Wirbeltieren gibt es kein natürliches Klonen mehr. Offenbar hat Sex Vorteile, auch ganz objektive, die nicht nur unsere persönliche Partnerwahl beeinflusst, sondern sogar im Pflanzenreich der natürlichen Selektion standhält.

Wesenszug der sexuellen Fortpflanzung ist, dass zwei verschiedene Organismen, ein weiblicher und ein männlicher, zur genetischen Ausstattung der Nachkommen beitragen können und dabei eine große Vielfalt verschiedener Genkombinationen herauskommen kann. Biologen rechnen vor, dass bei der großen Vielfalt möglicher neuer Genkombinationen beispielsweise ein menschliches Elternpaar getrost mehr als 8 Millionen Kinder haben könnte, und jedes einzelne Kind könnte anders sein als seine Eltern und alle seine Geschwister (Müller und Hassel 2012a, S. 13).

Sexuelle Fortpflanzung erzeugt unvorhersehbar viel Neues und bietet damit die Chance, dass unter den Nachkommen auch solche sind, die bei sich verändernden Umweltbedingungen besser angepasst oder bei unveränderter Umwelt leistungsfähiger sind. Hingegen führt Klonen zur genetischen Verarmung der Nachkommenschaft.

Es gibt indes einen weiteren, in freier Natur wichtigen Unterschied. Eigenmächtiges Klonen benötigt keinen Partner, Sex schon, und dies kann zum Problem werden.

9.4 Schwangere Männchen und andere Kuriositäten bei sexueller Fortpflanzung

Sexuelle Fortpflanzung kann zu Kuriositäten führen, nicht nur beim Menschen. Da ist das große Problem, den gewünschten Partner zu erobern, oder überhaupt einen Partner für das Fortpflanzungsgeschäft zu finden. Es kann besonders schwierig werden, in den dunklen Tiefen der weiten Ozeane einen geeigneten Partner zu finden, wenn man beispielsweise ein Junggeselle ist und ein Weibchen sucht, oder wenn man als weibliches Wesen vereinsamter Single ist und ein Männchen zur Seite haben möchte. Oder man bleibt vereinsamt, weil zu viel Konkurrenz keinen Partner mehr übrig lässt. Fische haben daher oftmals einen lockeren Lebensstil, werden transsexuell im ursprünglichen, vollen Wortsinn und wandeln sich bei Bedarf auch mal in das andere Geschlecht um, so viele barschartige Korallenfische. Hat man als Junggeselle oder unverheiratete Jungfrau end-

lich jemand der gleichen Art in seiner Nähe gesichtet, dieser jemand aber hat dasselbe Geschlecht wie man selbst, wechselt einer von beiden in das Gegengeschlecht; das ist immer noch besser, als die Chance einer Fortpflanzung zu verpassen.

Bei einer Reihe von Fischarten, die sich in Korallenriffen tummeln, Lippfischen, Papageifischen, Engelfischen, Zacken- und Riffbarschen hält man sich an eine allgemeine Lebenserfahrung. Um Kinder zu bekommen, sollte das weibliche Wesen jung sein; denn Eizellen haben stets das gleiche Alter wie die Erzeugerin; oft liegen alle ihre Eizellen schon im Embryo vollzählig bereit. Als Mann hingegen kann man auch in älterem Zustand noch gefragt sein und seine Dienste im Fortpflanzungsgeschäft erfüllen; denn Spermien entstehen täglich neu. Also ist man in jungen Jahren weiblich, erzeugt Eizellen und wird dann später männlich (Proterogynie). Doch es gibt auch Beispiele einseitiger absoluter Herrschaftsweisen, so bei den Juwelenfahnenbarschen des Roten Meeres: Hier dominiert ein Haremsbesitzer, der Besitzanspruch über alle weiblichen Artgenossen in seinem Revier erhebt und nicht duldet, dass eines seiner Weibchen zum Männchen und damit zum Konkurrenten wird. Als Gegenbeispiele gibt es jedoch auch absolutes Matriarchat: Die etablierte Dame dominiert in tyrannischer Art, der jüngere Artgenosse muss sich fügen. So ist dies bei den garstigen Anglerfischen.

Schon kurios, wie bei Anglerfischen dominante Weibchen bestimmen, wer als folgsames Männchen zu dienen hat. Biologen mit Sinn für zynischen Humor weisen auf das Beispiel mancher Anglerfische, die in den dunklen Tiefen der Ozeane mit ihrer leuchtenden Angel noch geschlechts-

lose, großäugige Jungfische anlocken, um sie mittels chemischer Lockstoffe (Pheromone) zu Männchen zu machen, zu versklaven und lebenslang an sich zu binden. Das angelockte Wesen verwächst mit seinem Weib und wird zum Zwergmännchen. Es liefert zeitlebens, wenn sie es will, Sperma. Andererseits handelt er ein sehr bequemes Leben ein. Sein Blutkreislauf verbindet sich mit dem seiner Wirtin, er braucht sich also nicht selbst um Futter zu kümmern (Abb. 9.6). Jungfische, die diesem Schicksal entgehen und Futter finden, werden, wie vermutet wird, selbst zu Weibchen. Schließlich muss es auch Weibchen geben.

Kurios, jedenfalls einmalig, ist auch das Verhalten der Seepferdchen, jener S-förmigen Wesen, die mit ihrem Gattungsnamen *Hippocampus* einer Region unseres Gehirns ihren Namen verliehen. Die Seepferdchen der wärmeren Meere und ihre Verwandten, die Seenadeln der Nordsee, gehören trotz ihres seltsamen Aussehens zu den Knochenfischen. Bei Seepferdchen wird das Männchen schwanger. Wie dies? Es ist schon das Weibchen, das die Eier produziert; denn dadurch ist es ja als Weibchen definiert. Es besitzt jedoch einen Penis-artigen Schlauch, mit dem es die Eier in einen Brutbeutel im Bauch des Männchens pumpt. Dort werden die Eier von Spermien besamt, dort entwickeln sich die befruchteten Eier zu Jungtieren. Das Männchen bringt sie alsdann durch eine Öffnung des Brutbeutels zur Welt (Abb. 9.6).

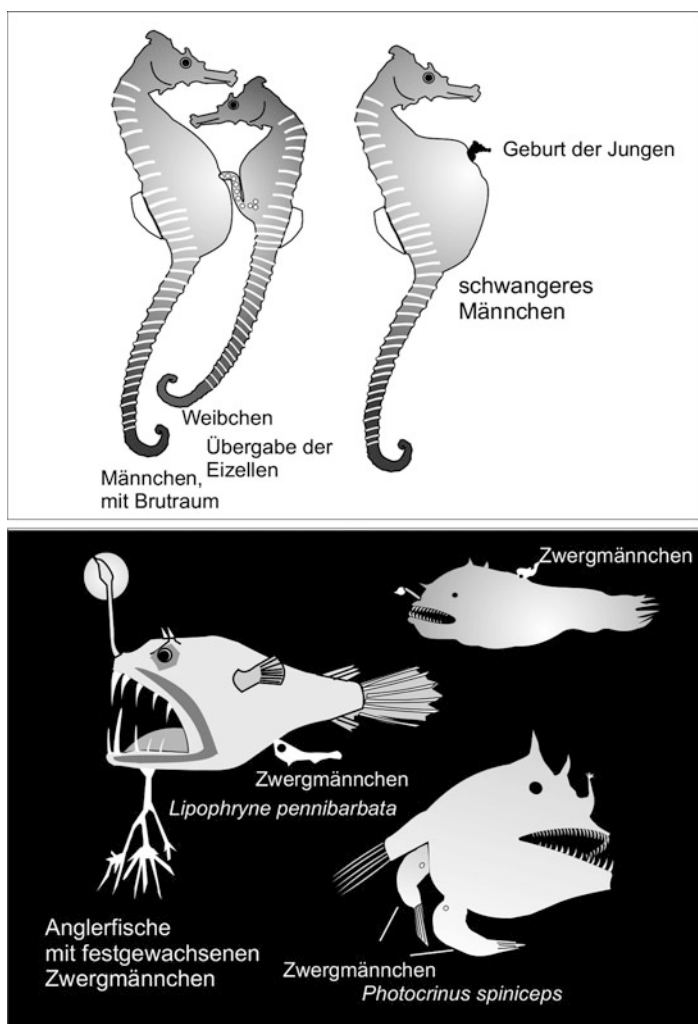


Abb. 9.6 Seepferdchen und Anglerfische, Beispiele für ungewöhnliche Partnerschaften

10

Schwärmen in Massen und Schwärmen mit dem Mond

Zusammenfassung

Viele Meeresorganismen wie die bekannten Korallen des australischen Great Barrier Reef (Riff) laichen gleichzeitig in Massen. Dies sichert den Fortpflanzungserfolg, auch wenn schon Räuber den nahrhaften Eiern auflauern. Zum Laichen in Massen schwärmen berühmt gewordene Meeres-Vielborstenwürmer, oder abgeschnürte Körpersegmente von ihnen wie die Palolos der Südsee, an bestimmten, der dortigen Bevölkerung seit Generationen bekannten Nächten des Jahres an die Wasseroberfläche. Ein kleinerer Verwandter des Palolo, der ca. 3 cm lange, vielbeinige Borstenwurm *Platynereis*, wurde zum experimentellen Laborpionier der Lunarperiodik, bei der bestimmte Mondphasen die Laichtermine synchronisieren. Bei diesem Lebewesen endet das Leben in einem Todes-Hochzeitstanz um die Zeit des Neumondes. Von der echten Mondperiodik (lunare oder semilunare Periodik) ist die Gezeitenperiodik (tidale Periodik) zu unterscheiden, bei der die Gezeiten wie Spring- oder Nipptiden die Hochzeitstermine bestimmen. Es werden Beispiele zusammengetragen, so des Fischchens Grunion Südkaliforniens, das sich in Voll- und Neumondnächten von der Flut in Massen an den Strand treiben

lässt, um dort zu laichen. Lesen Sie weiter, und Sie erfahren manch Seltsames mehr.

10.1 Laichen in Massen; was soll das?

In den Weiten der Ozeane kann es, wie im vorigen Kapitel gesagt, schwierig sein, einen Partner für das Fortpflanzungsgeschäft zu finden. Da ist es gut, wenn es einen Ort gibt, wo man sich zur rechten Zeit trifft. Naturbeobachter berichten von mitunter entlegenen Orten, wo sich regelmäßig einmal im Jahr oder Monat die erwachsenen Angehörigen einer Art treffen.

Zu Langstrecken-Wanderungen fähige Tiere versammeln sich oftmals an vereinbarten Plätzen, um einen Partner zu finden und gleich auch dort zu laichen, zu brüten oder zu gebären. Da sind beispielsweise die den Herings- oder Sardinenschwärmen nachfliegenden Meeresvögel wie die Lummens, Tordalken, Basstölpel, Eissturmvögel und Dreizehnmöwen, welche sich alljährlich im Frühjahr zum Brüten an der roten Felsklippe Helgolands treffen, während die Kegelrobben im Winter sich zum Gebären auf die benachbarte Düne begeben. Hier auf der Düne treffen kleine Kolonien von Kegelrobben-Weibchen ein, begleitet und behütet von einem Bullen als Haremsbesitzer. Wenn die Jungtiere vier Wochen nach ihrer Geburt entwöhnt sind, folgt die Zeit der Paarung, bevor man wieder im Meer verschwindet. Da sind auch bekannte Fernwanderer der Ozeane wie Meereschildkröten, die alljährlich bestimmte Strände als Laichplätze aufsuchen; aber auch viele Fischarten treffen sich an

bestimmten ausgesuchten Laichorten wie versteckten Buchten oder abgelegenen Riffen.

Erfolgreiches Laichen ins freie Wasser erfordert präzise Mechanismen der Synchronisation; denn Spermien sind keine Langstreckenschwimmer und nur wenige Minuten, im kalten Wasser allenfalls wenige Stunden, zur Befruchtung fähig. Dies ist der wohl wichtigste Grund, weshalb auch bei ortsfesten Meeresbewohnern, wie Muscheln und Korallen, und bei wenig mobilen Bodenbewohnern, wie Seesternen und Seeigeln, Massenlaichen Brauch ist. Ein weiterer Grund ist dieser: Zwar locken die riesigen Wolken nahrhafter Eier viele hungrige Mäuler an, aber Eiräuber können ihre Populationsdichte nicht nach einem nur einmal im Jahr gebotenen Festmahl richten. Folglich bleiben trotz vieler Räuber und Nutznießer, einschließlich der zahlreichen Filtrierer, immer noch viele befruchtete Eier übrig.

Laichen setzt eine lange Vorbereitungsphase voraus; denn Eier und Sperma müssen in einem wochen- oder monatelangen Prozess heranreifen. Dann geht es noch darum, einen exakten Termin für das gemeinsame Laichen einzuhalten. Entlang den Küsten und seichten Gestaden ist es sinnvoll, den genauen Termin mit dem Tidenkalender abzustimmen; denn Ebbe und Flut könnten die ins Wasser freigelassenen Eier ans Ufer schwemmen oder weit ins Meer hinaustreiben. Jede Tierart sollte im Laufe der Jahrtausende ein Wissen erworben haben, welche Orte und Termine für sie am günstigsten sind.

10.2 Eine Frage im Vornherein: echte Mondperiodik oder Gezeitenperiodik?

Esoteriker und so manche Naturheilkundige und Biobauern verehren den Mond. Wer im www nach Mondrhythmen sucht, wird viele Aussagen finden, wie nach dem Glauben dieser Gemeinde der Mond auf das Leben und die Gesundheit von Pflanzen, Tieren und Menschen Einfluss nehmen soll (Google-Fund beim Zugriff am 02. Februar 2016, Rosenmontag, an erster Stelle: „BIO Suppe nach den 5 Elementen im Mondrhythmus“).

Meeresbiologen, die nach den Regeln der Wissenschaft zu arbeiten haben, führen genaue Tagebücher. Sie versuchen, durch exakte Datenerhebungen herauszufinden, ob eine „echte“ Mondperiodik (lunare Periodik) oder „bloß“ eine Gezeitenperiodik (tidale Periodik) dem Verhalten zugrunde liegt. Da die Gezeiten von örtlichen Gegebenheiten nur modifiziert, aber letztendlich von der Gravitation des Mondes (und der Sonne) verursacht werden (Kap. 6), sind Gezeitenzyklen indirekt auch Mondzyklen. Ein **echter** Mondrhythmus im Sinne des Biologen liegt vor, wenn das Mondlicht als solches bestimmend ist und das registrierte Ereignis stets auf eine bestimmte Mondphase fällt.

Nach Aufzeichnungen sorgfältiger Beobachter können an Meeresgestaden Laichtermine wiederkehren, entweder

- einmal im Monat (genauer: gemäß dem synodischen Monat alle 29 Tage, 12 h, 44 min), z. B. stets bei Neumond oder Vollmond (Abb. 6.7). In diesem Fall re-

gistriert man eine **lunare Periodik**; oder die Termine kehren

- alle 15 Tage (genauer: 14,77 Tage) wieder, z. B. stets bei zu- und bei abnehmendem Halbmond (halb-synodischer Monat, Abb. 6.7). Die Wissenschaft spricht von **semilunarer Periodik**.

In beiden Fällen können sowohl die Lichtverhältnisse (Vollmond, Halbmond bei nicht-bedecktem Himmel, Neumond) oder die Gezeiten Auslöser des Laichaktes sein.

Mondlicht steht, wenn es die Bewölkung erlaubt, auch Meeresorganismen zur Verfügung in Regionen des Erdballs, in denen Gezeiten kaum bemerkbar sind: auf der Hochsee, in tropischen Regionen und in größeren Wassertiefen. Tritt hingegen in Küstenregionen mit ausgeprägten Gezeiten der Laichakt alle 15 Tage ein und fällt auf die Zeit der örtlichen Spring- oder Nipptide unabhängig davon, ob Mondlicht zu sehen oder der Himmel gänzlich bewölkt ist, zeigt dies Gezeiten-gesteuertes Verhalten an.

10.3 Synchronisation im Rhythmus der Gezeiten

Der Gezeiten-Ährenfisch Grunion (*Leuresthes tenuis*; amerikanisch *Silverslide*) bietet spektakuläre Szenen, die nicht nur Wissenschaftler, sondern auch Touristen anlocken. Das silbrig gestreifte, 10–15 cm lange Fischchen lebt unauffällig vor der sandigen Küste Südkaliforniens in Wassertiefen von 45 bis 120 m. Im Sommerhalbjahr machen sich an zwei Terminen jeden Monats die geschlechtsreifen Individuen

auf Hochzeitsreise, erscheinen zu Tausenden in dichten Schwärmen am Küstensaum und lassen sich während der Nacht bei Flut wie Surfer von den auflaufenden Wellen der Brandung auf den Strand werfen. Tausende der Fischchen liegen kurzzeitig am Strand und verwandeln ihn in eine silbrige Fläche. Bei den Grunions ist es Brauch, den Laich, nicht wie sonst in der Fischwelt üblich, im Wasser, sondern im Sand des Strandes abzusetzen. Die Weibchen graben sich, Schwanz voraus, bis an die Brustflossen in den feuchten Sand und legen ihre Eier ab, umringt von den besamenden Männchen. Dann schlängeln sich die Fische wieder aus ihrer Sandgrube heraus und lassen sich von ablaufenden Wellen ins Wasser zurücktragen. Das Erstaunlichste an diesem Ereignis ist der exakte Zeitplan. Die Grunions kommen zweimal im Mondzyklus während drei bis vier Nächte, jeweils nach Vollmond und Neumond, am Strand an. Die zwei täglichen Fluten sind ungleich hoch. Im Frühling und Sommer fällt die höhere Flut in die Nacht. Die Fischchen „wissen“ das und sie kennen auch die genaue Uhrzeit, wann sie sich am besten an Land schwimmen lassen können. Auch die Jungfische schlüpfen etwa 14 Tage später zur rechten Zeit, um sich nach dem Kulminationspunkt einer Flut von ablaufenden Wellen freischaufeln und ins Meer tragen zu lassen.

Die Oliv-Bastardschildkröten (*Lepidochelys olivacea*) des Pazifiks stimmen die Zeit der Eiablage ebenfalls auf die Gezeiten ab. In nur wenigen Nächten im Jahr sammeln sich Zehntausende der etwa 70 cm großen Schildkröten an bestimmten Stränden rings um den tropischen Pazifik, ein Ereignis, das im Spanischen als „Arribada“ (Ankunft) willkommen geheißen wird. Diese Ankunft ist auf Näch-

te terminiert, in denen der Mond im ersten oder letzten Viertel steht, also zu Zeiten der Nipptiden (Abb. 6.7). In diesen Nächten liegen an den ausgesuchten Orten größere Strandflächen frei, was das Finden eines privaten Platzes zum Ablegen der Eier erleichtert.

Strandschnecken. Auch an der Nordsee wurden, kaum überraschend, aber doch wenig untersucht, Tiden-periodische Laichzeiten registriert. Eine über der mittleren Hochwasserlinie an Felsküsten weidende Strandschnecke (*Littorina neritoides*) gibt ihre Eier alle 15 Tage bei Springhochfluten ab; die europäische Auster (*Ostrea edulis*) an der Kanal-küste laicht alle 7,5 Tage mit Maxima kurz nach Vollmond und Neumond.

Pfeilschwanzkrebse. Pfeilschwanzkrebse (Xiphosuren, Abb. 10.1a) sind urtümliche Geschöpfe. Anders als ihr deutscher (und englischer Name *horseshoe crabs*) sagt, sind Pfeilschwänze keine Krebse, sondern Überbleibsel einer sonst ausgestorbenen Familie urtümlicher Wasser-Spinnentiere. Sie beweiden den Sandboden flacher Küsten warmer Meere. Die Art *Limulus polyphemus*, um die es jetzt geht, ist an der Küste Floridas und im Golf von Mexiko verbreitet.

Die geschlechtsreifen Tiere sammeln sich jedes Jahr im Mai im Gezeitenbereich des Strandes und passen eine hohe Flut ab. Die kleineren Männchen warten am Wasser-saum auf die Weibchen. Kommen die an, umklammert jedes Männchen mit seinen spezialisierten Vorderbeinen ein Weibchen und lässt sich über die Wasserlinie auf den feuchten Sand ziehen. Die Weibchen graben eine Mulde in den Sand, legen 200 bis 1000 Eier hinein und lassen sie von den Männchen besamen. Die nächste Flut spült dann Sand über das Gelege.

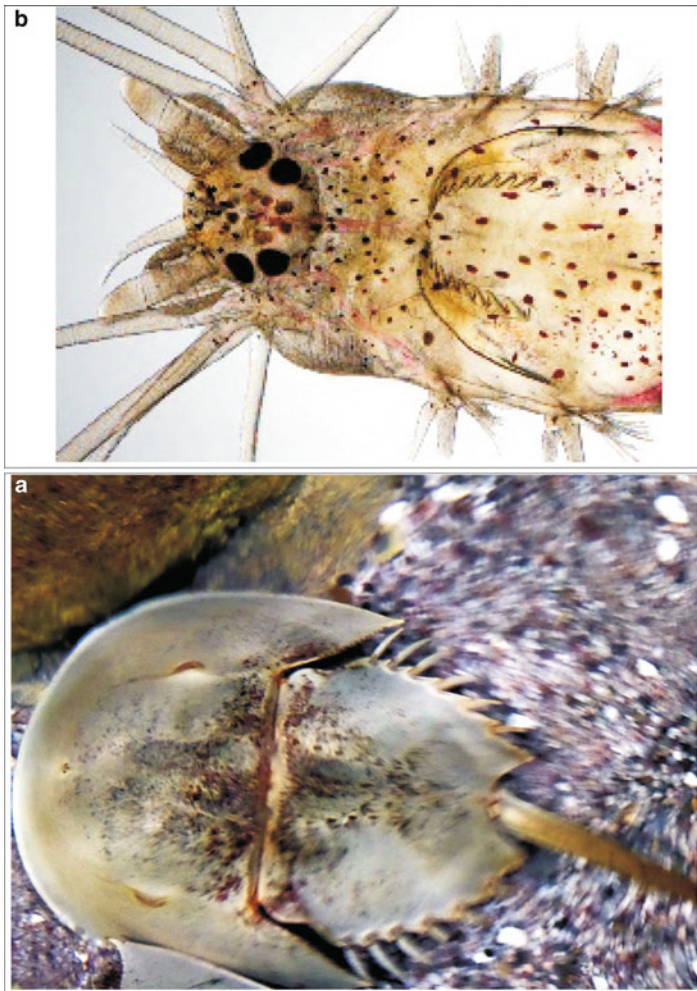


Abb. 10.1 a Der Pfeilschwanzkreb *Tachypleus gigas*. (© eigenes Foto WM), b der Polychaet *Platynereis*. (© Foto Antje Fischer, EMBL, Heidelberg, mit ihrer Genehmigung)

Winkerkrabben. Bei allen Arten werden lunare oder semilunare Aktivitäten beobachtet. Werbende Männchen der Art *Uca musica terpsichores* Panamas winken besonders intensiv zu Zeiten des Vollmondes. Die Auslöser der Aktivitäten, ob Mondphase oder Springtiden, sind nicht bekannt.

Kabeljau. Auch der atlantische Dorsch (*Gadus morhua*), als Fisch der Hochsee besser als Kabeljau bekannt, laicht nach neuen Erhebungen (Grabowski et al. 2015) bevorzugt bei Vollmond oder Neumond. Solch großen Fischen werden neuerdings kleine Sender angeheftet (*data storage tags*), deren gespeicherte Daten in regelmäßigen Abständen per Satellit abgerufen werden. Die Fische laichen, soweit bekannt, in Küstennähe. Ob sie sich vom Mondlicht oder von Springtiden synchronisieren lassen, ist den bisherigen Daten nicht zu entnehmen. Da sie überwiegend in Tiefen von 200 m laichen, ist es fraglich, ob die Gezeiten die entscheidenden Zeitgeber sind; freilich reicht auch Mondlicht kaum bis in diese Zonen. Die Frage dürfte noch lange offen bleiben; denn Laborexperimente mit künstlichem Mondlicht und künstlicher Ebbe und Flut sind mit diesen großen Hochseefischen kaum zu machen.

10.4 Ein Pionier-Laborwürmchen beweist erstmals die Existenz Mondlicht-abhängiger Lebenszyklen

In den 1950er Jahren hielt sich der deutsche Biologe Carl Hauenschild vom Max-Planck-Institut in Tübingen an der Meeresbiologischen Station in Neapel auf, um dort seltsame

Fortpflanzungsweisen mariner wirbelloser Tierchen zu studieren. In den Glasschalen seines Labors waren zur täglichen Beobachtung auch Exemplare des ca. 3 cm langen Polychaeten (Vielborsten-Ringelwurm) der Art *Platynereis dumerlii*, gefischt im Golf von Neapel. Man kann die Tierchen mit Kescher-Netzen fangen, wenn man nachts mit einer hellen Lampe ins Wasser leuchtet, um positiv phototaktische (Licht-suchende) Lebewesen anzulocken.

Wenn man spätere Beobachtungen mit einbezieht, kann man die Lebensgeschichte dieser Tierchen in folgender Kurzstory zusammenfassen: Nach einer 1- bis 2-jährigen Lebensphase als bodenständige, sich gern in einen selbstgesponnenen Kokon zurückziehende Weidegänger verwandeln sich die Tierchen in Schwimmformen mit speziellen Paddelbeinen, um an die Meeresoberfläche emporzusteigen und dort in Gruppen zu laichen. Und dies nur einmal in ihrem Leben; denn nach einem dramatischen Hochzeitstanz endet ihr Dasein. Der Hochzeitstanz ist spektakulär. Schnell in engen Kreisen schwimmend schleudern die Weibchen aus der aufreißenden Körperwand ihre Eier ins Wasser, die Männchen entlassen ihr Sperma über eine Pore. Freilich, des Forschers Tierchen taten das erst mal nicht, oder nur sporadisch.

Fangstatistiken wiesen eine Spur zur möglichen Lösung. Schwärmende Exemplare hatte man gehäuft während einiger dunkler Nächte um die Zeit des Neumondes gefangen. Unser Forscher setzte seine Tierchen nun einem künstlichen Sonnentag sommerlicher Länge aus und zusätzlich pro Monat sieben Nächte lang einem künstlichen Vollmond; dieser wurde dann abgeschaltet. Und siehe da, etwa 18 Tage nach dem Abschalten des Vollmondes tanzten die Tierchen ge-

meinsam in einer Nacht ihren Hochzeitstanz (Abb. 10.2). Nun sind Forscher zwar fleißig, der genannte war es allemal, aber niemand verzichtet gern auf nächtlichen Schlaf (es sei denn, man sei notorischer Nachtschwärmer wie ein Borsenwurm). Durch Variation der Belichtungszyklen konnte er, und nach ihm seine Mitarbeiter und Nachfolger, die Laichzeiten nach eigenen Vorstellungen bestimmen.

Unser Forscher zeigte dann in weiteren Experimenten, dass das Mondlicht schon viel früher auf die Tierchen Einfluss nimmt, indem es über ein Gehirnhormon die Endreifung der Keimzellen synchronisiert. Damit war die Voraussetzung gegeben, auch ein seit langem bekanntes, aber rätselhaftes Phänomen zu verstehen: das Laichen des pazifischen Palolo.

Bevor wir uns in die Südsee begeben, um das berühmt gewordene Palolofest mitzuerleben, erst noch ein ergänzender Hinweis: Heute ist *Platynereis* ein so genannter Modellorganismus des Labors geworden, der von mehreren Arbeitsgruppen an Universitäts-Instituten sowie am EMBL (European Molecular Biology Laboratory in Heidelberg) unter Aspekten der Evolutionsbiologie und der Biorhythmik mit moderner Laborkunst untersucht wurde und weiter untersucht wird (Referenzen in Fischer 2013; Lidke et al. 2014; Tessmar-Raible et al. 2011; Arendt et al. 2015). Außerhalb des Mittelmeeres und des östlichen Atlantiks sind es andere, nahe verwandte *Platynereis*-Arten, die eine Lunarperiodizität des Schwärmens und Laichens erkennen lassen (Fong 1993).

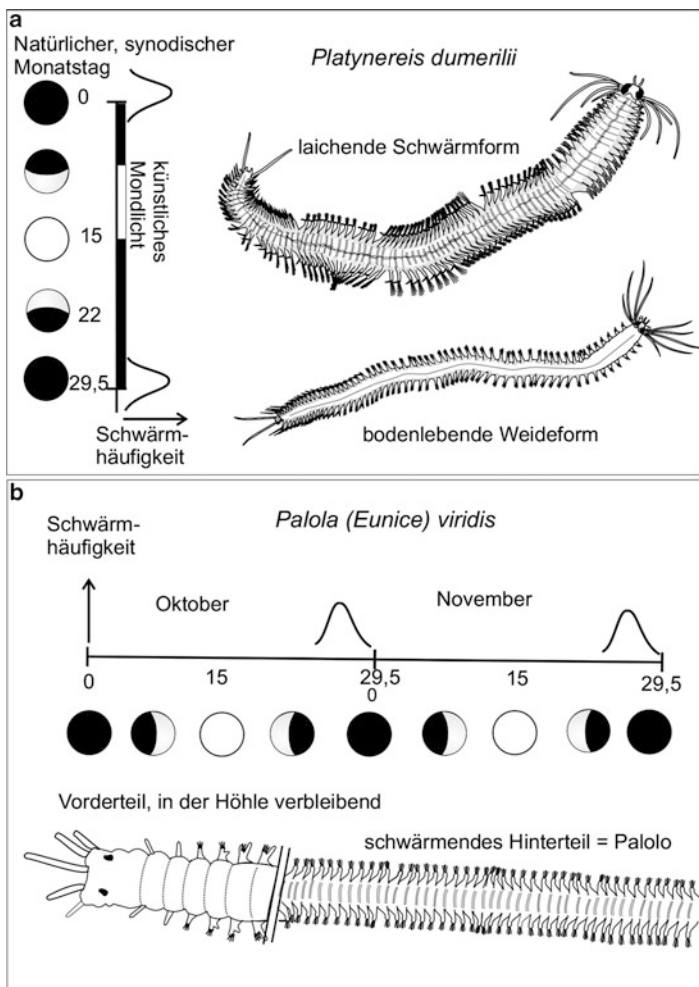


Abb. 10.2 Lunare Schwärm- und Laichzeiten bei den Polychaeten *Platynereis dumerilii* und beim Palolo *Palola viridis*, alias *Eunice viridis*. (Bild a einer Zeichnungen von Käthe Rehbinder in Fischer (2013) nachgezeichnet)

10.5 Das Paradebeispiel der Meere: der Palolo

Wir begleiten im Geiste unseren eben genannten Forscher und seine Mitarbeiter (Hauenschild et al. 1968) in die Südsee. Sie interessiert eine Delikatesse der indigenen Südseevölker auf Samoa, an denen diese sich an wenigen Tagen des Jahres laben können. Es geht um den Palolo (*Palola viridis*, auch *Eunice viridis*). Dieser Riesenwurm des Pazifiks zählt zu den mit vielen Ruderfüßen ausgestatteten Vielborsten-Ringelwürmern (Polychaeten). Er lebt in Gängen von Korallenriffen, die er nur vorübergehend zum Abweiden der Umgebung verlässt. Seine Keimzellen reifen im Hinterleib heran, gegen Ende durch das Mondlicht synchronisiert. Als dann koppelt der Wurm schlichtweg seinen bis zu 70 cm langen Hinterleib („Palolo“) ab. Der macht sich selbstständig, kriecht aus der Wohnröhre und schwimmt, von seinen vielen Bauchaugen vom schwachen Licht der abendlichen Dämmerung nach oben geführt, zur Wasseroberfläche. Dort im schwachen Mondlicht treffen sich Abertausende von grau-grünen männlichen und rosafarbenen weiblichen Palolos, um bei Sonnenaufgang ihren Hochzeitstanz zu tanzen, in engen Kreisen umher zu schwirren und ihre Eier oder Spermien ins Wasser zu entlassen. Das Schwärmen geschieht zweimal im Jahr im Abstand von einem Monat, ein erstes Mal im Oktober, das zweite Mal im November (Abb. 10.2), jeweils in Nächten, in denen der Mond im letzten Viertel steht, seine Helligkeit also abnimmt.

Die Samoaner kennen die Termine seit Generationen. Die Hinterleiber gelten als Delikatesse und zugleich als

Aphrodisiakum und Fruchtbarkeitsmittel. Das Jungvolk sammelt Palolos kiloweise in großen Keschern und Körben und verschluckt sie roh oder verspeist sie zwischen Bananenblättern gedünstet oder gebacken. An den Küsten anderer Südseeinseln wie den Fidschi-Inseln und auf Vanuatu ist es die dortige Zeit gegen Neumond, zu der das freudvolle Fest beginnt, oftmals von einem Fruchtbarkeitsritual eingeleitet.

Zurück zu *Platynereis* und dessen eigenem Hormonhaushalt. Erstaunlich ist, dass auch bei ihm die von Säugern bekannten Sexualhormone Testosteron und Östradiol vorkommen und ihre Menge mit dem Fortpflanzungszyklus schwankt (Lidke et al. 2014).

10.6 Das verheißungsvolle Leuchten für Christoph Columbus

Es wird gesagt, der erste Blick des Christoph Columbus auf die neue Welt sei die Sicht eines Leuchtens gewesen, das ihn an das Flackern vieler Kerzen erinnerte. Es war wohl erzeugt vom Meeresborstenwurm (Polychaeten) *Odontosyllis luminosa*, der entlang den Küsten der Bahamas beheimatet ist. Dieses Würmchen lebt am Boden. Einige wenige Nächte nach Vollmond schwärmen Weibchen zur Meeresoberfläche und legen dort Eiballen ab, und die leuchten. Sie locken Männchen an, die ihrerseits leuchten, ebenso wie die Jungtiere, ein Schauspiel in der Karibik (Gaston und Hall 2000).

10.7 Das spektakuläre Laichen der Korallen

Viele TV-Dokumentarfilme und Fotos in Journalen haben es gezeigt: In zahlreichen Korallenriffen der Tropen werden Milliarden von Eiern und Spermien, oder von fertigen Planula-Larven, die sich aus befruchteten Eiern in Körperhöhlen der Korallenpolypen entwickelt hatten, zu einer bestimmten Mondphase durch den Mund der Polypen ins freie Wasser ausgestoßen. Solche synchronen Laichakte ermöglichen hohe Befruchtungsraten, erhöhen darüber hinaus auch die Überlebenschancen der jungen Nachkommenschaft. Wer könnte aufs Mal Abermillionen von Keimen verschlucken?

Im Great Barrier Reef vor der Ostküste Australiens laichen über 100 verschiedene Korallenarten in einem Massenlaichen einmal im Jahr im Oktober/November, jeweils in drei bis sechs Nächten nach Vollmond. Das Ausspucken des Laichs geschieht bei fast allen Arten und Individuen zeitgleich zwei bis vier Stunden nach Sonnenuntergang (Abb. 10.3). Es treiben dann riesige Wolken von befruchteten Eiern und Planula-Larven an die Wasseroberfläche und werden von Strömungen fortgetragen.

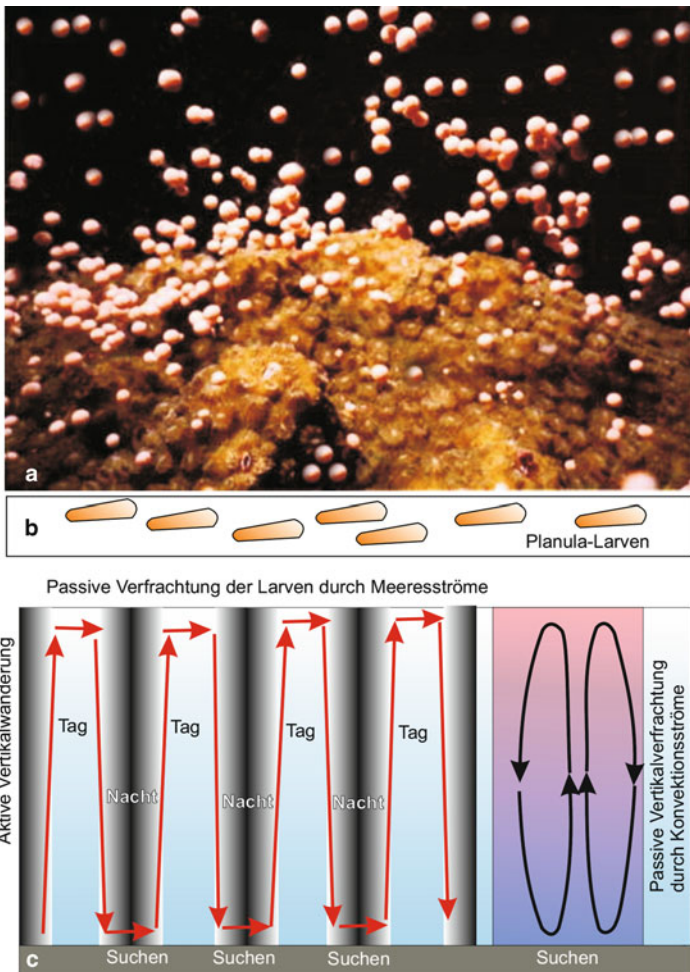


Abb. 10.3 a Massenlaichen bei Korallenpolypen. (© Credit NOAA.gov, Fotograf nicht genannt), b im Plankton aus den befruchteten Eiern hervorgegangene Planulalarven, c tägliche Vertikalwanderungen der Planulae

11

Lebensräume: freie Meere für vagabundierende Freibeuter – oder feste Standorte?

Zusammenfassung

Ins freie Wasser abgegebene Eier und daraus sich entwickelnde, stets winzige und den Meeresströmungen preisgegebene Schwimmlarven sollen in den Weiten der Ozeane einen neuen, artgemäßen Lebensraum finden und besiedeln. Wie schaffen diese das nur, da ihnen doch Fernsinnesorgane fehlen? Es können nur besondere, mit einfachen Sinneszellen wahrnehmbare Schlüsselreize sein, die ihnen ein besiedlungsfähiges Terrain anzeigen. Doch welche Reize sind dies, von was gehen sie aus? Das Wenige, das man hierzu bisher herausgefunden hat, ist überraschend, und von praktischer Bedeutung. Davor fragen wir noch, was eine Qualle mit ihren 24 Augen macht?

Man fragt sich als Zuschauer schon: Ist es sinnvoll, oder nicht doch allzu verschwenderisch, Milliarden von Eiern oder winzigen Larven über die ungeheuren Weiten der Ozeane zu verstreuen?

Wenn der Laichakt gut synchronisiert ist und wenn das freie Meer mit seinen Meeresströmungen das Ziel für ein

vagabundierendes Leben des künftigen Nachwuchses sein sollte, ist das freizügige Ausstreuen der Eier und Spermien in die Weiten des Meeres (Englisch *broadcast spawning*) kein Problem. So scheint es aber manchmal nur. Nehmen wir als Beispiel die Quallen. Die meisten dieser schwimmenden Glocken lassen sich mit den Meeresströmungen über die Ozeane treiben und sammeln dort tierisches Plankton als Futter. Ihre Eier und Spermien entlassen sie irgendwo und irgendwann ins freie Wasser, von zumeist noch unbekannten Zeitgebern synchronisiert. Die befruchteten Eier werden zu Planula-Larven, und die wandeln sich in Polypen um, die nun aber einen festen Untergrund benötigen, und dies an Orten, wo einerseits Strömungen Plankton zum Einfangen heranzuführen, andererseits Überflutung mit Sand und Schlick nicht zu befürchten ist. Die Lösung in diesem Fall: Man lebt als Polyp gern an Felsüberhängen. Wie findet die Larve solche für sie ideale Standorte? Bevor wir uns diesem nicht nur in unserer Gedankenwelt, sondern auch in der Natur schwerwiegenden Problem zuwenden, schauen wir ein Weilchen über die Bordkante unseres Schiffes auf das vorbei schwimmende „Pelagial“.

11.1 Leben im Pelagial: Wie verhindert man Absinken in den Abgrund – und was macht eine Qualle mit ihren 24 Augen?

Wir schauen gedankenverloren den Quallen zu. Manche finden sie schön, für andere sind es gefährliche Schreckgespenster, über deren brennende Nesselgifte viel Schlimmes

gesagt wird; für Fischer sind es üble Freibeuter, die ihnen tonnenweise Fischlarven und Jungfische wegräubern (umgekehrt ist Ursache der derzeit weltweit weltweiten Quallenplage der Umstand, dass so viele Fische, ihre Konkurrenten um tierisches Plankton, weggefischt werden). Wir schauen jetzt einfach zu. Die Quallen schlagen unentwegt mit ihrem Schirm, treiben periodisch Wasser von der Schirmunterseite hinaus und nutzen das Rückstoßprinzip, um sich in kleinen Schüben nach oben zu bewegen. Warum wohl? Sie müssen wie die Mehrzahl aller marinen Lebewesen unentwegt gegen das Absinken ankämpfen; sogar Bakterien schlagen mit Geißeln, nur einigen mikroskopisch kleinen Lebewesen genügen Öltropfen im Inneren als Auftriebsmittel oder lange Schwebefortsätze zur Erhöhung des Widerstandes, um Absinken zu vermeiden. Aktives Schwimmen könnte jedoch auch in die falsche Richtung führen. Quallen einschließlich der kleinen Medusen der Hydrozoen haben wie die meisten anderen Lebewesen Gleichgewichtsorgane, die ihnen anzeigen, wo oben und wo unten ist. Oder sie haben Augen, die Mehrzahl der Medusen hat deren vier, manche ein Mehrfaches von vier.

Unter den wegen ihres würfelförmigen Schirms Würfelquallen genannten Geschöpfen, zu denen die gefürchteten Seewespen (*Chironex fleckeri*) der tropischen Meere gehören, gibt es Arten, die haben gar 24 Augen! Wir lassen Forscher einer nur einen cm großen Würfelqualle mit Namen *Tripedalia cystophora* in die Augen schauen und uns berichten: Die kleinen Quallen leben vorzugsweise in von Mangroven umsäumten Lagunen. Nur in einem schmalen, zwei Meter breiten Bereich an der Grenze zum offenen Meer finden sie ein ausreichendes Angebot an Kleinkrebsen und

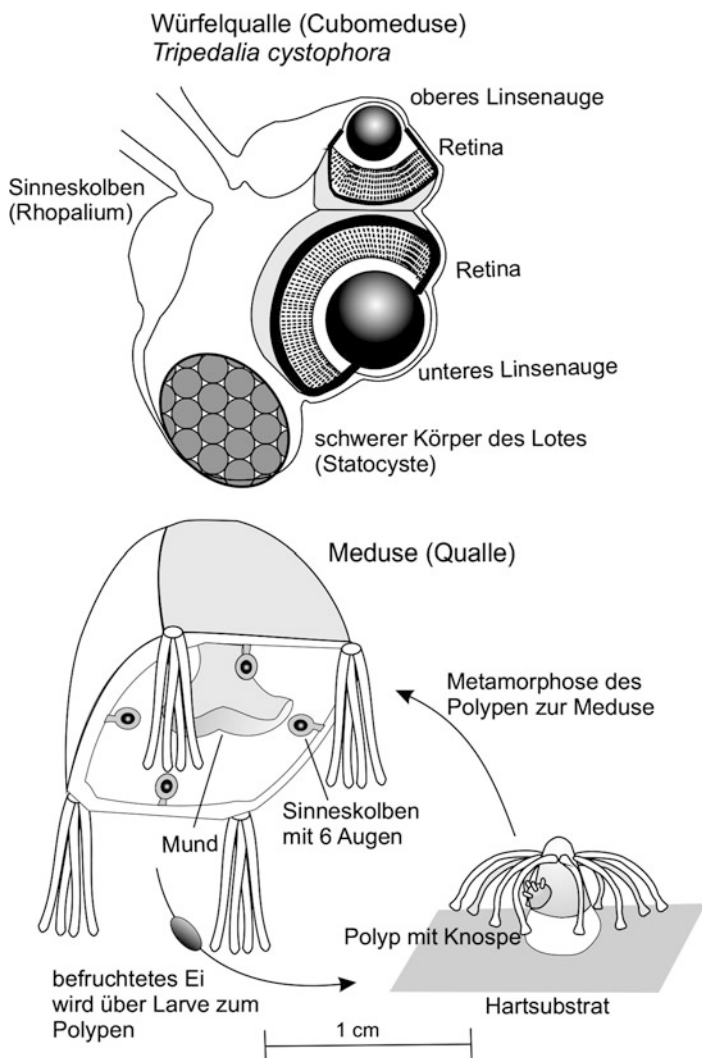


Abb. 11.1 Die Würfelqualle *Tripedalia cystophora*

Fischlarven. Diesen Bereich können sie leidlich zuverlässig ansteuern. Die Quallen haben im unteren Bereich jeder der vier Seitenflächen je ein kolbenförmiges, komplexes Sinnesorgan (Rhopalium) hängen, das jeweils sechs separate Augen enthält, vier einfache Pigmentbecher-Ozellen (= auf einer Seite durch einen schwarzen Becher abgedunkelte Lichtsinneszellen), denen man nur zutraut, die Richtung des Lichteinfalls zu registrieren; aber auch Linsenaugen, in jedem der vier Rhopalien je ein oberes und ein unteres (Abb. 11.1).

Die insgesamt vier oberen Linsenaugen sind auch in Quer- oder Kopflage der Quallen immer so ausgerichtet, dass sie nach oben blicken, wo sie sich an den Baumkronen der Mangrovewälder orientieren sollen, während die vier nach unten gerichteten Augen auf Hindernisse in Bodennähe achten (nach Garm und Mori 2009; Garm et al. 2011).

Solche komplexen Organe stehen den Larven der Korallenpolypen nicht zur Verfügung, nicht einmal den Larven der 24-äugigen Würfelqualle.

11.2 Leben an festen Standorten: Wie findet man einen geeigneten Platz für das ganze Leben?

Für Organismen, die an feste Standorte gebunden sind, gilt es, besondere Strategien zu entwickeln, um neue Lebensräume zu finden und zu besiedeln. Irdische Lebensräume sind gefährdet, auch in den Meeren: Das Watt kann einen Eisgang erleben, mitunter ganz zufrieren, stürmische Bran-

derung zerstört wieder und wieder die Lebensgemeinschaften der Felsgestade, steile unterseeische Hänge können wie Lawinen in die Tiefe abrutschen und alles Leben mit sich reißen und unter sich begraben, unterseeische Vulkane richten nicht minder Katastrophen an als überseeische. Und selbst wenn die Naturgewalten friedlich bleiben, drohen Bevölkerungsüberschuss und Hungersnot.

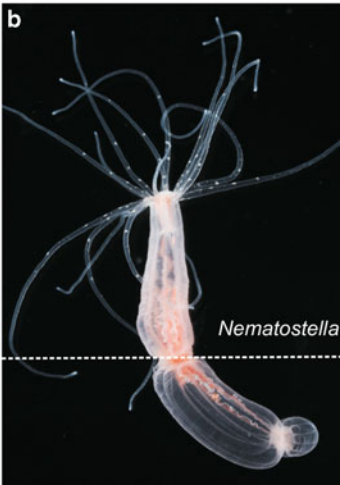
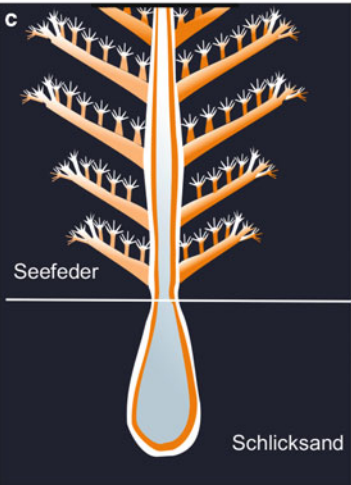
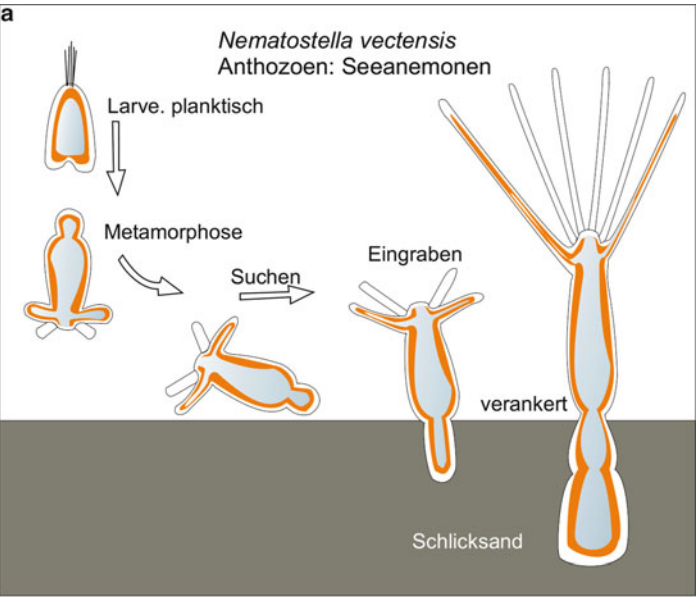
Forschungsschiffe entnehmen auf ihren Fahrten über die Ozeane aus verschiedenen Wassertiefen Wasserproben; die darin enthaltenen mikroskopisch kleinen Lebewesen werden mühselig unter Stereomikroskopen nach ihrer Art- oder Klassenzugehörigkeit bestimmt und gezählt. Nach diesem aufwändigen „Census“ (Volkszählung) zeichnet sich folgendes Bild ab: Große Teile des Mikroplanktons unternehmen tagtäglich ausgedehnte Vertikalwanderungen. Einzellige Grünalgen und blaugrüne Bakterien (Cyanobakterien) müssen sich naturgemäß tagsüber in den oberen, ausreichend belichteten Wasserschichten aufhalten; denn nur hier können sie Photosynthese betreiben und mit ihren organischen Produkten den basalen Lebensunterhalt für weiteres Leben in den Ozeanen erwirtschaften. Den autotrophen (heißt: sich selbst ernährenden) Primärproduzenten müssen die heterotrophen (heißt: von anderen Organismen oder von anderen Organismen produzierten Substanzen sich ernährenden) Nutznießer folgen. Tierisches Plankton muss den Primärproduzenten folgen und sich wohl oder übel auch im Lichtraum aufhalten, wo man von Räubern erwartet wird und erhascht werden kann.

Abends sinken dann viele Organismen des Planktons wie Kleinkrebse, Fischlarven und auch die Planula-Larven der Korallen in dunkle Tiefen und steigen erst morgens wieder

in die Lichtzone hoch. Sie können in günstigen Fällen für ihre Vertikalwanderung den Lift der Temperatur-getriebenen Konvektionsströme ausnutzen (Abb. 10.3).

In der Tiefe gleiten die Larven den Boden entlang, ihn absuchend. Über riesige Gebiete der Ozeane findet man da aber nur Sandwüste und Schlick. Hier ist es die Aufgabe der Larven von Organismen, die im Adult-Zustand bodenständig (benthisch) und sesshaft (sessil) sind, einen geeigneten Lebensraum für das weitere Leben zu finden. Dies gilt eben auch für Organismen, die in ihrer Lebensphase als Qualle (Meduse) frei im offenen Meer leben. Letztlich ist es doch die winzige Larve, die für ihre weitere Lebensphase als fest-sitzender Polyp einen geeigneten Standort finden muss.

Die Larven aller sesshaften Organismen sind kaum einen Millimeter groß und besitzen nur ein paar einfache Sinnes-Nervenzellen, die einen einfachen Tastsinn oder als Chemosensoren einen simplen Geschmackssinn repräsentieren. Wenn manche Organismen wie bestimmte Arten von Moostierkolonien die Oberfläche bestimmter Tangarten besiedeln, wird man vermuten, dass die Larven charakteristische Substanzen diese Pflanzen erspüren; doch diese Substanzen kennt man nicht. Beschränken wir uns auf die Planula-Larven der Korallen und anderer Nesseltiere; denn für die liegen einige Erkenntnisse vor. Sieht man sich die kleinen Winzlinge an, tritt das Problem verschärft zutage. Nur einigen Spezialisten sind Weichböden gut genug. Sie haben Methoden entwickelt, sich dort zu verankern. Dies gilt beispielsweise für Seefedern unter den Weichkorallen und für die Anemone der Art *Nematostella vectensis* (Englisch *starlet anemone*), die entlang den Küsten Englands und Nordamerikas im Mündungsbereich von Flüssen und



◀ **Abb. 11.2** Verankerung im weichen Untergrund durch Aufblähen des Stielendes bei der Seeanemone *Nematostella*. (Foto © Chiara Sinigaglia, mit ihrer Genehmigung) und bei Seefedern

in Priel zuhause ist und die heutzutage in mehreren Laboratorien als – wieder mal – Modellorganismus gezüchtet wird. Diese graben sich mit ihrem Fuß in den weichen Boden und blähen ihn dann zu einem ballonförmigen Anker auf (Abb. 11.2). Sollte man ausnahmsweise einen unzuträglichen Standort gewählt haben, löst man den Anker und sucht sich ein kommoderes Plätzchen.

Die allermeisten Arten der Nesseltiere, allen voran die aus der Metamorphose der Planula-Larven hervorgehenden Polypen der Steinkorallen, können eine falsche Wahl nicht mehr korrigieren; der einmal gewählte Standort kann nicht mehr verlassen werden. Deshalb sind bei sesshaften Steinkorallen Felsen gefragt oder doch irgendwelche Hartsubstrate wie ein Schiffswrack. Von all den mikrophysikalischen Erscheinungen, die an Oberflächen wirksam sind und das Anheften der Larven begünstigen oder erschweren, wie elektrostatische Kräfte und Oberflächenenergien im Nanobereich, soll hier, wiewohl von Bedeutung, nicht die Rede sein. Wir bleiben auf der Ebene der Lebewesen.

Um Vorstellungen zu gewinnen, wie man als nur dürftig mit Sinnesfunktionen ausgestattete Planularlarve ein bestimmtes Hartsubstrat finden könnte, dafür leisteten Pionierarbeiten, die zuerst gar nicht an Larven von Korallen, sondern an Planula-Larven eines Hydrozoons durchgeführt worden waren, hilfreiche Dienste.

Es sind die Planulae des schon mehrfach genannten und gezeigten Hydrozoons *Hydractinia echinata* (Abb. 11.3).

Diese Planulae sollten gar ein spärlich vorkommendes und auch noch bewegliches Hartsubstrat finden, eine Schneckenschale, die ein Einsiedlerkrebs als Wohnmobil im Watt herumschleppt.

Es zeigte sich, das Ziel wird mit einer Mehrstufen-Strategie erreicht. Erst klettert die Larve auf ein Sandkorn, stellt sich auf und wartet. Zieht, wie es der Zufall oder der Krebs will, ein solches Mobilheim vorbei, schleudert die Larve aus speziellen Nesselzellen Klebefäden als Wurfanker aus (Abb. 11.3; die Physik des Auslösereizes ist etwas kompliziert und hat etwas mit dem Geschwindigkeitsprofil im Wasserfilm um das Gehäuse zu tun). So verankert, klettert die Planula auf des Einsiedlers Wohnmobil. Hier auf dem Schneckengehäuse findet die Larve, was sie sucht: einen Biofilm, gebildet von einer Matte ihrerseits sesshafter Bakterien der Gattung *Pseudoalteromonas* (Müller und Leitz 2002). Es sollte sich dann herausstellen, dass dies eine von vielen sesshaften Meeresorganismen gewählte Strategie ist. Ein Biofilm löst das Ansiedeln (*settlement*) und die Metamorphose aus bei den Larven von Steinkorallen (Cawa und Hadfield 2012, 2013), Schwämmen, Miesmuscheln, Austern und anderen Organismen mehr (Literatur am Ende dieses Buches). Die jeweilige Zusammensetzung des Biofilms kann den Larven einen Hinweis geben, ob der Standort für ihre Art geeignet ist.

Nach dem Erspüren des geeigneten Untergrundes folgt – und auch dies ist ein verbreitetes Prinzip – eine interner, von hormonbildenden Nervenzellen ausgehender Signalprozess, der die Metamorphose zum adulten Wesens einleitet und innerlich synchronisiert. Dies ist sehr ähnlich wie bei der Pubertät des Menschen. Bemerkenswert: Wieder sind in

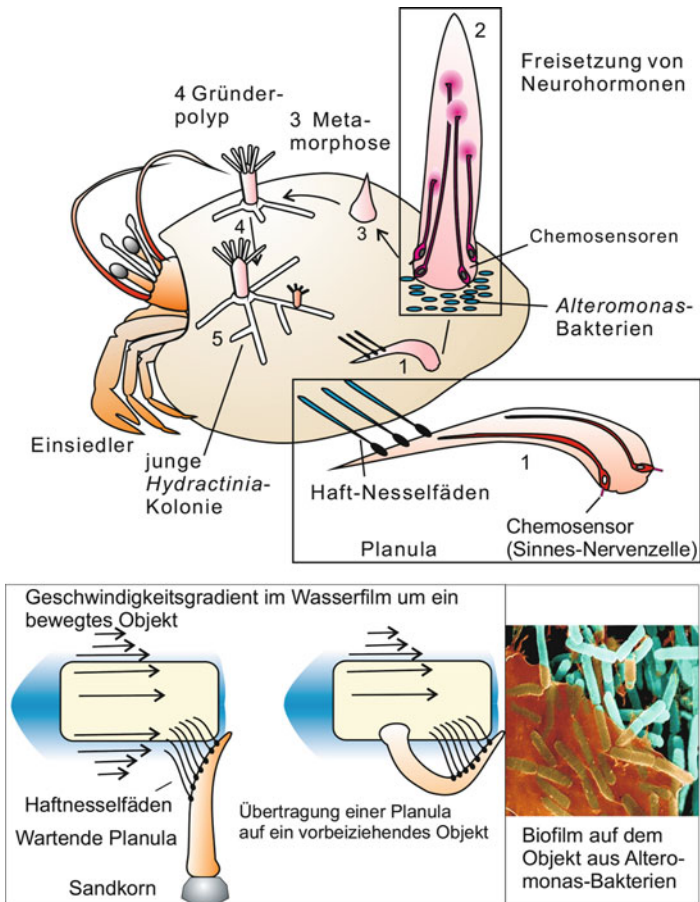


Abb. 11.3 Zur Lebensgeschichte von *Hydractinia*. Transfer der Larven auf ein vorbeiziehendes Objekt, Metamorphose zum Primärpolypen, falls die Schale von einem Biofilm mit Bakterien der *Alteromonas*-Gruppe bedeckt ist

den Larven von *Hydractinia* und der Steinkorallen die gleichen Hormone (Neuropeptide) am Werke (Müller und Leitz 2002; Erwin und Szmant 2010).

11.3 Der Nutzen und das leidige Biofouling-Problem

Wer nicht selbst an einem bestimmten Forschungsprogramm beteiligt ist, fragt in aller Regel: Wozu ist das gut? Hier eine Auswahl von Antworten:

- Austernbänke brauchen Nachschub für ein nachhaltiges Wirtschaften.
- Korallenriffe sind Kinderstube zahlreicher Fischarten und schützen Küsten vor der Erosion durch die Brandung. Für den Küstenschutz zuständige Institutionen möchten beschädigte Riffe regenerieren lassen, neue Riffe ansiedeln, beispielsweise durch Versenken ausgedienter Schiffe. Doch die sollten von Korallenlarven auch besiedelt werden.
- In Laboratorien in aller Welt nutzt man die gewonnenen Erkenntnisse, um das Ansiedeln und die Metamorphose von allerlei unerwünschten Passagieren zu verhindern. Biofouling – das Ansiedeln von Seepocken, Muscheln, Schwämmen und sonstiger sesshafter Lebewesen an Schiffsrümpfen – erhöht den Reibungswiderstand gewaltig; Schiffstransporte verteuern sich; Entsalzungsanlagen verlieren Kapazität.

Man hat in der Vergangenheit an Schiffsrümpfen hochgiftige Anstriche aufgebracht, um Biofouling zu verhindern, so das berüchtigte Tributylzinnoxid. Konzentrationen von lediglich einem Nanogramm pro Liter, wie sie in schiffbaren Flüssen und vielbefahrenen Meeresstraßen allemal auftraten, führten zu schwerwiegenden Vergiftungserscheinungen nicht nur in aquatischen Lebewesen. Tributylzinn war das giftigste Biozid, das jemals willentlich angewandt in die Ozeane gelangte. Die Substanz und einige ähnliche Stoffe wurden durch die *International Maritime Organization* im Oktober 2001 weltweit verboten. Noch aber sind viele andere Biozide in Gebrauch, die durch biologisch schonendere Methoden ersetzt werden müssten.

Mit dem Ziel, biologische Problemlösungen auch für die Technik nutzbar zu machen, sind Forschungen in Gang gekommen, herauszufinden, wie große Meeresbewohner wie Haie und Delfine es schaffen, ihre Haut frei von Fouling-Verschmutzung zu halten. Hier ist die Bionik gefragt, die Erfindungen der Lebewesen für Zwecke der Technik nutzbar machen will.

12

Lebenswelt Korallenriff

Zusammenfassung

Korallenriffe sind das Lebenswerk von Abermilliarden von Lebewesen. Baumeister sind vor allem die Polypen der Steinkorallen. Sie erzeugen als Fundament ihres Wohngebäudes eine Kalkplatte und türmen darauf Stockwerk um Stockwerk. Bei ihrer Bautätigkeit werden sie in tropischen Meeren von symbiontischen, einzelligen Grünalgen unterstützt, welche die Polypen in der obersten Zellschicht ihres Körpers kultivieren und dem Licht exponieren. Schon deshalb sitzen die Korallenpolypen stets oben auf ihrem Bauwerk nahe der Wasseroberfläche. Doch findet man mehr und mehr Korallenriffe auch in tiefen Kaltwasserzonen der Ozeane entlang der Ränder der Kontinentalschelfe, wo die Meeresströmung reichlich Plankton als Futter vorbei treibt. Korallen vermehren sich am Standort durch Klonen und erweitern so ihren Lebensraum. Dabei können sie in Konflikt mit Nachbarn geraten; es kommt zu einem Bürgerkrieg, geführt mit besonderen Nesselzellen gegen alle Nachbarn, welche als genetisch fremd erkannt werden, bis der Nachbar zugrunde geht und sein Platz frei wird.



A Blasenkoralle
Plerogyra sinosa

Tentakelblasen
symbiontische
Algen dem Licht
exponierend

B *Calaustrea
furcata*

C Hirnkoralle
Tentakel tags
eingezogen,
Mundscheiben
der Polypen
fusioniert, in die
Länge gezogen,
mäandrierend

D *Flabellina babai*
Nacktschnecke,
Korallen-fressend

◀ **Abb. 12.1** a–c Steinkorallen: **a** Blasenkoralle *Plerogyra*, **b** *Claustrea*, **c** Hirnkoralle *Diploria labyrinthiformis*. **d** eine Korallen verzehrende Nacktschnecke (Opisthobranchier). (Fotos **a**, **b**, **d** eigene Bilder WM; Foto **c** Jan Derek, © von ihm freigegeben)

Steinkorallen gelten zu Recht als die größten Baumeister der Vergangenheit und auch noch der Gegenwart. Unterstützt von einigen anderen Korallentypen wie den Feuerkorallen, von Muscheln und unzähligen mikroskopisch kleinen Kalkbildnern wie den Foraminiferen, die im System der Zoologie als Einzeller aufgeführt sind, haben sie dem Great Barrier Reef (großes Barriereriff) vor der Ostküste Australiens und mit den riesigen, erst in jüngster Zeit entdeckten Kaltwasserriffen an den Rändern der Kontinentalschelfe die größten Bauwerke errichtet, die von gegenwärtigen Lebewesen auf der Erde geschaffen wurden. Und sie waren auch in der geologischen Vergangenheit als Baumeister tätig. Gewaltige Massen von Kalkgebirgen in allen Kontinenten geben Zeugnis davon. Beispiele sind die eindrucksvollen Felstürme der Dolomiten und großräumige Felsformationen im Himalaya und in den Rocky Mountains.

Die ungeheure, bunte Vielfalt des Lebens in den Korallenriffen kann allenfalls in großen, bunten Bildbänden und in Videoaufnahmen gezeigt werden. Hier seien nur einige, nicht Schema-konforme Exemplare von Korallen gezeigt (Abb. 12.1). Wir beschränken uns im Weiteren auf einige Aspekte, die helfen sollen, zu verstehen ...

12.1 ... wie Riffe entstehen

Es geht also erst einmal darum, durch kleine Lebewesen Kalkstrukturen aufzubauen, ohne im Baumarkt gebrannten Kalk und Zement besorgen zu können, deren Grundsubstanz großenteils aus der Aktivität von solchen marinen Lebewesen der geologischen Vergangenheit erzeugt worden ist.

Die Chemie in Kürze (Abb. 12.2): Im Stoffwechsel der Polypen entsteht wie in allen atmenden Lebewesen Kohlendioxid (CO_2); weiteres CO_2 kann bei Bedarf dem Meerwasser entnommen werden. Gefördert durch ein Enzym (Carboanhydrase) erzeugt der Polyp in einer ersten Stufe aus CO_2 und Wasser Kohlensäure, bestehend aus dem elektrisch positiv geladenen Wasserstoff-Ion und dem negativ geladenen Hydrogencarbonat. Im zweiten Schritt entnimmt der Polyp dem Meerwasser Calcium-Ionen; die führt er mit zwei Molekülen Hydrogencarbonat zusammen und es entsteht Calciumcarbonat, in fester Masse als Kalk bekannt.

Übrig bleibendes Kohlendioxid übernehmen die Symbionten, die es in der Photosynthese zur Erzeugung organischer Substanzen verwenden. Das Calciumcarbonat wird von den Polypen an ihrer Unterseite ausgeschieden, wo es kristallin als Calcit oder Aragonit ausfällt und zum Hauptbestandteil des Kalk-Außenskeletts wird. Kommen noch Magnesium-Ionen dazu, bildet sich das beständige Calcium-Magnesium-Karbonat des Dolomit.

Die Polypen bauen ihr Gebäude überwiegend nachts. Läuft alles optimal, können bei den Rekordhaltern unter

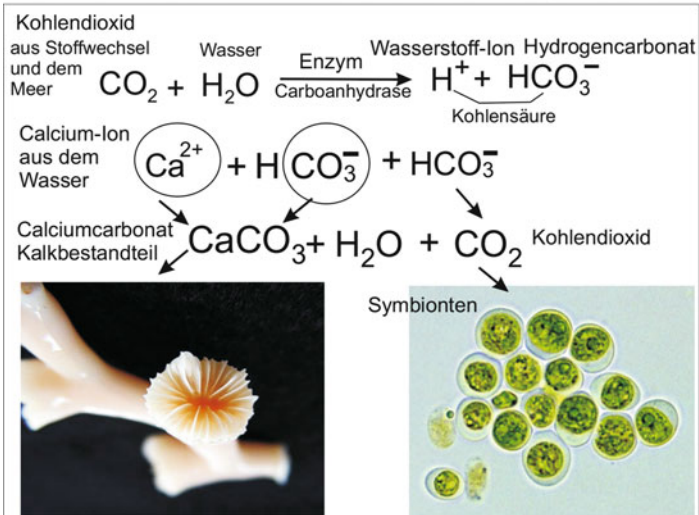
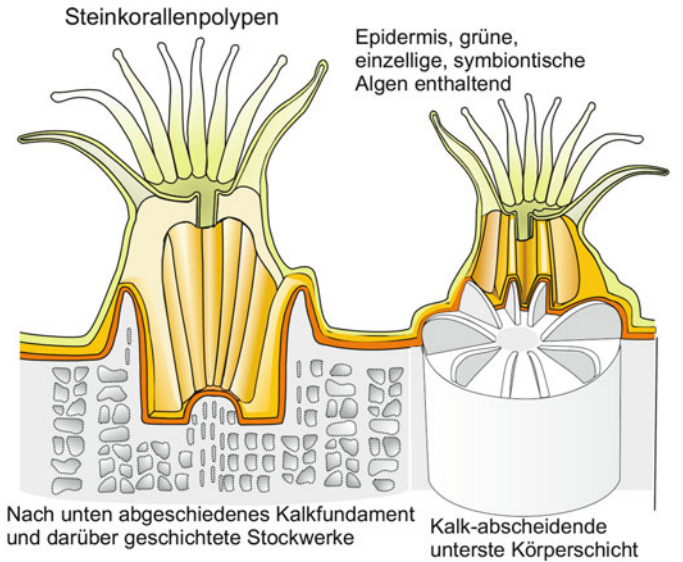


Abb. 12.2 Kalkbildung bei Steinkorallen; Erklärung im Haupttext

den Korallen (manche Acropora-Arten) jedes Jahr Stockwerke in einer Gesamthöhe von bis zu 15 cm hinzukommen. Im Allgemeinen wachsen Korallen kaum mehr als 1 cm pro Jahr, und dies nur bei Hilfe durch Symbionten.

12.2 Ein Leben in Wärme und mit Symbionten

Korallen der Tropen enthalten in ihrer äußeren Körperschicht, der Epidermis, Abermillionen von einzelligen, grünen Algen als Symbionten. Man nennt sie Zooxanthellen. Ihre Rolle in der Lebensgemeinschaft ist zweifach. Zum einen übernehmen sie restliches Kohlendioxid, verhindern so die Rückbildung von Kohlensäure. Die würde nicht nur Kalkbildung verhindern, sie könnte auch vorhandenen Kalk auflösen und damit die Kalkkonstruktionen der Korallen zum Einsturz bringen (was als Folge der Übersäuerung der Meere befürchtet wird). Zum zweiten erzeugen die Algen in der Photosynthese überschüssige organische Substanzen wie Traubenzucker, die sie ihrem Wirt zukommen lassen. Der Wirt seinerseits übergibt den Symbionten Stickstoff-haltige Produkte wie Harnstoff, welche die Algen zur Synthese von Aminosäuren und Nucleinsäuren wie DNA benötigen. Der Nutzen ist also, wie es sich für eine ordentliche Symbiose gehört, wechselseitig.

12.3 Noch wenig bekannt: Korallen im kalten Tiefenwasser

Photosynthese setzt ausreichend Licht voraus. Man findet daher die klassischen Korallen der Tropen nur in den oberen, lichtdurchfluteten Wasserschichten. Umso größer war die Überraschung in der gesamten Meeresbiologie, als man in den Tiefen der Ozeane die Kaltwasserriffe entdeckte. Sie besiedeln die Ränder der Kontinentalschelfe, im Ostatlantik von Norwegen bis Afrika, und sind in ihrer Gesamtheit länger als das Great Barrier Reef. Dort in der dunklen Tiefe sind die Korallen allerdings bleich, weil ohne Symbionten, und sie sind ganz auf tierisches Mikroplankton angewiesen, das ihnen die Meeresströmung heran führt. Sie wachsen vermutlich sehr, sehr langsam.

12.4 Bürgerkrieg in Kolonien und im Riff

Mag ja auf den ersten Blick ein Korallenriff der Tropen das Bild einer paradiesischen Gemeinschaft bieten, bei genauerem Hinsehen ist die Gesellschaft keineswegs friedlich. Formen, die festgewachsen sind und sich durch Klonen vermehren und ausbreiten, können bald in Streit mit Nachbarn um das unersetzliche und nicht erweiterbare Grundstück kommen. Man kann nicht einfach wegziehen. Hier hat die Forschung Erstaunliches zutage gefördert, wieder einmal hat die Hydrozoen-Kolonie *Hydractinia* die Pionierrolle gespielt. Es war vereinzelt schon beobachtet worden, dass

Seeanemonen aus Poren in ihrer Körperwand lange Nessel­fäden (Acontien) ausschleudern, wenn sie in Kontakt zu einem Konkurrenten um das Substrat kommen. Manche der eh als notorische Solisten lebenden Seeanemonen sind mitunter nachgiebig, können sich vom Untergrund lösen und wegziehen, aber nur sehr wenige tun dies. Und schon gar nicht Steinkorallen; denn die können es nicht. Da geht der Kampf unerbittlich weiter, bis ein Konkurrent zugrunde geht.

Eben ein vergleichbares Phänomen wird auch bei *Hydractinia* beobachtet. Kommen zwei Kolonien in Kontakt zueinander, wandern spezielle Nesselzellen zur Kontaktstelle, stellen sich parallel nebeneinander auf, richten die Mündung ihrer Kanonen in Richtung des Gegners und schießen dann plötzlich wie auf ein (unhörbares) Kommando ihre Batterien los. Der Gegner tut das Gleiche in umgekehrter Richtung. Der Kampf kann tagelang dauern, neue Giftkanonen werden in Stellung gebracht und abgefeuert – bis schließlich einer der beiden Konkurrenten zugrunde geht. Die besondere Überraschung war nun die: Die Batterien werden zwar aufgestellt, aber nicht abgefeuert, wenn die Nachbarkolonie ein Klon, also genetisch identisch ist, oder wenn sie, in etwa einem Viertel der Fälle, wenigstens eine Geschwisterkolonie ist. Nur allernächste Verwandte werden geduldet und auch die keineswegs alle. Formal gleicht das Phänomen der Gewebe(un)verträglichkeit, mit der sich die Transplantationsmedizin auseinanderzusetzen hat: Nur wenige Spender werden vom Immunsystem des Empfängers geduldet. Es liegt jedoch offenbar nicht nur eine Parallele vor. Aufwändige, hierzulande begonnene (Hauenschild – der schon genannte Mondrhythmiker) und in den USA wei-

tergeführte genetische Experimente zeigten dann: Es gibt schon bei diesen Organismen wie beim Menschen Moleküle, die an der Oberfläche der Zellen exponiert werden und als Personalausweis dienen. Die Moleküle gehören wie die unseres eigenen, biologischen Personalausweises zur Klasse der Immunglobuline.

13

Leuchten im Dunkeln

Zusammenfassung

Viele Meeresorganismen, von Bakterien, Einzellern über Quallen bis hin zu Tintenfischen und Anglerfischen können im Dunkeln leuchten, sei es, dass sie selbst Licht erzeugen können wie Bakterien und Quallen, sei es, dass sie in besonderen Kammern oder Laternen leuchtfähige Mikroorganismen kultivieren. Biolumineszenz, die Erzeugung von Licht auf chemischem Weg, kann sehr unterschiedlichen Zwecken dienen, und die Lichter können von blau über grün bis rot reichen. Rätseln Sie mit, wozu in Einzelfällen Licht erzeugt und eingesetzt wird. Beim Anglerfisch ist der Grund leicht zu erkennen, in anderen Fällen nicht.

Wir erinnern uns: Es ist oben gesagt worden, der erste Blick des Christopher Columbus auf die neue Welt sei die Sicht eines Leuchtens gewesen, das ihn an das Flackern vieler Kerzen erinnerte. Das Leuchten war, wie Forscher der Karibik annehmen, erzeugt worden vom Meeresborsenenwurm *Odontosyllis luminosa*, der entlang den Küsten der Bahamas beheimatet ist. Der Fall ist in zweierlei Hinsicht bemerkenswert: Zum einen leuchten nicht nur die schwärmenden Weibchen, sondern auch die Eier und Jungtiere,

zum anderen geschieht das Schauspiel jeweils kurz nach Vollmond.

Die große Mehrzahl aller leuchtenden Organismen lebt im Meer. Zum Verständnis sind zwei Gegebenheiten zu beachten: Sonnenlicht reicht bis maximal 1000 m Tiefe; darunter ist es stockdunkel. Zahlreiche marine Organismen vollziehen tagesperiodische Vertikalwanderungen. Man zieht sich, so man nicht in den oberen, belichteten Wasserschichten Phytoplankton ernten will, ins Dämmerlicht oder Dunkle zurück. In solcher Umgebung ist auch schwaches Licht ein vorzüglicher Signalgeber.

Im Wasser dringt Blaulicht am weitesten vor, gefolgt von Grün, wohingegen langwelliges Licht rasch absorbiert wird. Weil Rot-Gelb total absorbiert und nicht, wie es mit Blau-Grün geschieht, auch reflektiert wird, sehen wir die Meere in den Gegenfarben Blau bis Grün. Die verschiedene Reichweite des blauen, grünen und roten (kurz-, mittel- und langwelligen) Lichts wird von den lichterzeugenden Organismen „berücksichtigt“: Sie leuchten oft blau, in flachen Gewässern auch grün. Warum es auch rot leuchtende Arten gibt? Jedenfalls wird man als Rotlichtlampe nicht schon von weiter Ferne gesehen, eh sind die meisten Bewohner der Tiefsee rotblind. Rotlicht eignet sich aber zur Kommunikation mit Nachbarn, so in Schwärmen, und als Scheinwerfer zum Suchen rotblinder Beute.

Das Leuchten in den Weiten und Tiefen der Ozeane kann verschiedenen Zwecken dienen:

- Häufig dient weißes bis hellblaues Leuchten, erstaunlicherweise, der Tarnung, vor allem in den oberen bis mittleren Wasserschichten. Zahlreiche frei schwebende

und frei schwimmende marine Organismen tarnen sich durch einen transparenten Körper. Größere, kompakte Organismen wie Fische, Tintenfische und größere Krebse können sich jedoch nicht mehr vollständig transparent machen. Um trotzdem möglichst unsichtbar zu sein, gestalten Fische, die in mittleren Wasserschichten leben, ihre Rückenseite dunkel. Für den Räuber, der von oben herab blickt, heben sich dunkle Rücken kaum vom dunklen Untergrund ab. Der Bauch ist indes weiß oder silbrig: Die Silhouette des Fisches hebt sich für einen tiefer schwimmenden Räuber nur gering gegen den hellen Himmel ab. In tieferen Wasserschichten gibt es aber nicht mehr genug Streulicht, um mit einem silbrigen Spiegel die Bauchseite aufhellen zu können. Schwache, nach unten abgestrahlte Lumineszenz kann hier nachhelfen. Die Bauchseite wird gerade so weit aufgehellt, dass sie sich nicht mehr vom hellen Wasserspiegel abhebt. Viele Fische, Tintenfische und Krebse befolgen diese Taktik.

- Lichtsignale dienen in der Finsternis der Nacht oder der Tiefsee dem Schwarmzusammenhalt.
- Sie dienen der Verwirrung potenzieller Räuber; sei es, dass ein Räuber durch das unerwartete Aufblitzen eines Lichtes erschreckt wird, sei es, dass der Räuber im Gewirr blinkender Lichter nicht mehr weiß, worauf er sich stürzen soll. Wolken leuchtenden Nebels, den viele Quallen, Krebstiere und Tintenfische ausstoßen, ermöglichen verstecktes Entkommen.
- Starke punktuelle Lichtquellen können andererseits als Signalgeber eingesetzt werden, zum Anlocken eines Sexpartners, z. B. bei Garnelen und Ringelwürmern (siehe



Abb. 13.1 Biolumineszenz bei Cnidariern. **a** *Aequorea victoria*, eine pazifische Hydromeduse, aus der das Gen für das GFP (*green fluorescent protein*) stammt, **b** Tiefsee-Kronenqualle *Periphylla*, **c** leuchtende Koralle *Corynactis californica*. (Aus Müller et al. 2015b)

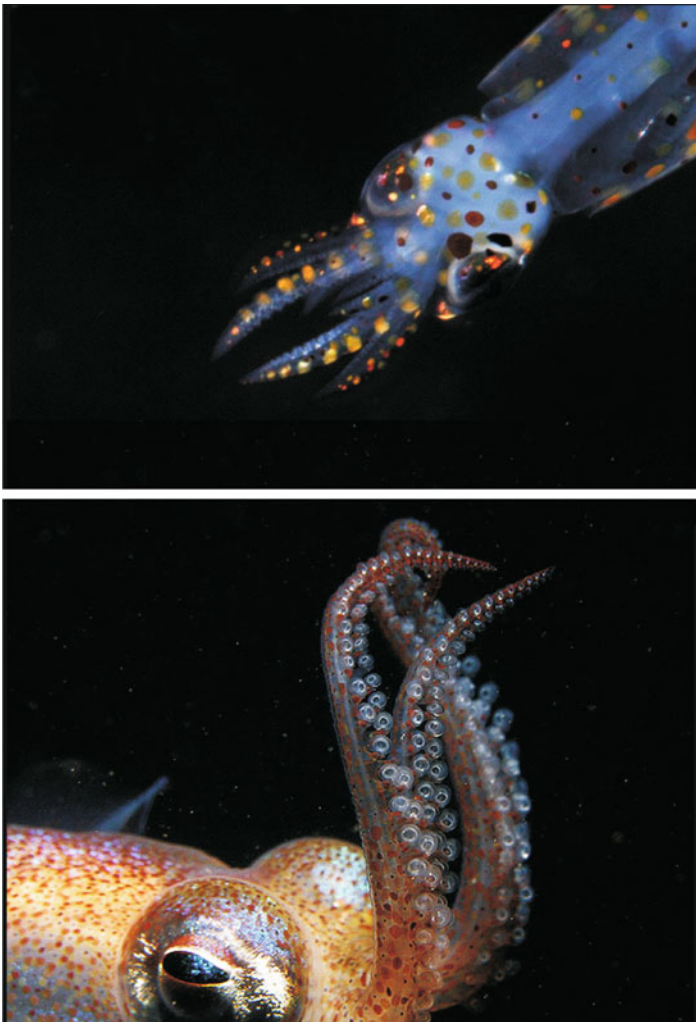


Abb. 13.2 Biolumineszenz bei Tintenfischen. (Fotos erhalten von © Sven Gust, Bremen)

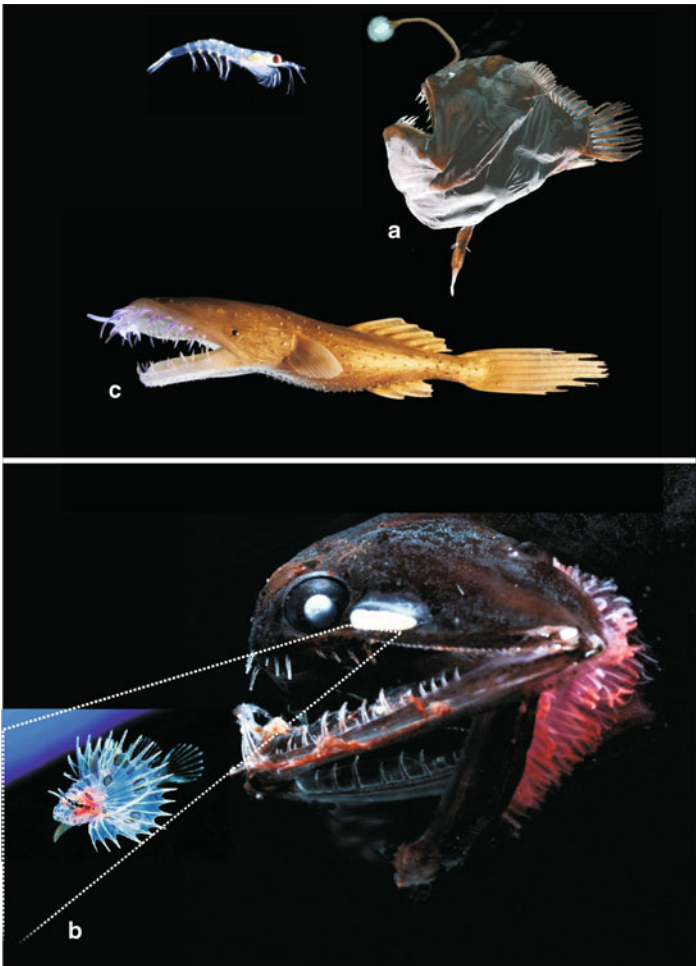


Abb. 13.3 Biolumineszenz in der Tiefsee. **a** Schwarzer Anglerfisch *Melanocetes johnsonii*, **b** *Photostomias guernei* mit eingeschaltetem Scheinwerfer hinter dem Auge, **c** *Thaummatichthyes*. (Aus Müller et al. 2015b)

oben die blinkenden Kerzen des Christoph Kolumbus). Hierfür werden Signale oft intermittierend in einem artspezifischen Rhythmus ausgesandt. Auch die verblüffend schnell wechselnden Farbmuster vieler Tintenfische (Abb. 13.3) können außer zur Tarnung auch zur Kommunikation erzeugt werden, etwa bei der Balz.

- Oder die Lichter dienen zum Anlocken einer irregeführten Beute. Anglerfische der Tiefsee treiben ein tückisches Spiel. Bei vielen ist der vordere Strahl der Rückenflosse zu einer langen, beweglichen Angelrute ausgezogen, an deren Ende ein leuchtender „Wurm“ Fische anlockt. Besonders kurios und heimtückisch: Manche Angler der Gattung *Thamaticthys* haben ihre Leuchte direkt an den Gaumen ihres riesigen Mauls gehängt (Abb. 13.3).
- Manche Leuchtorgane können als Scheinwerfer dienen und dem Tiefseebewohner, z. B. dem Tiefseefisch *Pachystomias*, ein Sehen ermöglichen. Er sendet Rotlicht aus, das zwar nicht weit reicht, aber von den in aller Regel rotlichtblinden Opfertieren nicht gesehen wird (Abb. 13.3).

13.1 Licht kann man selbst erzeugen, oder man borgt sich eine Lichtquelle

Cnidarier wie Quallen und Seefedern sind selbst-leuchtend. Die Meduse *Aequorea victoria* (Abb. 13.1) und danach noch manch andere Cnidarier waren Quelle von heute in zahlreichen Laboratorien benutzten Biolumineszenz-Molekülen. Zell- und Molekularbiologen in aller Welt kennen das GFP, das *Green-fluorescent protein*, dessen Gen sie in Organismen

aller Art einschleusen, damit diese, oder bestimmte Organe oder Zellen von ihnen, zeitlebens im lebenden Zustand grün aufleuchten, wenn man sie unter Ultraviolett-Licht bringt (Näheres hierzu in Müller und Hassel 2012; Müller et al. 2015b). So kann man beispielsweise das Wandern von Stamm- und Krebszellen beobachten.

Viele Fische und Tintenfische hingegen züchten in besonderen Räumen symbiontische Bakterien, die das biochemische Rüstzeug zur Lichtproduktion besitzen (sekundäres Leuchten). Manche Arten nutzen beide Möglichkeiten.

Biologisch erzeugtes Licht ist kalt; kalt ist hier im doppelten Sinn des Wortes gemeint: Das Licht ist ohne Beimengung von Infrarot und erzeugt daher im Empfänger keine erhöhte Temperatur. Es ist kalt auch im psychologischen Sinn, weil es in der Regel bläulich-grün schimmert. In der Evolution sind unabhängig voneinander mehrere verschiedene Leuchtsysteme erfunden worden. Sie arbeiten jedoch nach gleichen Prinzipien: In chemischen Reaktionen wird Energie als Licht freigesetzt. In diesem Zusammenhang liest man oft die Begriffe Luziferin und Luziferase, doch diese Worte bezeichnen keine definierten Moleküle, sondern sagen nur aus, dass eine Enzymreaktion im Spiel ist.

14

Überraschung in der Tiefsee: Leben ohne Licht, aber mit heißer Chemie

Zusammenfassung

Wie sollte im Hades der Tiefsee, wo ewige Finsternis kein pflanzliches Leben mehr gedeihen lässt, wo mangelnde organische Substanz und fehlender Sauerstoff auch kein tierisches Leben mehr zu ermöglichen scheinen, überhaupt Leben existieren? Ur-uralte Mikroorganismen aus der vulkanischen Urzeit der Erde, Archaeen und Bakterien, kennen noch Wege, mit purer Chemie Substanz und Energie zu gewinnen. Sie sind chemoautotroph, ihnen genügen Gase wie Kohlendioxid, Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und giftige Stickstoff-Verbindungen, um zu gedeihen. Solche Gase schießen gemeinsam mit bis zu 450 °C heißem mineralreichen Wasser aus den Schloten unterseeischer Geysire, den schwarzen und weißen Rauchern, und unterhalten ein reiches mikrobielles Leben, das wiederum Grundlage für ein unglaublich reiches, an Hitze und Sauerstoffmangel angepasstes tierisches Leben ist. In Poren der Vulkanschlote entstehen sogar organische Substanzen ohne Zutun von Lebewesen. Könnten gar neue Lebewesen entstehen?

Mehrfach sind wir nun schon in die Tiefsee vorgestoßen, haben Anglerfische mit leuchtenden Ködern gesehen, transparente, auf dem Boden mit Füßen wandelnde „Seegurken“ (Holothurien), rot leuchtende Quallen und in Quallengestalt schwebende, rot leuchtende Tintenfische und Holothurien.

„Wir sind vorgestoßen“ – doch nein, gewiss nicht wir, sondern stellvertretend für uns, Forscher in Tauchbooten, deren Besatzung Mitglieder eines 2000 Forscher umfassenden internationalen Teams sind, das sich dem Projekt *Census of Marine Life*, der „Volkszählung“ in den Weiten der Ozeane, verschrieben hat. Wie der Weltraum ist die Tiefsee ein Raum schier unermesslicher Weite, es gibt keine Luft zum Atmen, die Temperaturen lassen Menschen vor Kälte erzittern, doch statt leerem Druck wie im Weltraum gibt es ungeheuren Hochdruck. Tauchboote, die in Tiefen von 10.000 m abtauchen, müssen einen Druck von einer Tonne pro Quadratzentimeter aushalten.

Neuerdings werden mehr und mehr „ROV“ (*Remotely Operated Vehicle*), ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge eingesetzt, soweit eine Datenübertragung über Kabel oder WLAN noch möglich ist. Ob bemannt oder nicht, die Vehikel sind mit ihren Kameras, Messinstrumenten und Greifarmen ausgerüstet, welche die Sinne und Hände der Forscher ersetzen. Immer öfter kommen unbemannte, autonome Unterwasservehikel, AUV, zum Einsatz. Sie gleiten, ohne an langen Kabeln zu hängen, selbsttätig in die Tiefe und dort den Böden entlang, zeichnen die ermittelten Daten in internen Speichern auf, sammeln Proben und bringen sie dann beim Auftauchen hoch zur Mannschaft des Forschungsschiffes.

14.1 Die Sensation: extrem heiße unterseeische Geysire, schwarze und weiße Raucher

Geologen an Bord des Forschungs-U-Bootes Alvin waren die ersten, welche vor den Galapagos-Inseln den ersten der damals noch gänzlich unbekannten schwarzen Raucher (Abb. 14.1) sahen: Ungeheure Mengen schwarzen Rauches schossen aus einem etwa 30 m hohen, unterseeischen Schlot. Das war 1977. Inzwischen sind einige Hundert dieser heißen, Mineralien-reiches Wasser ausspuckende Geysire bekannt; sie liegen in den Vulkan-reichen Zonen der Ozeane, so im mittellatlantischen Rücken zwischen Afrika/Europa, der alten Welt, und Amerika, der neuen Welt. Dort steigt glutflüssiges Magma hoch, erstarrt und bildet neuen Meeresboden, der die Kontinente auseinander drängt. Die große Überraschung war jedoch nicht die Existenz unterseeischer Vulkane; die konnten erwartet werden. Die große Überraschung war das unglaublich reiche Leben in der ewigen Finsternis und im höllisch heißen Wasser, das aus Kaminschlotten hochschoss. Bevor wir darauf eingehen, erst ein Vorspann, der das fundamentale Prinzip der Energiegewinnung ohne Sonnenlicht aufzeigen soll.

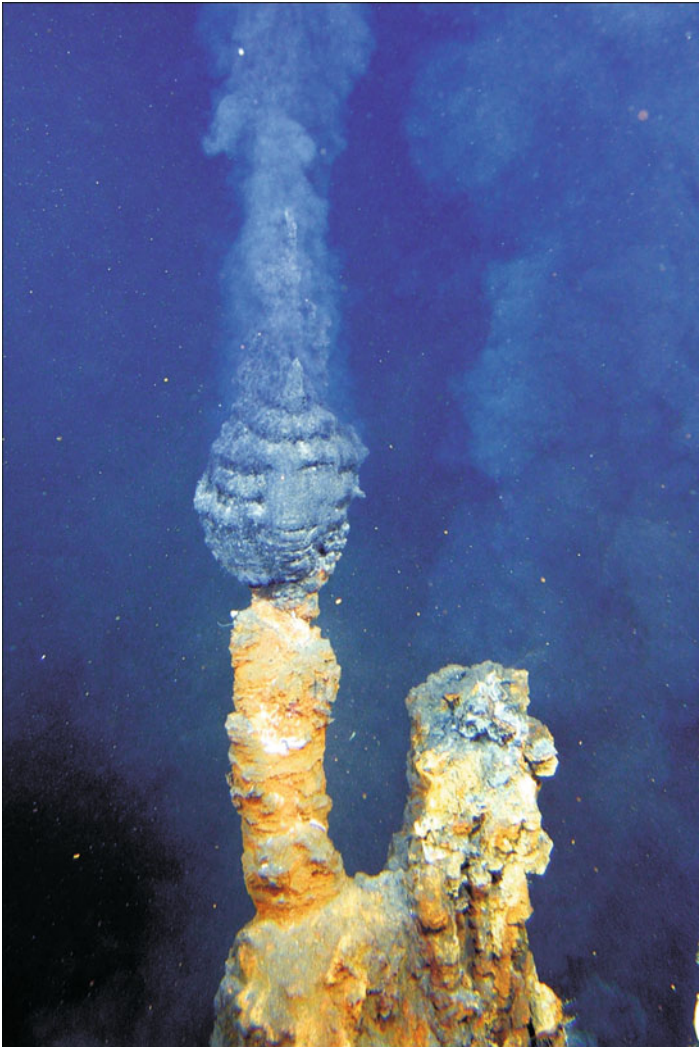


Abb. 14.1 Schwarzer Raucher mit einem offenen und einem verschlossenen Kamin. (© Credit NOAA Vents Program)

14.2 Die normale, dürftige Speisekarte für das Nachtmahl in der stockdunklen Tiefsee

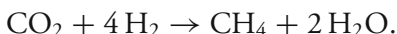
In Meerestiefen, aus denen man nicht mehr zur Nahrungsaufnahme periodisch aufsteigen kann, ist man auf die Nahrung angewiesen, die zwischen 1000 und 10.000 m Tiefe zur Verfügung steht. Das ist zum einen ein dünner Regen aus organischen Partikeln (Detritus, „Meeresschnee“), die Reste des reichhaltigen Lebens in der lichtdurchfluteten Zone der obersten 200 m. In Tiefen von 3000 m und mehr mussten sich die Tiere jedoch auf ein Leben fast ganz ohne Pflanzen als Primärproduzenten einstellen. In diesen Tiefen liegt die Wassertemperatur bei 1–2 °C und es gibt bloß noch 5 ml Sauerstoff (O₂) pro Liter Wasser gegenüber 210 ml pro Liter Luft, aber immerhin noch so viel wie in sumpfigen Teichen (und in unserem Blutplasma ohne Hämoglobin). Dieser Sauerstoff wurde ursprünglich in den oberen Meeresschichten durch Pflanzen erzeugt und gelangte in unendlich langsamen Vermischungsprozessen bis in die Tiefsee. Es gibt nun zwei nicht auf pflanzlicher Nahrung beruhende Energiequellen, die in der Tiefsee, und nicht nur dort, in größerem Maßstab zur Verfügung stehen. Beide Quellen sind Gase, die im buchstäblichen Sinn aus Gasquellen des Bodens emporsteigen: So wenig Sauerstoff kann man gerade noch nutzen, um diese Gase als Energiequellen zu erschließen:

- Das eine Gas ist stinkender Schwefelwasserstoff H₂S. Der restliche Sauerstoff in der Tiefsee kann noch genügen,

dieses Gas zu veratmen (zu oxidieren). Das können Bakterien und Archaea (uralte Organismen aus der Frühzeit der Erdgeschichte von der Größe von Bakterien). Diese holen den energiereichen Wasserstoff aus H_2S heraus und ersetzen dabei Schwefel durch Sauerstoff; dabei fällt elementarer Schwefel S aus. Besucher oberirdischer Vulkangebiete sehen das Ergebnis: Der Boden um dampfende Fumarole ist stellenweise von gelbem Schwefel bedeckt. In der Tiefsee kann der Prozess noch weitergehen. Aus Schwefel und restlichem Sauerstoff entsteht am Ende einer weiterhin energieliefernden Prozesskette Schwefelsäure (neutralisiert als Sulfat bekannt). Wer hält das aus? Eben bestimmte Bakterien und Archaea.

- Die zweite Quelle sind die Gase Wasserstoff und Kohlendioxid, die ebenfalls stellenweise aus der Tiefe des Erdinneren emporsteigen (so auch im Laacher See) und selbst bei völligem Mangel von Sauerstoff Energie liefern, wenn sie miteinander, wiederum unter Mitwirkung von Bakterien und Archaea, in Methangas CH_4 verwandelt werden.

Kohlendioxid reagiert mit Wasserstoff zu Methan



Bakterien und Archaea gedeihen also unter diesen Bedingungen ohne jegliche von Pflanzen in der Photosynthese erzeugten Produkte; sie benötigen für diese Reaktion nicht einmal Sauerstoff.

Von diesen Mikroorganismen ernähren sich, wie oben in Kap. 8 gesagt, allerlei Filtrierer wie Schwämme, Muscheln, Seescheiden und so manches Kleingetier mehr: Der wesent-

liche Punkt ist: Das Leben in der Tiefsee ist, soweit solche gasförmigen Energieressourcen zur Verfügung stehen, unabhängig vom Sonnenlicht!

14.3 Die heiße Chemie der Raucher und ihre Nutznießer

Als man die aus den unterseeischen Schloten hervorquellender schwarzen bis weißen Wolken sah (Abb. 14.1) hielt man sie erst für Rauch. Das sind sie aber nicht, und auch die Nebel im Umfeld solcher Vulkane erwiesen sich als – Wolken von Bakterien. Das muss erläutert werden, auch wenn dies hier nur in groben Zügen und spärlichen Skizzen (Abb. 14.2) möglich ist.

Naturgase wie Methan und Kohlendioxid quellen im Umfeld tätiger oder erloschener Vulkane durch Ritzen in der Erdkruste empor. Dies ist im Meer ebenso der Fall wie in der Eifel oder bei den auch Schwefelwasserstoff aus-speienden Sulfataren auf Island, im Golf von Neapel bei Pozzuoli und auf Ischia, wo zugleich heißer Wasserdampf aus Erdspalten zu Land und im Meer austritt. Mittlerweile hat man zahlreiche hydrothermale Quellen in weiten Gebieten der Ozeane kartiert. Schwarze und weiße Raucher sind riesige Exemplare solcher hydrothermaler Quellen. Die ausgestoßenen Gase und Wolken entstehen jedoch bei diesen beiden Typen in unterschiedlichen Prozessen.

Schwarze Raucher Durch Erdspalten dringt kaltes Meerwasser bis zu 1500 m in die Tiefe und heizt sich im Kon-

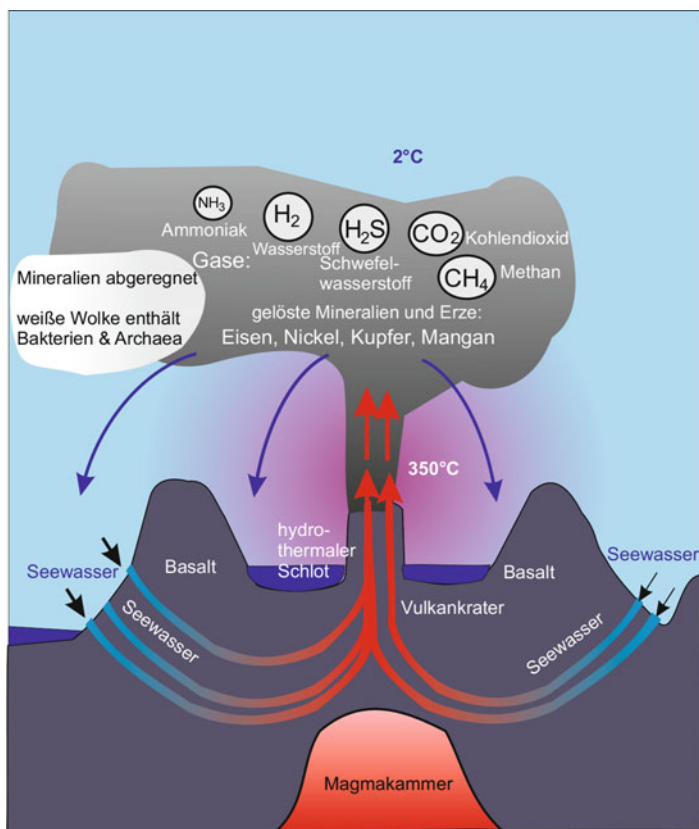


Abb. 14.2 Schema eines schwarzen Rauchers (Skizze WM)

takt zu heißen Felsen oder gar zum flüssigen Magma bis zu 400 °C auf. Wegen des enormen Druckes verdampft es aber nicht, sondern erreicht einen „*superheated*“ – superüberhitzen – Zustand, und in diesem Zustand löst es viele metallhaltige Mineralien. Mit diesen verflüssigten Mineralien als Fracht, steigt das überhitzte Wasser über die schmalen Kamine eines Schlotes nach oben und wird ins Meerwasser ausgeworfen. Die Mineralien reagieren in den Kaminen mit dem gleichzeitig mitgeführten Schwefelwasserstoff zu schwarzen Eisen-, Kupfer-, Zinn- und Nickel-Sulfiden. Über dem Schlot kühlt sich das noch bis zu 350 °C heiße Wasser im Kontakt mit dem eiskalten Tiefseewasser schlagartig ab und die Erz-Sulfide flocken als schwarzer Niederschlag aus.

Für die Biologie sind die massenhaft austretenden Gase (Abb. 14.2) von Bedeutung. Bakterien und noch mehr die extreme Temperaturen ertragenden Archaea gedeihen prächtig. Selbst im Inneren der porösen Kaminwände fand man verschiedene Gruppen „hyperthermophiler“ Archaeen. Diese Mikroorganismen ertragen außergewöhnlich hohe Säuregrade und Temperaturen; sie werden auch in den Geysiren des Yellowstone Nationalparks der USA und Islands gefunden. Die Archaeen besitzen eine sehr robuste Zellmembran, die bei Temperaturen von 120 °C noch funktionstüchtig ist. Allerdings in Kaminen, durch die 400 °C heißes Fluid durchströmt, dürften auch diese Rekordhalter im Ertragen unwirtlicher Zustände nicht mehr gedeihen und müssen in Poren im Außenbereich der Schlote ausweichen. Die Außenwände der Schlote und das Felsgestein der Umgebung sind überzogen von einer Schicht aus Mikroben, und selbst die schwarzen Wolken über den Schloten

wimmeln von schwebenden Mikroorganismen. Von diesem überreichen Angebot profitieren die uns schon bekannten Filtrierer wie Muscheln (Abb. 14.3) und Garnelen; sie bilden dichte Populationen, so dicht wie sonst nirgendwo auf der Welt.

Ein Typ von Organismus fiel durch seine rote Farbe auf und wurde von Wissenschaftlern zu seltsamen Kuriositäten erklärt; denn sie hatten (im Adultzustand) weder Mund, noch After, noch einen Darm, gediehen aber im Umfeld schwarzer Raucher prächtig. Man nennt diese Organismen Pogonophoren, auf Deutsch Bartwürmer. Es handelt sich um eine Gruppe von nur im Meer vorkommenden, röhrenbauenden, im Normalfall einige cm, im Extremfall 3 m langen Ringelwürmern mit einer knallroten Federkrone, die nur wenige Tiefseeforscher je lebend zu Gesicht bekamen. Es stellte sich heraus: Diese Tiere leben in Symbiose mit Bakterien, die sie im Inneren ihres Körpers in Säckchen pflegen. Die Federkronen sind rot, weil sie viel roten Blutfarbstoff (Hämoglobin) enthalten, mit dem sie restlichen Sauerstoff und Schwefelwasserstoff der Umgebung aufnehmen und über ihre Blutgefäße den Symbionten zuführen. Diese gewinnen Energie durch Oxidation des Schwefelwasserstoffs zu Sulfid, uns als Konservierungsstoff in Bier und Wein bekannt. Dann noch, vom Wirt gespendet, CO_2 als Kohlenstoffquelle, Ammoniak als Stickstoffquelle sowie Phosphat, und die Bakterien synthetisieren ganz ohne Sonnenlicht organische Substanzen, die sie mit ihrem Wirt teilen.

Es sind jedoch nicht nur Bartwürmer, welche die Vorzüge einer Symbiose nutzen, sondern auch spezialisierte, ebenfalls darmlose Muschelarten (*Calymene*) und Garnelen. Es



Abb. 14.3 Nutznießende Organismen im Umfeld eines Rauchers. *Oben* Muscheln mit symbiontischen, H_2S verwertenden Bakterien; *unten* der Riesenbartwurm (Pogonophore) *Riftia pachyptila*. (© Credit NOAA Galapagos-Expedition)

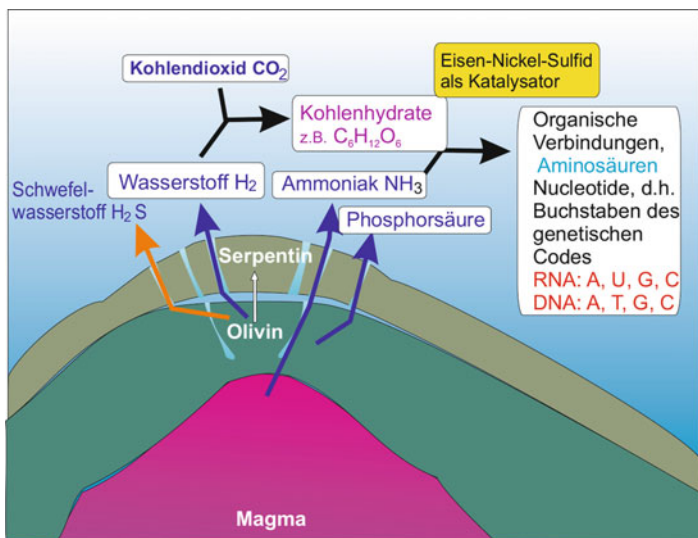


Abb. 14.4 Schema eines weißen Rauchers (Skizze WM)

wird gewiss noch manch Sonderbares ans Tageslicht kommen.

Weißer Raucher der „Lost City, der verlorenen Stadt“

Lost City wurde ein Feld von Hydrothermalquellen des Atlantik getauft, das 2000 auf einer Expedition der *National Science Foundation* entdeckt und 2005 von der NOAA, der *National Oceanic and Atmospheric Administration* der USA, eingehend erforscht wurde. Lost City ist das Parade-feld einer Ansammlung weißer Raucher. Ihr Rauch enthält nicht die schwarzen Erzsulfide der schon länger bekannten schwarzen Raucher. Das Wasser ist mit einer Austrittstemperatur von 40 bis 90 °C auch längst nicht so heiß und

nicht so sauer; denn es wird durch einen ganz anderen Prozess aufgeheizt. Zwar dringt auch in solchen Gegenden Meerwasser in die Tiefe, erreicht aber nicht glühendes Magma, sondern reagiert mit den Silizium-haltigen Mineralien Olivin und Peridotit, die sich in Serpentin umwandeln; dabei wird Wärme freigesetzt; das Gestein wirkt als riesige Bodenheizung (Abb. 14.4).

15

Vorstellungen über die Entstehung des Lebens auf der Erde

Zusammenfassung

Könnte es sein, dass heute noch Lebewesen neu entstehen? In der Konkurrenz zu den seit Jahrmilliarden ausgebauten und optimierten Mikroben wohl kaum. Aber es gibt nachweislich eine nicht-biologische Entstehung organischer Substanzen (Abiogenese). Unter archaischen Bedingungen, wie sie beispielsweise noch im Umfeld unterseeischer Vulkane herrschen, können Grundbausteine des Lebens entstehen, wie Aminosäuren, die sich autonom zu Eiweißsubstanzen verbinden, und Nukleotide, die sich zu langen Nukleinsäuren verketteten, welche sich selbst reproduzieren können und grundsätzlich genetische Information speichern könnten. Forscher versuchen, im Labor in speziellen Bioreaktoren ohne Mithilfe schon existierender Lebewesen und mittels zum Teil abenteuerlichen Ausgangssubstanzen wie der (für uns) hochgiftigen Blausäure die Bedingungen für die spontane Entstehung von Leben zu imitieren. Ziel der neuen „Synthetischen Biologie“ ist es, künstliche Zellen mit vorgewählten Eigenschaften zu erzeugen. In der Natur indes schafft die Evolution unablässig unzählig viel Neu-

es durch Abwandlung und Erweiterung des Vorhandenen nach ihren eigenen Gesetzen.

Wir kommen zu einer fundamentalen Frage, welche die Menschheit seit Jahrtausenden bewegt und mit allerlei fantasievollen und märchenhaften Mythen zu beantworten suchte: Wie ist das Leben entstanden, wo war sein Ursprung? Eine uralte Vorstellung ist, das Leben könnte außerirdischen Ursprungs sein. Schon der altgriechische Denker Anaxagoras hatte mit seiner Panspermie-Hypothese eine solche Idee vorgetragen. Leben schwirre überall im Weltall in Form elementarer Keime herum und könne so auch auf die Erde gelangen. Neuere Varianten dieser Idee setzen, wenn nicht Ufos, so doch Asteroiden ein, um Leben aus dem Weltall zur Erde zu bringen. Solche Vorstellungen sind bei Esoterikern und Romanschriftstellern beliebt, nicht aber bei nüchtern denkenden Wissenschaftlern. Im ganzen Sonnensystem gibt es keinen Himmelskörper, auf dem günstigere Bedingungen für die spontane Entstehung von Leben herrschten als auf unserem Planeten. Man müsste schon Flugkörper aus anderen Sonnensystemen zur Erde leiten und in einer Weise, dass sie nicht in der Atmosphäre der Erde verglühen oder verdampfen. Einwände solcher Art besagen aber nicht, dass nicht doch über Asteroide Mineralien und eingeschlossene einfache Kohlenstoffverbindungen auf die Erde gelangten, die bei der Bereitung von Grundstoffen des Lebens von Bedeutung gewesen sein könnten. Je nach den Mineralien, die Forscher in Meteoriten finden, weisen sie eine solche Rolle Eisen-Nickel-Phosphor-Verbindungen zu oder Zirkon-Graphit Kristallen. Oder die Forscher weisen in ihren Theorien der simplen, nur

ein Kohlenstoffatom und ein Stickstoffatom enthaltenden Substanz Cyanwasserstoff HCN, die reichlich in Kometen und Meteoriten vorkommt, eine entscheidende Rolle zu. HCN ist bekannt und berüchtigt als Blausäure. Und diese hochgiftige Substanz soll der Beistand des Himmels bei der Entstehung des Lebens gewesen sein? Wir kommen darauf zurück.

Es werden Szenarien entwickelt, die sich einstmals auf der jungen Erde vor 4,5 Milliarden von Jahren abgespielt haben könnten. Einstmals? Warum nicht heute noch?

Dieser Einwand wird vor allem von Gegnern der Evolutionstheorie vorgetragen. Doch schon Darwin gab eine plausible Erklärung, warum – sehr wahrscheinlich – heutzutage keine gänzlich neue Entstehung von Lebewesen beobachtet werden kann.

„Es wird oft behauptet, alle Bedingungen, die jemals geherrscht haben könnten, seien auch jetzt noch erfüllt. Wenn wir uns aber (und oh, was für ein ungeheures Wenn) vorstellen könnten, dass sich in einem warmen, kleinen Tümpel, in dem alle Arten von Ammonium- und Phosphorsalzen, Licht, Wärme, Elektrizität usw. vorhanden waren, ein Eiweißstoff auf chemischem Wege gebildet haben könnte, der zu weiteren komplizierten Umwandlungen fähig gewesen wäre, so würde doch heutzutage ein solcher Stoff augenblicklich gefressen werden oder anderweitig absorbiert, was vor der Entstehung lebender Wesen nicht der Fall gewesen wäre.“ (Darwin 1871 in einem Brief an Joseph Hooker, zitiert in Vollmer 2010, S. 74).

Eben dies ist das Argument, warum nach gegenwärtigem Wissen heutzutage im Umfeld auch hydrothermalen Quellen wahrscheinlich keine Bakterien oder Bakterien-ähnliche

Lebewesen entstehen. Sie können schlichtweg nicht mit den vorhandenen, seit Jahrmilliarden von Jahren biochemisch aufgerüsteten und optimierten konkurrieren.

Es sind seit Darwin, nicht überraschend, viele Ideen vorgetragen worden, wie Leben auf Erden entstanden sein könnte. Diese Ideen alle zu referieren und zu kommentieren, ist nicht das Anliegen dieses Buches.

Erst gilt es, eine Grundfrage zu klären: War die Entstehung einer ersten lebenden Zelle ein einmaliges und damit ein in hohem Maße unwahrscheinliches Ereignis? Gab es überhaupt nur eine einzige Zelle als Ursprung aller nachfolgenden Lebewesen oder gab es viele Versuche der Natur?

Für ein einmaliges Ereignis sprechen durchaus einige Argumente. Bei aller Vielgestaltigkeit und unterschiedlich hohen Komplexität haben alle derzeit lebenden Organismen, von den einfachsten Bakterien und Archaeen bis hin zum Menschen, überraschend viele und fundamentale Gemeinsamkeiten.

15.1 Welche Bauelemente müssen vorab vorhanden sein, dass Lebewesen, wie sie heute auf der Erde existieren, entstehen konnten?

In allen Lebewesen gibt es drei unverzichtbare Klassen von Substanzen:

1. Eiweißsubstanzen (Proteine), zusammengesetzt aus jeweils einer charakteristischen, einmaligen Folge von Aminosäuren. Proteine sind Elemente zum Bau von Gerüsten, intrazellulären Transportbahnen, Motoren und Pumpen. Proteine sind auch all die vielen Enzyme, die als Werkzeuge der Zelle es ihr ermöglichen, alles Weitere herzustellen. In den heutigen Lebewesen sind es 20 verschiedene Aminosäuren, die bis auf sehr seltene Ausnahmen der L-Gruppe angehören (L wie links, da sie die Schwingungsrichtung polarisierten Lichts nach links drehen); es könnten auch (ebenso gut?), D-Aminosäuren sein.
2. Nukleinsäuren. Sie sind Träger der genetischen Information, niedergelegt in der Abfolge ihrer vier oft genannten molekularen Buchstaben A (wie Adenin), G (wie Guanin), C (wie Cytosin) und T (wie Thymidin, oder in der RNA statt T das ihm ähnliche U = Uracil). Die Abfolge dieser gewöhnlich als „Basen“ bezeichneten Buchstaben bestimmt ihrerseits die Abfolge der Aminosäuren in den Proteinen und damit deren spezifische Struktur und Funktion. Diese Buchstaben ermöglichen es zugleich, dass zwecks Vervielfältigung und Vererbung des ganzen, langen Nucleinsäurestrangs identische Kopien seiner selbst hergestellt werden können (Replikation nach dem Matrizenprinzip: eine Positivkopie erzeugt eine negative, diese wiederum eine positive, usf.; Abb. 15.3 und 15.4). Oder gar, was im gegenwärtigen Kontext besonders wichtig ist, die Abfolge (Sequenz) dieser Buchstaben und ihre besondere Lego-Struktur ermöglichen es, dass solche Kopien von selbst entstehen können, wenn die

Bausteine erst einmal vorliegen und besondere äußere Bedingungen gegeben sind.

3. Lipide, öl- und fettartige Substanzen, welche, zu Membranen zusammengestellt, Zellen gegen die Außenwelt abgrenzen und innere Reaktionsräume schaffen, wie sie für Lebensfunktionen wichtig sind. Membranen werden auch gebraucht, um positive und negative elektrische Ladungen zu trennen und so Energie speichernde und Energie wieder ausliefernde Batterien herzustellen.

Alle diese Bedingungen müssen erfüllt sein, damit eine erste Zelle, eine hypothetische Protozelle, heute in Presseberichten LUCA genannt, entstehen und gedeihen konnte. Trotzdem geht man heute nicht mehr von einem einmaligen, alle Bedingungen aufs Mal erfüllenden Ereignis aus, wenn es um die Entstehung lebender Systeme geht. Einheitlichkeit wie das Vorherrschen von L-Aminosäuren und die Auswahl der vier Buchstaben für den genetischen Code wird als Ergebnis von natürlichen Selektionsprozessen gedeutet: das Bessere obsiegt auf lange Sicht.

15.2 Grundbausteine des Lebens ohne Zutun von Lebewesen in Poren der Kaminschlote gebildet?

Auch weiße Raucher spucken die biologisch wichtigen Gase Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, und Methan (weniger Kohlendioxid) aus (Abb. 14.4). Es kann sich wieder eine dichte Population von Mikroben und ihren uns schon be-

kannten Nutznießern bilden. Das wäre soweit nichts Neues, hätten Forscher nicht von Roboterarmen herausgebrochene Proben des porösen Gesteins im Labor mit dem Elektronenmikroskop, mit Gaschromatografen, Massenspektrometern und weiteren Hightech-Geräten untersucht. In winzigen Kammern des porösen Gesteins, so klein, dass nicht einmal Bakterien und Archaeen hineinschlüpfen könnten, fanden sie eine große Zahl von organischen Substanzen, die normalerweise nur von Lebewesen erzeugt werden und Grundbausteine aller heutigen Lebewesen sind, wie Aminosäuren, die Bausteine der Proteine (Eiweißsubstanzen) und Nukleotide, die Grundelemente der Nukleinsäuren und als solche die Buchstaben des genetischen Codes. Und sie fanden Substanzen wie Zucker, die Energie speichern. Freilich, die Kammern sind durch Nanoporen mit der Außenwelt verbunden. Die Substanzen könnten von Lebewesen draußen gebildet worden und über diese Nanoporen ins Kammerinnere gelangt sein. Die weiteren Untersuchungen und Experimente mussten im Labor in erhitzten Hochdruckgefäßen durchgeführt werden, unter Zufuhr der genannten Gase und unter sterilen Bedingungen. Die Forscher fanden die Befunde so faszinierend, dass sie eine neue Hypothese zur Entstehung des Lebens auf der Erde entwarfen.

Welches sind nun die Szenarien, die unter Berücksichtigung der Gesetze der Physik (insbesondere der Thermodynamik) von klugen Köpfen erdacht und in Bioreaktoren des Labors experimentell überprüft werden? Alle gegenwärtigen Entwürfe gehen von Bedingungen aus, wie sie vor etwa 3,5 Milliarden Jahren auf der damals sehr vulkanreichen Erde herrschten und heute in ähnlicher Form noch

bei den hydrothermalen Geysiren der Tiefsee herrschen. Eine Atmosphäre, für uns heutige Menschen zum Erstickten und Vergiften: kein Sauerstoff, viel Kohlendioxid (CO_2), Wasserstoff (H_2), stinkender Schwefelwasserstoff (H_2S) und stinkender Ammoniak (NH_3), das außergewöhnliche Methanethiol (CH_4S), ein möglicher Vorläufer einer wichtigen Substanz im Energiestoffwechsel (des Acetyl-CoA), und gar die oben erwähnte, in den Rauchgasen in Spuren vorkommende, zusätzlich in größerer Menge auch von Meteoriten auf die Erde gebrachte Blausäure (HCN). Und schließlich heiße Temperaturen. Solche unwirtlichen Bedingungen werden in abgeschlossenen Laborreaktoren nachgeahmt. Einige Forscher versuchen, die Bedingungen in den feinen Poren im Gestein von weißen Rauchern zu imitieren und setzen Eisen-Nickel-Sulfid-Mineralien, $\text{Fe}(\text{Ni})\text{S}$, wie sie dort in den Wänden der Poren gefunden werden, als Katalysatoren ein. Als Energiequellen dienen Unterschiede in der Temperatur und im Säuregrad (pH) des Wassers, wie sie in den grauweißen, in das kalte und leicht alkalische Meerwasser emporragenden Schloten der Geysire herrschen. Andere Entwürfe bauen nicht auf die speziellen Bedingungen der Raucher, sondern erwägen andere Szenarien, die auch nicht auf die Bedingungen im Meer abgestimmt sein müssen. Es können hier nur in sehr vereinfachter Form einzelne Befunde zusammengetragen werden.

- Wasserstoff reagiert unter dem Einfluss von $\text{Fe}(\text{Ni})\text{S}$ -Katalysatoren bei alkalischen Bedingungen mit Kohlendioxid und bildet allerlei „organische“, das heißt sonst nur in Lebewesen vorkommende, Kohlenstoffatome enthaltende Substanzen; so geschieht dies auch bei Methan-bildenden

Archaeen (Sojo et al. 2016). Ist auch eine Stickstoffquelle vorhanden und eine ausreichend starke Energiequelle, entstehen Aminosäuren, und dies sogar außerhalb der Erde; denn manche Aminosäuren können auch in Meteoriten gefunden werden (Jiang et al. 2014).

- Die Forschergruppe von John Sutherland in Cambridge, England, ließ mit Wasserstoff, Kohlendioxid und Blausäure als Stickstoffquelle, mit UV-Licht als Energiequelle und Kupferverbindungen als Katalysatoren gleichzeitig eine Fülle essenzieller Grundbausteine des Lebens entstehen: elf verschiedene Aminosäuren, einfache Zucker, bekannte Zwischensubstanzen des allgemeinen Zellstoffwechsels, und Vorstufen von Lipiden (Patel et al. 2015). Zuvor schon gelang es dieser Arbeitsgruppe nach zusätzlicher Gabe von Phosphat, wie es im Meerwasser vorkommt, Nukleotide („Basen“), die Bausteine des genetischen Codes, speziell die Bausteine der RNA (Abb. 15.1) herzustellen und dies nur mit den Ingredienzien Blausäure HCN, Schwefelwasserstoff H_2S und mit UV-Licht, aber ganz ohne die Mithilfe von Mikroben oder von biologischen Enzymen (Powner et al. 2009). Auch anderen Arbeitsgruppen glückten, mit anderen Methoden, solche Kunststücke der Chemie (z. B. Da Silva et al. 2015, Ostrovskii und Kadyshevich 2014).
- Die vier Bausteine der RNA können sich unter Bedingungen, wie sie in der Frühzeit der Erde herrschten und heute noch in Poren der Hydrothermal-Kamine herrschen, spontan zu langen Ketten verbinden; es entsteht RNA, die potenziell genetische Information tragen könnte und sogar in der Lage ist, Kopien ihrer selbst anzulegen (Burcar et al. 2015; Abb. 15.3, 15.4). Auch

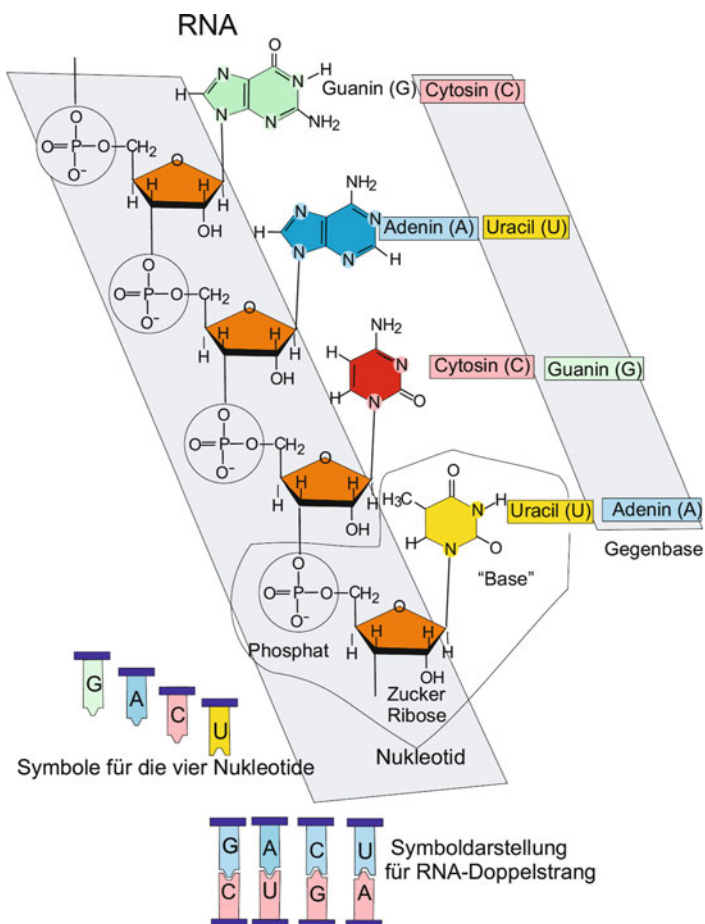


Abb. 15.1 RNA (*ribonucleic acid*, Ribonukleinsäure)

die Oberfläche bestimmter Mineralien induzieren eine geordnete Zusammenlagerung von Nukleotiden zu RNA oder Aminosäuren zu Peptiden, diese nur aus L-Aminosäuren zusammengesetzt.

Die spontane Entstehung von RNA-Strängen ist eine Stütze der Theorie einer einstigen RNA-Welt, wie sie Molekularbiologen schon seit längerer Zeit diskutieren. Ursprünglich sei der Träger der genetischen Information RNA gewesen; erst später sei diese Rolle von der stabileren DNA übernommen worden, während RNA heute nur noch in bestimmten Viren diese Rolle spielt, sonst aber nur noch als Zwischenträger der Information vom Zellkern zu den Protein-Synthese-Maschinen fungiert.

15.3 Von den Bauelementen zu einer Urzelle

Bestimmte Lipide können spontan im Wasser blasenförmige Membranen bilden, die Zellmembranen ähnlich sind. Man nennt sie Liposome. Gibt man weitere Lipide hinzu, wachsen die Blasen bis auf eine Grenzgröße heran; ist diese überschritten, teilen sich die Blasen in zwei (Abb. 15.2).

Solche Blasen können vielerlei Substanzen dem umgebenden Wasser entziehen und in sich aufnehmen, so auch die Bausteine der RNA (Abb. 15.3 und 15.4). Was noch fehlt, ist nicht wenig. Die RNA muss Sinn gewinnen, sie muss lernen, die Abfolge der Aminosäuren in den Proteinen festzulegen. Nur so können Enzyme entstehen, die treu eine bestimmte Funktion erfüllen und von Generation zu Gene-

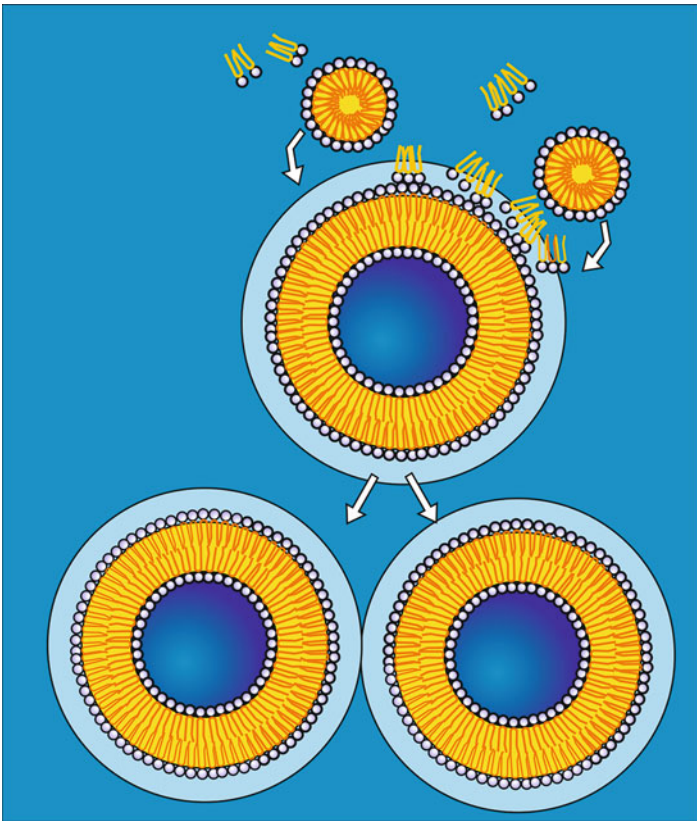


Abb. 15.2 Aus Phospholipiden bestehendes Liposom, nach Aufnahme von weiteren Phospholipiden bei Übergröße sich autonom teilend

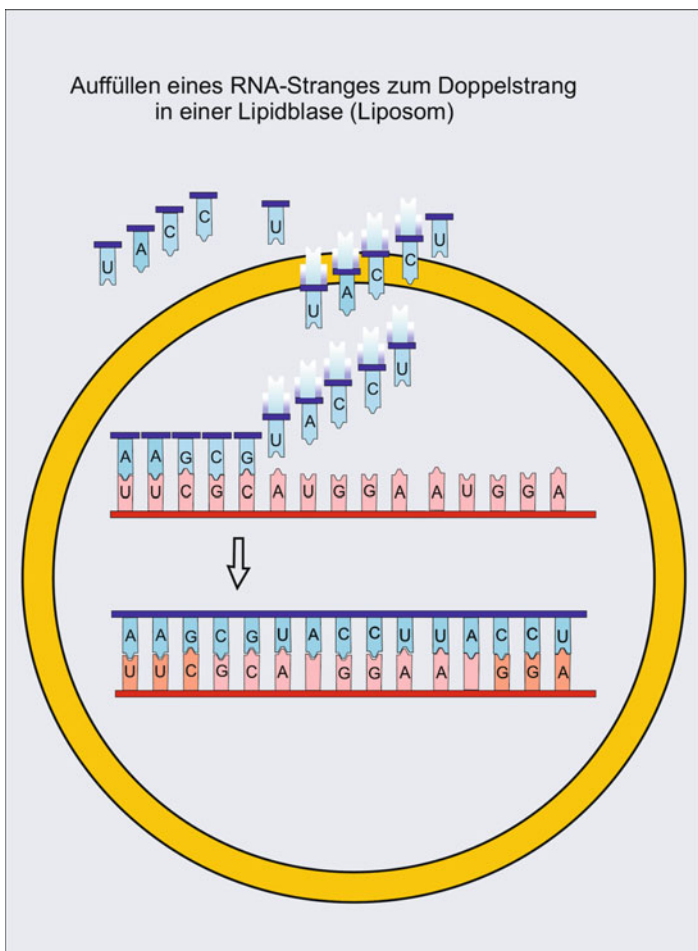


Abb. 15.3 Liposom, Bausteine der RNA aufnehmend. Diese ergänzen einen RNA-Einfachstrang zum RNA-Doppelstrang, eine Voraussetzung für weitere Replikationen

ration in exakt der gleichen Weise erneut hergestellt werden können.

Diese Enzyme wiederum müssen dafür sorgen, dass die Zelle selbst möglichst alle notwendigen Ingredienzien zum Weiterleben herstellen kann und nur wenig von der Umwelt beziehen muss. Die pflanzliche Zelle hat in dieser Hinsicht den höchsten Grad der Autonomie erreicht. Sie entnimmt ihrer Umwelt lediglich Kohlendioxid, Wasser und ein paar Mineralsalze. Daraus stellt sie, mit Licht als Energiequelle, am Ende an die 200.000 verschiedene Substanzen her.

15.4 Ein Ausblick und eine letzte Bemerkung

Eine neue Sparte der Biologie/Biochemie, die sich selbst synthetische Biologie nennt, hat es sich zum Ziel gesetzt, künstliche Lebewesen zu erzeugen. Das mag, wenn man die vorigen Abschnitte gelesen hat, gar nicht vermessen klingen. Wer jedoch jemals professionelle Lehrbücher der Biochemie, Molekulargenetik und der Zellbiologie durchgeblättert oder gar studiert hat, wird rasch gewahr, dass der Weg von den simplen, hypothetischen LUCA-Zellen der Presseberichte zu realen Zellen noch schier unendlich weit ist. Die Komplexität des Lebens hat in ca. 4 Milliarden von Jahren der Evolution ein Ausmaß erreicht, das unvorstellbar ist. Nochmals: Eine einzige Zelle von etwa 20 Tausendstel eines Millimeters im Durchmesser beherbergt an die 200.000, manche Schätzungen gehen bis zu 500.000, verschiedene Substanzen. Die intrazellulären Re-

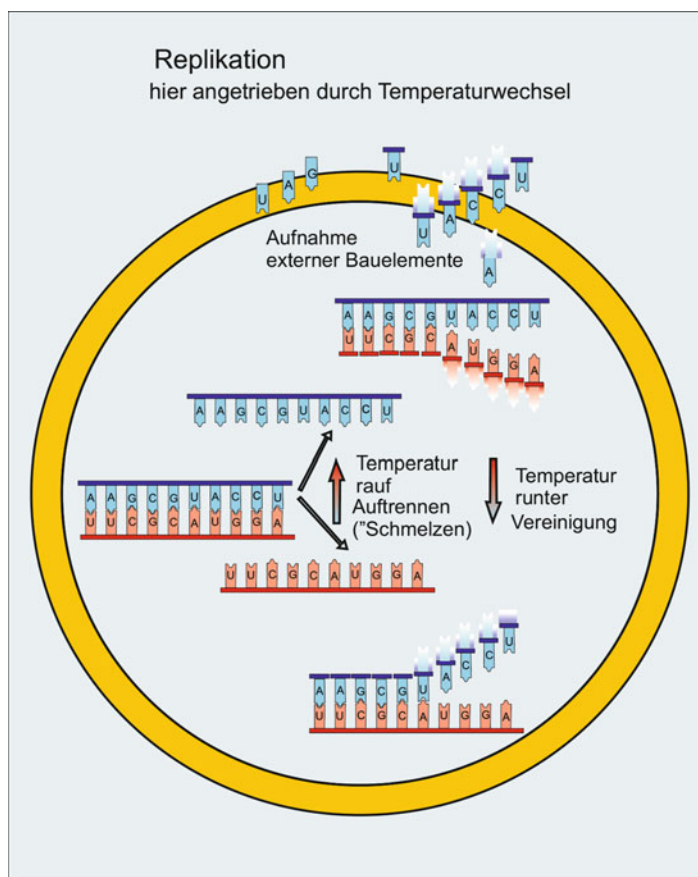


Abb. 15.4 Replikationen eines RNA-Doppelstrangs, im Laborexperiment durch Wechsel von heiß nach kalt in die Wege geleitet

aktionssysteme sind entsprechend kompliziert ausgebaut und vielseitig vernetzt.

Die synthetische Biologie hat deswegen vorerst als Ziel ihrer Bemühungen nur Minimalzellen, wobei man Funktionsmodule aus schon existierenden Organismen herausholt und in Kunstzellen aus Lipidmembranen einbaut.

Mag wohl sein, dass optimistische Wissenschaftler künftig für die Bioreaktoren der Industrie neue, maßgefertigte Mikroorganismen entwerfen und herstellen, die manche Produkte effizienter als die bisher verwendeten, natürlichen (aber genetisch aufgerüsteten) Mikroorganismen und Zellkulturen produzieren. Das Leben im Meer bleibt davon unberührt. Hier wird das Leben, wenn auch gestört durch Eingriffe des Menschen, seinen eigenen, natürlichen Weg weitergehen.

Die Evolution ruht nicht und schafft unablässig Neues durch Abwandlung des Vorhandenen, und sie tut dies nach ihren eigenen Regeln und Gesetzen.

Glossar

Abyssal Abgrund-, Tiefsee betreffend

Bathyal lichtloser Bereich

Bathypelagial im lichtlosen Bereich pelagisch lebend

Benthos Gesamtheit der Organismen, die auf dem Boden oder festem Untergrund leben

Hadal Gesamtheit der auf dem tiefsten Grund des Meeres lebenden Organismen

Litoral oder Littoral den Küsten- oder Uferbereich betreffend

Nekton Gesamtheit der nicht nur von Meeresströmungen passiv verfrachteten, sondern auch aktiv in horizontaler Richtung schwimmenden Organismen wie Fischeschwärme

Pelagial Uferferne Bereiche des offenen Wassers

Plankton Gesamtheit der Organismen, die passiv von Wellen, Meeresströmungen und Konvektionen des Wassers verfrachtet werden

Literatur

Bücher

- Au Whitlow WL (1993) The Sonar of Dolphins. Springer, New York
- Brusca RC, Brusca GJ (2002) Invertebrates, 2. Aufl. Sinauer Ass. Publ., Sunderland
- Klaus J, Kremer B (2003) Düne, Strand und Wattenmeer. Kosmos Naturführer, Stuttgart
- Müller WA, Hassel M (2012a) Entwicklungsbiologie und Reproduktionsbiologie des Menschen und bedeutender Modellorganismen. Springer, Berlin Heidelberg
- Müller WA, Hassel M, Maura G (2015a) Development and Reproduction in Humans and Animal Model Species. Springer, Berlin, Heidelberg
- Müller WA, Frings S, Möhrle F (2015b) Tier- und Humanphysiologie, 5. Aufl. Springer Spektrum, Heidelberg
- Sommer U (1998) Biologische Meereskunde. Springer, Berlin, Heidelberg
- Storch V, Welsch U (2003) Systematische Zoologie, 6. Aufl. Spektrum, Gustav Fischer, Heidelberg
- Vollmer G (2010) Biophilosophie. Reclam, Stuttgart

- Westheide W, Rieger R (2004) Spezielle Zoologie, Teil 1, Einzeller und Wirbellose. Spektrum Akad Verlag, Heidelberg
- Westheide W, Gunde R, Rieger R (2014) Spezielle Zoologie, Teil 2, Wirbel- oder Schädeltiere. Springer Spektrum, Heidelberg

Einzelartikel zu Kap. 1–14

- Arendt D, Tosches MA, Marlow H (2015) From nerve net to nerve ring, nerve cord and brain – evolution of the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience* 17(1):61–72
- Bedore CN et al (2015) Freezing behaviour facilitates bioelectric crypsis in cuttlefish faced with predation risk. *Proceedings Royal Society B* 282:1886
- Caspers H (1984) Spawning periodicity and habitat of the palolo worm *Eunice viridis* (Polychaeta: Eunicidae) in the Samoan Islands. *Marine Biology* 79(3):229–236
- Cawa T, Hadfield MG (2012) Larvae of *Pocillopora damicornis* (Anthozoa) settle and metamorphose in response to surface-biofilm bacteria. *Marine Ecology Progress Series* 433:85–96
- Cawa T, Hadfield MG (2013) Localization of sensory mechanisms utilized by coral planulae to detect settlement cues. *Invertebrate Biology* 12(3):195–206
- Cranford TW et al (2011) Observation and analysis of sonar signal generation in the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*): Evidence for two sonar sources. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 407(1):81–96
- Erwin PM, Szmant AM (2010) Settlement induction of *Acropora palmata* planulae by a GLW-amide neuropeptide. *Coral Reefs* 29(4):929–939
- Fields DR (2007) Der sechste Sinn der Haifische. *Spektrum der Wissenschaft* 11:55–63

- Fischer A (Hrsg) (2013) The Helgoland Manual of Animal Development. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München
- Fong PP (1993) Lunar control of epitokal swarming in the polychaete *Platynereis bicanaliculata* (Baird) from central California. *Bulletin of Marine Science* 52(3):911–924
- Garm A, Mori S (2009) Multiple photoreceptor systems control the swim pacemaker activity in box jellyfish. *Journal of Experimental Biology* 212(24):3951–3956
- Garm A et al (2011) Box Jellyfish Use Terrestrial Visual Cues for Navigation. *Current Biology* 21(9):798–803
- Gaston G, Hall J (2000) Lunar periodicity and bioluminescence of swarming *Odontosyllis luminosa*. *Gulf & Caribbean Research* 42:47–51
- Grabowski TB et al (2015) Evidence from data storage tags for the presence of lunar and semi-lunar behavioral cycles in spawning Atlantic cod. *Environmental Biology of Fishes* 98(7):1767–1776
- Hauenschild C (1955) Photoperiodizität als Ursache des von der Mondphase abhängigen Metamorphose-Rhythmus bei dem Polychaeten *Platynereis dumerilii*. *Zeitschrift für Naturforschung* 11b:125–402
- Hauenschild C (1969) Lunar periodicity. *Cold Spring Harbor Symposium Quant Biol* 25:491–497
- Hauenschild C, Fischer A, Hofamm DK (1968) Untersuchungen am pazifischen Palolowurm *Eunice viridis* (Polychaeten) in Samoa. *Helgoländer wiss Meeresuntersuchungen* 18:254–295
- Kremers D et al (2014) Behavioural evidence of magnetoreception in dolphins: detection of experimental magnetic fields. *Naturwissenschaften* 101(11):907–911

- Kroiher M, Berking S (1999) On natural metamorphosis inducers of the cnidarians *Hydractinia echinata* (Hydrozoa) and *Aurelia aurita* (Scyphozoa). *Helgol Mar Res* 53:118–121
- Lidke AK et al (2014) beta-Estradiol induces supernumerary primordial germ cells in embryos of the polychaete *Platynereis dumerilii*. *General Comparative Endocrinology* 196:52–61
- Miller D, Ball EE (2000) The coral *Acropora*: what it can contribute to our knowledge of metazoan evolution and the evolution of developmental processes. *BioEssays* 22:291–296
- Müller WA (2012b) Geborgen aus einer riesigen Informationsflut: Stammzellen I: Basiswissen updated. *Biologie in unserer Zeit* 6(42):380–389
- Müller WA, Leitz T (2002) Metamorphosis in the Cnidaria. *Canadian Journal of Zoology* 80:1755–1771
- Petie R et al (2011) Visual control of steering in the box jellyfish *Tripedalia cystophora*. *Journal of Experimental Biology* 214:2809–2815
- Plickert G, Frank U, Müller WA (2012) *Hydractinia*, a pioneering model for stem cell biology and reprogramming somatic cells to pluripotency. *International Journal of Developmental Biology* 56:519–534
- Qin Siying et al (2016) A magnetic protein biocompass. *Nature Materials* 15:217–226
- Saigusa M (1988) Entrainment of Tidal and Semilunar Rhythms by Artificial Moonlight Cycles. *Biological Bulletin* 174:126–138
- Tebben J et al (2011) Induction of Larval Metamorphosis of the Coral *Acropora millepora* by Tetrabromopyrrole Isolated from a *Pseudoalteromonas* Bacterium. *PLoS One* 6(4). Article no. e19082

- Tessmar-Raible K, Raible F, Arboleda E (2011) Another place, another timer: Marine species and the rhythms of life. *BioEssays* 33(3):165–172
- Webster NS et al (2004) Metamorphosis of a scleractinian coral in response to microbial biofilms. *Applied and Environmental Microbiology* 70(2):1213–1221

Zu Kap. 15 Ursprung des Lebens

- Altstein AD (2015) The progene hypothesis: the nucleoprotein world and how life began. *Biology Direct* 10. Article No. 67
- Baaske P et al (2007) Extreme accumulation of nucleotides in simulated hydrothermal pore systems. *Proceedings National Academy Sci USA* 104(22):9346–9351
- Barge LM et al (2014) The Fuel Cell Model of Abiogenesis: A New Approach to Origin-of-Life Simulations. *Astrobiology* 14(3):254–270
- Baross JA, Martin WF (2015) The Ribofilm as a Concept for Life's Origins. *Cell* 162(1):13–15
- Blain JC, Szostak JW (2014) Progress toward synthetic cells. *Annual Revue Biochemistry* 83:615–640
- Burcar BT et al (2015) RNA Oligomerization in Laboratory Analogues of Alkaline Hydrothermal Vent Systems. *Astrobiology* 15(7):509–522
- Callahan MP et al (2014) Amino acid analysis in micrograms of meteorite sample by nanoliquid chromatography-high-resolution mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 1332:30–34
- Caschera F, Noireaux V (2014) Integration of biological parts toward the synthesis of a minimal cell. *Current Opinion in Chemical Biology* 22:85–914

- D'Aguanno E et al (2015) Physical Routes to Primitive Cells: An Experimental Model Based on the Spontaneous Entrapment of Enzymes inside Micrometer-Sized Liposomes. *Life-Basel* 5(1):969–996
- Da Silva L, Maurel M-C, Deamer D (2015) Salt-Promoted Synthesis of RNA-like Molecules in Simulated Hydrothermal Conditions. *Journal of Molecular Evolution* 80(2):86–97
- Deamer DW, Georgiou CD (2015) Hydrothermal Conditions and the Origin of Cellular Life. *Astrobiology* 15(12):1091–1095
- de Souza et al (2014) Spontaneous Encapsulation and Concentration of Biological Macromolecules in Liposomes: An Intriguing Phenomenon and Its Relevance in Origins of Life. *Journal of Molecular Evolution* 79(5–6):179–192
- Fontecilla-Camps JC (2014) The Stereochemical Basis of the Genetic Code and the (Mostly) Autotrophic Origin of Life. *Life-Basel* 4(4):1013–1025
- Gill S, Forterre P (2016) LUCA and extracellular membrane vesicles (EMVs). *International Journal of Astrobiology* 15(1):7–15
- Herschey B et al (2014) An Origin-of-Life Reactor to Simulate Alkaline Hydrothermal Vents. *Journal of Molecular Evolution* 79(5–6):213–227
- Jaeschke A et al (2012) Microbial diversity of Loki's Castle black smokers at the Arctic Mid-Ocean Ridge. *Geobiology* 25:
- Norio K (2015) Energetics of Amino Acid Synthesis in Alkaline Hydrothermal Environments. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 45(4):377–409
- Kimura J, Kitadai N (2015) Polymerization of Building Blocks of Life on Europa and Other Icy Moons. *Astrobiology* 15(6):430–441

- Konn C, Charlou JL, Holm NG et al (2015) The Production of Methane, Hydrogen, and Organic Compounds in Ultramafic-Hosted Hydrothermal Vents of the Mid-Atlantic Ridge. *Astrobiology* 15(5):381–399
- Martin W (2009) Hydrothermalquellen und der Ursprung des Lebens. *Biologie in unserer Zeit* 39:166–174
- Martin W et al (2008) Hydrothermal vents and the origin of life. *Nature Reviews Microbiology* 6(11):805–814
- McDermott JM et al (2015) Pathways for abiotic organic synthesis at submarine hydrothermal fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 112(25):7668–7672
- Ostrovskii VE, Kadyshевич EA (2014) Life Origination Hydrate Theory (LOH-Theory) and the Explanation of the Biological Diversification. *Journal Molecular Evolution* 79:155–178
- Patel BH et al (2015) Common origins of RNA, protein and lipid precursors in a cyanosulfidic protometabolism. *Nature Chemistry* 7:301–307
- Russell MJ et al (2014) The Drive to Life on Wet and Icy Worlds. *Astrobiology* 14(4):308–343
- Saladino R et al (2015) Meteorite-catalyzed syntheses of nucleosides and of other prebiotic compounds from formamide under proton irradiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112(21):E2746–E2755
- Sojo V et al (2016) The Origin of Life in Alkaline Hydrothermal Vents. *Astrobiology* 16(2):181–197
- Sousa FL et al (2013) Early bioenergetic evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B Biological Sciences* 368(1622). Article No. 20130088

Spitzer J, Pielak GJ, Poolman B (2015) Emergence of life: Physical chemistry changes the paradigm. *Biology Direct* 10. Article No. 33

Umeda Y et al (2016) Survivability and reactivity of glycine and alanine in early oceans: effects of meteorite impacts. *Journal of Biological Physics* 42(1):177–198

Internet

<https://www.beachexplorer.org/apps>, kostenlos dank Förderung durch Bundesbehörden (Bundesprogramm Biologische Vielfalt)

www.oceancare.org

www.platynereis.de

www.wwf.de

Sachverzeichnis¹

A

Aal 35, 41, 42
Aequorea victoria 204, 207
Alcyonium 92, 93, 146
Algenblüte 101
Aminosäuren 223,
227–229, 231, 233
Amphioxus 108, 133, 137
Anglerfisch 143, 157, 159,
201, 206, 207
Annelida 85, 136
Anthozoa 121
Anthozoen 105
Archaea 214, 217
Arenicola marina 52, 85
Arenicola marina 72
Ascidien 108, 114, 148
Asterias rubens 84, 125
Asteroide 224
Aurelia 63, 79, 144, 145
Auster 73, 167, 186, 188

B

Bartwürmer 219
Bäumchenröhrenwurm 53,
87
beach explorer 62
Bilateral-Symmetrie 103,
110, 112, 115, 128, 132
Biofilm 186, 187
Biofouling 188
Biolumineszenz 201,
204–206
Blasenkoralle 193
Blaubakterien 101
Blausäure 223, 225, 230,
231
Blumentier 105, 118
Bohrmuschel 116
Botryllus 153, 154
Branchiostoma 108, 133
broadcast spawning 178

¹ In Fettdruck: Seite mit Abbildung.

C

- Cancer pagurus
(Knieper) 92
- Caretta caretta 40
- Census of Marine Life 182,
210
- Cephalopoden 116
- Chelonia mydas 38, 40
- chemoautotroph 209
- Chironex 179
- Choanocyten 138, 139
- Choanoflagellaten 139
- Chordata, Chordatiere 92,
125, 128, 143
- Chrysaora 63, 79
- Clione 115
- Cnidaria, Cnidarier 75, 78,
107, 136, 138, 207
- Cnidocyten 78
- Crangon vulgaris 91
- Crinoidea 129, 131
- Ctenophora 66
- Cyanea 63
- Cyanobakterien 101, 182
- Cyanwasserstoff 225

D

- Darwin 225
- Delfine 9, 11, 12, 15, 20,
21, 24, 35, 37
- Deuterostomier 133, 145
- Dinoflagellaten 101, 102
- Doggerland 99

Donnerkeil 63

Dornhai 28, 63

Dorsch 94, 169

E

- Echinodermen 84, 109,
123, 124, 125, 127, 128,
129, 131, 132, 136, 138
- Echinus esculentus 84
- Echoortung 20
- Ectoprocta 136
- Einsiedlerkrebse 74, 81,
186
- elektrische Felder 28
- elektrische Rochen 20
- Elektrisches Organ 32, 33
- Elektroplax 32
- Elektrosensoren 20, 31, 39
- Entenmuscheln 45, 66, 67,
69, 70
- Erdmagnetfeld 35, 36, 39
- Euglena sanguinea 101
- Eunice viridis 172, 173
- Eupagurus 74, 81

F

- Felswatt 50
- Flügelschnecken 116

G

- Gadus morhua 94, 169
- Garnelen 89, 91, 203, 218
- Gastropoden 116
- Geflügelte Engel 115

Generationswechsel 144
Geysir 209, 211, 217, 230
Gezeiten 45, 47, 54, 57,
59, 60, 165, 167
Gezeitenperiodik 161, 164
Gezeiten-Ährenfisch
Grunion 165
GFP 204, 207
Gorgonenhäupter 104,
107, 124, 126, 127
Gorgonien 107, 126, 127
Great Barrier Reef 161,
175, 193, 197
Green-fluorescent
protein, 207
Großen Tümmlers 10
Grunion 161, 166

H

Haarsterne 131, 136
Haarzellen 141
Hai, Haie 5, 20, 28, 29, 30,
33, 103
Herzmuschel 72
Hirnkoralle 193
Holothurien 123, 210
Homologie 136, 139
Hydractinia 80, 82, 84,
146, 147, 149, 153, 154,
185, 187, 188, 197, 198
Hydractinia echinata 81
Hydrobia 71
Hydromedusen 121

Hydropolyphen 75, 121
Hydrothermalquellen 215,
220, 225
Hydrothermal-Kamine 231
Hydrozoen,
Hydrozoon 105, 118,
121, 146, 179, 185

I

Infraschall 19, 23

K

Kabeljau 94, 169
Kalkbildung 195, 196
Kaltwasserriffe 193, 197
Kleptocniden 115
Klonen 143, 144, 146, 148,
150, 155, 156, 191
Knieper 94
Knurrhahn 94
Kompassqualle 63
Konvergenz 136, 139
Koralle 204
Korallen 70, 109, 118, 126,
148, 161, 163, 175, 183,
191, 193, 195, 197
Korallenriffe 103, 128, 175,
188, 191
Korallentiere 136
Krabben 89, 91
Krabbenkutter 89
Kragengeißelzellen 139,
141

L

- Laichen 161–163, 170,
171, 175
 Lanice conchilega 87
 Laterne des Aristoteles 45,
63, 64, 84
 Lepas 69
 Lipide 228, 233
 Liposom 232, 233
 Litorina 72
 Lorenzinische Ampullen 30
 Lost City 220
 LUCA 228
 lunare Periodik 161, 164,
165
 Luziferase 208
 Luziferin 208

M

- Magnetfeld 35, 44
 Magnetfeldorientierung 37,
40
 Mammut 97
 Manteltiere 107, 108, 114,
133, 143, 148
 Massenlaichen 163, 176
 Medusen 75, 121, 179,
180, 204
 Medusenhaupt 126
 Meeresborstenwürmer 136
 Meeresleuchten 45, 100
 Meeresringelwürmer 86

- Meeresschildkröten 35, 38,
40
 Megalodicopia 108, 114
 Metagenese 144
 Methan 214, 215, 228, 230
 Methanethiol 230
 Miesmuscheln 73, 84
 Mikroplankton 135, 136
 Mollusken 71, 116
 Mondperiodik 161, 164
 Moostier 92, 106, 107,
136, 148
 Muscheln 66, 72, 116, 117,
137, 218, 219

N

- Nacktschnecken 115, 193
 Napfschnecken 65, 70
 Nauplius 65
 Nematostella 183, 185
 Nereis 88
 Nesseltiere 75, 78, 118,
121, 148, 151, 185
 Nesselzellen 75, 78, 115,
119, 139, 191, 198
 Nipptiden 54, 58, 161, 167
 NOAA 220
 Noctiluca 102
 Nukleinsäuren 223, 227,
229
 Nukleotide 223, 229, 231,
233

O

- Ocean Care 26
- Octocorallia,
 - Oktokorallen 92, **106**
- Odontosyllis 174, 201
- Ohrenqualle 63, **79**, 144, **145**
- Ophiura fragilis 85
- Orcas 12

P

- Palola **172**, 173
- Palolo 161, 171, **172**, 173
- Palytoxin 109
- Pantoffelschnecke 71
- Pfeilschwanzkrebse 167, **168**
- Phospholipide **232**
- Pierwurm 85
- Planula, Planularlarven 144, 146, 175, **176**, 178, 183, 185
- Platnereis **172**
- Plattfische 89, 94
- Platynereis 161, 170
- Pleurobrachia 66
- Pluteus **145**
- Pogonophore 218, **219**
- Polychaeten **86**, 88, 170, **172**, 173, 174
- Polypen 75, 80, 92, 146, 151, 175, 178, 185, 194

- Portugiesische Galeere **152**, **153**
- Pottwal 12, 15, 17
- Proteine 227, 229
- Psammechinus miliaris 84
- Pteropoda 115

Q

- Quallen 6, 75, **79**, 103, 118, 121, 136, 144, 178, 201, 207
- Quallenplage 4, 179

R

- Radiär-Symmetrie 103, 110, **112**, 117, 118, 120, 128
- Raucher (unterseeische Geysire) 209, 211, **212**, 215, **216**, **219**
- Rhopalium **180**
- Riftia **219**
- RNA 227, 231, **232**, 233, **235**, **237**
- RNA-Welt 233
- Rochen 20, 28, 30, 39, 94
- Rote Flut 100, 101

S

- Salpen 143, 148
- Schallkanonen 19, 26
- Schlangensterne 85, 110, 124, 126
- Schnecken **65**, **72**, **193**

- Scholle 28, 94, 95
 Schwämme 141
 Schwämme 135, 137, 138, 214
 Schwarzer Raucher 211, 212, 215, 216
 Schwefelwasserstoff 209, 213, 217, 218, 228, 230, 231
 Schweinswale 22
 Schwimmkrabben 74
 Scyphozoen 121
 Seeanemonen 118, 198
 Seefeder 183, 207
 Seegurken 104, 132, 136, 210
 Seehasen 115
 Seeigel 84, 122, 124, 126, 132, 163
 Seeigellarve 145
 Seelilien 104, 124, 129, 131, 136
 Seemoos 45, 75, 76, 77, 105, 107
 Seenelken 70, 104, 119, 131
 Seepferdchen 143, 158, 159
 Seepocken 53, 63, 69, 70, 188
 Seerosen 70, 103, 104, 112, 118, 121, 143
 Seescheiden 92, 107, 108, 114, 128, 133, 137, 148, 153, 214
 Seestachelbeere 66
 Seesterne 84, 104, 110, 122, 124, 125, 163
 Seewalzen 122, 132
 Seewespe 179
 semilunare Periodik 161, 165
 Sepia officinalis 30
 Sepia-Tintenfische 63
 Sertularia 75, 76, 77, 146
 Shrimps 91
 Sonar 20
 Sonnenstern 110, 124, 125
 Springfluten 58
 Springtiden 54, 58, 60, 100, 169
 Staatsquallen 143, 148, 151, 152
 Stachelhäuter 123, 124, 131
 Steinkorallen 104, 185, 188, 191, 193, 195
 Sterntiere 124, 132
 Strandkrabben 74
 Strandschnecken 53, 71, 74, 167
 Sturmfluten 99
 Superorganismus 143, 146

T

- Taschenkrebse 92
Tauchen 15
Tintenfische 30, **116**, 117,
201, 203, **205**, 208, 210
Tote-Seemannshand 45, 92,
93
Tributylzinn 189
Tripedalia 179, **180**
Tunikaten **108**, 114, **150**

U

- Überfischung 4
Ultraschall 16, 19, **21**
Ultraschall-Sonar 19
Urbilateria 128
Urzelle 233

V

- Veligerlarve 71
Vielborstenwürmer 85, 88,
161

W

- Wasserstoff 209, 214, 228,
230
Wattenmeer 45, 47, **51**, **53**,
72
Wattschnecken 71
Wattwanderung 68
Wattwurm **52**, 85
Weichkorallen 92, 104,
105, **106**, 107, 146, 183
Weißer Raucher **220**
Wellhornschnecke 71, 74
Winkerkrabben 167
Würfelqualle 179, **180**, 181

X

- Xenia **106**, 107
Xiphosuren 167

Z

- Zitterrochen 20, 31
Zooxanthellen 196
Zypressenmoos 75, 105,
146

