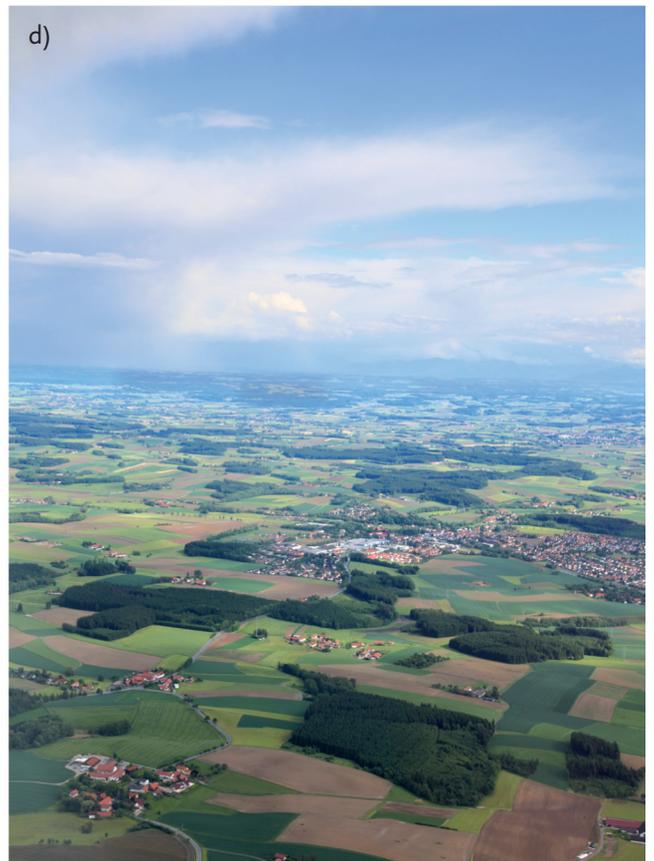
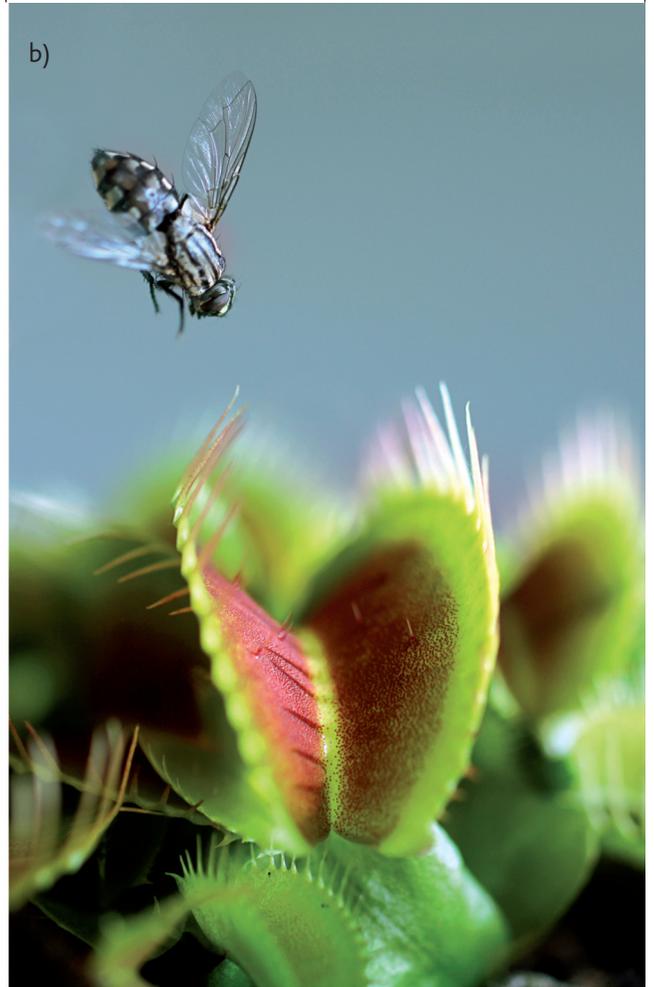




Teil I

Biologische Vielfalt entdecken





1

Faszination, Bedeutung, Zustand und Zukunft unserer Lebensgrundlage:

Eine Einführung in Fragen zur biologischen Vielfalt

Markus Fischer

Die Erde beherbergt eine faszinierende und dynamische Vielfalt von Genen, Individuen, Populationen, Arten, Lebensgemeinschaften und Ökosystemen, die im Lauf der Jahrmilliarden entstanden ist. Während diese Vielfalt schon immer ethische und ästhetische Wertschätzung erfuhr, werden ihr immenser ökologischer und ökonomischer Wert erst jetzt erkannt. Faszinierend und wertvoll ist also die biologische Vielfalt – doch auch stark unter Druck. Änderungen der Landnutzung, Klimawandel und biologische Invasionen setzen ihr zu. Wie wird es weitergehen? Die damit verbundenen Forschungsfragen werden in diesem Buch durch interessante Beispiele illustriert.

Der erste Teil des Buches widmet sich der Frage, wie man biologische Vielfalt erforscht – wie man also die Vielfalt der Gene, Individuen, Populationen, Arten, Lebensgemeinschaften und Ökosysteme, der Verhaltensweisen und der Wechselwirkungen zwischen den Organismen sowie die Veränderungen ihrer Verteilung im Raum und in der Zeit untersucht. Dementsprechend vielfältig sind die Untersuchungsmethoden, die dabei zum Einsatz kommen und in die das Buch einen

kurzweiligen Einblick gibt. Zum Einsatz kommt die gesamte Palette der biologischen Erfassungsmethoden, von abenteuerlichen Expeditionsreisen bis zu hochkomplexen Labormethoden, von der Fernerkundung aus dem Flugzeug heraus oder über Satelliten bis zur statistischen Bearbeitung riesiger Datenmengen nach modernen stammesgeschichtlichen und populationsgenetischen Gesichtspunkten in der Bioinformatik, von der Sammlung von Organismen bis zur Untersuchung ihres Verhaltens und ihrer vielfältigen Wechselwirkungen mit anderen. Je nach Organismengruppe und Fragestellung ist der Zugang zu Biodiversitätsuntersuchungen einfach oder sehr schwierig. Neue Entdeckungen verdanken wir deshalb oft der Erschließung neuer Lebensräume für die Forschung, etwa der Tiefsee, der Polarregionen oder extremer Lebensräume auf dem Festland.

Bei der Frage nach der genetischen Variabilität in einer Population, beispielsweise der Verwandtschaftsverhältnisse von Löwenzahnpflanzen in einer Mähwiese, kommen moderne molekularbiologische Techniken zusammen mit Methoden aus den Geowissenschaften, beispielsweise der Geopositionierung (GPS) und der geografischen Informationssysteme (GIS), ins Spiel. Auch die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Arten wird immer wichtiger: Von der direkten geduldigen Beobachtung von

- ◀ Die faszinierende und dynamische Vielfalt von a) Genen, b) Arten, c) Lebensgemeinschaften und d) Ökosystemen bildet unsere Lebensgrundlage. Bilder: a) Fotolia © Vit Kovalcik, b) Fotolia © Martina Marschall, c) Fotolia © Gennadiy Poznyakov, d) Fotolia © Jeanette Dietl.

4 | Biologische Vielfalt entdecken

Blütenbesuchern zur Aufklärung der Vernetzung von Pflanzenarten mit ihren Bestäubern, über indirekte Methoden wie etwa der Untersuchung des Mageninhalts von Vögeln oder auch der ungeheuren Vielfalt der Bodenorganismen zur Aufklärung von Nahrungsnetzen, bis hin zu molekularbiologischen Methoden bei der Untersuchung von parasitischen und symbiontischen Organismen, die Wirtsorganismen besiedeln.

Oft sind es nicht allein hochwissenschaftliche Methoden, die neue Einsichten eröffnen, Biodiversitätsforschung braucht auch immer wieder begeisterte Hobbyforscher und -forscherinnen, die die Daten für breit abgestützte Langzeitstudien liefern oder die Bestimmung seltener Organismen ermöglichen, ein Thema, das unter dem Stichwort *Citizen Science* in dem Buch näher beleuchtet wird.

Neuland in der Erforschung der biologischen Vielfalt

Neuland wird an vielen Fronten der Biodiversitätsforschung betreten. Ein Beispiel ist das Zusammenspiel von meeresbiologischen Forschungsexpeditionen mit modernen Methoden bei der Aufklärung der Vielfalt planktonischer Jäger bis in große Meerestiefen. Doch man muss nicht immer sehr tief tauchen, um im Ozean Hotspots der biologischen Vielfalt aufzufinden. Ein besonders schönes Beispiel dafür sind die Flachwasserbereiche vor der Küste Namibias mit ihrer erstaunlichen Vielfalt an am Boden lebenden Tieren. Auch in den polaren Regionen wurde in jüngster Zeit Pionierarbeit im Aufspüren bisher unbekannter Organismenvielfalt und biologischer Wechselwirkungen geleistet. So erschließt sich den Forschenden im polaren Eis eine erstaunliche Vielfalt an Eisbewohnern. Gleichzeitig verändert der Rückgang des einstmals für ewig gehaltenen Eises den Bestand des Planktons in Polarmeeren, was sich wiederum auf die Nahrungsnetze und die Artenzusammensetzung durch Artenwanderungen und schlussendlich auf die Fischerei auswirkt.

Neue Methoden und unermüdlicher Forschungsdrang ermöglichen heute auch die besonders schwierige Aufklärung von Geheimnissen der Vielfalt der Mikroorganismen. Bisher war deren Entdeckung oft mit der Frage verknüpft, ob die Organismen kultivierbar sind, was ihre Identifizierung und die Untersuchung ihrer Stoffwechselleistungen erst ermöglicht. Zudem konzentrierte sich das Interesse lange vor allem auf für den Menschen besonders nützliche oder schädliche Mikroben. Eine zusätzliche Schwierigkeit ergibt sich aus der Frage, was genau bei Mikroorganismen unter einer Art zu verstehen ist – die für die Beschreibung der biologischen Vielfalt immens wichtige Definition einer Art ist bei Mikroorganismen am allerwenigsten geklärt.

Eine gewisse Sonderstellung unter den Lebewesen nehmen solche Bewohner extremer Habitats ein, die dichte Geflechte bilden, die oft aus verschiedenen Organismen bestehen. Erst neue Methoden ermöglichen hier große Fortschritte bei der Aufklärung der Vielfalt solcher biologischer Krusten und beim Verständnis ihrer Rolle als Pioniere der Besiedlung von Lebensräumen mit extremen Bedingungen.

Das Ausmaß der biologischen Vielfalt

Die spannenden Beispiele des Buches machen deutlich, wie schwierig es ist, genaue Angaben über die Artenzahlen auf der Erde zu machen. Derzeit geht man davon aus, dass etwa neun Millionen Arten auf der Erde leben, von denen aber nach wie vor knapp 90% noch unbekannt sind, also noch nicht wissenschaftlich beschrieben wurden. Je nach Schätzmethode schwanken solche Angaben aber beträchtlich zwischen insgesamt etwa zwei und 100 Millionen Arten auf der Erde (siehe hierzu auch die Kästen auf den folgenden Seiten). Die meisten Schätzungen beruhen dabei auf Hochrechnungen, die von der bekannten Diversität kleinerer Einheiten, seien es kleinere Flächen, einzelne tropische Baumarten mit ihrer speziellen Insektenvielfalt oder Wirtsarten mit ihrer hohen Anzahl von parasitischen

Methoden zur Erfassung der Artenvielfalt der Erde

Bis heute wurden etwa 1,75 Millionen Arten von Organismen beschrieben, wobei die tatsächliche Zahl beschriebener Arten wegen möglicher Doppelbeschreibung und -zählung wohl eher bei 1,2 Millionen liegt. Die am besten bekannten Gruppen sind die Säugetiere (mit 5487 derzeit beschriebenen Arten [1]) und die Landpflanzen (270.000 beschriebene Arten), am schlechtesten erforscht sind die Mikroorganismen (~10.000 beschriebene „Arten“) und die weitaus häufigste Gruppe, die Insekten (eine Million beschriebene Arten). Wie viele Arten es im Moment auf der Erde gibt, weiß niemand genau. Hochrechnungen kommen auf circa zehn Millionen Arten, so dass wir heute vielleicht gut ein Zehntel unserer „Mitbewohner“ auf der Erde kennen, vielleicht auch weniger.

Wie kommt man zu solchen Zahlen? Die Beschreibung einer Art setzt voraus, dass man ein oder mehrere Individuen davon „in der Hand“ hat, ihre äußere Gestalt, ihre innere Struktur, ihre Lebens- und Fortpflanzungsweise, ihr Vorkommen und ihren Lebensraum nach wissenschaftlichen Methoden untersuchen und die entsprechenden Daten in Datenbanken sowie die beschriebenen Exemplare in geeigneten Sammlungen deponieren kann. Heute kommt in vielen Fällen noch ein genetischer Fingerabdruck (Abb. 1) dazu, der meist aus einer charakteristischen und unter allen Arten einzigartigen DNA-Sequenz besteht. Im Prinzip lässt sich eine solche Artbeschreibung vom mikroskopisch kleinen Einzeller bis zum Elefanten durchführen, teilweise sogar an fossilem Material längst ausgestorbener Arten. Schwierig wird es aber bei Mikroorganismen, von denen

man die meisten nicht in Reinkultur im Labor halten kann, so dass nicht genug Untersuchungsmaterial verfügbar ist.

Auf die oben beschriebene Weise werden zurzeit etwa 15.000 Arten jährlich neu beschrieben. Für die geschätzte Artenzahl der Erde bräuchte man bei diesem Tempo noch etwa 400 bis 500 Jahre. Doch wie schätzt man überhaupt die gesamte Artenzahl auf der Erde? Zunächst gab es Schätzungen der Experten für einzelne Tier- und Pflanzengruppen. Ein Beispiel: Hawksworth [2] ging vom Erfahrungswert aus, dass auf eine höhere Pflanzenart etwa sechs spezialisierte Pilzarten kommen (meist Pathogene, aber auch Mykorrhiza). Bei 270.000 Pflanzenarten ergibt dies bereits eine Hochrechnung von 1,6 Millionen pflanzenassoziierten Pilzarten. Addiert man die publizierten stark unterschiedlichen Schätzungen für alle einzelnen Organismengruppen, so würde die Zahl der Arten zwischen zwei und 100 Millionen liegen. Aufgrund dieser Ungenauigkeit sind die Schätzungen nicht sonderlich hilfreich und können nicht einmal als grobe Anhaltspunkte dienen. Einen anderen Ansatz der Hochrechnung verfolgten deshalb Mora und Mitarbeitende [3], die zunächst die definitiv bekannten 1,2 Millionen Arten ihren jeweiligen höheren hierarchischen Einheiten im Stammbaum des Lebens zuordneten und daraus Muster der hierarchischen Artenverteilung errechneten, die sie für alle Gruppen extrapolieren konnten. Danach kamen sie (ohne Mikroorganismen) auf die bisher wohl genaueste Schätzung von insgesamt 8,7 Millionen Arten, von denen etwa ein Viertel im Meer lebt.

Arten ausgehen. Weiterhin schätzt man, dass drei Viertel dieser Arten an Land oder im Süßwasser leben und ein Viertel in den Ozeanen.

Die Entstehung der biologischen Vielfalt

Die Frage nach dem Ausmaß der Vielfalt wirft gleichzeitig die Frage nach ihrer Entstehung auf, eine faszinierende Frage, der in mehreren Kapiteln nachgegangen wird. So lernen wir viel über Evolution anhand spannender Erkenntnisse über Enziane, Bromelien, Strahlenfische und Korallen. Neue Einsichten über die verschiedenen Prozesse, die zur Evolution neuer Arten führen, und zu ihrem Zusammenspiel werden anschaulich und aus unterschiedlichen Blickwinkeln auf-

gezeigt. Sie vermitteln sowohl die Faszination der Vielfalt an sich als auch die Faszination der Forschung, die zu ihrem Verständnis führt, wie beispielsweise der „Molekularen Uhr“ (siehe Kasten auf S. 8). Und sie illustrieren die zentrale Bedeutung der Evolution für das Verständnis biologischer Vielfalt und die Rolle hoher genetischer Vielfalt als unabdingbare Voraussetzung zur Anpassung an eine sich verändernde Umwelt.

Die funktionelle Bedeutung der biologischen Vielfalt

Welche Funktion hat biologische Vielfalt? Was ändert sich dadurch, dass die biologische Vielfalt

Methoden zur Erfassung der Artenvielfalt eines Gebiets

Zur Erhebung der Artenzahl in einem Lebensraum kommen verschiedene Methoden zum Einsatz, von hochmodernen biochemischen oder physikalischen Verfahren bis hin zum für viele Organismen bewährten Bestimmen von Arten aufgrund morphologischer Merkmale. Eine mehr und mehr eingesetzte moderne Methode ist das DNA-Barcoding, das mit Hilfe der Molekularbiologie unterschiedliche DNA-Sequenzen etwa in einer Boden- oder Wasserprobe oder auch im Magen eines räuberischen Tiers aufspürt und durch Vergleich dieser Gen-Abschnitte mit in Datenbanken gespeicherten Sequenzen verschiedener Organismen (den so genannten „Barcodes“, in Anlehnung an die vom Supermarkt her bekannten Warenkennzeichnungen) zu einer Aussage kommt, welche und wie viele Organismen in dieser Probe mindestens vorhanden sind.

Im Jahr 2011 gab es bereits etwa 2,7 Millionen Barcodes, die zum Vergleich zur Verfügung stehen (Abb. 1). Da die Ermittlung der Barcodes mittlerweile automatisiert erfolgen kann, können in kurzer Zeit sehr große Zahlen von Proben und Sequenzen untersucht werden. Sogar extrem ambitionierte Projekte, wie die vom Molekularbiologie-Pionier Craig Venter angeregte stichprobenartige „Sequenzierung des Atlantiks“, müssen keine Utopie mehr bleiben.

Für spezielle Fragestellungen kann man auch akustische oder Fernerkundungsmethoden heranziehen. Mit Hilfe spezieller Empfänger kann man Rufe von Tieren als Tonfolgen in bestimmten Frequenzbereichen aufzeichnen und damit zum Beispiel feststellen, wie viele Fledermausarten nachts in einem Wald auf Jagd gehen. Ähnliches gilt für diejenigen Insekten, Frösche oder

Meerestiere, die durch Schall kommunizieren. Heute gibt es in den großen naturkundlichen Museen bereits ausgedehnte Schallarchive der Rufe verschiedener Tierarten. Auch bildgebende Verfahren bieten neue Möglichkeiten der Arterfassung. So lassen sich Baum- oder größere Straucharten, von denen man das Spektrum des von den Blättern reflektierten Lichts kennt, durch Luft- oder Satellitenbilder ermitteln. Damit lässt sich errechnen, wie viele Baumarten auf einer Fläche stehen. Solche Verfahren sind zudem sehr hilfreich, wenn es darum geht, Änderungen der Vegetation im Verlauf der Zeit zu erkennen.

Obwohl prinzipiell gleich, unterscheiden sich Untersuchungen der Vielfalt im Meer, im Süßwasser, auf dem Land oder in der Luft in der Art und Weise, wie Proben erhoben werden. Die Felderhebung, sei es zur direkten Bestimmung von Arten oder zur Sammlung von Proben zu deren weiterer Untersuchung, stellt dabei bei allem technischen Fortschritt oft den geschwindigkeits- und qualitätsbestimmenden Schritt in der Erhebung der Artenvielfalt dar (Abb. 2).

Zur Abschätzung der Vollständigkeit von Artenzahlen eines Untersuchungsgebietes sind statistisch fundierte, räumlich und zeitlich richtig geplante Stichprobenerhebungen und Auswertungen von besonderer Bedeutung. In jüngster Zeit wurden auch auf diesem Gebiet wichtige Fortschritte erzielt, die es erlauben, zunehmend verlässlichere vergleichende Aussagen über die Artenvielfalt verschiedener Lebensräume und über die zeitliche Veränderung der Artenvielfalt wiederholt untersuchter Gebiete zu machen.

durch menschlichen Einfluss so stark zurückgeht? Diesen wichtigen Fragen wendet sich ein weiterer Teil des Buches zu. Es ist interessant, dass die Biodiversitätsforschung biologische Vielfalt lange Zeit vor allem als Zielgröße angesehen hat, deren Veränderung unter natürlichen und anthropogenen Einflüssen verstanden werden muss. Erst in jüngster Zeit stellt man auch die spannende und wissenschaftlich wie gesellschaftlich wichtige Frage, ob Vielfalt an sich auch eine Funktion haben kann. Dabei gibt es viele Beispiele aus anderen Gebieten, die deutlich darauf hinweisen, dass höhere Vielfalt günstig sein kann. Bereits Adam Smith erkannte in seinem Werk „The Wealth of Nations“ von 1776 die Be-

deutung der Arbeitsteilung: Verschiedene spezialisierte Akteure erzielen eine höhere Gesamtleistung als einzelne, die alles können müssen. In Analogie dazu kann man vermuten, dass diversere Artengemeinschaften besser funktionieren als artenärmere. Aus der Landwirtschaft gibt es tatsächlich dramatische Beispiele: Monokulturen der Kartoffel in Irland führten zur Ausbreitung des Kartoffelfäulepilzes, was vor allem in den 1840er Jahren fast die ganze Ernte vernichtete. Die nachfolgende Hungersnot und die Auswanderungswelle in die USA machen auf drastische Art deutlich, dass Konsequenzen verringerter biologischer Vielfalt von enormer gesellschaftlicher Bedeutung sein können. Aus der

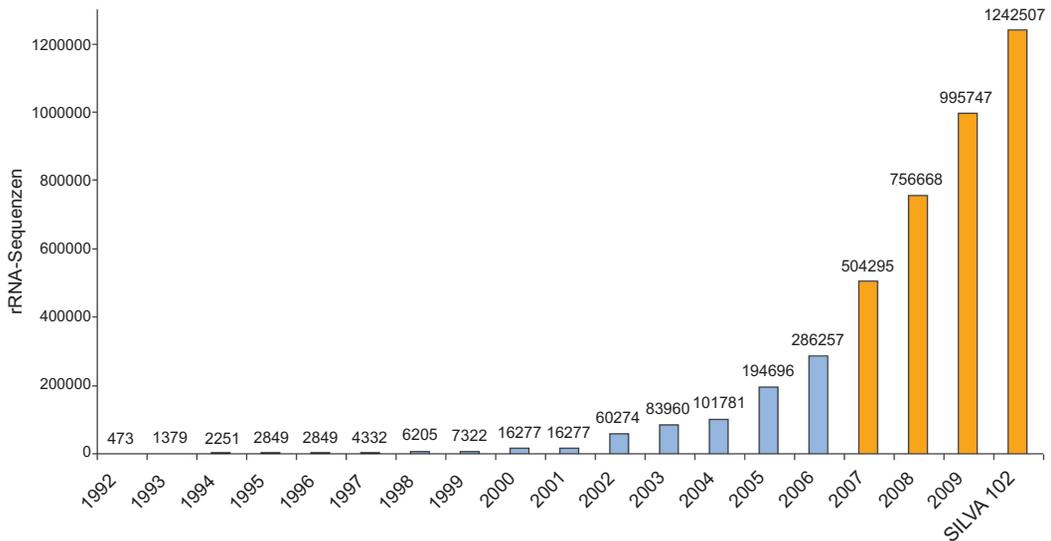


Abb. 1 Das DNA-Barcoding: Die zunehmende Zahl bekannter Sequenzen des Erbguts (hier: ribosomaler Ribonukleinsäurefragmente) von verschiedenen Organismen ermöglicht eine leichtere Zuordnung, welche und wie viele Organismen in einer Probe enthalten sind. Im Jahr 2010 waren 1,2 Millionen Sequenzen analysiert und beispielsweise in der Silva-Datenbank abgelegt. Mehr Informationen unter www.arb-silva.de.

Populationsgenetik ist schon lange bekannt, dass höhere Inzuchtgrade, also eine geringere genetische Vielfalt, zu verringertem Wachstum und Überleben der Nachkommen von Pflanzen und Tieren führen. In der ökologischen Biodiversitätsforschung haben experimentelle Untersuchungen gezeigt, dass Gemeinschaften mit mehr Arten in vieler Hinsicht besser funktionieren als solche mit weniger Arten. Experimente bieten den Vorteil, dass man die Rahmenbedingungen kontrollieren kann, so dass mittlerweile zweifelsfrei nachgewiesen werden konnte, dass eine Verringerung der Artenvielfalt einen Funktionsverlust nach sich zieht.

Eine wichtige ökologische Funktion ist die Stabilität von Artengemeinschaften im Verlauf der Zeit. Intuitiv setzen wir häufig eine hohe Stabilität voraus, etwa bei der Planung landwirtschaftlicher Erträge oder in der Einrichtung von Naturschutzgebieten. Im Zusammenhang mit Umweltveränderungen wird mehr und mehr auch die Aktualität der Frage deutlich, ob vielfältigere

Ökosysteme nach Störungen, etwa durch Überschwemmungen, Trockenheit oder Insekten-„plagen“, erholungsfähiger sind, also besser imstande, rascher wieder in den Ausgangszustand zurückzukehren, als weniger vielfältige System dies sind. Ein sehr interessantes Buchkapitel widmet sich der Frage, inwieweit solche zeitliche Stabilität und Erholungsfähigkeit von Artengemeinschaften mit dem Ausmaß der Vielfalt zusammenhängt. Das Kapitel belegt darüber hinaus auch den Wert konstruktiver Zusammenarbeit zwischen theoretischer und empirischer Forschung.

Die sich grundsätzlich abzeichnenden Zusammenhänge höherer Vielfalt mit besserer Funktion stellen sich in verschiedenen ökologischen Zusammenhängen auch unterschiedlich dar. Anhand ausgewählter Beispiele aus dem aquatischen und terrestrischen Bereich wird deshalb die Rolle der biologischen Vielfalt für die Aufrechterhaltung und das Funktionieren solcher Ökosysteme, gerade auch im Hinblick auf



Abb. 2 Das Aufsuchen schwer zugänglicher Lebensräume (hier: Baumkronen in Ecuador) ist für die Bestimmung der Artenvielfalt oft der geschwindigkeits- und qualitätsbestimmende Schritt. Bild: J. Bendix, Marburg.

den globalen Wandel, dargestellt. In einem eigenen Kapitel über die faszinierende Vielfalt von speziellen Bestäubungssystemen, nämlich solchen, bei denen Pflanzenarten ihren Blütenbesuchern Öle – und nicht nur Pollen oder Nektar – anbieten, wird die funktionelle Bedeutung der Biodiversität auch in der Vielfalt der Wechselwirkungen zwischen Organismen anschaulich sichtbar.

Nutzung der biologischen Vielfalt

Die im Allgemeinen bessere ökologische Funktionsfähigkeit vielfältiger Artengemeinschaften und Ökosysteme bringt sehr interessante Anwendungsmöglichkeiten mit sich: So befasst sich dieses Buch exemplarisch mit der Wechselwirkung zwischen landwirtschaftlicher Nutzung und biologischer Vielfalt sowie damit, welche

Die molekulare Uhr

Mutationen verändern im Lauf der Generationen die Sequenz der Basenpaare eines Genoms. Je nach untersuchtem Genomabschnitt verläuft diese Veränderung schneller oder langsamer, für manche Abschnitte so langsam, dass in vielen Tausenden von Jahren nur wenige Basenpaare ersetzt werden. Je länger der Zeitraum der Evolution, desto mehr Basenpaare unterscheiden also Nachkommen von der Ahnengeneration – und das ist das Prinzip der molekularen Uhr. Über alle Organismengruppen und Genome hinweg dürfte eine Mutationsrate um 0,7% pro einer Million Jahre realistisch sein.

Mit Hilfe absolut bekannter Zeitpunkte, oft aus der Altersbestimmung von fossilen Ahnen heute lebender Artengruppen, lässt sich die molekulare Uhr eichen, d.h. lässt sich angeben, wie viele Basenpaare sich in welchem Zeitraum verändern. Vergleicht man zwei Arten, so kann man die Anzahl unterschiedlicher Basenpaare bestimmen. Diese Zahl ermöglicht dann, den ungefähren Zeitpunkt zu bestimmen, an dem die beiden Arten den letzten gemeinsamen Vorfahren hatten.

Neben dem Alter von Arten, Gattungen, Familien und Stämmen ist auch der Zeitpunkt interessant, an dem im Lauf der Evolution Arten mit bestimmten Neuerungen erstmals auftraten, wie etwa die Zwitterblüten bei den Pflanzen und die damit eng verknüpfte große Vielfalt bestäubender Insekten. Die Altersbestimmung mit Hilfe einer molekularen Uhr ergab beispielsweise, dass die Evolution der großen Bestäuber Vielfalt auf die Evolution der Blütenpflanzen vor rund 130 Millionen Jahren folgte.

Rolle die Vielfalt bei der Renaturierung von Lebensräumen spielt. Bei der Landnutzung stellt sich die Frage, wie Schutz und Förderung biologischer Vielfalt am besten mit der angestrebten landwirtschaftlichen Produktion vereinbart werden können. Bei der Renaturierung ist die Hauptfrage, wie sich die positiven Konsequenzen hoher biologischer Vielfalt bei der Aufwertung degradiertes und biologisch verarmtes Lebensräume praktisch effizient einsetzen lassen.

Rückgang der biologischen Vielfalt, Gegenmaßnahmen und Handlungsmöglichkeiten

Land-, Wald- und Wasserwirtschaft, Fischerei, Verkehr, Bau, Energiegewinnung, Industrie,

Dienstleistungs- und Freizeitaktivitäten, alle nutzen und verändern den Raum und wirken sich dadurch auf die biologische Vielfalt aus. Im dicht besiedelten Mitteleuropa ist die sich ergebende Biodiversität deshalb im Wesentlichen ein Nebenprodukt der gesellschaftlichen Aktivitäten – und genau aus diesem Grund in den vergangenen Jahrzehnten stark abnehmend und ständig weiter unter Druck.

Angesichts des Artenrückgangs beleuchtet der abschließende Teil dieses Buchs verschiedene Handlungsmöglichkeiten. Zunächst werden invasive Organismen thematisiert, die als Konsequenz des zunehmenden internationalen Handels und Transports, von Habitatveränderungen und des Klimawandels ihr Verbreitungsgebiet immer stärker ausweiten und die sehr große Effekte auf einheimische Arten und Ökosysteme und damit auch auf für den Menschen wichtige Ökosystemleistungen haben können.

Am Beispiel der deutschen Meeresküsten wird dann die Frage nach Indikatoren gestellt, die als wichtige Hilfsmittel für die Bewertung von Lebensgemeinschaften im Sinne des Naturschutzes dienen könnten. Die Frage geeigneter Indikatoren wird hier am spannenden Beispiel der Diversität der marinen Bodenfauna in der Ostsee und ihrer funktionellen Bedeutung diskutiert.

Angesichts der großen Rolle der Raumnutzung und -planung für die biologische Vielfalt widmet sich ein sehr wichtiges Kapitel den Handlungsmöglichkeiten, die sich der Raumplanung zum Erhalt und zur Förderung der biologischen Vielfalt bieten.

Schließlich wird die aktuelle Biodiversitätsforschung in einen Bezug zum politischen Handeln in Deutschland gestellt. Dies beinhaltet eine Zusammenstellung der wichtigen internationalen Konventionen und Vereinbarungen und der Möglichkeiten, Maßnahmen und Hürden ihrer nationalen Umsetzung.

Vielfalt fasziniert

Dieses Buch spannt einen Bogen, der die Faszination, die Entstehung, die funktionelle Bedeutung und den Wert der biologischen Vielfalt veranschaulicht und ihre Gefährdung, ihren Rückgang und die Handlungsmöglichkeiten für ihren Schutz aufzeigt. Gleichzeitig wird das faszinierende Feld der Biodiversitätsforschung greifbar und es wird deutlich, wie aktiv deutsche Forschende in diesem zukunftsweisenden Gebiet sind.

Literatur

- [1] Schipper, J., Chanson, J.S., Chiozza, F., Cox, A.N., Hoffmann, M., Katariya, V., Lamoreux, J., Rodrigues, A.S.L., Stuart, S.N., Temple, H.J. et al. (2008) The status of the world's land and marine mammals: Diversity, threat, and knowledge. *Science*, **322**, 225–230.
- [2] Hawksworth, D.L. (1991) The fungal dimension of biodiversity: Magnitude, significance and conservation. *Mycological Research*, **95**, 641–655.
- [3] Mora, C., Tittensor, D.P., Adl, S., Simpson, A.G.B., Worm, B. (2011) How many species are there on earth and in the ocean? *PLoS Biology*, **9**, 1–8.



2

Die Bedeutung ehrenamtlicher Forschung:

Citizen Science – ohne Liebhaber geht es nicht

Christian Anton

Die Biodiversitätsforschung hat in Deutschland einen neuen Stellenwert erlangt. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gehen viel offensiver mit ihren Forschungsergebnissen an die Öffentlichkeit. Manche Forscher öffnen ihre Projekte sogar und lassen Bürgerinnen und Bürger mitforschen. Dieses Kapitel zeigt, welchen Beitrag Freizeitforscher im Bereich der Biodiversitätsforschung heute leisten und warum die Erforschung des Klimawandels die Bedeutung der Hobbyforschung noch vergrößern wird.

Hobbyforschung ist kein neues Phänomen. Lange bevor sich die Naturwissenschaften an den Universitäten etablierten, erforschten Menschen in ihrer Freizeit die biologische Vielfalt. Ihr berühmtester Vertreter ist Charles Darwin. Er segelte als unbezahltes Besatzungsmitglied über die Weltmeere und machte auf seinen Landgängen die Beobachtungen, die ihn schließlich nach langem Zögern dazu brachten, seine Vorstellung von der Evolution der Arten niederzuschreiben. Die private Forschung in der freien Zeit oder auf eigene Kosten war jedoch lange eine Beschäfti-

gung Privilegierter. Heute ist „Citizen Science“ eine Aktivität, die zumindest in den entwickelten Ländern beinahe jedem offensteht. In den vergangenen Jahrzehnten standen dabei die Kartierung von Tier- und Pflanzenarten und das Monitoring von Beständen im Vordergrund.

Die so genannten Roten Listen mit Übersichten zum Zustand gefährdeter Tier- und Pflanzenarten basieren auf dem Engagement tausender Laien-Naturkundler, die viel von ihrer Freizeit in der Natur verbringen. Ein Großteil des Materials der Naturkundemuseen stammt aus privaten Sammlungen, die den Museen überlassen wurden. Unser naturkundliches Wissen wäre heute deutlich geringer ohne die Menschen, die neben ihrer Erwerbstätigkeit in ihrer Freizeit als Käferspezialist die Museen unterstützen, als Ornithologe die Bestandsentwicklung von Vögeln überwachen oder in naturkundlichen Vereinen die lokale Flora erfassen.

Die Bürgerforschung hat ihre längste Tradition vermutlich in der Botanik. Die Regensburger Botanische Gesellschaft erforscht seit 1790 die lokale Flora. Im Bereich der Ornithologie ist das möglicherweise älteste Projekt dieser Art der *Christmas Bird Count* in den USA: Seit dem Jahr 1900 werden dort über die Weihnachtsfeiertage Jahr für Jahr die Vogel-Bestände erfasst. Auch in Deutschland haben die Vogelkundler Pionierarbeit geleistet. Der Dachverband Deutscher Avi-

- ◀ Im Darwin-Jubiläumsjahr 2009 stand die Schwarzmündige Bänderschnecke (*Cepaea nemoralis*) im Zentrum eines europaweiten Citizen Science-Projektes. Ziel des *Evolution MegaLab* war es, mit möglichst vielen Beobachtungen zu verstehen, ob sich die Bänderschnecken an den Klimawandel angepasst haben. Bild: Al Greer.

12 | *Biologische Vielfalt entdecken*

faunisten koordiniert seit den 1960er Jahren ein regelmäßiges Vogel-Monitoring und hat wertvolle Erkenntnisse zu Verbreitung, Bestandsentwicklung und Vogelzug gesammelt.

Auch Wissenschaftler haben inzwischen entdeckt, dass für sie manch eine Fragestellung ohne die Hilfe von Amateuren nicht beantwortet werden kann. Die Hobbyforscher nehmen sich dafür Zeit, was vielen Wissenschaftlern heute nicht mehr möglich ist. Mit guten Ideen und passenden Methoden lassen sich so Untersuchungen realisieren, die von Forschungsprojekten aus Mangel an Mitteln und Mitarbeitern nicht umzusetzen wären. Dies betrifft insbesondere Untersuchungen zu den Folgen des Klimawandels für die Tier- und Pflanzenwelt. Kartierungen, Zählungen und detaillierte biologische Erfassungen sind zeitaufwändig und teuer. Daher sind beinahe alle Projekte, die über große geografische

Räume Daten zum Zustand der Tier- und Pflanzenwelt erheben, auf die Teilnahme von Hobbyforschern angewiesen. Die Qualität der Erhebungen von Hobbyforschern ist dabei nicht schlechter als die von bezahlten Experten [1].

Was müssen erfolgreiche Projekte leisten?

Insbesondere in der Ökologie bietet die aktive Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern einmalige Chancen. Durch internationale Citizen Science-Projekte wird es möglich, die Ebene lokaler Untersuchungen zu verlassen und stattdessen gleich das ganze Verbreitungsgebiet einer Art zu untersuchen. Die Ziele, Teilnehmer und Methoden von Citizen Science-Projekten sind sehr unterschiedlich (siehe Tab. 1). Trotzdem lassen sich allgemeine Kriterien aufstellen, die für das Gelingen entscheidend sind [2]:

Tab. 1 Citizen Science-Projekte zur Erfassung der biologischen Vielfalt

Name	Was wird erfasst?	Internet
Projekte in Deutschland		
Tagfalter-Monitoring Deutschland	Schmetterlinge	www.tagfalter-monitoring.de
Science4You	Wandernde Schmetterlinge; viele weitere Tier- und Pflanzenarten	www.science4you.de
Stunde der Gartenvögel	Singvögel	www.nabu.de
Stunde der Wintervögel	Singvögel	www.nabu.de
Laternentanz	Glühwürmchen	www.laternentanz.org
Naturgucker	Pflanzen- und Tierarten	www.naturgucker.de
Naturbeobachtung	Pflanzen- und Tierarten	www.naturbeobachtung.de
Internationale Projekte		
Evolution MegaLab	Bänderschnecken	www.evolutionmegalab.org
Garlic Mustard Field Survey	Evolution und Ausbreitung der Knoblauchsrauke	www.garlicmustard.org
Spring Alive Meldung von Frühlingsboten	Rauchschwalbe, Weißstorch, Mauersegler, Kuckuck, Bienenfresser	www.springalive.net
What's invasive!	Invasive Tier- und Pflanzenarten	www.whatsinvasive.com
Project Budburst	Phänologie von Tieren und Pflanzen	www.neoninc.org/budburst/

- Am Beginn des Projektes sollte eine Frage stehen, deren Beantwortung realistisch erscheint.
- Die Methoden zum Sammeln der Daten müssen simpel, standardisiert und verständlich sein.
- Die Qualität der gewonnenen Daten muss gesichert sein.
- Das Projekt sollte auch mit Wissensvermittlung gekoppelt sein.
- Die Teilnehmer sollten Zugriff auf die Daten erhalten.
- Alle Teilnehmer und die Öffentlichkeit sollten über die Ergebnisse informiert werden.
- Eine ansprechende Website und Apps machen Citizen Science-Projekte attraktiver.

Die Teilnehmer von Citizen Science-Projekten müssen als gleichwertige Partner verstanden werden und Wissenschaft und Laien sollten gleichermaßen von der Zusammenarbeit profitieren. Daten, die in den Archiven von Naturschutz-Organisationen oder Universitäten verschwinden, motivieren nicht zu einer erneuten Teilnahme. Im Folgenden werden zwei erfolgreiche Citizen Science-Projekte vorgestellt.

Evolution MegaLab: Bürger erforschen Schnecken und Klimaveränderungen

Das Jahr 2009 stand ganz im Zeichen des Wissenschaftlers, der das Selbstbild des Menschen in seinen Grundfesten erschüttert hat: Charles Darwin. Im Jahr 2009 konnte neben dem 200. Geburtstag von Darwin auch der 150. Geburtstag seines Hauptwerkes „On the origin of species by the means of natural selection“ gefeiert werden. Was lag also näher, als in dem Doppel-Jubiläumjahr Bürgerinnen und Bürger in einem Citizen Science-Projekt die Evolution erforschen zu lassen? Im Zentrum des europaweiten Projektes *Evolution MegaLab* stand dabei die Schwarzmündige Bänderschnecke (*Cepaea nemoralis*). Anhand dieser in Europa häufigen Schneckenart wollten die Forscher folgende Frage beantworten: Haben sich die Bänderschnecken an den Klimawandel in Mitteleuropa angepasst?

Bänderschnecken reagieren empfindlich auf die sie umgebenden Temperaturen. Sie tragen gelb, rot oder braun gefärbte Häuschen auf ihrem Rücken. Diese wärmen sich je nach Farbe unterschiedlich stark auf. Während braune Gehäuse die Sonnenwärme aufnehmen, strahlen gelbe Gehäuse mehr davon ab. Die Tiere tragen sozusagen ihre eigene Klimaanlage auf dem Rücken. Diese theoretische Anpassungsmöglichkeit veranlasste die Wissenschaftler zu der Vermutung, dass aufgrund der Klimaerwärmung heute in Mitteleuropa mehr Schnecken mit gelben Häuschen zu finden sein sollten als noch vor wenigen Jahrzehnten. Die große innerartliche Vielfalt ermöglicht den Bänderschnecken die Besiedelung ganz unterschiedlicher Lebensräume: von sonnenbeschienenen Dünen, in denen Tiere mit gelbem Gehäuse dominieren, bis hin zu

Schnecken zählen: Teilnehmer gesucht!

Das *Evolution MegaLab* (www.evolutionmegalab.org) sucht weiterhin Interessierte, die in Garten, Park oder im Wald Bänderschnecken zählen. Die Teilnahme ist ganz einfach:

Informieren Sie sich auf der Projektseite www.evolutionmegalab.org über Bänderschnecken und warum der Klimawandel und veränderte Umweltbedingungen möglicherweise zu evolutionären Veränderungen bei Bänderschnecken führen. Laden Sie sich hierzu die Infoblätter und Erfassungsbögen herunter.

Suchen Sie auf einer Fläche (Garten, Park, Straßenrand oder Wald) von 30 × 30 Metern nach Bänderschnecken. Notieren Sie auf dem Erfassungsbogen, wie viele gelbe, rote und braune Gehäuse Sie gefunden haben und welche Bänderung die Gehäuse haben (ein Band, mehrere Bänder oder kein Band). Tragen Sie ein, um welchen Lebensraum es sich bei Ihrer Fläche handelt (Wald oder Unterholz, Hecke, Wiese, Düne).

Gehen Sie nun auf die Projektseite www.evolutionmegalab.org und legen Sie dort einen Datensatz mit Name, Funddatum und dem Fundort an. Den genauen Fundort übermitteln Sie bequem per Mausclick in eine Google-Karte. Tragen Sie die Häufigkeiten der einzelnen Schneckenhaus-Varianten in der Eingabemaske ein. Nach dem Abschluss der Dateneingabe erscheint sofort eine grafische Darstellung Ihrer Bänderschnecken-Erfassung auf einer Karte. Alle Daten können auch heruntergeladen werden.



Abb. 1 Gehäusevielfalt der Schwarz-
mündigen Bänderschnecken
(*C. nemoralis*).
Bild: Christian Anton.

schattigen Waldrändern, in denen eher solche mit rotem oder braunem Gehäuse zu finden sind.

Im Darwin-Jubiläumsjahr waren alle Natur-Interessierten dazu eingeladen, in ihrer lokalen Umgebung eine selbst gewählte Fläche nach Bänderschnecken abzusuchen und die Zahl, Farbe und Bänderungsvarianten der Schneckengehäuse zu erfassen (siehe Kasten und Abb. 1). Ergänzend sollten die Teilnehmer die Fläche einem Lebensraum-Typ zuordnen. Mit Hilfe von *Google Maps* konnten diese Daten auf der Projektseite bequem in die Datenbank eingegeben werden. Durch die europaweite Beteiligung entstand auf diese Weise ein virtuelles Labor der Evolution – das *Evolution MegaLab*.

Das *Evolution MegaLab* erlebte in der Pilotphase im Jahr 2009 einen enormen Zulauf. Europa-weit registrierten sich mehr als 6500 Nutzer und gaben online mehr als 7600 Datensätze in die Datenbank ein. In Deutschland meldeten sich mehr als 1800 Personen an und steuerten nach den Teilnehmerinnen und Teilnehmern in England den zweitgrößten Datensatz bei.

Europaweite evolutionäre Veränderungen

Die Ergebnisse der Hobbyforscherinnen und Hobbyforscher aus dem *Evolution MegaLab* zei-

gen eindrucksvoll, dass sich die Bänderschnecken lokal anpassen [3]; In kühleren Lebensräumen leben vorwiegend Schnecken mit dunklem Gehäuse, in offenen und warmen Lebensräumen haben Tiere mit hellem Gehäuse einen höheren Fortpflanzungserfolg und sind damit am häufigsten. Die zentrale Frage des *Evolution MegaLab* war jedoch, ob durch den Klimawandel heute in Mitteleuropa insgesamt die Zahl der Bänderschnecken mit hellem Gehäuse zugenommen hat. Hierzu wurden die von den Bürgerinnen und Bürgern im Jahr 2009 gesammelten Informationen über die Bänderschnecken mit historischen Daten verglichen. Die Hypothese des *Evolution MegaLab* konnte nur in einem Lebensraum bestätigt werden. In Dünen hat der Anteil der gelben Gehäuse zugenommen. In den übrigen Lebensräumen haben sich die Tiere möglicherweise durch ein verändertes Verhalten an die Temperaturerhöhung angepasst. Denkbar ist, dass die Tiere ihre Aktivität in andere Tageszeiten verlagern. In den sonnenexponierten Dünen besteht jedoch keine Möglichkeit, bei zu hohen Temperaturen in den Schatten auszuweichen. Hier haben Tiere mit hellem Gehäuse (einem hohem Albedo-Effekt) offenbar einen Fitnessvorteil.

Ein Vergleich der Daten aus dem Darwin-Jubiläumsjahr brachte noch ein anderes überras-

sches Ergebnis zutage. Bei der Musterung der Gehäuse (der Bänderung, siehe Abb. 1) ist offenbar eine schleichende Veränderung im Gange. Neben den drei Grundfarben gibt es bei der Bänderung unzählige Varianten. Die gängigen Varianten sind: ohne Band, ein Band, drei Bänder oder fünf Bänder. Allgemein geht man davon aus, dass die Bänder der Tarnung dienen. Britische Wissenschaftler konnten zeigen, dass die gebänderten Gehäuse für Fressfeinde wie die Singdrossel schwerer zu entdecken sind als die ungebänderten Schneckenhäuser. Der Vergleich der Daten aus dem *Evolution MegaLab* mit Daten aus dem vergangenen Jahrhundert zeigt, dass eine Variante dabei ist, andere zu verdrängen: Tiere mit einem Mittelband haben in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen [3]. Über die Gründe können die Forscher derzeit nur Mutmaßungen anstellen. Es wird vermutet, dass die Lebensräume oder der Selektionsdruck durch die Fressfeinde sich verändert haben. Leider war es nicht möglich, die europaweit verfügbaren Daten zu Vorkommen und Häufigkeit der Singdrossel mit dem Vorkommen der Bänderschnecken in Beziehung zu setzen. Es zeigte sich, dass die Erfassungsmethoden zur Kartierung der Singdrossel zu verschieden sind und keine europaweite Auswertung erlauben.

Da Bänderschnecken häufig sind, in unmittelbarer Nachbarschaft zum Menschen leben und die entscheidenden Merkmale leicht erkennbar sind, eignet sich dieses „Modellsystem“ auch bestens für den Schulunterricht außerhalb des Klassenraums. Das Buch „Evolution biologie – Moderne Themen für den Unterricht“ [4] bietet vertiefende Informationen und Material für den Unterricht.

Tagfalter-Monitoring Deutschland

Für die langfristige Bestandsaufnahme, das so genannte Monitoring der Tier- und Pflanzenwelt, bekommen Forscherinnen und Forscher nur selten Mittel [5]. Die Erfassung der biologischen Vielfalt wird von den Forschungsförde-

rungs-Institutionen nicht als ein Selbstzweck angesehen. Selbst wenn entsprechende Förderträge eine klare Fragestellung als Ausgangspunkt hätten, würden sie wohl aufgrund ihres Zeitbedarfs abgelehnt werden. Wissenschaftliche Einzelprojekte haben heutzutage eine Dauer von maximal drei bis fünf Jahren. Innerhalb einer solch kurzen Zeitspanne lassen sich jedoch die Bestandstrends von Populationen nicht mit wissenschaftlichen Methoden untersuchen.

Wöchentliche Schmetterlingszählung

Vor diesem Hintergrund kann das ehrenamtliche Engagement für Projekte wie das *Tagfalter-Monitoring Deutschland* (www.tagfalter-monitoring.de) nicht hoch genug eingeschätzt werden. Bei dieser „Volkszählung der Schmetterlinge“ erfassen Hobbyforscher und Entomologen deutschlandweit die lokale Vielfalt der tagaktiven Schmetterlinge. Gezählt werden einmal pro Woche alle Falter links und rechts entlang eines festgelegten Pfades. Wo ein Teilnehmer diesen auch Transekt genannten Pfad einrichtet, bleibt ihm selbst überlassen. Hauptziel des Tagfalter-Monitorings Deutschland (TMD) ist es, langfristige Bestandstrends aufzuzeigen (siehe Kasten auf der folgenden Seite). Datenreihen über mehrere Jahre hinweg geben einerseits Auskunft über die Artenvielfalt, andererseits kann mit ihnen auch ein genauer Blick auf die Entwicklung einzelner Populationen geworfen werden. Dabei geht es den Initiatoren des Projektes weniger um die besonders seltenen Arten. Interessantere Erkenntnisse erhoffen sie sich von den (noch) häufigen und eher unbeachteten Arten. Diese Arten kommen beinahe überall vor und können eventuell zeigen, ob sich die Auswirkungen von Umweltveränderungen in den verschiedenen Regionen unterscheiden. Die kombinierte Analyse der Falterhäufigkeiten mit Klima-, Landnutzungs- oder Vegetationsdaten soll in einigen Jahren eine fundierte Auskunft über mögliche Zusammenhänge geben. Gelegentlich mischen sich unter die alteingesessenen auch neue Arten. Der Kurz-

Das Tagfalter-Monitoring Deutschland auf einen Blick

Fragen, die das Tagfaltermonitoring beantworten möchte:

- Wo tritt eine Falterart wie häufig in Deutschland auf?
- Welche Lebensräume nutzen die einzelnen Arten?
- Wie entwickeln sich die Bestände der Arten?
- Dehnt eine Schmetterlingsart ihr Areal gerade aus oder geht es zurück?
- Was sind die Gründe für Bestandsveränderungen oder Arealverschiebungen?
- Wie können die Tagfalter am besten geschützt werden?

Die Aufgabe der Schmetterlingszähler:

Festlegung einer Strecke (Transekt), entlang der die Schmetterlinge gezählt werden sollen, mit Angaben zum Lebensraum. Zwischen April und September wer-

den alle Schmetterlinge entlang des Transektes wöchentlich gezählt und die Häufigkeiten der einzelnen Arten in eine Datenbank direkt auf der Website www.tagfalter-monitoring.de eingetragen.

Kontakt:

Elisabeth Kühn, Dr. Josef Settele, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Theodor-Lieser-Str. 4, 06120 Halle, Tel. 0345-5585263; elisabeth.kuehn@ufz.de

Kooperationspartner:

Naturschutzbund Deutschland, BUND, Butterfly Conservation Europe, Science4You.

schwänzige Bläuling (*Cupido argiades*), eigentlich eine wärmeliebende südliche Art, ist in den vergangenen Jahren auf vielen Transekten gesichtet worden. Das TMD konnte zeigen, dass der winzige Falter sich innerhalb von zwei bis drei Jahren von Süden kommend ausgebreitet hat. Ob er sich dauerhaft bei uns etabliert, wird erst in einigen Jahren erkennbar sein.

Masseneinwanderung des Distelfalters

Auch ein weiteres Einwanderungs-Ereignis konnte durch die ehrenamtliche Schmetterlingszählung quantifiziert werden. Der Distelfalter

(*Vanessa cardui*) ist ein Wanderfalter, der jedes Jahr in Deutschland einfliegt (Abb. 2). Die Tiere überwintern als Raupe in Nordafrika und im Mittelmeerraum. Gleich nach dem Schlüpfen machen sich die Tiere auf den weiten Weg über die Alpen nach Deutschland. Im Jahr 2009 kam es zu einer extremen Wanderbewegung in Richtung Mitteleuropa. An vielen Orten konnten ganze Schwärme von Distelfaltern bei ihrem Flug in Richtung Norden beobachtet werden. Auf der Online-Plattform *Science4You*, wo neben der Datenbank des Tagfalter-Monitorings auch das Meldeportal der Deutschen Forschungszentrale für Schmetterlingswanderungen geführt wird, liefen



Abb. 2 Der Distelfalter (*V. cardui*) wandert jedes Jahr aus dem Mittelmeerraum nach Mitteleuropa ein. Bild: Manfred Hund.

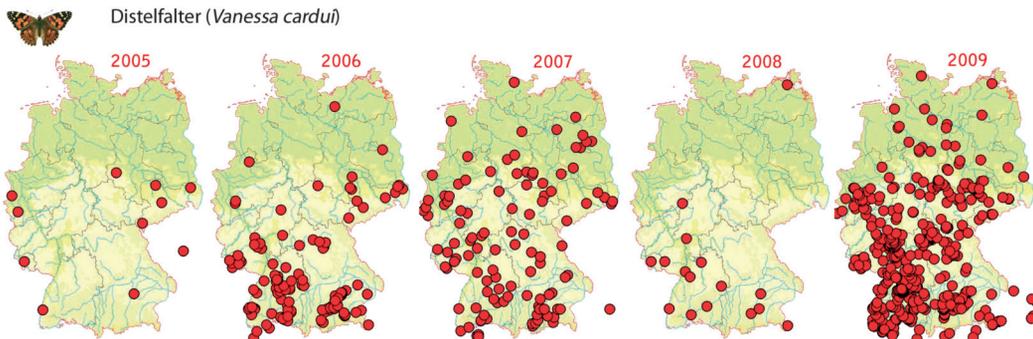


Abb. 3 Im Jahr 2009 war mit der Masseneinwanderung des Distelfalters (*V. cardui*) ein seltenes Phänomen zu beobachten. Die Abb. zeigt die Zahl der beobachteten Falter jeweils am Stichtag 20. Mai der Jahre 2005–2009. Bild: Science4You.

alle Beobachtungen zusammen. Die Abb. 3 zeigt die Distelfalterbeobachtungen im Jahresvergleich und verdeutlicht die Ausnahmeerscheinung im Jahr 2009.

Aktuell sind für das Tagfalter-Monitoring, das im Jahr 2005 gestartet wurde, circa 500 Ehrenamtliche in ganz Deutschland aktiv (siehe Abb. 4). Das Engagement der Schmetterlingsbegeisterten wird sich in einigen Jahren auszahlen. Dann werden Datensätze vorliegen, die unser Verständnis der heimischen Schmetterlingswelt deutlich verbessern und mit denen wir die Frage beantworten können, welche Konsequenzen der Klimawandel für Schmetterlinge in Deutschland haben könnte. Die Erfassungsmethoden des deutschen Tagfalter-Monitorings wurden dabei von Beginn an so konzipiert, dass eine kombinierte Auswertung mit den Monitoring-Daten anderer Länder möglich ist.

Können Monitoring-Daten Klimaveränderungen abbilden?

Ein weiteres Beispiel für den Wert ehrenamtlich erhobener Daten ist eine aktuelle Untersuchung der Populationen von Schmetterlingen und Vögeln in acht europäischen Ländern [6]. Dabei hat man sich Informationen zur Temperatur-Präferenz der Artengruppen zunutze gemacht. Jeder Art wird dabei eine bestimmte Temperatur als

Zeigerwert zugeordnet (*Species Temperature Index*). Dieser Wert spiegelt die Jahresmittel-Temperaturen des Verbreitungsgebietes wider. Wärmeliebende Arten haben einen höheren Wert. Kälteliebende Arten haben niedrigere Werte, da sie meist in nördlicheren Breiten oder in größeren Höhen vorkommen, wo es kälter ist. Wird es nun in Mitteleuropa wärmer, sollten südliche Arten nachrücken und ihr Verbreitungsgebiet nach Norden verschieben.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Vögel als auch die Schmetterlinge in ihrer Anpassung (Veränderung des Areals) nicht mit der Klimaveränderung Schritt halten können. Die Verzögerung in der Anpassung ist bei den Vögeln größer als bei den Schmetterlingen. Der Grund hierfür könnte in der Generationenzahl liegen. Falter bilden oft mehrere Generationen pro Jahr und können sich dadurch eventuell schneller anpassen.

Europaweite Verbreitungsdaten von Tier- und Pflanzenarten erlauben auch einen Blick in die Zukunft. Kombiniert mit Klimaszenarien lassen sich beispielsweise Aussagen über die mögliche Verbreitung von Arten treffen. Der Klimaatlas der Schmetterlinge Europas [7] zeigt, wie sich die Vielfalt von Schmetterlingen verändern wird, wenn die Erwärmung und die Intensität der Landnutzung so anhalten wie bisher. Ein Beispiel: Der Aurorafalter (*Anthocharis cardamines*),

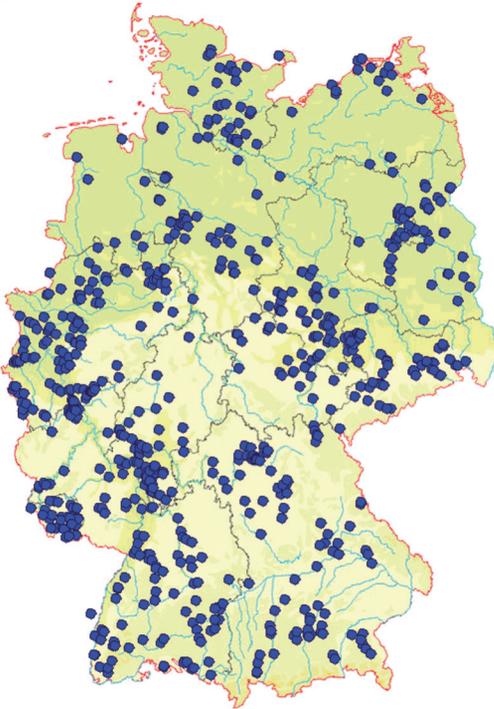


Abb. 4 Geografische Verteilung der Teilnehmer des *Tagfalter-Monitorings Deutschland*. Das Bild zeigt, dass die meisten Naturbeobachter in den Ballungsräumen zu finden sind. Der demografische Wandel wird die Erhebung der biologischen Vielfalt in manchen Regionen erschweren. Bild: Tagfalter-Monitoring Deutschland.

eine sehr häufige Art, die im Frühjahr in vielen Gärten fliegt, könnte nach den Vorhersagen der Forscher bis zum Jahr 2080 über 85% seines Lebensraums verlieren. Die Prognose für die Schmetterlinge gibt Anhaltspunkte dazu, wie auch andere Insekten reagieren dürften.

Die Zukunft der Hobbyforschung

Schnelle Datenübertragung, soziale Medien und die Anwendungsmöglichkeiten von Smartphones werden in Zukunft die Möglichkeiten und das Potenzial der Bürgerforschung wohl noch erweitern.

Das schwere Bestimmungsbuch, das alle Arten einer Tiergruppe vorstellt, muss vielleicht in

naher Zukunft nicht mehr ins Gelände getragen werden. Vielmehr wird es in Zukunft elektronische Bestimmungshilfen geben, die nur ein bestimmtes Gebiet abdecken und den Leser nicht mehr mit einer unüberschaubaren (und letztlich nicht notwendigen) Artenübersicht verwirren. Netzwerke wie *Facebook* oder *Flickr* bieten zahlreiche Möglichkeiten, Citizen Science-Projekte über befreundete Gruppen zu verbreiten und zu organisieren, Daten per Smartphone zu melden und Fotos mit Zusatzinformationen zum fotografierten Lebewesen an andere Interessierte zu schicken [8]. Das Programm *CyberTracker* wurde in den 1990er Jahren entwickelt, um im südwestlichen Afrika die Fähigkeit des Fährtenlesens von Personen aus der Bevölkerungsgruppe der Khoisan für wissenschaftliche Studien an Nashörnern zu nutzen. Die einfache Bedienung der Kleincomputer ermöglichte es auch analphabetischen Fährtenlesern, Tierspuren aufzunehmen und über das integrierte GPS an eine Datenzentrale zu senden. Heute wird *CyberTracker* von vielen Hobbyforschern und Wissenschaftlern genutzt.

Laden Smartphone-Nutzer die App *Anymals*, verbindet sich das Smartphone mit dem Server der Website und sendet standortspezifische Informationen zu den Tier- und Pflanzenarten. Hierzu greift die Plattform auf große naturkundliche Datenbanken und Wikipedia zurück. Über die App können Nutzer aber auch eigene Beobachtungen inklusive Geodaten mitteilen.

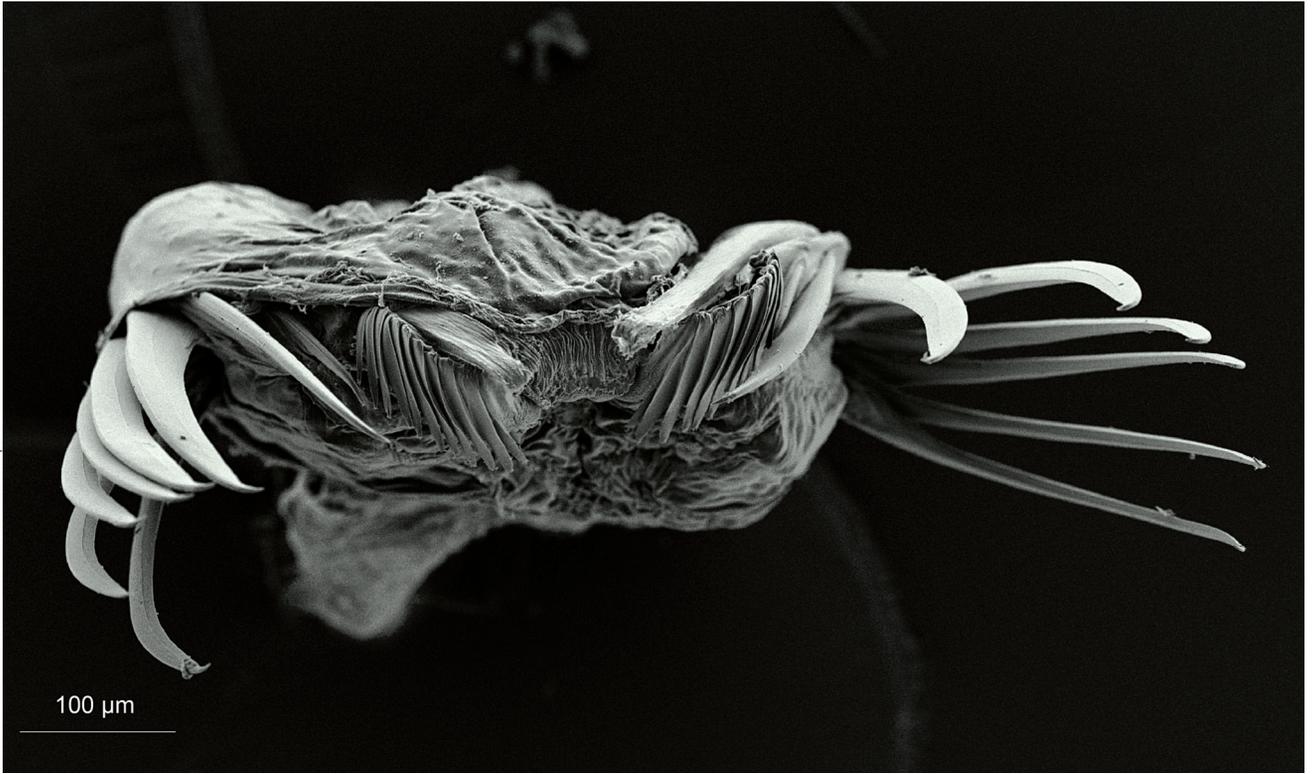
Die große Resonanz auf Projekte wie das *Evolution MegaLab* oder das *Tagfalter-Monitoring Deutschland* zeigt, dass es in Deutschland ein großes Potenzial für Citizen Science gibt. Die weitere Erforschung der Wirkungen des Klimawandels, aber auch Phänomene wie die Einwanderung fremder Tier- und Pflanzenarten werden die Bedeutung der Citizen Science noch erhöhen [9].

Eine europaweite Untersuchung machte vor kurzem deutlich, dass sich die Deutschen beim Thema Biodiversität gut auskennen. So wurde die Frage „Haben Sie schon einmal den Begriff

„Biodiversität“ gehört?“ in keinem Land von einem höheren Anteil der Befragten zustimmend beantwortet wie in Deutschland [10]. Der Bürgerforschung könnte eine große Zukunft bevorstehen.

Literatur

- [1] Schmeller, D., Henry, P.Y., Julliard, R., Gruber, B., Clobert, J., Dziock, F., Lengyel, S., Nowicki, P., Deri, E., Budrys, E., Kull, T., Bauch, B., Settele, J., van Swaay, C., Kobler, A., Babij, V., Papastergiadou, E., Henle, K. (2008) Advantages of volunteer-based monitoring in Europe. *Conservation Biology*, **23**, 307–316.
- [2] Silvertown, J. (2009) A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology and Evolution*, **24**, 467–471.
- [3] Silvertown, J., Cook, L., Cameron, R., Dodd, M., McConway, K., Worthington, J., Anton, C., Bossdorf, O., Baur, B., Schilthuizen, M., Fontaine, B., Sattmann, H., Bertorelle, G., Correia, M., Oliveira, C., Pokryzko, B., Ozgo, M., Stalazs, A., Gill, E., Rammul, U., Solymos, P., Feher, Z., Juan, X. (2011) Citizen Science reveals unexpected continental-scale evolutionary change in a model organism. *PLoS One*, **6**, e18927.
- [4] Dreesmann, D., Graf, D., Witte, C. (Hrsg.) (2011) *Evolutionsbiologie – Moderne Themen für den Unterricht*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- [5] DIE ZEIT: Weißt Du, wie viel Falter fliegen? 12. 2. 2009.
- [6] Devictor, V., van Swaay, C., Brereton, T., Brotons, L., Chamberlain, D., Heliola, J., Herrando, S., Julliard, R., Kuussaari, M., Lindstrom, A., Reif, J., Roy, D.B., Schweiger, O., Settele, J., Stefanescu, C., van Strien, A., van Turnhout, C., Vermouzek, Z., WallisDeVries, M., Wynhoff, I., Jiguet, F. (2012) Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature Climate Change*, **2**, 121–124.
- [7] Settele, J., Kudrna, O., Harpke, A., Kuehn, I., van Swaay, C., Verovnik, R., Warren, M., Wiemers, M., Hanspach, J., Hickler, T., Kuehn, E., van Halder, I., Veling, K., Vliegenthart, A., Wynhoff, I., Schweiger, O. (2008) Climatic Risk Atlas of European Butterflies, *Biorisk* **1**, special issue.
- [8] Stafford, R., Hart, A.G., Collins, L., Kirkhope, C.L., Williams, R.L., Rees, W.S., Lloyd, J.R., Goode-nough, A.E. (2010) Eu-social science: the role of internet social networks in the collection of bee biodiversity data. *PLoS One*, **5**, e14381.
- [9] Smith, K. (2011) An army of observers. *Nature Climate Change*, **1**, 79–82.
- [10] European Commission (2007) Attitudes of European towards the issue of biodiversity, Brussels.



100 µm



3

Die Vielfalt im Kleinen:

Pfeilwürmer – durchsichtige Jäger im Plankton der Meere

Franziska Glück

Die Ozeane gelten als Wiege des Lebens. Neue Arten entstehen, existierende Arten verschwinden im Lauf der Jahrmillionen. Die Natur ist fleißig in ihrem maritimen Versuchslabor: Im August 2010 veröffentlichten 2700 Forscher aus über 80 Nationen ihre ersten Ergebnisse des „Census of Marine Life“ – einer „Volkszählung“ der Meere, die zehn Jahre lang dauerte. Erste Schätzungen ergaben eine Erhöhung der Meerestierarten von 230.000 auf fast 250.000. Wir können davon ausgehen, dass die Tiefen der Ozeane für Wissenschaftler in Zukunft noch viele Geheimnisse bereithalten. So ist zum Beispiel über Pfeilwürmer – winzige, torpedoartige Jäger im Plankton – noch längst nicht alles bekannt.

Im Juli 1768 machte sich der 28jährige niederländische Beamte und Naturforscher Martinus Slabber auf die Suche nach neuen marinen Lebensformen und unternahm einen seiner zahlreichen Sammlungsausflüge. Er entdeckte eine seltsame, ungefähr einen Zentimeter lange, wurmförmige Kreatur. Unter dem Mikroskop erkannte er einen

- ◀ Pfeilwürmer sind winzige Jäger im Plankton der Ozeane. Haben ihre hier im Bild deutlich zu sehenden Greifhaken erst einmal eine Beute gepackt, gibt es kein Entkommen. Beim Schwimmen werden die Mundwerkzeuge in einer einzigartigen Kopfkappe verpackt, was die Pfeilwürmer zu den vermutlich ältesten Torpedos der Welt macht. Diese rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt den Kopf von *Eukrohnia bathypelagica*.

schlanken und steifen Körper mit einem runden Kopf, konnte dieses Tier aber keiner Gattung zuordnen. Nach vorsichtigen Berührungen beobachtete er, dass es ruckartig „wie ein Pfeil davonsprang“. In seinen späteren Aufzeichnungen und Illustrationen gab er diesem Wesen den Namen *Sagitta* oder „pfeilförmiger Seewurm“ [1]. Er schloss seine Untersuchungen mit den folgenden Worten ab: „Ein ieder Leser wird bey der Betrachtung dieses Wurms, eher die Merkmale der göttlichen Weisheit und Macht, als die Kennzeichen seines Geschlechtes (= Gattung) finden, und ich wünschte nichts mehr, als daß diese Wahrnehmungen einen ieden reizen möchten, gleicherweise in der Naturgeschichte Untersuchungen anzustellen. Dieses würde einem ieden Naturforscher und auch mir selbst vorzüglich angenehm seyn, zumal, wenn man die Lebensart dieser Geschöpfe ausfündig machen möchte [...]“.

In den vergangenen 230 Jahren sind zahlreiche Biologen diesem Aufruf gefolgt und haben die Morphologie und Taxonomie der Pfeilwürmer erforscht. Auch mit aktuellen molekularbiologischen Studien konnte die Stellung dieses Tierstammes im Zoologischen System nicht festgestellt werden, die Diskussion darüber dauert an. Was wissen wir also bis heute von diesen faszinierenden „Kreaturen“?

Die meisten Pfeilwürmer verbringen ihren gesamten Lebenszyklus im freien Wasser und

treiben mit den großen Meeresströmungen. Manche Arten findet man epibenthisch auf dem Meeresboden oder an Pflanzen angeheftet. Pfeilwürmer kommen in allen marinen Lebensräumen und Tiefenstufen vor. Sie sind jedoch als Jäger im Plankton wenig bekannt, was vor allem an ihrer geringen Körpergröße von nur 1–120 mm liegen mag.

Die etwa 150 Arten spielen aufgrund hoher Individuenzahlen eine wichtige Rolle im Nahrungsnetz der Meere. Pfeilwürmer machen im Allgemeinen zwischen 5 und 10% der Biomasse des Gesamtzooplanktons der Ozeane aus und tragen als Gejagte nennenswert zum Transfer erheblicher Energiemengen auf höhere Stufen der Nahrungsnetze bei [2].

Der wissenschaftliche Name *Chaetognatha* (*chaete* = Borste, *gnathos* = Kiefer) bezieht sich auf eine Serie langer Greifhaken, die links und rechts am Kopf verankert sind und zum Ergreifen kleiner Beutetiere, wie Ruderfußkrebse und anderen planktischen Vertretern derselben Größenklasse, dienen. Pfeilwürmer selbst sind eine Nahrungsquelle für Fische, Medusen und größere Arten ihrer eigenen Gruppe.

Strukturen und Funktionen

Pfeilwürmer besitzen einen langgestreckten Körper (Abb. 1), der dem Wasser nur einen geringen Strömungswiderstand entgegengesetzt. Diese äußere Form bildet die perfekte Grundlage für die typischen, abrupten Bewegungen bei Flucht oder Beutefang und lässt erahnen, wie schnell dieser Räuber seine Beute packen kann.

Der Körper besteht aus dem Kopf und dem Rumpf. Letzterer wird durch ein Querseptum in einen vorderen Teil (mit paarigen weiblichen Geschlechtsorganen und Darm) und in einen hinteren, auch als Schwanz bezeichneten Teil (mit männlichen Geschlechtsorganen) gegliedert. An beiden Körperseiten befinden sich ein oder zwei Paare transparenter Flossen, die entweder vollständig oder teilweise durch Flossenstrahlen versteift sind. Gleiches gilt für die am hinteren Kör-

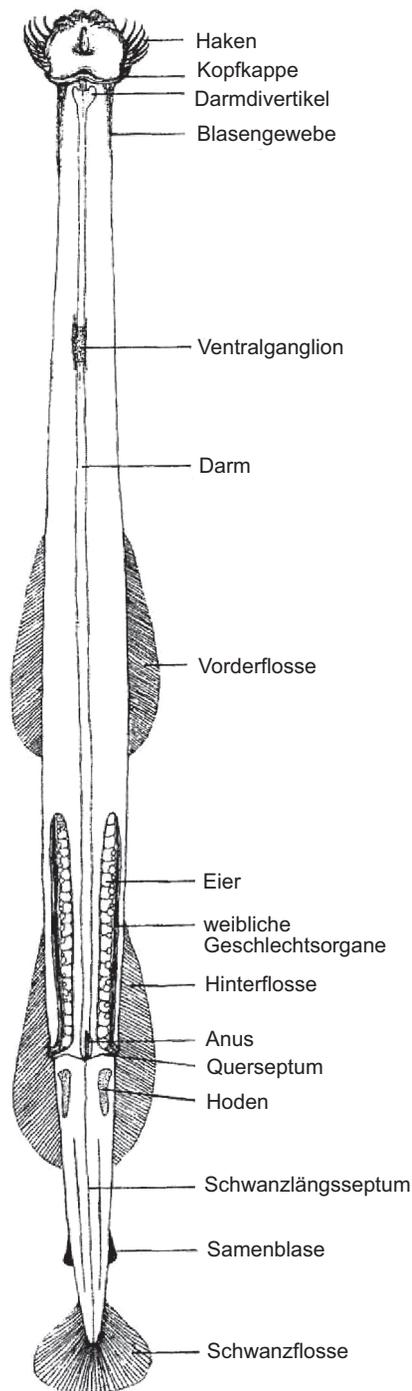


Abb. 1 Gesamtansicht (*Sagitta*). Zeichnung: H. Kapp.

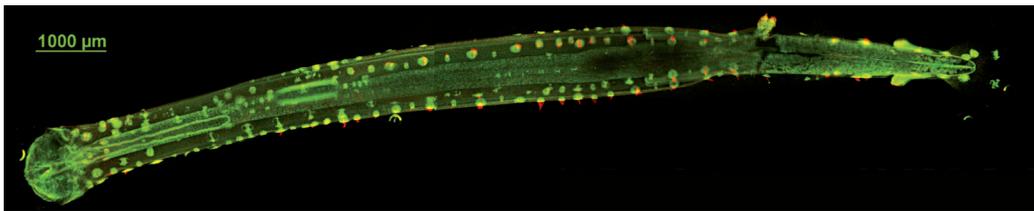


Abb. 2 Fluoreszenzmikroskopaufnahme der *ciliary fence receptors* von *Sagitta bipunctata*.

perende sitzende, einzelne Schwanzflosse. Flossen dieser Bauart gewährleisten den notwendigen Formwiderstand für präzise Bewegungen im Wasser [3].

Pfeilwürmer verfügen über einen perfekten Fangmechanismus. Die Greifhaken funktionieren wie riesige Klauen, die ausgeklappt werden können und dem Packen und Festhalten der Beute dienen. Dafür sorgt ein komplexes System aus schnell und kraftvoll kontrahierenden Muskeln im Kopf, die ein Entkommen der Beute fast unmöglich machen. Neben den Greifhaken ist der rundliche Kopf der Pfeilwürmer auf jeder Seite mit ein bis zwei Zahnreihen (Vorder- und Hinterzähne) ausgestattet. Die dolchartigen Zähne durchstechen die Haut oder das Außenskelett des Opfers und injizieren innerhalb von Sekunden das lähmende Gift Tetrodotoxin [3]. Im Anschluss kann die Beute zum Mund transportiert und verschlungen werden.

Studiert man Pfeilwürmer beispielsweise durch ein Licht- oder Elektronenmikroskop, dann entdeckt man viele weitere und häufig nur den Pfeilwürmern eigene Details. Ein einzigartiges Merkmal im Tierreich stellt die Kopfkappe (Praeputium) dar – eine Erweiterung der Außenhaut (Epidermis), die entweder dorsal auf dem Kopf zusammengefaltet oder kapuzenartig über den gesamten Kopf gestülpt werden kann. In diesem Zustand besteht ein deutlich geringerer Strömungswiderstand beim Schwimmen, da die spitzen und langen Mundwerkzeuge bis auf eine kleine Öffnung im Mundbereich vollständig umhüllt sind. Mit Nachweisen aus dem Kambrium gehören Pfeilwürmer zu den frühesten fossil überlieferten Räubern in den Ozeanen [4].

Pfeilwürmer sind zu verschiedenen Sinnesleistungen fähig, die der Orientierung und dem Beutefang dienen. Das Nervensystem ist entsprechend zur Zweiteilung des Körpers in Kopf und Rumpf ebenfalls in zwei Zentren gegliedert: dem Cerebralganglion oder Gehirn auf der Oberseite des Kopfes und dem Ventralganglion auf der Unterseite des vorderen Rumpfes. Serien kleiner Nerven streuen über Netzwerke feiner Nervenfasern in die Körperperipherie [5]. Dort befinden sich zahlreiche Sinnesorgane mit präzisen Mechanismen zum Aufspüren von Beuteorganismen. Auf der Oberseite des Kopfes sitzen bei den meisten Arten zwei kleine Augen, die sowohl die Lichtintensität als auch die Richtung des Licht einfallts wahrnehmen. So können Pfeilwürmer ihre Lage im Raum bestimmen und die weitere Fortbewegung koordinieren.

Besondere Strukturen sind die Tastbüschel oder *ciliary fence receptors* (*ciliary* = ciliär, *fence* = Zaun). In Längs- und Querreihen entlang des gesamten Körpers angeordnet, bilden sie artspezifische, aber ähnliche Muster [6] (Abb. 2). Diese Rezeptoren reagieren auf Vibrationen über kurze Distanzen (wenige Millimeter). Dabei werden die von Beuteorganismen ausgelösten Schwingungen von dem bewegungslos dahintreibenden Jäger zielsicher erfasst [6].

Pfeilwürmer sind Zwitter, bei denen die Reife der männlichen vor der Reife der weiblichen Geschlechtsprodukte eintritt. Von vielen Autoren wird Fremdbefruchtung angenommen, aber auch Selbstbefruchtung ist möglich. Die befruchteten Eier werden auf unterschiedliche Weisen in die Umwelt abgegeben: sie können ins freie Wasser entlassen (*Sagitta*; holoplank-

24 | Biologische Vielfalt entdecken

tisch), an Steine oder Pflanzen geheftet (*Spadella*; nahe beziehungsweise auf dem Meeresboden lebend) oder in Brutsäckchen ausgetragen werden (*Eukrohnia*; Tiefenform).

Pfeilwürmer besitzen kein Larvenstadium, sondern entwickeln sich direkt. Diese Entwicklung vom Embryo zum geschlüpften Jungtier dauert etwa einen Tag und zählt zu den kürzesten Embryonalzeiten im Tierreich.

Systematik

Die stammesgeschichtlichen Verwandtschaftsverhältnisse der Pfeilwürmer innerhalb der vielzelligen Tiere werden seit rund 230 Jahren erforscht, sind aber weiterhin unklar. Obwohl morphologische Untersuchungen inzwischen durch moderne molekularbiologische Methoden ergänzt werden, sind sowohl die Position im System der Tiere als auch die Stellung der einzelnen Arten innerhalb des Stammes nicht eindeutig. Aktuelle Studien lassen die Zugehörigkeit zu den Urmündern (Protostomia) [7] und nähere Verwandtschaft zu den Rädertierchen (Rotifera) sowie den Lophotrochozoen vermuten [8]. Aber auch eine phylogenetisch isolierte Stellung der Pfeilwürmer wird diskutiert [9].

Biologische Vielfalt erkunden

Im Rahmen von drei Expeditionen in den Atlantischen Ozean im Jahr 2009 wurde das Artenspektrum der Pfeilwürmer entlang einer Linie aus Messpunkten von Norden (subtropischer Nordostatlantik, Azoren-Schwelle und Kapverdische Inseln) über den Äquator hinweg entlang des Mittelatlantischen Rückens nach Süden ins Brasilianische und Argentinische Becken vor der südamerikanischen Küste auf insgesamt 18 Stationen untersucht. Es konnten dabei Wasserschichten von der Oberfläche bis in 4000 Meter Tiefe beprobt werden. In jeder der untersuchten Schichten waren Pfeilwürmer präsent.

Für das Einfangen von Planktonorganismen bedient man sich engmaschiger Netze, die verti-

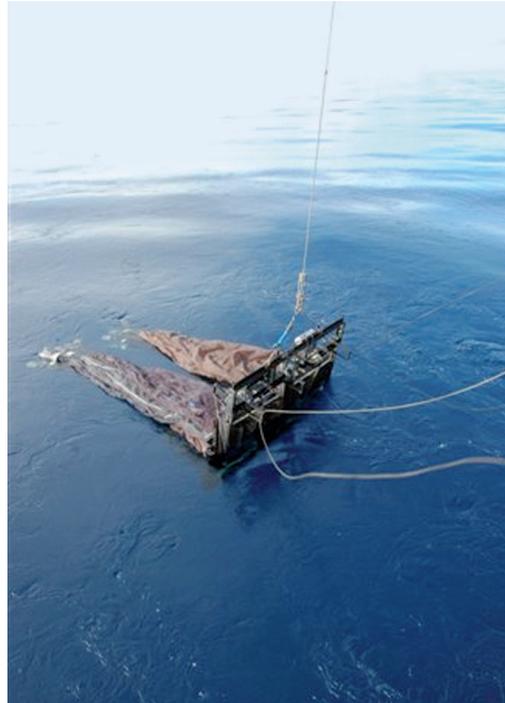


Abb. 3 Netzsystem zum Fang von Plankton in Ozeanen: MOCNESS, was eine Abkürzung für *Multiple Opening/Closing Net and Environmental Sensing System* ist. MOCNESS-Netze können Proben bis in die Tiefsee sammeln. Bild: B. Christiansen.

kal durch die Wassersäule gezogen werden. Die Apparatur eines Multinetzes besteht aus fünf Einzelnetzen, die nach Betätigen eines Auslösemechanismus an Bord des Forschungsschiffes schrittweise in verschiedenen Tiefenstufen geöffnet und geschlossen werden können. Die Maschen sind nur 300 μm weit. Das so genannte MOCNESS-Netz funktioniert analog, besteht jedoch aus bis zu 20 Einzelnetzen mit einer Maschenweite von 335 μm (Abb. 3).

Die Vielfalt der Pfeilwürmer

Bei den drei erwähnten Expeditionen konnten in den Proben 17 unterschiedliche Arten aus den folgenden fünf Gattungen identifiziert werden: *Sagitta*, *Eukrohnia*, *Heterokrohnia*, *Pterosagitta* und

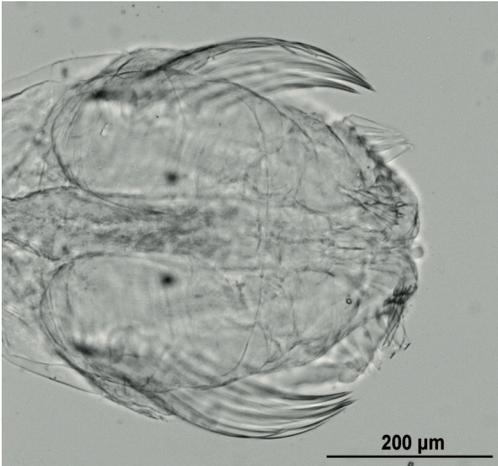


Abb. 4 Lichtmikroskopische Aufnahme des Kopfes von *Krohnitta pacifica* mit 7–15 langen, dünnen Vorderzähnen und ohne Hinterzähne.

Krohnitta. Die einzelnen Gattungen unterscheiden sich dabei in der Körperform, der Anzahl an paarigen Seitenflossen und Zahnreihen sowie in der Muskelstruktur. Wie in Abb. 4 deutlich wird, weist die Gattung *Krohnitta* nur eine Zahnreihe auf und besitzt typischerweise nur ein Paar an kurzen Seitenflossen. Die beiden Vertreter der Gattung *Sagitta* (Abb. 5 und 6) besitzen zwei Zahnreihen mit einer artspezifischen Anzahl an Zähnen. Am Körper tragen sie zwei Paare von

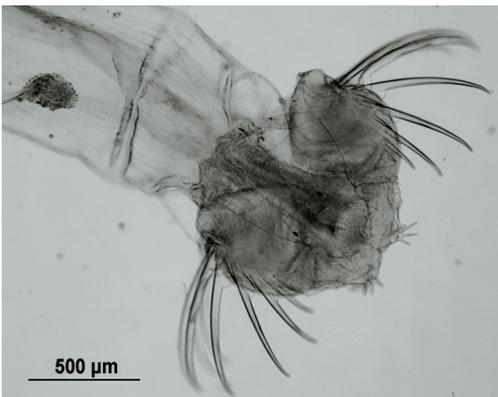


Abb. 5 Lichtmikroskopische Aufnahme des Kopfes von *Sagitta hexaptera* mit 3–5 dolchartigen Vorderzähnen und 0–6 Hinterzähnen.

Seitenflossen (Abb. 1). Bisher wurden für den Atlantik circa 40 Arten beschrieben (Kapp, 2004, bisher nicht publiziert).

Die physikalischen, chemischen und ökologischen Bedingungen in den Ozeanen ändern sich mit geografischer Breite und Meerestiefe. Diese Veränderungen bewirken Unterschiede in den Artenspektren, in Verbreitung und Tiefenverteilung sowie in der Häufigkeit und Biodiversität von Planktonorganismen.

Die Verteilungsmuster von Pfeilwürmern werden dabei vor allem von Temperatur, Salzgehalt, Wasserzirkulation und Beutemenge, außerdem von den Eigenbewegungen der Tiere sowie von Konkurrenten und Fressfeinden beeinflusst. Aufgrund ihrer engen Kopplung an vorherrschende Umweltvariablen dienen einige Arten von Pfeilwürmern als zuverlässige Indikatoren.

In den Ozeanen können gewaltige zyklonisch und antizyklonisch laufende Wirbel mit Übergangszonen und Grenzströmungen beobachtet werden. Übergangszonen sind besonders artenreich. Generell nimmt die Artenvielfalt und Individuendichte von niedrigen zu hohen Breitengraden und von der Wasseroberfläche zur Tiefe hin ab [10].

Die meisten Pfeilwurm-gattungen leben pelagisch. *Spadella*, *Paraspadella* und *Bathyspadella* dagegen kommen nahe beziehungsweise auf

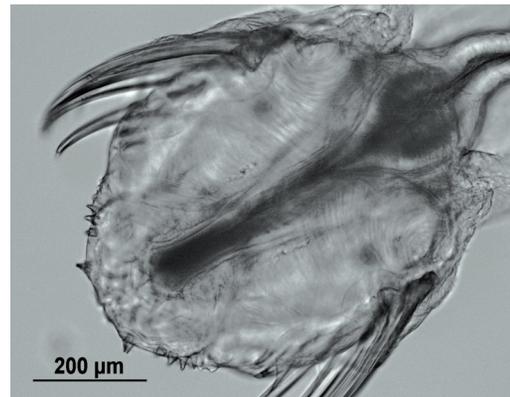


Abb. 6 Lichtmikroskopische Aufnahme des Kopfes von *Sagitta lyra* mit 2–8 Vorderzähnen in steilen Reihen und 5–12 Hinterzähnen.

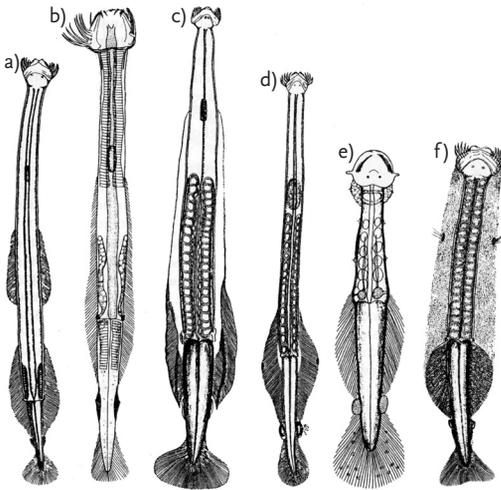


Abb. 7 Gattungen der Pfeilwürmer. a) *Sagitta*, b) *Heterokrohnia*, c) *Eukrohnia*, d) *Krohniitta*, e) *Spadella*, f) *Pterosagitta*. Zeichnung: H. Kapp.

dem Meeresboden vor. *Heterokrohnia* und *Hemispadella* leben spezifisch in der Tiefsee, meist zwischen 1000 und 4000 Meter (Abb. 7).

Generell kann die Gattung *Sagitta* (Abb. 8) als besonders erfolgreich bezeichnet werden. Diese Gattung ist erst spät aus anderen entstanden, hochentwickelt und anpassungsfähig. *Sagitta* verfügt über die größte Artenzahl aller Pfeilwurm-Gattungen und tritt in allen pelagischen Lebensräumen auf [10].

Sagitta lyra ist eine weitverbreitete Spezies, die typischerweise warme und temperierte Gewässer zwischen 200 und 1000 Meter Tiefe bewohnt. Sie wurde auf fast allen beprobten Stationen zwischen der Oberfläche und bis in 1000 Meter Tiefe gefunden und trat als häufigste Spezies neben zwei weiteren *Sagitta*-Arten auf.



Abb. 8 *Sagitta bipunctata*, ein typischer Vertreter der besonders artenreichen Gattung *Sagitta*.

Die größte Populationsdichte an Pfeilwürmern findet man generell in der oberen, belichteten Zone des Wassers, dem Epipelagial (0–200 Meter Tiefe). Im Pazifik beispielsweise bewohnt von 40°N bis 40°S etwa 20 Arten die oberen 200 Meter der Wassersäule [10]. Es konnten jedoch ebenfalls Arten in Tiefenstufen gefunden werden, die sie typischerweise nicht bewohnen. Das ist nicht ungewöhnlich, da einige Spezies ausgeprägte Vertikalwanderungen unternehmen. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Verhalten in Zusammenhang mit der Nahrungsaufnahme steht und dass Pfeilwürmer parallel zu planktischen Beutetieren auf- und absteigen. Tagsüber halten sie sich in mesopelagischen Schichten (200–1000 Meter Tiefe) auf und bewegen sich in der Dämmerung in oberflächennahe Bereiche [2].

Im Laufe der Evolution könnten dafür bestimmte Strukturen oder Mechanismen, wie die versteiften Finnen, voluminöses und gallertiges Gewebe im Rumpfbereich oder Darmzellen mit großen Vakuolen und dichteregulierendem Ionenaustausch bedeutsam geworden sein [3]. Damit ergeben sich Hinweise für einen Zusammenhang zwischen Tiefenverteilung und Größe/Reifegrad eines Individuums. Jungtiere bewohnen oft die oberen Wasserschichten, während sich ausgewachsene Tiere scheinbar aufgrund von Gewichtszunahme durch Wachstum und Reifeprozesse von Sexualprodukten in tieferen Zonen aufhalten.

Temperatur und Salzgehalt sind weitere Parameter, die bevorzugte Lebensräume bestimmen. *Sagitta gazellae* hält sich vor allem in kühlen, salz- und nährstoffreichen Wasserkörpern auf. Während der oben genannten Expeditionen wur-

de diese Spezies ausschließlich im Malvinas-Strom unter dem Einfluss von kaltem antarktischem und subantarktischem Wasser gefunden. Kaltwasserarten leben in hohen Breiten ($> 40^\circ \text{N/S}$). Auf der Südhalbkugel sind sie für gewöhnlich zirkumantarktisch verbreitet. In arktischen Regionen tritt bei einigen Arten Provinzialismus auf. So kommt *Sagitta tasmanica* im Nordatlantik, nicht aber im Nordpazifik vor. Warmwasserarten mit eingeschränktem tropischem Lebensraum ($\pm 30^\circ \text{N}$ bis $\pm 30^\circ \text{S}$) können sich nicht in andere Ozeane ausbreiten, denn die Kontinente wirken hier als physikalische Barrieren. Als Folge existieren häufig enge Verwandte in unterschiedlichen Ozeanen, in der Regel gibt es eine indo-pazifische und eine atlantische Art. Die Populationen der epipelagischen Warmwasserarten (zum Beispiel *Pterosagitta draco*) mit einer tropisch-subtropischen Verbreitungsspanne ($\pm 40^\circ \text{N}$ bis $\pm 40^\circ \text{S}$) sind zumeist global verbreitet. Sie treffen an der südafrikanischen Spitze zwischen Atlantik und Indo-Pazifik aufeinander und können so zum Genfluss und damit zur genetischen Vielfalt beitragen [2].

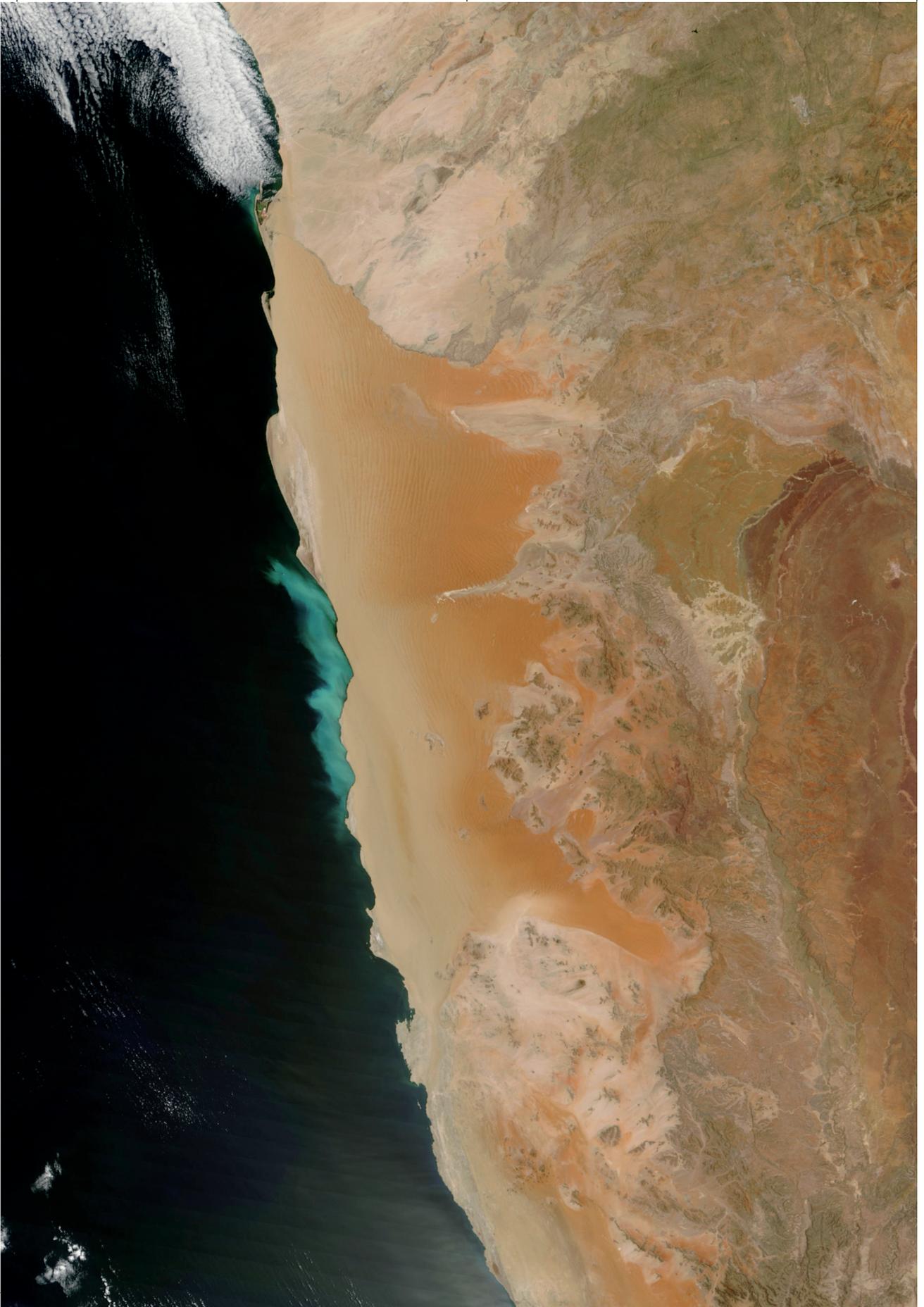
Trotz ihrer geringen Artenzahl haben sich Pfeilwürmer aufgrund ihrer vielfältigen Anpassungsmechanismen erfolgreich als durchsichtige Jäger im Plankton durchgesetzt. Mit Sicherheit halten die Ozeane noch weitere faszinierende Arten bereit und der Aufforderung von Martinus Slabber, diese zu erforschen, wird noch der eine oder andere Biologe nachgehen.

Danksagung

Ich möchte mich bei Dipl.-Biol. Helga Kapp für ihre Beratung herzlich bedanken.

Literatur

- [1] Slabber, M. (1778) *Natuurkundige Verlostingen behelzende microscopise Waarneemingen van inen uitlandse Water-en Land-dieren*, Bosch, Haarlem.
- [2] Bone, Q., Kapp, H., Pierrot-Bults, A.C. (1991) *The Biology of Chaetognaths*, Oxford University Press, Oxford.
- [3] Kapp, H. (2004) Chaetognatha oder Pfeilwürmer – Leben und Entwicklung im Pelagial. *Natur und Museum*, **134**, 398–405.
- [4] Chen, J.Y., Huang, D.Y. (2002) A possible Lower Cambrian Chaetognath (Arrow Worm). *Science*, **298**, 187.
- [5] Harzsch, S., Müller, C.H.G. (2007) A new look at the ventral nerve centre of *Sagitta*: implications for the phylogenetic position of Chaetognatha (arrow worms) and the evolution of the bilaterian nervous system. *Frontiers in Zoology*, **4**, 14.
- [6] Feigenbaum, D.L. (1978) Hair fan patterns in the Chaetognatha. *Canadian Journal of Zoology*, **56**, 536–546.
- [7] Marletaz, F., Martin, E., Perez, Y., Papillon, D., Caubit, X., Lowe, C.L., Freeman, B., Fasano, L., Dossat, C., Wincker, P., Weissenbach, J., Le Parco, Y. (2006) Chaetognath phylogenomics: a protostome with deuterostome-like development. *Current Biology*, **16**, R577–R578.
- [8] Philippe, H., Brinkmann, H., Copley, R.R., Moroz, L.L., Nakano, H., Poustka, A.J., Wallberg, A., Peterson, A.J., Telford, M.J. (2011) Acoelomorph flatworms are deuterostomes related to Xenoturbella. *Nature*, **470**, 255–260.
- [9] Kapp, H. (2000) The unique Embryology of Chaetognatha. *Zoologischer Anzeiger*, **239**, 263–266.
- [10] Alvarino, A. (1964) Bathymetric distribution of chaetognaths. *Pacific Science*, **18**, 64–82.



4

Hotspot mariner Biodiversität:

Wind, Wasser und Wirbellose im Atlantischen Ozean

Ralf Bochert, Michael L. Zettler

Vom Wind angetrieben bewegen sich seit mehreren Millionen Jahren gewaltige Wassermassen im südlichen Atlantik. Ein beständiges System gerichteter Meeresströmungen gibt die Bahnen für die Ausbreitung von Tierarten vor. Tropisch warm, antarktisch kalt, reichlich mit Sauerstoff versorgt und arm an Nährstoffen oder sauerstoffarm und nährstoffreich – an den Grenzflächen vor Südwest-Afrika prallen die Gegensätze aufeinander.

Als der Leipziger Zoologieprofessor Carl Chun im Jahr 1898 den für eine Forschungsreise umgerüsteten Dampfer „Valdivia“ in Hamburg bestieg, war erst seit wenigen Jahrzehnten bekannt, dass Leben unterhalb einer Wassertiefe von 500 Metern möglich ist. Die Route der ersten deutschen Tiefseeexpedition verlief entlang der Westküste Afrikas und ihr Ziel war klar: Beschreibung aller aufzufindenden Tierarten und Einordnung in die wissenschaftliche Systematik. Die Ergebnisse der Expedition waren bedeutend. Die

- ◀ Vor Namibias Küste liegt eine der größten Auftriebszonen der Welt. Dieses Satellitenbild zeigt den Küstenbereich zwischen 22 und 28°S mit Blick auf Sanddünen der Namib-Wüste zwischen Walvis Bay und Lüderitz. Deutlich erkennbar ist der Kaltwasserauftrieb vor Namibias Küste mit küstennaher Wolkenbildung an der angrenzenden warmen Wüste und dem Abtransport des lebenswichtigen Wassers durch vorherrschende Südostwinde. Bild: NASA.

Aufarbeitung des gesammelten Materials, die Auswertungen und die Veröffentlichungen der Resultate dauerten bis 1940. Der Name des Expeditionsschiffes wird eng mit dem Südostatlantik verbunden bleiben: Die „Valdivia-Bank“ ist die seichteste Stelle des während dieser Reise entdeckten so genannten Walfischrückens (Abb. 1), einem 3000 Kilometer langen ozeanischen Gebirge, das sich fast bis an die Wasseroberfläche erhebt und dabei bis zu 5000 Meter tiefe Becken voneinander trennt.

Auch heute – über 100 Jahre nach der Valdivia-Expedition – gilt das nördlich des Walfischrückens gelegene Angolabecken als ein weißer Fleck in der biologischen Landschaft. Im Jahr 2000 führte eine Expedition des Forschungsschiffes „Meteor“ dorthin. Diese Reise war Teil einer weltweiten Zählung von Tierarten aus der Tiefsee. Erneut wurde umfangreiches Tiermaterial gesammelt und es war nicht überraschend, dass in vielen der untersuchten Tiergruppen mehr als 90% der gefangenen Arten neu für die Wissenschaft waren [1].

Neue Tierarten weisen morphologische oder molekularbiologische Merkmale auf, die sie von ähnlichen Arten unterscheiden. Ihre Entdeckung durch den systematisch arbeitenden Zoologen ist eine wesentliche Grundlage für die Beschreibung der Artenvielfalt mit lokalem, regionalem oder globalem Bezug. Abgrenzungen von

Arten sind als evolutionäre Prozesse zu verstehen, die konkrete Anpassungen und wesentliche Spezialisierungen der Organismen an die Lebensbedingungen in ihrer Umwelt widerspiegeln. Die ökologische Bedeutung dieser Anpassungen und die Vernetzung des einzelnen Individuums oder der Population im biologischen Gefüge beschreiben daher die funktionalen Aspekte der Biodiversität.

Die Quelle ist ein Strom

Es ist erstaunlich, welchen globalen und regionalen Einfluss tiefe Meeresströmungen ausüben können. Seit mehr als 40 Millionen Jahren, als sich die Drakestraße zwischen der Südspitze Südamerikas und der Nordspitze der Antarktischen Halbinsel öffnete, bewegt der Antarktische Zirkumpolarstrom sein Wasser immer westwärts und transportiert dabei gewaltige Mengen gelöster Stoffe, fester Teilchen und Kleinstlebewesen. Ein Teil dieses Wassers strömt südlich des Walfischrückens auf die Südwestküste von Afrika zu. Aus den Tiefen wird es auf den Schelf gehoben und gelangt bei Lüderitz (Namibia) an die Oberfläche: kaltes Wasser (9–12 °C), arm an lebenswichtigem Sauerstoff, aber reich an Nährstoffen. Vor Namibias Küste liegt eine der größten Auftriebszonen der Welt, welche die atmosphärischen Bedingungen der Region prägt, Richtung und Stärke von Oberflächenströmungen bestimmt und als Quelle des Großen Benguelastrom-Meeresökosystems (Abb. 1) bezeichnet wird [2, 3]. Dieses erstreckt sich an der Westküste Afrikas südlich des Äquators bis zum Kap auf einer Küstenlänge von 3500 Kilometern. Vielfältige und einzigartige Lebensräume befinden sich an den langen Fels- und Sandküsten, den Mündungen zahlreicher Flüsse, auf den großflächigen Schelfgebieten und den Tiefseeböden bis in 5000 Meter Tiefe. Der Einfluss des Kaltwasserauftriebes vor Namibias Küste ist nicht auf die marine Umwelt begrenzt. Auch bis zu 150 Kilometer landeinwärts formt der Strom Landschaften. Die Trockenheit in der Namib-Wüste ist ursächlich mit ihm verbunden,

denn durch das kalte Wasser aus der Antarktis kondensiert die Luftfeuchtigkeit an der warmen westafrikanischen Küste und aufgrund der hohen Schichtungsstabilität der Luft können sich die einzelnen Schichten nicht mischen, sodass kein Niederschlag gebildet werden kann.

Das Auftriebssystem vor Süd-West-Afrika in seiner heutigen Ausprägung ist etwa zwei Millionen Jahre alt. Nirgendwo sonst auf der Welt befindet sich eine vergleichbare auf einen kleinen Bereich konzentrierte Auftriebszone. Die globale Einzigartigkeit des Gebietes ist durch die Begrenzung durch zwei Warmwasserströmungen gegeben. Im Süden transportiert der Agulhasstrom warmes Wasser aus dem Indischen Ozean westwärts, im Norden beeinflusst der Äquatoriale Gegenstrom das Strömungsgeschehen.

Das vor Lüderitz (Namibia) aufströmende Kaltwasser wird durch die in diesem Gebiet vorherrschenden Südostwinde permanent nach Nordwesten gedrückt. Diese Kaltwasserströmung, der Benguelastrom, verläuft zunächst küstenparallel und bewegt sich etwa in Höhe der Mündung des Flusses Kunene an der Grenze von Namibia und Angola auf die offene See. An der südlichen Grenze vermischen sich die um 5 °C wärmeren Wasser des Indischen Ozeans mit dem Kaltwasser im 320 Kilometer messenden Agulhas-Ring (Abb. 1). Im Norden induziert der sich von der Küste entfernende Benguelastrom eine küstennahe Gegenströmung, den Angolastrom, der oberflächennah das tropisch warme, salzreiche, sauerstoffgesättigte, aber nährstoffarme Wasser vom Äquator südwärts transportiert. Küstenfern bildet sich ein Strömungsring vor Angola (Angola-Wirbel). Charakteristisch ist ebenfalls die Ausprägung einer klaren Konvergenzzone, der Angola-Benguela-Front, vor Angolas Südküste.

Die kräftigen und stetigen Strömungen verändern sich im Jahreslauf nur gering [4]. Dennoch führen Extrembedingungen wie „El Niño“, ähnlich wie seltene Extremhochwasser in Flüssen, manchmal zu abweichenden Bedingungen.

Alle Organismen haben sich im Laufe ihrer evolutionären Entwicklung mehr oder weniger

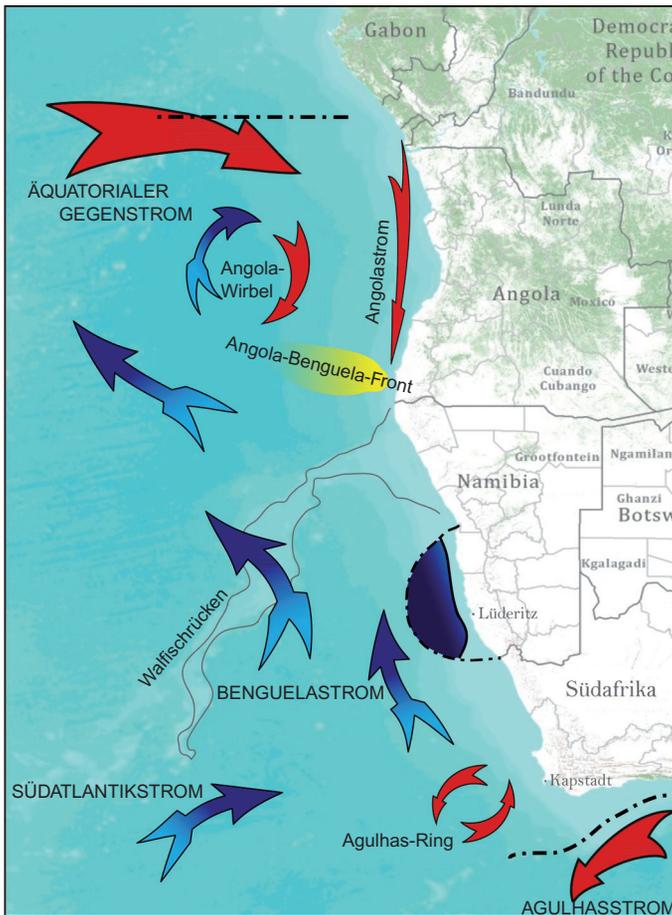


Abb. 1 Strömungssystem des Großen Benguelastrom-Meeresökosystems im Südostatlantik: Es herrschen konstant starke, gerichtete Strömungen vor. Die Quelle eines nährstoffreichen Kaltwasserauftriebes befindet sich vor Lüderitz (Namibia).

eng an bestimmte Umweltbedingungen angepasst, um sich zu entwickeln und sich erfolgreich fortzupflanzen. Im marinen Bereich sind für bodenlebende Tiere neben dem Siedlungssubstrat (Fels, Sand, Schlick) vor allem die Verfügbarkeit von Nahrung, das Vorhandensein von Sauerstoff und die für physiologische Prozesse wichtigen Parameter des Salzgehaltes und der Wassertemperatur wesentliche Anpassungsfaktoren. Mit den Strömungen können auch die verschiedenen abiotischen Faktoren stark ab- oder zunehmen, was insbesondere an Grenzflächen zu extremen Schwankungen führt. Einzelne oder als Kombination aus mehreren Faktoren gelangt eine Tierart dadurch an die Grenzen ihrer Leis-

tungsfähigkeit. Dies spiegelt sich deutlich im Vorkommen einzelner Tierarten wider, es lassen sich zudem Gruppen von Tierarten mit ähnlichen Reaktionen gegenüber der Umgebung zusammenfassen und letztlich bilden sich zoogeografische Regionen heraus, die ein Abbild des Strömungsgeschehens im Großen Benguelastrom-Meeresökosystem sind.

Aus der Tiefe entspringt der Reichtum

Die Auftriebsgebiete der Welt zeigen eine hohe Produktion und sind damit reich an Biomasse. Grund dafür ist der permanente Transport von Nährstoffen. Einzellige Algen sind die Basis des

ozeanischen Reichtums vor Namibia. Ihnen werden Nitrat und Phosphat aus der Tiefe serviert. Diese Nährstoffe setzen sie in den lichtdurchfluteten Oberflächenschichten um und wachsen damit ausgesprochen gut. Die Nahrungskette hat sich in Gang gesetzt, unzählige Tierarten verschiedener Gruppen wollen nur eines: fressen. Kleinstkrebse, kleine Wirbellose im Freiwasser und am Boden, größere Krebse, Krabben und Stachelhäuter führen die gespeicherte Energie weiter zu den kleinen Fischen und großen Meeressäugern. Diese einzigartige Faktorenkombination führt im Großen Benguelastrom-Meeressystem zu einer enormen Biodiversität auf einer breiten Basis und ermöglicht die Etablierung verschiedener Lebensgemeinschaften entlang des südwestafrikanischen Schelfs.

Die enorme Biodiversität des Gebietes lässt sich nur schwer abschätzen. Für die Phytoplanktongemeinschaft als Grundlage der Artenfülle sind in der Größenklasse kleiner als 200 µm 184 Diatomeenarten, 158 Dinoflagellatenarten sowie 32 verschiedene Braun-, Grün- und Blaualgen bekannt [5]. Das Zooplankton zeigt sich mit 511 Arten sehr divers. Am stärksten sind dabei die Klassen der Wurzelfüßer (Rhizopoda) und Wimperntierchen (Ciliata) vertreten. Für mehrzellige Pflanzen (Meeresalgen) werden 179 Arten im Areal benannt. Allein bei den höheren Krebsen (Garnelen, Hummer und Krabben) sind 105 Arten bekannt, weiter kommen im Gebiet 55 verschiedene Kopffüßerarten (Oktopus, Sepien, Kalmar) vor. Neben zwei Rundmäulern gibt es an Knorpelfischen 46 Hai-, 28 Rochen- und sechs Chimärenarten. Die Knochenfische sind sogar mit 410 Arten im Gebiet beschrieben [5]. Hinzu kommen noch die bekannten Meeressäuger: Acht Bartenwalarten, 23 Zahnwal- und Delfinarten und eine Robbenart. Mehr als 1000 ohne starke Vergrößerung noch zu erkennende wirbellose Arten sind im und am Boden zu erwarten. Diese haben sich in vielfältigen Lebensräumen wie beispielsweise Gezeitenzonen, Seegrasswiesen sowie auf den unterschiedlichen Sedimenten (Schlick, Ton, Schill, Sand) des

Schelfs und am Kontinentalabhang bis hin zur Tiefsee ab 200 Meter Wassertiefe eingemischt.

Das Auftreten und die Verteilung von Arten vor Namibia und Angola lässt allein auf dem Schelf eine Abgrenzung mehrerer zoogeografischer Regionen zu. Im Süden befindet sich eine Vermischungszone. Die Ausbreitung wärmeliebender Arten des Indischen Ozeans stößt hier an Grenzen. Weiter nördlich bis zur Mündung des Kunene leben fast ausschließlich kälteliebende Arten. Auf dem dortigen Schelf hat sich seit Millionen von Jahren eine Lebensgemeinschaft an die Sauerstoff-Minimum-Zonen angepasst [6]. Trotz widriger Lebensumstände (die Sauerstoffwerte liegen meist weit unter 0,5 ml/l) werden erstaunlich hohe Dichten und Biomassen erreicht. Vom Kap von Südafrika bis zur Nordgrenze von Namibia nehmen die Artenzahlen stetig ab [7]. Der Süßwassereintrag des Grenzflusses zu Angola lässt die Diversität auf dem Schelf im Mündungsbereich in die Höhe schnellen. Wie im Auftriebsgebiet stehen hier im brackigen Wasser ausreichend Nährstoffe zur Verfügung. Doch dieser Hot Spot ist lokal begrenzt. Nördlich, wenige Kilometer Küstenlinie weiter, stoßen tropisch warme Wasser mit dem Kaltwasser des Südens zusammen. In dieser sehr dynamischen Mischungszone mit wechselnden Umweltbedingungen sinkt die Artenzahl engräumig erneut, um im Anschluss in den warmen Wassern des Angolastroms stetig anzusteigen (siehe auch Abb. 4). An Angolas Küste dominieren Arten des tropischen Atlantiks [8].

Die Vielfalt der Meere – Faszination Wirbellose

Einen Einblick in die Unterwassermeereswelt der Wirbellosen erhält der interessierte Strandwanderer durch Beobachten von größeren Vertretern dieser Gruppe. Schalentiere (Muscheln und Schnecken, Abb. 2), Stachelhäuter (Seesterne, Seeigel, Seegurken) und Krebse (Krabben, Hummer, Garnelen) sind leicht zu identifizieren und erregen die Aufmerksamkeit des Betrachters durch Formenvielfalt, Farbenspiel und Be-



Abb. 2 Formenvielfalt und Artenreichtum bei Schalentieren: Die Stachelschnecke *Hexaplex rosarium* ist ein Räuber in flachen tropischen Gewässern (oben links; 8 cm), die Nabelschnecke *Natica marchadi* lebt auf Weichboden, jagt Weichtiere und frisst Aas (oben rechts), *Marginella orstomi* bevorzugt tropische Gewässer und ernährt sich räuberisch (unten links), die Muschel *Nuculana bicuspidata* lebt eingegraben im weichen Boden und sammelt sich die Nahrung von der Sedimentoberfläche (unten rechts, alle 2 cm).

musterungen. Ist die Abgrenzung von Gruppen noch recht einfach, lassen sich Unterschiede zwischen einzelnen Arten nur schwer erkennen. Dem erfahrenen Zoologen offenbart sich die Vielfalt und Reichhaltigkeit dieser umfangreichen Tiergruppen erst bei Betrachtung durch Vergrößerung unter dem Stereomikroskop.

Einige Klassen innerhalb der Wirbellosen haben sich im Großen Benguelastrom-Meeresökosystem besonders umfangreich entwickelt. Dazu gehören unter anderem die wurmartig aus vielen gleichmäßigen Segmenten aufgebauten Vielborster, Schlangensterne und Krebse (Abb. 3).

Ein halbwegs vollständiges Inventar der Artenvielfalt aller Wirbelosengruppen im Gebiet ist mittelfristig nicht absehbar. Allenfalls ist es möglich, einzelne Klassen vergleichend zu betrachten. Die Artenzahl in der Klasse der Vielborster wird für das Gebiet südlich des Äquators bis 18°S mit 385 angegeben [8]. Im weiteren Küstenverlauf vor Namibia und Südafrika kommen noch einmal 64 endemische Arten hinzu.

Ein bereits angesprochener deutlich regionaler Trend im Vorkommen ist auch für Schnecken

belegbar. Die 133 bekannten Arten im Gebiet bevorzugen den Bereich um die Mündung des Grenzflusses Kunene, der reichlich Nahrung auf den Schelf transportiert. Weiter nach Norden sinken die Artenzahlen, weil die Bedingungen im Grenzgebiet zwischen kalten und warmen Wassermassen an die Leistungsgrenzen vieler tropischer beziehungsweise Kaltwasser-Spezies führen. Mit Stabilisierung der Bedingungen an Angolas Nordküste steigen auch die Artenzahlen wieder an (Abb. 4).

Die Artenvielfalt im Großen Benguelastrom-Meeresökosystem lässt sich ebenfalls innerhalb der Ordnung der Flohkrebse erkennen. Viele verschiedene Spezies leben verteilt im Gebiet und tragen zu einer stattlichen Gesamtartenzahl von 111 bei. Auch weiterhin werden neue Arten gefunden.

Die Ausbreitung von Arten ist ein populationsdynamischer Prozess. Für die Bewohner des Meeresbodens spielen sowohl aktive Migrationsbewegungen als auch passives Verdriften eine enorme Rolle. Es ist leicht vorstellbar, dass eine Ausbreitung von größeren und mobilen Arten

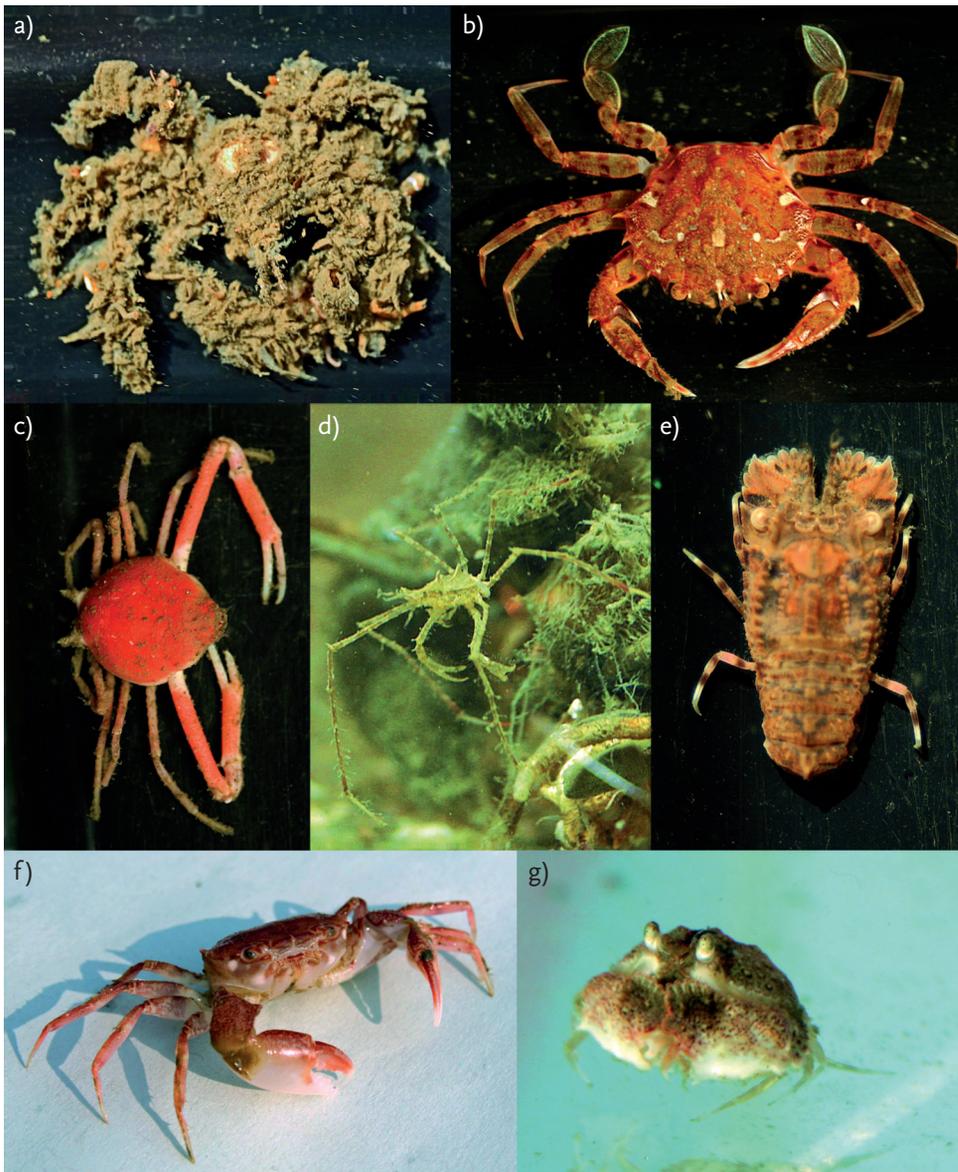


Abb. 3 Formenvielfalt und Artenreichtum bei Krebsen (von links nach rechts). a) *Dehaanius* spec. maskiert sich vor Fressfeinden durch gezieltes Anheften von Algenfilamenten und verschmilzt dadurch optisch mit dem gleichförmigen Weichboden; b) bei Schwimmkrabben (Polybiidae) ist das fünfte Beinpaar mit deutlich abgeflachtem und extrem verbreitertem, blattförmigem Endglied zu einer Schwimextremität umgewandelt. c) Kugelkrabben leben vergraben im Sand flacher Meeresgebiete (Leucosoiidae), d) Seespinnen (Majidae) sind Allesfresser und durch ihre langen Beine sehr mobil; e) Bärenkrebse (Scyllaridae) sind nachtaktiv und leben bevorzugt in warmen Gewässern. f) Strandkrabben leben häufig an der Küste im Gezeitenbereich und bewegen sich seitwärts auf der Suche nach Nahrung; g) Schamkrabben (*Calappa* spec.) besitzen stark verbreiterte Endglieder am ersten Beinpaar, die schützend vor den Körper gehalten werden.

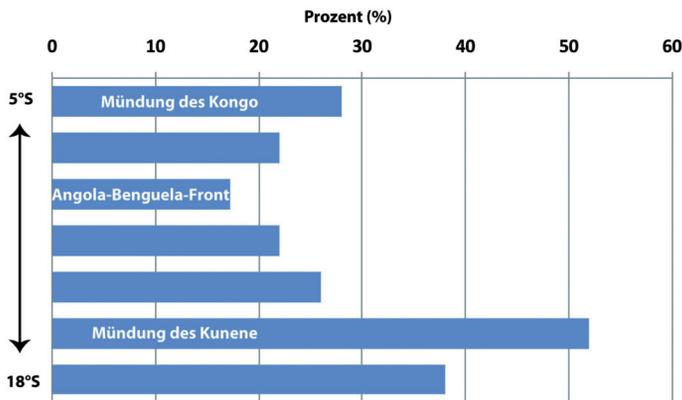


Abb. 4 Biogeografische Verteilung (in Prozent) der Schneckenfauna (Artenzahl 133) vor der Küste Angolas. Hohe Biodiversität (Hot Spots) sind Bereiche der Flussmündungen. Die Angola-Beguela-Front ist dagegen artenarm.

(Krabben, Langusten, Hummer) in einem höheren Maß stattfinden kann als bei kleinen Vertretern. Jedoch wie bei allen Tiergruppen gelingt dies nur denjenigen Arten, die sehr tolerant gegenüber veränderten Lebensbedingungen sind. 218 Krabbenarten aus 26 Familien an Westafrikas Küsten haben sich bereits etabliert [9].

Auftriebsgebiete: hochproduktive Zentren der Biodiversität

Auftriebsgebiete der Welt sind ein bedeutendes Zentrum für die Fischerei. Im Großen Benguelastrom-Meeresökosystem werden jährlich 1,25 kg Kohlenstoff pro Quadratmeter in der Biomasse festgelegt, etwa sechsmal mehr als in der Nordsee [3]. Das Gebiet ist reich an Fischen, Seevögeln, Krebsen und Meeressäugern. Die Gesamtanlandung an Fisch (der Teil des Fangs, der an Land gebracht wird) erreichte 1978 ein Hoch von circa drei Millionen Tonnen pro Jahr. Starke Überfischung führte zu einem drastischen Rückgang in den Beständen. Aktuell betragen die Anlandungen circa eine Million Tonnen pro Jahr. Große Bedeutung an den Fängen haben die pelagisch lebenden Sardinen und Anchovis (etwa 200.000 Tonnen pro Jahr). In ähnlichen Größenordnungen werden weiterhin Sardellen, Seehechte (*Merluccius* sp.), Makrelen und Hummer gefangen.

Die vorhandene Biomasse dieser Schlüsselorganismen im Gebiet ist eng mit den Populationsgrößen ihrer Beute (Zoobenthos und Planktonorganismen) und ihrer Räuber, wie den Seevögeln, Robben und Pinguinen, verknüpft.

Erwachsene Tiere, aber auch frühe Entwicklungsstadien von kleinen und festsitzenden Arten nutzen den Wasserstrom, um neue Gebiete zu erreichen, da Siedlungsplätze am Ort für Artgenossen generell knapp sind.

Im Großen Benguelastrom-Meeresökosystem gibt der nordwärts fließende Strom die Richtung für die Ausbreitung vor. Insofern ist es nicht verwunderlich, dass nur ein sehr geringer Prozentsatz an Tierarten zugleich vor Südafrika und nördlich des Äquators lebt. Vielborster gelten dabei als besonders robust und anpassungsfähig. Von den 211 bekannten Vertretern rund um Südafrika lassen sich immerhin etwa zwei Drittel auch an den Küsten Nordostafrikas nördlich 20°N finden [8].

Dass noch viel Forschungsbedarf besteht, zeigen die Funde vieler neuer Tierarten aus dem Gebiet vor Angola, die jüngst beschrieben wurden [10–14].

Literatur

- [1] Guerrero-Kommritz, J. (2005) Results of the Diva-1 expedition of RV "Meteor" (Cruise M48/1). Notes on the Tanaidacea (Crustacea: Peracarida) of the Angola Basin. *Organisms, Diversity & Evolution*, 5, 171–177.
- [2] O'Toole, M.J., Shannon, L.V., de Barros Neto, V., Malan, D.E. (2001) Integrated Management of the Benguela Current Region, in: *Science and Integrated*

- Coastal Management*, (eds. B. von Bodungen, R.K. Turner), Dahlem University Press, 231–253.
- [3] Shannon, L.V., O’Toole, M.J. (2003) Sustainability of the Benguela: ex Africa semper aliquid novi, in: *Large Marine Ecosystems of the World – Trends in Exploitation, Protection and Research* (eds. G. Hempel, K. Sherman) Elsevier, Amsterdam, 227–253.
- [4] Mohrholz, V., Bartholomae, C.H., van der Plas, A.K., Lass, H.U. (2008) The seasonal variability of the northern Benguela undercurrent and its relation to the oxygen budget on the shelf. *Continental Shelf Research*, **28**, 424–441.
- [5] Maartens, L. (2003) Biodiversity, in: *Namibia’s marine environment* (eds. F. Molly, T. Reinikainen) (Directorate of Environment Affairs of the Ministry of Environment and Tourism, Windhoek), 103–135.
- [6] Zettler, M.L., Bochert, R., Pollehne, F. (2009) Macrozoobenthos diversity in an oxygen minimum zone of northern Namibia. *Marine Biology*, **156**, 1949–1961.
- [7] Sakko, A.L. (1998) The influence of the Benguela upwelling system on Namibia’s marine biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, **7**, 419–433.
- [8] Le Loeuff, P., von Cosel, R. (1998) Biodiversity patterns of the marine benthic fauna on the Atlantic coast of tropical Africa in relation to hydroclimatic conditions and paleogeographic events. *Acta Oecologica*, **19**, 309–321.
- [9] Manning, R.B., Holthuis, L.B. (1981) West African crabs (Crustacea: Decapoda). *Smith. Contr. Zool.*, **306**, 1–379.
- [10] Bochert, R., Zettler, M.L. (2009) A new species of *Heterospio* (Polychaeta, Longosomatidae) from offshore Angola. *Zoological Science*, **26**, 735–737.
- [11] Bochert, R., Zettler, M.L. (2010) *Grandidierella* (Amphipoda: Aoridae) from Angola with description of a new species. *Crustaceana*, **83**, 1209–1219.
- [12] Massier, W., Zettler, M.L. (2009) *Marginella himburgae* nov. sp. (Gastropoda: Marginellidae: *Marginella*). Description of a new Marginellidae species from Namibia. *Malacologia Mostra Mondiale*, **65**, 3–4.
- [13] Rolan, E., Zettler, M.L. (2010). A new species of *Gibbula* (Mollusca, Archaeogastropoda) from Namibia. *Iberus*, **28**, 73–78.
- [14] Thandar, A.S., Zettler, M.L., Arumugam, P. (2010) Additions to the sea cucumber fauna of Namibia and Angola, with descriptions of new taxa (Echinodermata: Holothuroidea). *Zootaxa*, **2655**, 1–24.