

Epilog

Meeresbiologische Forschung wird angetrieben von wissenschaftlicher Neugier und technischem Fortschritt, aber auch von Fragen der Gesellschaft nach dem rechten Umgang mit dem Meer und seinen Ressourcen. Die Meeresbiologie liefert wichtige Erkenntnisse zur Struktur und Funktion mariner Lebensgemeinschaften, zur Anpassung an wechselnde Umweltbedingungen bei Meeresorganismen unterschiedlicher Organisationsstufen, von den Bakterien bis zu den Walen. Das damit gewonnene Verständnis des Lebens auf unserem Planeten ist Allgemeinut, es dient auch der Einsicht in die Bedeutung der Ozeane für den Menschen und trägt zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz mariner Ökosysteme bei. Viele Meeresbiologen sind bestrebt, dieses Wissen und ihre Begeisterung für die Meeresforschung über den engen Kollegenkreis hinaus weiterzugeben – so auch in diesem Lesebuch.

Ökologen beschreiben die Veränderungen in den marinen Ökosystemen, sie decken Zusammenhänge auf und erstellen Prognosen im Rahmen des Klimawandels. Ein großes Arsenal der modernen Ozeanografie steht ihnen dabei zur Verfügung: Forschungsschiffe, verankerte und mobile Messsysteme, Beobachtungssatelliten sowie jahrzehntelange Zeitserien aus Monitoring-Programmen. In Sedimentkernen werden die langfristigen Veränderungen über Jahrmillionen abgebildet. Ökologische Experimente im Meer und in Versuchsaquarien sind unentbehrlich, stellen aber immer eine Vereinfachung der natürlichen Bedingungen dar und sind daher mitunter nur von begrenzter Aussagekraft für das Gesamtsystem. Die immer stärkeren Vernetzungen zwischen organismischer und molekularer Biologie ermöglichen wichtige neue Erkenntnisse und Synergien. Mathematische Modelle unterschiedlicher Komplexität und Auflösung dienen als virtuelle Experimente. Neue Technologien werden aus anderen Bereichen, etwa der Raumfahrt, Informatik und Medizin, übernommen und erschließen

neue Forschungsfelder, z. B. durch autonome In-situ-Beobachtungen, automatisierte Laboranalysen, schnelle Übertragung und Verarbeitung großer Datenmengen sowie hohe Kapazitäten für Modellrechnungen.

Viele Beiträge in diesem Lesebuch beschäftigen sich mit den folgenden Schwerpunktthemen

- Meeresorganismen sind wichtig für die Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung.
- Das Weltmeer ist der größte Hort der Biodiversität.
- Meeresorganismen sind Bestandteil der marinen Stoffkreisläufe und des Klimamotors Meer.

Das Meer als Nahrungsquelle

Zwar nährt sich der Mensch global gesehen primär von den „Früchten“ des Landes, für die Deckung des Eiweißbedarfs großer Teile der Küstenbevölkerungen, besonders in Entwicklungsländern, sind aber Fische die wichtigste Quelle. Zudem haben die Wohlhabenden in aller Welt großen Appetit auf Fische, Krebse, Muscheln und Tintenfische (inklusive ihrer gesundheitsfördernden Omega-3-Fettsäuren). „Massenfische“ wie z. B. die peruanischen Sardellen (*Anchoveta*) werden darüber hinaus zur Fischmehlproduktion für die Massentierhaltung benötigt.

Die großen Fischressourcen in den Schelfmeeren werden meist voll genutzt, in vielen Fällen sogar überfischt. Nur durch ein sorgfältiges, breit angelegtes Management ließe sich der Weltfischereiertrag auf seinem jetzigen Niveau halten oder geringfügig steigern. Das setzt aber eine gute Kenntnis der marinen Ökosysteme voraus, in die die Fischbestände mit ihren verschiedenen Lebensstadien als Beute, Räuber und Nahrungskonkurrenten eingebettet sind. Der Schutz der lokalen, handwerklichen Kleinfischereien gegenüber den weiträumig operierenden, industriellen Großfischereien ist für die meist armen Küstenbevölkerungen lebenswichtig. Am Beispiel des Krill wird deutlich, wie viel kostspielige Forschung nötig ist für eine einigermaßen realistische Abschätzung des Fangpotenzials und der ökologischen Implikationen der Krillfischerei für die antarktischen Lebensgemeinschaften.

Die marine Aquakultur hat in den letzten drei Jahrzehnten einen enormen Aufschwung erfahren. Sie kann die Meeresfischerei maßgeblich ergänzen durch die Erzeugung mitunter hochbezahlter Meerestiere und Algen. Die Marikultur ist ein dankbares Feld für ernährungs- und verhaltensphysiologische, parasitologische und genetische Forschung. Die ökologischen Wechselwirkungen zwischen den Meeresfarmen und der „wilden“ Umgebung müssen im Interesse einer langfristigen Nutzung intensiv untersucht werden.

Marine Biodiversität

Das Meer beherbergt die vielfältigsten Lebensformen (abgesehen von den Insekten). Viele Arten sind im Verlauf der langen Erdgeschichte ausgestorben, neue haben sich entwickelt. Die üppige marine Biodiversität ist an sich schon ein hohes Gut und trägt zur Stabilität von Ökosystemen und deren Attraktivität für den Menschen bei. Sie liefert zudem Rohstoffe sowie chemische und biophysikalische Entwürfe für die biotechnologische und pharmazeutische Industrie. Diesen Schatz der Evolution gilt es, taxonomisch zu inventarisieren und molekulargenetisch und biochemisch zu erfassen. Stellenweise ist es ein Wettlauf mit der Zeit, wie die rasante Zerstörung der Lebensgemeinschaften vieler Korallenriffe, Mangroven und Seeberge zeigt. Die komplexe Rolle der Biodiversität bei der Erhaltung mariner Ökosysteme beschäftigt aktuell viele Meeresbiologen.

Im Zusammenhang mit dem Schutz der marinen Biodiversität werden aber auch andere Fragen interessant: Wie wirkt sich die Schleppnetzfisherei auf die Fauna des Meeresbodens aus? Wie sind die großen Offshore-Windkraftanlagen ökologisch zu bewerten? Welche Effekte hat die durch anthropogene Eutrophierung und Klimaerwärmung gesteigerte Phytoplanktonproduktion auf die pelagischen und benthischen Lebensgemeinschaften? Welche ökologische Bedeutung hat der Rückgang des arktischen Meereises? Ein extremes Beispiel liefert die Rolle der großen Wal- und Thunkadaver als Fressplatz für eine spezielle Gemeinschaft von Aasfressern am Tiefseeboden. Die starke Dezimierung der Großfische und Wale beraubte diese bisher wenig erforschten benthischen Tiere und Mikroorganismen ihrer Lebensgrundlage. Mittlerweile ist es unstrittig, wie entscheidend die Biodiversität für die sogenannten Ökosystemdienstleistungen (*ecosystem services*) mariner Systeme sind, d. h. welche ihrer ökologischen Funktionen am Ende auch für den Menschen nutzbringend sind. Hier wird deutlich, wie eng ökologische und sozioökonomische Fragestellungen miteinander verzahnt sein können.

Das Meer als Klimamotor

Erst die schrittweise Entfaltung der Lebensprozesse im Meer hat die Erdatmosphäre in ihrer heutigen Zusammensetzung geschaffen. Diese Prozesse sind auch für den atmosphärischen Schutzschirm mit seiner Ozonschicht und seinem Treibhauseffekt verantwortlich. So ist unser Klima stark vom früheren und heutigen Leben im Meer geprägt. Die in vergangenen Erdperioden u. a. von Meeresalgen gebildete organische Substanz wird heute als fossiler Brennstoff verfeuert und als atmosphärisches CO₂ klimawirksam. Das Meer nimmt einen großen Teil dieses CO₂ wieder auf. Das Ausmaß der Aufnahmekapazität hängt stark von der Wirksamkeit der „Biologischen Pumpe“ ab, die CO₂ aus der Oberflächenschicht zum Meeresboden transportiert. Alle Vorhaben, mittels einer Verstärkung der

biologischen Pumpe CO_2 im Meer zu versenken, müssen in ihren Auswirkungen auf die Meeresorganismen und marinen Lebensgemeinschaften kritisch geprüft werden. Die Versauerung der Meere hat einen starken selektiven Einfluss auf die marinen Lebensgemeinschaften und auf deren biochemische, mitunter klimarelevante Leistungen. Der Gashaushalt des Meeres und die Kreisläufe von Kohlenstoff, Schwefel, Stickstoff, Phosphat und Eisen im Meer werden regional wie auch global durch biologische Prozesse angetrieben oder zumindest stark beeinflusst.

Das Meer ist dank mikrobiologischer Abbauprozesse auch eine Quelle von klimarelevanten Gasen, vor allem Methan und CO_2 . Damit ist die Biogeochemie des Meeres in seinen verschiedenen Wasserschichten und am Meeresboden zu einem zentralen Thema der Meeresforschung geworden. Neben pauschalierenden Modellierungen spielen dabei detaillierte In-situ-Messungen und experimentelle Ansätze eine wachsende Rolle.

Meeresbiologie als Schlüsselwissenschaft

Das Meer war über Jahrmilliarden der wichtigste Schauplatz der Evolution und hat eine Vielzahl von Bauplänen hervorgebracht. Das Land wurde erst langsam im letzten Viertel der Evolutionsgeschichte vom Wasser aus besiedelt, und nur wenige Gruppen des Tierreichs haben an Land eine starke Radiation erfahren, insbesondere Insekten, Spinnen und Wirbeltiere. Bei den Vögeln und Säugetieren gab es immer wieder ein „Zurück ins Meer“. Pinguine und Alken „fliegen“ mit ihren Stummelflügeln unter Wasser, Wale und Seekühe sind reine Wassertiere geworden.

Im Laufe der Evolution hat sich eine Fülle von biochemischen und molekulargenetischen Prozessen und Strukturen entwickelt, die sich zuerst in vielfältigen Archaea, Bakterien und Protisten manifestiert haben. Die marine Mikrobiologie hat uns in den letzten vier Jahrzehnten durch das Studium der Besiedlung des Meeresbodens im Wattenmeer, in den Auftriebsgebieten und in den heißen und kalten untermeerischen Quellen wesentliche Einblicke in diese Lebensprozesse und ihre Träger vermittelt.

Die Anpassungen der höheren Organismen an die marinen Lebensbedingungen lassen sich auf allen Ebenen, von den Zellen und einzelnen Organen über die Individuen und ihre Populationen bis hin zu Lebensgemeinschaften im Meer studieren. Wie dieses Buch zeigt, rücken dabei die möglichen direkten und indirekten Auswirkungen plötzlicher Klimaveränderungen (UV-Einstrahlung, Erwärmung, Versauerung) auf Lebensprozesse und Lebensgemeinschaften immer mehr in den Fokus der Forschung.

In der jüngsten Vergangenheit haben sich mehrere Arbeitsgebiete in der deutschen biologischen Meeresforschung als besonders fruchtbar herausgestellt: das Verfolgen von Langzeitentwicklungen durch feste Messprogramme (z. B. Helgoland Reede oder „Hausgarten“ in der Framstraße), die mikrobiologische Grund-

lage der marinen Stoffkreisläufe und der Prozesse auf natürlichen und künstlichen Substraten im Meer sowie die Analyse der komplexen trophischen Netzwerke. Dafür ist die enge Kombination von in situ beobachtender, experimenteller und modellierender Ökologie gefragt. Die Meeresstationen, die einstmals primär für individuelle Gastforscher eingerichtet wurden, haben im Rahmen dieser Entwicklung eine neue Bedeutung gewonnen.

Ausblick

Im Epilog der ersten Auflage beschrieben einige Autoren, wie sie sich die künftige Entwicklung der meeresökologischen Forschung vorstellen. Dabei wurden konkrete Wünsche für einzelne Fachgebiete genannt, mehr noch wurde aber der Bedarf an fächerübergreifender Zusammenarbeit bei der Erfassung komplexer Systeme betont. Drei Antworten mögen als Beispiele dienen:

Holger Auel

Die Erforschung der Tiefsee ist die größte Herausforderung für Meeresbiologen in der kommenden Dekade sowohl in wissenschaftlicher als auch in technologischer Hinsicht. Insbesondere die faszinierenden Anpassungsstrategien und die Biodiversität der Tiefseebewohner sowie ihre Bedeutung für biogeochemische Prozesse sind vielversprechende Forschungsgebiete. Dabei wird sich die zukünftige Tiefseeforschung grundlegend von der traditionellen Meereskunde unterscheiden und eher an Methoden und Geräte der Raumfahrttechnik erinnern.

Rolf Gradinger

Meeresbiologen sollten verstärkt erfolgversprechende Ansätze aus angrenzenden biologischen Disziplinen aufgreifen und weiterentwickeln. Experimentelle Studien, um Struktur und Funktion mariner Ökosysteme besser zu verstehen, sowie die Übernahme des Metagemeinschaftskonzepts und funktionelle Genomanalysen erscheinen mir besonders vielversprechend.

Arne Körtzinger

Es war einmal ein Lattenzaun, Zwischenraum, hindurchzuschauen.
Ein Architekt, der dieses sah, stand eines Abends plötzlich da –
und nahm den Zwischenraum heraus und baute draus ein großes Haus.
Der Zaun indessen stand ganz dumm, mit Latten ohne was herum,
Ein Anblick gräßlich und gemein. Drum zog ihn der Senat auch ein.
Der Architekt jedoch entfloh nach Afri- od- Ameriko.
(*Der Lattenzaun*, Christian Morgenstern)

Ich glaube, in der Meeresforschung verhält es sich wie bei dem Lattenzaun: Die großen meereskundlichen Disziplinen (die Latten) haben inzwischen ein ansehnliches und beeindruckendes Werk (den Lattenzaun) zustande gebracht. Die großen offenen Fragen liegen jedoch im Zwischenraum zwischen den Disziplinen.

Aufgrund unserer noch immer stark disziplinären Denkweise sehen wir zuerst die Latten und nicht die Zwischenräume. Ich hoffe, dass die zukünftigen Generationen von Meeresforschern es schaffen werden, den Zwischenraum zu einem großen Haus, einem ganzheitlichen Gedankengebäude des Systems Erde, zusammenzufügen (und dass sich die Perspektiven junger Forscher in Deutschland verbessern, damit sie nicht nach Ameriko fliehen müssen ...).

Ich wünsche mir, dass wir den Weg zu einer wissenschaftsfreundlicheren Gesellschaft finden. Ein Irrweg ist die Reduktion der Forschung auf angewandte Aspekte, auf eine vermeintliche Planbarkeit von Erkenntnis und auf die Hoffnung, der gesellschaftliche Nutzen von Forschung sei durch frühzeitigen lenkenden Eingriff des Staates zu erhöhen. Grundlagenforschung ist vielleicht die wichtigste Wertschöpfungsquelle unserer Gesellschaft und braucht Rahmenbedingungen, die ihrem Wesen entsprechen und kreative Entfaltungsmöglichkeiten schaffen.

Einige dieser vor einem Jahrzehnt formulierten Zukunftsvisionen sind mittlerweile tatsächlich in der modernen Meeresforschung realisiert worden, andere harrten nach wie vor ihrer Umsetzung. Die rapide voranschreitende technologische Entwicklung hat die Erforschung der Tiefsee mit Tauchrobotern und Lander-Systemen enorm beflügelt und liefert heute wesentliche Beiträge zum Verständnis der globalen Stoffkreisläufe. Neueste, aus der medizinischen Forschung adaptierte molekularbiologische Verfahren in Kombination mit innovativen Methoden der Statistik und Bioinformatik sowie der zunehmenden Leistungsfähigkeit neuer Computergenerationen erlauben die Verarbeitung riesiger Datenmengen zur Analyse von Metagenomen, d. h. zur genetischen Analyse ganzer Lebensgemeinschaften.

Die biologische Forschung der letzten Jahre ist durch die sogenannten „omics“-Ansätze geprägt, also Analyseverfahren, mit denen bestimmte Stoffwechselleistungen eines Organismus (oder einer Population) in ihrer Gesamtheit untersucht werden: Proteomics, Metabolomics, Genomics und Transcriptomics stehen demnach für Untersuchungen, in denen sämtliche synthetisierten Proteine, Metabolite oder exprimierte Gene, erfasst werden. Diese Verfahren werden zügig weiterentwickelt und auf die Metaebene (also auf ganze Ökosysteme) angewandt werden. Dabei wird sich auch das Fachgebiet der Bioinformatik zu einer Schüsseldisziplin der Meeresforschung entwickeln.

Die Meeresforschung wird sich somit in zwei scheinbar gegenläufige Hauptrichtungen weiter bewegen: Zum einen ermöglicht der biotechnologische Fortschritt, immer tiefer zu den molekularen Details der Mechanismen sämtlicher Lebensäußerungen der Organismen vorzudringen (mit der Tendenz, diese gegebenenfalls auch zu beeinflussen). Im anderen Forschungsstrang werden die Meereswissenschaftler die Verbesserung hochauflösender (gekoppelter) Ökosystemmodellierungen intensiv vorantreiben, gestützt auf immer leistungsfähigere Rechner. Der ökophysiologischen Forschung wird dabei in immer stärkerem Maße die Rolle zukommen, als Bindeglied zwischen den molekularen und ökosystemaren Disziplinen zu fungieren und Synergieeffekte zu befördern. Diese Entwicklungen sollten auch bei der

zukünftigen Gestaltung meeresbiologischer Ausbildungsprogramme berücksichtigt werden. Dabei kann nicht auf die Vermittlung eines gewissen traditionellen Grundwissens über das „Tier- und Pflanzenreich“ verzichtet werden.

Geografisch werden dank immer neuer Beobachtungs-, Mess- und Probenahmegeräte die Tiefsee und der Tiefseeboden zunehmend intensiver erforscht werden. Die vom Klimawandel besonders stark betroffenen Polarmeere haben einen großen Einfluss auf die globale ozeanische Zirkulation und den Wärmehaushalt der Atmosphäre. Marine Polarforschung wird daher wie in den letzten drei Jahrzehnten in Deutschland eine wichtige Rolle spielen. Besonders bedeutsam scheint aber die Untersuchung der küstennahen Meeresgebiete weltweit, denn hier ist die Interaktion zwischen den natürlichen, vom Klimawandel überprägten Prozessen und dem immer besitzergreifenderen Menschen am intensivsten. Die ganzheitliche Betrachtung der natürlichen, ökonomischen und sozialen Dimensionen der Küstenmeere ist nicht nur gesellschaftlich, sondern auch wissenschaftlich ein faszinierendes Forschungsfeld.

Die Väter der deutschen Meeresforschung am Ende des 19. Jahrhunderts waren Universitätsprofessoren und noch immer sind bei uns Forschung und Lehre eng verknüpft. Während heute die Meeresforschung überwiegend von den „außer-universitären“ Helmholtz-, Leibniz- und Max-Planck-Instituten geleistet wird, sind die Universitäten vor allem die Träger der akademischen Ausbildung mit Vorlesungen, Seminaren, Praktika und Exkursionen. Nur sie haben das Promotionsrecht. Die führenden Wissenschaftler der Forschungsinstitute werden als Kooperationsprofessoren in gemeinsamen Verfahren mit benachbarten Universitäten berufen. Sie beteiligen sich am Lehrbetrieb und betreuen Examens- und Doktorarbeiten. Umgekehrt kooperieren die hauptamtlichen Professoren und ihre Doktoranden mit den Forschungsinstituten und nutzen deren Forschungsschiffe, Laboratorien und Versuchsanlagen. So entsteht jedes Jahr eine große Zahl hochaktueller, oftmals methodisch sehr aufwändiger Doktorarbeiten deutscher und ausländischer Nachwuchswissenschaftler. Tatsächlich fußen die Erfolge der deutschen Meeresforschung in erheblichem Maße auf der engen personellen Verknüpfung zwischen Forschungsinstituten und Universitäten. Dies System bedarf einer ständigen Pflege durch die Leitungen der Universitäten und der Forschungsinstitute: Den Universitätsprofessoren müssen Freiräume für Forschung und den „Außeruniversitären“ Anreize für Lehrtätigkeiten geboten werden. Bund und Länder haben dafür Förderinitiativen entwickelt, z. B. im Rahmen der Exzellenz-Initiative.

Heute studieren auch in Deutschland deutlich mehr Frauen als Männer Meeresbiologie. Während noch in den 1970er Jahren Meeresforschung weitgehend Männersache war, ist jetzt der Frauenanteil in der Meeresforschung besonders beim akademischen Nachwuchs Forschungsinstituten, aber auch in Leitungspositionen.

Seit dem 2. Weltkrieg hatte es ständig einen erheblichen „Export“ junger deutscher Meeresforscher ins Ausland gegeben. Im Gegenverkehr nimmt seit einiger Zeit die Zahl der Berufungen ausländischer Meereswissenschaftler und

der Zugang ausländischer Studierender zu unseren meereswissenschaftlichen Studiengängen stark zu. Damit wurde Englisch auch bei uns zur gängigen Lehrsprache der Meereswissenschaftler. Diese verstehen sich heute als Teilhaber eines gemeinsamen europäischen und globalen Wissenschaftsmarktes.

Eine der großen Herausforderungen für die marinen Ökologen wird dabei sein, die vielfältigen Forschungsergebnisse wissenschaftlich und gegebenenfalls auch gesellschaftlich nutzbar zu machen. Wie kann die Flut von Daten, die weltweit publiziert werden, verknüpft und strukturiert werden, und wie können daraus die wesentlichen Erkenntnisse destilliert werden? Hier bietet wiederum die Metaanalyse (d. h. die Auswertung der durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Arbeitsgruppen erhobenen Datensätze hinsichtlich einer bestimmten Fragestellung) einen vielversprechenden Ansatzpunkt. Die wissenschaftlich-technologischen Perspektiven der Meeresforschung sind also enorm. Wie steht es jedoch mit dem Transfer dieses Wissens in die Gesellschaft, und wie kann diese – über die direkte Nutzung des Lebensraums Meer als Nahrungs- und Rohstoffquelle hinaus – von meeresbiologischer Forschung profitieren? Unser „Anthropozän“ liefert hier viele Aufgaben, insbesondere im Bereich Klimawandel, Biodiversitätsschwund, nachhaltiges Management und wirksame Schutzprogramme, die uns mit Sicherheit in den kommenden Jahrzehnten intensiv beschäftigen werden. Hierzu bedarf es einer großen Zahl kreativer und fleißiger Meeresökologen. Schüler*innen und Studierende hierfür zu begeistern, ist eine wichtige Aufgabe, heute und für die kommenden Jahre. Ihr dient auch dieses Lesebuch.



Gotthilf Hempel, Wilhelm Hagen und Kai Bischof bei der Umbruchkorrektur ihres Epilogs am 27.10.2016. (Foto: Jessica Schiller, Universität Bremen)