



Gotthilf Hempel  
Kai Bischof  
Wilhelm Hagen  
*Hrsg.*

# Faszination Meeres- forschung

Ein ökologisches Lesebuch

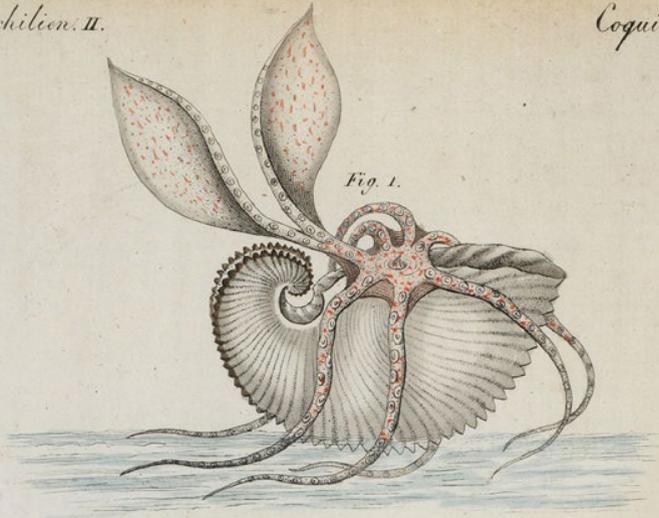
*2. Auflage*

 Springer

# Faszination Meeresforschung

Conchilien. II.

Coquilles. II.



Gotthilf Hempel · Kai Bischof · Wilhelm Hagen  
Hrsg.

# Faszination Meeresforschung

Ein ökologisches Lesebuch

2. Auflage

 Springer

*Herausgeber*  
Gotthilf Hempel  
Bremen, Deutschland

Wilhelm Hagen  
Bremen, Deutschland

Kai Bischof  
Bremen, Deutschland

ISBN 978-3-662-49713-5 ISBN 978-3-662-49714-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-49714-2>

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

1. Aufl.: © Verlag H.M. Hauschild GmbH, Bremen 2006

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017, korrigierte Publikation 2020

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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Einbandabbildung: Gefleckter Adlerrochen *Aetobatus narinari*  
Planung: Merlet Behncke-Braunbeck

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Germany

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

# Wissenschaftler können die Politik verändern und so die Welt verbessern

Es ist noch gar nicht lange her. Noch vor weniger als fünfzig Jahren besaßen selbst Wissenschaftler nur rudimentäres Wissen über die Ozeane und Meere. Ihre Erkenntnisse tauschten sie unter ihresgleichen aus, selbst befreundete Disziplinen wurden kaum wahrgenommen, nicht mit eigenen kombiniert, und der Austausch fand in Konferenzen und Fachpublikationen statt. Es war die Zeit der Elfenbeintürme, des bewusst von der Gesellschaft, den Medien und der Politik isolierten akademischen Betriebs.

Heute ist alles anders. Die Erkenntnisse über die Ozeane sind enorm gewachsen, die einzelnen Wissenschaftsdisziplinen sind verwoben und werden nicht mehr isoliert betrachtet. Und die Möglichkeiten des inhaltlichen Austausches sind vielfältig. Das System der Ozeane wird als komplexes Ökosystem begriffen und teilweise schon verstanden, und die gesellschaftliche Position und Rolle der Wissenschaftler hat sich grundlegend geändert.

Vor ungefähr zehn Jahren wurden diese Veränderungen manifest. Der Stern-Report im Jahre 2006 und vor allem der IPCC-Report der Vereinten Nationen im Jahr 2007 belegten dies eindrucksvoll. Der Begriff „Klimawandel“ fand sozusagen über Nacht innerhalb der Gesellschaft Widerhall, und es wurde ein Bewusstsein im Umgang mit unserem Planeten für die Zukunft geschaffen. Trotz – oder gerade wegen – der diskutierten Inhalte und Folgen des IPCC-Berichts ist die Wissenschaftsgemeinde aufgerufen, diese begonnene Sensibilisierung der Öffentlichkeit für die Bedeutung und die Probleme des maritimen Ökosystems weiterzuführen.

Veränderungen und Entwicklungen in unserem Verhalten sind immer dann schwer zu erreichen, wenn diese nicht sofort erkennbare Vorteile für unser Leben erbringen. Doch die Natur, das marine Ökosystem insbesondere, zeigt nur einen sehr langsam und nicht einfach erkennbaren Wandel. Auch Maßnahmen,

die diesen Wandel umkehren oder auch nur verlangsamen, sind kaum medial darzustellen. Doch leider sind unsere politischen Strukturen reaktiv und opportunistisch ausgelegt und reagieren dementsprechend nur auf Druck. Dieser muss vom Souverän ausgehen. Doch auch das Individuum darin folgt vor allem populären Sichtweisen und Erkenntnissen. Den schon weit vorangeschrittenen Veränderungen des marinen Ökosystems jedoch – mit all seinen Folgen –, ist nur mit Maßnahmen zu begegnen, die mit Einschränkungen an Konsum und vor allem wirtschaftlichen Entwicklungen verbunden sind.

Alldem können nur die Wissenschaftler begegnen. Aber auch nur, wenn sie willens und in der Lage sind, ihre Erkenntnisse so darzustellen, dass die Medien diese verbreiten können oder sie im Schulsystem nachhaltig die Kinder und Jugendlichen prägen. Dann sind die Voraussetzungen geschaffen, über den gebildeten Souverän Druck auf die Politik auszuüben.

Dieses Buch ist geradezu prädestiniert, dies zu schaffen. Aus meiner eigenen, jahrzehntelangen Erfahrung weiß ich, dass es möglich und vor allem notwendig ist, Erkenntnisse von Wissenschaftlern so in Publikationen umzusetzen, dass diese den beschriebenen Effekt hervorrufen.

Das Wissen über unsere Ozeane wird größer und komplexer. Wir müssen mit solchen Werken dafür Sorge tragen, dass dies auch zu nachhaltigen Konsequenzen für unseren blauen Planeten führt.



Nikolaus Gelpke  
*mare*-Verlag  
Hamburg

# Leben mit dem Meer

Das Konzept für ein meeresbiologisches Lesebuch entstand vor zwanzig Jahren auf einer langen Expedition des Forschungsschiffs *Polarstern* ins antarktische Weddellmeer. Wie Irmtraut Hempel im Prolog schildert, war es Brauch, dass die Wissenschaftler in Abendvorträgen ihren Kollegen und Kolleginnen anderer Fachrichtung ihre Arbeitsgebiete vorstellten. Daraus entstand, mit finanzieller Unterstützung des Alfred-Wegener-Instituts, die *Biologie der Polarmeere*, versehen mit einem Vorwort von Helmut Schmidt über die Bringschuld der Wissenschaft. Das Buch war schnell vergriffen, es folgte eine revidierte englische Ausgabe, als nächstes dann die *Faszination Meeresforschung*. Dieses ökologische Lesebuch brachte Beispiele aus allen Zonen und Tiefenstufen der Weltmeere, es fand viel Interesse und Zustimmung bei Schülern, Lehrern und Studierenden. Nun liegt die zweite Auflage vor, in neuem Gewand und handlicher als die erste. Sie zeigt u. a. die großen Fortschritte und Themenverschiebungen in der biologischen Meeresforschung im vergangenen Jahrzehnt.

Warum brauchen wir Meeresforschung und warum brauchen wir Bücher wie dieses? Nur ein kleiner Teil des Planeten Erde ist durch den Menschen besiedelt, der Rest ist Meer oder Wüste. Das Meer gibt uns Nahrung, es reguliert das Klima und die globalen Stoffkreisläufe. Diese Funktionen zu verstehen, zu schützen und zu erhalten, ist die große Aufgabe der Meereswissenschaften. In Anbetracht der riesigen Weiten des Meeres ist internationale Zusammenarbeit unabdingbar. Dies wurde schon immer in den Meereswissenschaften gelebt und sollte Grundlage für zukünftige friedliche *Ocean Governance* sein.

In Zukunft wird sich die Nutzung des Meeres weiter ausdehnen, jedoch sind wir uns über mögliche negative Auswirkungen nicht immer im Klaren. Dies betrifft vor allem die Auswirkungen auf die Lebewesen im Meer, deren vielfältige Verflechtungen mit der physiko-chemischen Umwelt und innerhalb des

Nahrungsnetzes enorm komplex sind. Mikroalgen sind die Grundnahrung für viele Meerestiere, sie liefern Sauerstoff, binden Kohlendioxid und sind damit auch für die Balance der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre wichtig. Was passiert aber, wenn sich durch Ozeanversauerung die Mikroalgenegemeinschaft in ihrer Zusammensetzung verschiebt? Ändern sich dadurch das Nahrungsnetz und auch die chemische Balance? Wir beobachten zurzeit eine starke Abnahme der Meereisbedeckung im arktischen Ozean. Das hat große Auswirkungen auf die Austauschprozesse zwischen Ozean und Atmosphäre und auch auf die Organismen, die an das Leben im und mit dem Eis angepasst sind. Wie wird sich die biologische Vielfalt im arktischen Ozean verändern?

Das Meer bietet immer noch wunderbare Überraschungen in der Vielfalt des Lebens. Wir kennen noch lange nicht alle Organismen des Meeres, geschweige denn ihre Lebensweisen und Lebensansprüche. Die Biodiversität des Ozeans ist eine riesige, für den Menschen nützliche Schatzkammer, die wir schützen müssen. Aber nicht nur das – wir brauchen das Meer auch als Quelle der Regeneration und Inspiration.

Die Meeresforschung bildet die Grundlage für die verantwortungsvolle Nutzung der Ressourcen und „Dienstleistungen“ des Meeres. Um die Bedeutung des Meeres für die Menschheit zu verdeutlichen, hat die Bundesregierung das Jahr 2016/17 zum „Jahr des Ozeans“ ausgerufen. Ich freue mich, dass die zweite Auflage der *Faszination Meeresforschung* rechtzeitig zum Jahr des Ozeans erscheint. Junge und ältere Meeresforscher und Meeresforscherinnen aus verschiedenen Instituten berichten nicht nur über ihre Entdeckungen, sie liefern auch Beiträge zur Frage nach einem weisen Umgang mit dem Meer. Ich danke dem Herausgaberteam und den mehr als 60 Autoren für dieses gelungene Lesebuch und wünsche den Lesern Wissensgewinn und viel Freude bei der Lektüre.

Karin Lochte

Karin Lochte  
Alfred-Wegener-Institut,  
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

# Vorwort

Nach einem Jahrzehnt erscheint die zweite Auflage des Buches *Faszination Meeresforschung – ein ökologisches Lesebuch* in neuem Format und in einem anderen Verlag. Die Texte wurden im Lichte neuer Forschungsergebnisse aktualisiert, und neue Kapitel zu wichtigen Themen wurden hinzugefügt, beispielsweise zum Thema Klimawandel. Die Neuauflage sollte trotz der thematischen Erweiterung schlanker und handlicher als ihre Vorgängerin werden. Daher mussten einzelne Kapitel aus der Erstauflage wegfallen und andere kräftig gekürzt werden.

Die meisten Bücher des Verlags Springer Spektrum erscheinen heute bei der Neuauflage parallel als e-Version, in der auch Einzelkapitel separat zugänglich sind. Das gilt auch für unser Buch.

Fast alle angefragten Autorinnen und Autoren waren bereit, ihr Kapitel in einem engen Zeitrahmen gründlich zu überarbeiten, mit vielen neuen Abbildungen zu versehen und die Listen der weiterführenden Literatur und Internetlinks zu aktualisieren, oft gemeinsam mit jungen Koautorinnen und Koautoren. Ähnlich schnell und effizient arbeiteten die „neuen“ Autorinnen und Autoren.

Den Anstoß zur zweiten Auflage hatte Ende 2014 Linda Falkenberg in der Nachfolge des Hauschild-Verlags gegeben. Merlet Behncke-Braunbeck hat uns wenig später zur Realisierung im Springer-Verlag ermutigt. Die technische Durchführung lag verlagsseitig vor allem in den kompetenten Händen von Martina Mechler. Beiden sind wir dankbar für ihre große Unterstützung und für ihre Bereitschaft, auf unsere, dem Charakter des Lesebuchs geschuldeten, Sonderwünsche einzugehen. Dankbar hervorheben möchten wir das vorzügliche Lektorat durch Regine Zimmerschied. Irmtraut Hempel hat die Erstellung dieser Neuauflage beratend begleitet.

Kai Bischof, Wilhelm Hagen, Gotthilf Hempel

Bremen, Frühjahr 2016



Der Fangzahn (*Anoplogaster spec.*) ist ein kleiner Tiefseefisch (max. 15 cm).  
(Foto: Uwe Piatkowski, GEOMAR)

# Prolog

Irmtraut Hempel und Gotthilf Hempel

Auf unseren Polarexpeditionen mit dem Forschungsschiff *Polarstern* in den 1980er Jahren war es Brauch, dass abends im Kinosaal eine Veranstaltung stattfand, auf der Wissenschaftler der verschiedenen Arbeitsgruppen den Expeditionsteilnehmern der anderen Fachgebiete von ihren Arbeiten an Bord, von ihren Erfolgen, aber auch von Fehlschlägen berichteten. Zur Teilnahme war auch die Schiffsbesatzung eingeladen. Wer Interesse hatte, konnte erfahren, wozu die verschiedenen Geräte eingesetzt werden, warum z. B. Dauerstationen wichtig sind, auf denen das Schiff stunden- und tagelang auf gleicher Position gehalten werden muss.

Die Vortragenden waren gefordert, einem überwiegend fachfremden Publikum – vom Kapitän bis zum Bootsmann und vom Professor bis zum Studenten – die Fragestellung ihres Forschungsthemas verständlich zu vermitteln. Schon auf See entstand der Gedanke, diesen bunten Strauß von aktuellen Forschungsthemen, angereichert mit informativen und schönen Bildern, in einem Buch mit dem Titel *Biologie der Polarmeere* zu veröffentlichen.

Die Form eines Lesebuchs bot sich an, denn laut *Großer Brockhaus* von 1983 ist ein Lesebuch eine „literarische Sammlung, zusammengestellt unter einer bestimmten Zielsetzung“. Unser Lesebuch enthält eine Auswahl von wissenschaftlichen Texten zur Studienhilfe und zur Einführung in ein Sachgebiet.

Unsere weit gespannten „Lesegüter“ sind für eine breite Leserschaft bestimmt. Kompliziert erscheinende Forschungsthemen und Methoden sollten daher in leicht verständlicher Sprache und in gut lesbarer Form vorgestellt werden. Dies war für die meist jungen Wissenschaftler ungewohnt, denn fachwissenschaftliche Artikel werden normalerweise nach einem anderen, nüchternen Schema und in englischer Sprache verfasst.

Die *Biologie der Polarmeere* (1995) war ein großer Erfolg, besonders bei Studenten der Meeresbiologie, aber auch bei Lehrern. Zehn Jahre später, als das

Buch längst vergriffen und der Verlag in Jena aufgelöst war, entschlossen wir uns zu einer englischsprachigen Neuauflage, die 2009 im NW-Verlag in Bremerhaven erschien. Auch sie ist inzwischen vergriffen. Aber schon vorher begannen wir, Beiträge für ein zweites, breiter angelegtes Lesebuch zu sammeln, das über die Polarmeere hinaus die meeresbiologische Forschung in allen Klimazonen behandeln sollte. Daraus wurde die *Faszination Meeresforschung*, liebevoll und aufwendig produziert von Friedrich Steinmeier im Hauschild-Verlag in Bremen (2006). Auch dieses Lesebuch fand viele Liebhaber und war nach wenigen Jahren vergriffen. Die Nachfrage nach einer Neuauflage überdauerte den Hauschild-Verlag.

In den zehn Jahren seit Erscheinen der ersten Auflage der *Faszination Meeresforschung* hat sich die meeresbiologische Forschung auf vielen Feldern kräftig weiterentwickelt:

- Die Expansion der marinen Geowissenschaften in Kiel und Bremen führte zu einer Intensivierung der Tiefseeforschung unter Verwendung neuer Beobachtungs-, Mess- und Sammelsysteme. Davon hat auch die meeresbiologische Forschung profitiert.
- Gewaltige Fortschritte hat die marine Mikrobiologie an und in den Meeresböden vom Wattenmeer bis in die Tiefseegräben und in der Wassersäule gemacht.
- Die aktuellen und potenziellen Auswirkungen des Klimawandels auf Meeresorganismen und marine Ökosysteme wurden zum meistzitierten Leitthema der meeresökologischen Forschung.
- Die Biodiversitätsforschung profitierte von der marinen Volkszählung „Census of Marine Life“ und von den rapiden Fortschritten der inzwischen hochentwickelten molekulargenetischen Analysetechniken.
- Die Marikultur von Fischen, Krebsen, Muscheln und Algen hat im vergangenen Jahrzehnt einen gewaltigen Aufschwung erfahren.
- Neue Systeme der Gewinnung, Weitergabe, Verarbeitung und Vernetzung großer Datenmengen prägen inzwischen die Arbeit vieler Meeresbiologen.

In der Neuauflage haben wir uns bemüht, diesen aktuellen Entwicklungen Rechnung zu tragen. Dafür mussten neue Autorinnen und Autoren gesucht und gewonnen werden. Dabei halfen uns Anregungen aus den „meeresökologischen Dämmerchoppen“ in Bremen. Bei diesen regelmäßigen Treffen diskutieren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aller Altersgruppen und diverser Disziplinen meeresökologische Themen.

Das Buch ist in sieben Themen gegliedert mit insgesamt 48 Kapiteln:

In Teil I bis Teil III werden die großen Lebensräume der Ozeane und ihre Lebensgemeinschaften dargestellt: zuerst die Physik und Chemie der Wassermassen mit ihrer räumlichen Struktur und Dynamik, dann die Gemeinschaften des driftenden Planktons und der schnellen Schwimmer, d. h. des Nektons, wie Tintenfische, Fische, Schildkröten, Vögel und Wale. Über den Meeresboden des offenen Ozeans, die Vielfalt seiner Bewohner und die im Benthos ablaufenden Lebensprozesse wissen wir heute viel mehr als vor zehn Jahren.

Teil IV ist den Schelfmeeren und ihren Küsten gewidmet. Hier sind die Lebensgemeinschaften des freien Wassers und des Meeresbodens so eng miteinander verknüpft, dass die Übergänge fließend sind, z. B. im Korallenriff, im Wattenmeer oder in der Mangrove. Die Vielfalt der Einwirkungen des Menschen auf die küstennahen Meeresräume und ihre Lebensgemeinschaften ist tabellarisch aufgeführt.

Den meeresbiologischen Auswirkungen des Klimawandels, d. h. vor allem Erwärmung und Versauerung des Weltmeeres, ist in der Neuauflage ein eigener Teil (V) gewidmet. Dort werden die vielfältigen biologischen Reaktionen auf allen Skalen von der Zelle bis zur Lebensgemeinschaft behandelt, und es wird gezeigt, wie Abwandern und Anpassen an räumliche, physiologische und ökologische Grenzen stoßen.

Der massivste Eingriff des Menschen in die marinen Ökosysteme ist immer noch die Fischerei. Teil VI betrachtet aus verschiedenen Perspektiven die Weltfischerei und den Walfang sowie die Marikultur von Fischen, Algen und marinen Wirbellosen.

Teil VII gibt einen Überblick über moderne Arbeitsgeräte und Methoden der Meeresbiologen und beschreibt die meeresbiologische Forschungslandschaft in Deutschland. Auf eine Darstellung des Studiums der Meeresbiologie wurde in dieser Auflage verzichtet, weil sich Studierende, Schülerinnen und Schüler heutzutage zielgerichtet im Internet darüber orientieren können, bevor sie dann konkret Kontakt zu den marin orientierten Universitäten (Oldenburg, Bremen, Hamburg, Kiel, Rostock) aufnehmen. Der Epilog beschließt das Buch mit einer Rückschau auf die behandelten Themenfelder und einem Ausblick auf die Zukunft meeresbiologischer Forschung.

Und nun wünschen wir unseren Leserinnen und Lesern viel Vergnügen und Inspiration beim Studieren der vielen „Lesegüter“.



Die Portugiesische Galeere (*Physalia physalis*), eine Staatsqualle, segelt mit Hilfe ihrer Gasblase an der Wasseroberfläche und nutzt ihre bis 50 m langen, giftigen Tentakeln zum Beutefang. (Foto: Katharina Kreissig)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Teil I</b>	<b>Der größte Lebensraum: Das Pelagial</b> .....	<b>1</b>
	<i>Wilhelm Hagen</i>	
<b>1</b>	<b>Die physikalische Umwelt „Meer“</b> .....	<b>3</b>
	<i>Ursula Schauer, Gerd Rohardt und Eberhard Fabrbach</i>	
<b>2</b>	<b>Der marine Kohlenstoffkreislauf</b> .....	<b>15</b>
	<i>Arne Körtzinger</i>	
<b>3</b>	<b>Leben im Pelagial</b> .....	<b>27</b>
	<i>Sigrid Schiel, Astrid Cornils und Barbara Niehoff</i>	
<b>4</b>	<b>Eine virtuelle Reise durch den Atlantik – Energieflüsse, Nahrungswege und Anpassungspfade</b> .....	<b>41</b>
	<i>Holger Auel und Wilhelm Hagen</i>	
<b>5</b>	<b>Das Leben im Eispalast: Flora und Fauna des arktischen Meereises</b> .....	<b>51</b>
	<i>Rolf Gradinger und Bodil Bluhm</i>	
<b>6</b>	<b>Wechselwirkungen zwischen Meeresboden und Ozean: Die pelago-benthische Kopplung im Südpolarmeer</b> .....	<b>63</b>
	<i>Ulrich Bathmann</i>	
<b>7</b>	<b>Auftriebsgebiete und El Niño</b> .....	<b>71</b>
	<i>Matthias Wolff</i>	

<b>Teil II Plankton und Nekton</b> .....	83
<i>Wilhelm Hagen</i>	
<b>8 Das Bakterioplankton – Riese und Regulator im marinen Stoffumsatz</b> .....	85
<i>Meinhard Simon</i>	
<b>9 Das Phytoplankton im Überblick</b> .....	103
<i>Eva-Maria Nöthig und Katja Metfies</i>	
<b>10 Die wichtigsten Gruppen des Zooplanktons</b> .....	113
<i>Astrid Cornils, Gustav-Adolf Paffenhöfer und Sigrid Schiel</i>	
<b>11 Krill und Salpen prägen das antarktische Ökosystem</b> .....	121
<i>Volker Siegel</i>	
<b>12 Mikroplastikmüll im Meer</b> .....	135
<i>Lars Gutow, Gunnar Gerdtts und Reinhardt Saborowski</i>	
<b>13 Tintenfische – die Spitzenathleten der Weltmeere</b> .....	143
<i>Uwe Piatkowski und Alexandra Lischka</i>	
<b>14 Meeresschildkröten haben es schwer</b> .....	147
<i>Mark Wunsch</i>	
<b>15 Fischbrut im Nahrungsnetz</b> .....	153
<i>Walter Nellen</i>	
<b>16 Der arktische Polardorsch und der Antarktische Silberfisch: Erfolgsgeschichten im Eismeer</b> .....	159
<i>Hauke Flores</i>	
<b>17 Seevögel und ihre Ernährungsweisen als Spiegel der Meeresumwelt</b> .....	163
<i>Holger Auel</i>	
<b>18 Schweinswale in der Ostsee – Forschung für den Artenschutz</b> ..	171
<i>Harald Benke</i>	

<b>Teil III Am Boden der Ozeane</b> .....	177
<i>Kai Bischof</i>	
<b>19 Leben am Meeresboden</b> .....	179
<i>Dieter Piepenburg, Angelika Brandt, Karen von Juterzenka, Heike Link, Pedro Martínez Arbizu, Michael Schmid, Laurenz Thomsen und Gritta Veit-Köhler</i>	
<b>20 Mikroorganismen des Tiefseebodens: Vielfalt, Verteilung, Funktion</b> .....	211
<i>Christina Bienhold und Antje Boëtius</i>	
<b>21 Stabilität, Störungen oder Zufall: Was steuert marine Biodiversität?</b> .....	223
<i>Julian Gutt</i>	
<b>22 Dunkle Energie: Symbiosen zwischen Tieren und chemosynthetischen Bakterien</b> .....	231
<i>Anne-Christin Kreuzmann und Nicole Dubilier</i>	
<b>Teil IV Küstennahe Ökosysteme</b> .....	245
<i>Kai Bischof</i>	
<b>23 Meeresküsten – ein Überblick</b> .....	247
<i>Karsten Reise</i>	
<b>24 Leben auf festem Grund – Hartbodengemeinschaften</b> .....	255
<i>Martin Wahl</i>	
<b>25 Muschelbänke, Seegraswiesen und Watten an Sand- und Schlickküsten</b> .....	261
<i>Harald Asmus und Ragnhild Asmus</i>	
<b>26 Mikroalgen in der Grenzschicht zwischen Sediment und Wasser</b>	273
<i>Karen Helen Wiltshire und Nicole Aberle-Malzahn</i>	
<b>27 Wälder unter Wasser – Großalgengemeinschaften</b> .....	281
<i>Kai Bischof und Markus Molis</i>	
<b>28 Mangroven – Wälder zwischen Land und Meer</b> .....	291
<i>Ulrich Saint-Paul und Martin Zimmer</i>	

<b>29</b>	<b>Ökosystem Korallenriff – Schatzkammer der Meere</b> .....	<b>303</b>
	<i>Claudio Richter</i>	
<b>30</b>	<b>Die Ostsee</b> .....	<b>315</b>
	<i>Maren Voß und Joachim Dippner</i>	
<b>31</b>	<b>Belastungen unserer Meere durch den Menschen</b> .....	<b>329</b>
	<i>Henning von Nordheim und Gotthilf Hempel</i>	
<b>Teil V</b>	<b>Meeresökologie in Zeiten des Klimawandels</b> .....	<b>343</b>
	<i>Kai Bischof</i>	
<b>32</b>	<b>Wie wirkt der Klimawandel auf das Leben im Meer?</b> .....	<b>345</b>
	<i>Hans-Otto Pörtner</i>	
<b>33</b>	<b>Ozeanversauerung: Gewinner und Verlierer im Plankton</b> .....	<b>357</b>
	<i>Ulf Riebesell und Lennart Bach</i>	
<b>34</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Wirkung auf Meerestiere</b> .....	<b>365</b>
	<i>Daniela Storch, Gisela Lannig und Hans-Otto Pörtner</i>	
<b>35</b>	<b>Helgoland, Krill und Klimawandel</b> .....	<b>373</b>
	<i>Friedrich Buchholz</i>	
<b>36</b>	<b>Klimaflüchtlinge, Migranten und Invasoren</b> .....	<b>385</b>
	<i>Christian Buschbaum und Karen Helen Wiltshire</i>	
<b>Teil VI</b>	<b>Das Meer als Nahrungsquelle: Fischerei und Marikultur</b> ..	<b>399</b>
	<i>Gotthilf Hempel</i>	
<b>37</b>	<b>Die Weltfischerei – mit weniger Aufwand fängt man mehr</b> .....	<b>401</b>
	<i>Werner Ekau</i>	
<b>38</b>	<b>Nachhaltiges Fischereimanagement – kann es das geben?</b> .....	<b>415</b>
	<i>Daniel Pauly und Rainer Froese</i>	
<b>39</b>	<b>Zum Beispiel Kabeljau und Hering: Fischerei, Überfischung und Fischereimanagement im Nordatlantik</b> .....	<b>427</b>
	<i>Christopher Zimmermann und Cornelius Hammer</i>	

<b>40</b>	<b>Der tote Leviathan – ein Streifzug durch die Geschichte des antarktischen Walfangs</b> .....	443
	<i>Karl-Hermann Kock und Helena Herr</i>	
<b>41</b>	<b>Sushi und die Algenfarmen</b> .....	455
	<i>Cornelia Buchholz und Bela Buck</i>	
<b>42</b>	<b>Kultur von Meerestieren – mehr Eiweißnahrung aus dem Meer ..</b>	461
	<i>Andreas Kunzmann und Carsten Schulz</i>	
<b>Teil VII</b>	<b>Forschungspraxis der Meeresökologie</b> .....	469
	<i>Gotthilf Hempel</i>	
<b>43</b>	<b>Über Forschungsschiffe</b> .....	471
	<i>Klaus von Bröckel</i>	
<b>44</b>	<b>Der Hausgarten in der Framstraße: Von der Momentaufnahme zur Langzeituntersuchung</b> .....	485
	<i>Thomas Soltwedel</i>	
<b>45</b>	<b>Neue Methoden der Artbestimmung</b> .....	495
	<i>Christoph Held und Astrid Cornils</i>	
<b>46</b>	<b>Zeitmaschine DNA – die verschlüsselte Evolutionsgeschichte im Erbgut</b> .....	503
	<i>Marc Kochzius</i>	
<b>47</b>	<b>Computermodelle als Werkzeuge der Meeresökologen</b> .....	515
	<i>Hauke Reuter und Stefan Königstein</i>	
<b>48</b>	<b>Die meeresbiologische Forschungslandschaft in Deutschland ..</b>	525
	<i>Gotthilf Hempel</i>	
	<b>Erratum zu: Zum Beispiel Kabeljau und Hering: Fischerei, Überfischung und Fischereimanagement im Nordatlantik</b> .....	E1
	<i>Christopher Zimmermann und Cornelius Hammer</i>	
	<b>Epilog</b> .....	539
	<b>Autorenverzeichnis</b> .....	547
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	553



Forschungsschiff *Maria. S. Merian* im Sargassomeer, April 2015. (Foto: Kristina Koch, Universität Bremen)

# Verzeichnis der Boxen

- Box 2.1: Das marine CO<sub>2</sub>-System
- Box 3.1: Licht im Meer
- Box 3.2: Biolumineszenz mariner Organismen
- Box 8.1: Das Leben im Mikrobennetz
- Box 10.1: Historischer Exkurs 1: Planktonforschung in Deutschland
- Box 11.1: So frisst der Krill
- Box 19.1: Das Meiobenthos der Tiefsee – kleine Tiere, große Vielfalt
- Box 19.2: Ein cooles Leben – arktische Benthosgemeinschaften
- Box 19.3: Kontinentalränder – Leben am Abhang
- Box 19.4: Ökologie des Tiefseebodens
- Box 19.5: Historischer Exkurs 2: Benthosforschung in Deutschland
- Box 22.1: Chemosynthese
- Box 22.2: Symbiose
- Box 28.1: Mangroven und Gezeiten
- Box 28.2: Bevölkerungszunahme – Vernichtung der Mangroven
- Box 30.1: Die Fische der Ostsee
- Box 31.1: Natura-2000-Meeresschutzgebiete
- Box 31.2: Meeresschutzgebiete in der Antarktis – Fallstudie Weddellmeer
- Box 32.1: Frisst der Meeresspiegelanstieg die Korallenriffe?
- Box 35.1: Plankton und Fische in sauerstoffarmen Zonen
- Box 36.1: Die Einwanderung der Trapezkrabbe in die Nordsee
- Box 37.1: Biologische Produktion an Land und im Meer – ein Vergleich
- Box 39.1: Bedrohte Fischarten
- Box 39.2: Historischer Exkurs 3: Der Internationale Rat für Meeresforschung (ICES)
- Box 43.1: Tauchroboter: Augen und Hände der Meeresökologen
- Box 43.2: Probenahme vom schaukelnden Schiff
- Box 44.1: Historischer Exkurs 4: Neapel und Helgoland – Meeresbiologische Stationen
- Box 45.1: Museumsschätze als Fundament meeresbiologischer Forschung

## **XXII** Faszination Meeresforschung

Box 46.1: Volkszählung im Meer

Box 48.1: KDM: Die deutsche Meeresforschung organisiert sich

Box 48.2: Meeresökologische Forschung international

# Teil I

## Der größte Lebensraum: Das Pelagial

Wilhelm Hagen

Im Gegensatz zu terrestrischen und auch zu benthischen Lebensräumen mit ihrer eher flächigen Ausdehnung ist das Pelagial durch eine enorme vertikale Dimension gekennzeichnet, die sich von der Oberfläche bis in über 10.000 m Tiefe erstrecken kann und überall mehr oder weniger pulsierendes Leben aufweist. Damit umfasst das marine Pelagial ein riesiges Biovolumen und den mit Abstand größten Lebensraum unseres Planeten, der trotz seiner vordergründigen Einförmigkeit eine faszinierende Vielfalt von Lebewesen hervorgebracht hat, mit sehr speziellen Anpassungen an ihr jeweiliges Habitat – von der Meeresoberfläche bis ins tiefste Abyssal, von den Polarmeeren bis in die Tropen.

Welche physikalischen und chemischen Faktoren bestimmen die Umwelt dieser Organismen? Welche Meeresströmungen sind für die Verbreitung des Planktons wichtig? Wie funktionieren die marinen Stoffkreisläufe, vor allem beim Kohlenstoff, und wie steht das Meer im biogeochemischen Austausch mit der Atmosphäre? Wir lernen die wichtigsten, zum Teil bizarren Lebensformen des Planktons (Mikroalgen, Medusen, Krebse etc.) und des Nektons (Fische, Meeresschildkröten, Wale etc.) kennen, gehen auf eine Expedition vom Nord- zum Südpolarmeer und studieren dabei typische pelagische Ökosysteme. Wir verweilen insbesondere in der eisbedeckten Arktis und den hochproduktiven Auftriebsgebieten mit ihren ökologischen Besonderheiten und verdeutlichen am Beispiel der Antarktis die intensive Kopplung der Produktionsprozesse des Pelagials mit dem Benthos (Stichwort „biologische Pumpe“).

Damit bietet der erste Teil dieses Buchs eine Einführung in den Lebensraum des offenen Ozeans, mit Schwerpunkt auf abiotischen und biotischen Prozessen im Pelagial und seinen wichtigsten Habitaten und Bewohnern.



Sonnenuntergang in der Sargassosee. (Foto: Wilhelm Hagen, BreMarE, Universität Bremen)

# 1

## Die physikalische Umwelt „Meer“

Ursula Schauer, Gerd Rohardt und Eberhard Fahrbach<sup>†</sup>

### Der physikalische Rahmen der Ökosysteme

Das Leben im Meer entfaltet sich entsprechend den physikalischen Rahmenbedingungen. Sieht man vom menschlichen Einfluss ab, so sind es neben den biologischen die physikalischen Gegebenheiten, die das Überleben und Verhalten einzelner Arten und damit den Aufbau und die Funktion eines Ökosystems bestimmen. Die physikalischen Bedingungen unterliegen ständigen Veränderungen, die natürliche Ursachen haben, aber zunehmend auch vom Menschen ausgelöst werden. Die Reaktion der Organismen auf Veränderung ist ein wesentlicher Antrieb der Evolution.

Im engeren Sinne sind die physikalischen Rahmenbedingungen im Ozean bestimmt durch die Temperatur, den Druck und die Bewegungen des Wassers. Im Ozean gelöste Stoffe, die unter dem Begriff „Salzgehalt“ zusammengefasst werden, sind eigentlich chemische Zutaten. Da sie aber zusammen mit der Temperatur und dem Druck die Dichte des Wassers bestimmen, sind sie ebenfalls für die physikalische Beschreibung relevant: Temperatur und Salzgehalt sind für die größten Bewegungsskalen im Ozean verantwortlich – die weltumspannenden Umwälzbewegungen, die deshalb thermohaline Zirkulation genannt werden.

Viele marine Organismen haben sich an einen bestimmten Temperaturbereich sowie an die entsprechenden Druck- und Salzgehaltsverhältnisse angepasst.

---

Prof. Dr. Ursula Schauer (✉)

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Am Handelshafen 12, 27570 Bremerhaven, Deutschland

E-Mail: [Ursula.Schauer@awi.de](mailto:Ursula.Schauer@awi.de)

Darüber hinaus brauchen Pflanzen  $\text{CO}_2$  und Licht, Tiere und manche Bakterien brauchen Sauerstoff; der pH-Wert beeinflusst z. B. die Löslichkeit von Kalkschalen. Ändern sich die Umweltbedingungen, etwa durch Erwärmung des Wassers oder durch Vermehrung von Schadstoffen, so sind die Lebewesen gezwungen, darauf zu reagieren, indem sie ihren Lebensraum verlagern oder sich anpassen. Gelingt dies nicht, sind sie in ihrer Existenz gefährdet.

Bis auf den Druck, der hauptsächlich durch die Tiefe festgelegt ist, werden alle diese Eigenschaften und Substanzen durch Wasserbewegungen ständig verlagert. Nährstoffe, die das Phytoplankton in den obersten Schichten verbraucht hat, müssen durch Wasserbewegungen wieder ersetzt werden, z. B. durch Auftrieb aus tieferen Schichten, wo Nährstoffe durch bakterielle Remineralisierung von abgesunkenen Partikeln produziert wurden. Der Abwärtstransport von gelösten Stoffen und Partikeln durch die großräumige thermohaline Zirkulation ist für Benthosorganismen lebenswichtig, da sie nur auf diese Weise am Meeresboden mit Sauerstoff und zusätzlichen Nahrungspartikeln versorgt werden. Auch Lebewesen können sich mit der Wasserbewegung transportieren lassen und so ihren Lebensraum wechseln. Das gilt besonders für das Plankton, das zu keiner wesentlichen Eigenbewegung fähig ist.

Welche Temperatur und welcher Salzgehalt herrschen wo? Wie schnell wird etwas von hier nach dort transportiert? Wie schnell und wie stark ändert sich das? Auf solche Fragen der Biologen geben Ozeanografen Antworten.

## Dichteänderung: Oben bleiben oder absinken?

Die Temperatur und der Salzgehalt, und damit die Dichte, werden dem Ozean im Wesentlichen an der Meeresoberfläche aufgeprägt. Nimmt die Dichte z. B. durch Abkühlung zu, so sinkt Wasser in die Tiefe und verbleibt dort womöglich für sehr lange Zeit. Nimmt die Dichte durch Erwärmung von oben ab, so wird der Dichteunterschied zum darunterliegenden Wasser verstärkt und das leichtere Wasser samt seinen Inhalten wird im Oberflächenwasser quasi festgehalten.

Durch den Tages- und Jahresgang der Sonnenstrahlung entsteht in den oberflächennahen Schichten ein Tages- und Jahresgang der Temperatur. Niederschläge, Schmelzen von Meereis und Flusseinträge setzen den Salzgehalt herab; Verdunstung und Gefrieren bewirken das Gegenteil. Diese Vorgänge haben natürlich eine ausgeprägte regionale Verteilung, z. B. in den regenreichen, warmen Tropen, den verdunstungsreichen Subtropen oder den kalten Polargebieten.

Da Wasser elektromagnetische Strahlung wie Licht und Wärme stark absorbiert, ist der Effekt der solaren Einstrahlung auf die oberste dünne Schicht der Ozeane beschränkt. Auch im klaren Wasser, d. h. in nährstoff- und daher planktonarmen Bereichen des offenen Ozeans, kann das Licht nur bis ca. 200 m

eindringen; in den darunterliegenden, oftmals mehrere Kilometer mächtigen Schichten des Ozeans ist es stockdunkel. In küstennahen Gewässern, die durch den Eintrag von Schwebstoffen aus Flüssen sehr trübe sein können, kann die Lichtzufuhr auf ein paar Meter beschränkt sein.

Da aus dem weiten Spektrum der elektromagnetischen Strahlung nur der schmale Bereich des sichtbaren Lichtes am tiefsten in das Wasser eindringt, hat sich das Phytoplankton diesen Bereich als Energiequelle auserkoren.

Durch die Dichtereduzierung aus Erwärmung und/oder Verringerung des Salzgehalts an der Wasseroberfläche nimmt der Dichteunterschied bzw. die Stabilität der Wassersäule zu. Es wird damit schwieriger, durch turbulente Bewegungen nährstoffreiches Wasser aus den tieferen Schichten in Oberflächennähe zu bringen, wo nach einer Planktonblüte die Nährstoffe aufgezehrt sind. Turbulenz entsteht durch brechende Wellen oder die Scherung winderzeugter Strömungen. Der vertikale Transport durch Turbulenz schafft nicht nur Nährstoffe nach oben, sondern im Gegenzug auch Wärme nach unten – meist behindert durch eine mehr oder weniger starke Dichteschichtung.

Salzreiches Wasser ist dichter als salzarmes. Die Dichte steigt also nicht nur bei Abkühlung, sondern auch bei Verdunstung (z. B. besonders in den Subtropen) und bei Eisbildung in den Polargebieten. Sobald die Dichte an der Oberfläche höher ist als in den Schichten darunter, setzt thermohaline Vertikalkonvektion ein: Schweres Wasser sinkt ab und leichteres Wasser aus der Schicht darunter steigt auf. Ähnlich wie die winderzeugten Turbulenzen sorgt diese Konvektionsbewegung für die Durchmischung und Homogenisierung der Deckschicht oder aber der Wassersäule bis in mehrere Kilometer Tiefe. Die größten Oberflächendichten und die größten Konvektionstiefen findet man in den kalten, relativ salzreichen subpolaren Zonen.

In den mittleren Breiten ist im Sommer die erwärmte und durch den Wind homogenisierte Deckschicht etwa 30 m dick; im Herbst und Winter wird diese Schichtung durch die Temperaturabnahme – und damit Dichtezunahme – bis mehrere Hundert Meter Tiefe konvektiv durchmischt. Im Einzelnen hängt die Mächtigkeit der durchmischten Schicht vom Jahresgang des Wärmeumsatzes, von der Vertikalgeschwindigkeit (resultierend aus der Divergenz der Strömungen) und von der Stärke des turbulenten Austauschs und damit vom Wind ab.

In den flachen Schelfmeeren entsteht neben der winderzeugten Turbulenz in der oberflächennahen Deckschicht zusätzlich Turbulenz durch Reibung am Boden. Hier spielen die Gezeitenströme eine große Rolle, die in den Schelfmeeren wegen der geringen Wassertiefe besonders stark sind. Neben Turbulenz in der Deckschicht gibt es hier auch Turbulenz am Meeresboden, was z. B. in Teilen der Nordsee dazu führt, dass die gesamte Wassersäule bis zum Boden homogen durchmischt ist. Wenn die Gezeitenströme schwach sind und zusätzlich der Salzgehalt mit der Tiefe stark zunimmt und die Dichteschichtung stabilisiert, wie

z. B. in der Ostsee oder in den weiten arktischen Schelfmeeren, dann erreicht der Jahresgang der Temperatur den Boden nicht.

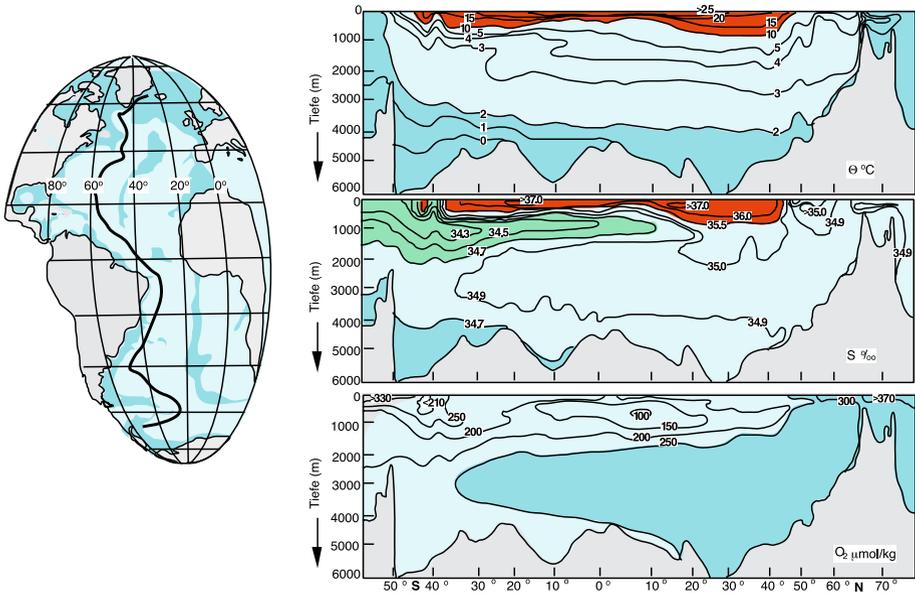
Eine starke vertikale Schichtung der Dichte hält auch Plankton in einer bestimmten Wassertiefe. Selbst absinkende Teilchen werden aufgehalten, wenn sie nicht schwer genug sind, um den Dichtesprung zu überwinden. Diese sogenannten Sprungschichten können dann als Schichten erhöhter Wassertrübung sichtbar werden. Durch die Abnahme der Schichtung oder die Zunahme der Turbulenz kann in der Nähe der Oberfläche lebendes Phytoplankton aber in dunklere Tiefen verlagert werden. An der Wasseroberfläche können auch horizontale Temperaturgradienten entstehen, die sich in der Tiefe fortsetzen und damit Dichtefronten bilden. Entlang solcher Fronten kann das Wasser aufsteigen oder absinken – mit entsprechenden Folgen für die Versorgung der Organismen. Mit horizontalen Dichtegradienten sind jedoch auch Strömungen verbunden, die umso stärker sind, je stärker die Dichtegradienten sind.

In polaren und subpolaren Meeren kann die konvektive Durchmischung mehrere Tausend Meter tief reichen, wie z. B. in der Grönlandsee oder der Labradorsee. Die starke Auskühlung im Winter bringt das Wasser bis an den Gefrierpunkt, der bei einem Salzgehalt von 34,5 bei  $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegt, denn das gelöste Salz senkt den Gefrierpunkt ab. Erreicht das Wasser den Gefrierpunkt, so formt sich Meereis, das weniger Salz in seiner Kristallstruktur aufnehmen kann als Meerwasser. Daher bleibt das Salz im Meerwasser zurück und führt zu einem weiteren Dichteanstieg.

Auch in den Schelfmeeren des Weddellmeeres im südlichen Atlantik bilden sich große Mengen sehr kalten und salzreichen Wassers, das entlang dem Kontinentalabhang in die Tiefsee sinkt. Dieses Antarktische Bodenwasser breitet sich nach Norden aus und füllt das tiefste Stockwerk des Weltmeeres (Abb. 1.1). Darüber schichtet sich aus dem Norden kommend – etwas wärmer und daher nicht ganz so schwer – das Nordatlantische Tiefenwasser ein.

Die Bedeutung der Polarmeere für das Weltmeer wird verdeutlicht durch dessen Durchschnittstemperatur, die bei nur  $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegt; selbst am Äquator beträgt die mittlere Temperatur der ganzen Wassersäule nur  $4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Kaltwassersphären der drei Ozeane mit Temperaturen unter  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  nehmen etwa 75 % des Volumens des Ozeans ein. Darüber liegt die Warmwassersphäre, die etwa drei Viertel der Oberfläche des Weltmeeres bedeckt. In den polaren und subpolaren Regionen reicht die Kaltwassersphäre bis an die Meeresoberfläche. Die Versorgung der Tiefseeorganismen mit Sauerstoff hängt damit von der in diesen Gebieten stattfindenden Tiefen- und Bodenwasserbildung ab.

Schließlich bringen aber die globalen Meeresströmungen auch dieses abgesunkene kalte Wasser wieder an die Oberfläche. Hypothetisch benötigt ein Wasserpaket, das im Nordatlantik durch Abkühlung von der Oberfläche absinkt, 1000 Jahre, bis es wieder seinen Ursprung erreicht.



**Abb. 1.1** Vertikalschnitte der Temperatur, des Salzgehalts und des gelösten Sauerstoffs durch den westlichen Atlantischen Ozean. In der Karte (*links*) ist die Lage des Schnittes als *dicke Linie* angegeben. Antarktisches Bodenwasser mit Temperaturen unter 2 °C bildet die tiefste Schicht. Nordatlantisches Tiefenwasser, sichtbar als Sauerstoffmaximum, liegt darüber

## Zunehmende Anforderungen an Messmethoden

Nansen-Schöpfer und Kippthermometer haben die grundlegenden Kenntnisse über Wassermassen und Schichtungsverhältnisse geliefert und wurden noch bis in die 1990er Jahre eingesetzt. Jetzt haben sie ihren Platz im Museum gefunden. Heute messen elektronische Sonden mit sehr hoher vertikaler Auflösung und Genauigkeit Druck, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit. Aus diesen Größen können Salzgehalt und Dichte berechnet werden. Die CTD-Sonde (die Abkürzung steht für *conductivity, temperature* und *depth*) wird mit einer Winde an einem elektrischen Kabel gefiert (Abb. 1.2) und kann bis zu einer Wassertiefe von ca. 6500 m eingesetzt werden. In dieser Tiefe muss das Gehäuse für die Elektronik einem Druck von 650 bar standhalten. Entscheidend ist aber, dass der filigrane Temperaturfühler und die Leitfähigkeitsmesszelle an der Oberfläche und in 6500 m Tiefe mit gleicher Präzision messen. Dabei wird für Temperatur und Salzgehalt eine Genauigkeit bis zur vierten Nachkommastelle erreicht. Der Einfluss von Klimaveränderungen auf den Ozean kann damit nachgewiesen werden. Neben den Sensoren für die physikalischen Größen sind für die CTD-