

Peter Wadhams

Abschied vom Eis

Ein Weckruf aus der Arktis

SACHBUCH

EBOOK INSIDE



Springer

Abschied vom Eis

Peter Wadhams

Abschied vom Eis

Ein Weckruf aus der Arktis

Aus dem Englischen übersetzt von
Florian Neukirchen

 Springer

Peter Wadhams
Cambridge, UK

Übersetzt von Florian Neukirchen, Berlin, Deutschland

ISBN 978-3-662-60661-2 ISBN 978-3-662-60662-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60662-9>

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

Übersetzung der englischen Ausgabe: *A Farewell To Ice* von Peter Wadhams, erschienen bei Penguin Books Ltd, London, 2017. Text copyright © Peter Wadhams 2016. The author has asserted his moral rights. Alle Rechte vorbehalten.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: © [smallredgirl/stock.adobe.com](https://smallredgirl.stock.adobe.com)

Planung/Lektorat: Sebastian Müller

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

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

Vorwort

Peter Wadhams ist seit 50 Jahren Polarforscher und hat in dieser Zeit enorme Veränderungen der Meereisbedeckung in den Polarregionen beobachtet und gemessen. In diesem Buch gibt er zunächst einen kurzen Überblick über die Erde und die Entwicklung ihres Eises auf Land und Meer. Er beschreibt weiterhin die tief greifenden Veränderungen, die er in seiner Karriere erlebt hat. Die Fläche des sommerlichen Meereises der Arktis ist von mehr als acht Millionen Quadratkilometern auf weniger als die Hälfte zurückgegangen, weshalb ein bald bevorstehendes Auftreten eisfreier Sommer vorhergesagt wird.

Das Schmelzen von Meereis ist nicht nur ein seltsames Phänomen in einem entlegenen Teil unserer Welt: Es verringert die Menge der in den Weltraum zurückreflektierten Sonnenstrahlung drastisch von 60 % auf 10 % und beschleunigt so die globale Erwärmung zusätzlich. Gefrorene Sedimente, die seit der letzten Eiszeit ungestört unter der Oberfläche lagen, setzen nun Methan – ein sehr

VI **Vorwort**

starkes Treibhausgas – in die Atmosphäre frei. *Der Abschied vom Eis* ist sowohl ein maßgeblicher Bericht über den heutigen Zustand der Arktis als auch eine zeitgemäße Mahnung angesichts der globalen Bedrohung, die vom Verlust des Meereises ausgeht.

Walter Munk
Scripps Institution of Oceanography
La Jolla, Kalifornien, USA

Danksagung

Ich bin unzähligen Menschen dankbar, die mit Fakten, Ideen und Inspirationen geholfen haben. Dazu gehören Paul Beckwith, Peter Carter, Florence Fetterer, Martin Harrison, Chris Hope, Charles Kennel, Daniel Kieve, Seelye Martin, Walter Munk, Jon Nissen, Jim Overland, Hans Joachim Schellnhuber, David Wasdell und Gail Whiteman. Ich danke Carl Wunsch, David Wasdell und Subhankar Banerjee, dass sie das ganze Manuskript gelesen und wertvolle Ergänzungen und Änderungen vorgeschlagen haben. Ich danke dem US Office of Naval Research für die langfristige wissenschaftliche Unterstützung, die dieses Buch ermöglicht hat; ebenso Andrea Pizzuti von Grafiche Fioroni in Casette d'Ete (Fermo), Italien, für die Hilfe bei den Illustrationen. Vor allem danke ich meiner Frau Maria Pia Casarini, Direktorin des Istituto Geografico Polare „Silvio Zavatti“ in Fermo, Italien, für die lebenslange persönliche Unterstützung und Inspiration.

VIII Danksagung

Ich habe dieses Buch in Anlehnung an einen Roman von Ernest Hemingway benannt, weil es sich nicht nur mit den Auswirkungen des derzeit ablaufenden enormen Meereisverlustes auf unserem Planeten befasst, sondern diesen auch mit einigen persönlichen Geschichten aus meiner langen Karriere verschränkt. Diese werfen, wie ich hoffe, ein Licht auf die Besonderheiten der Welt des Meereises und auf die katastrophalen Folgen, die durch sein Verschwinden ausgelöst werden.

Kap. 12 stützt sich auf einen Bericht, der bereits in einem anderen Werk veröffentlicht wurde: Wadhams P (2015) Antarctic Sea Ice Changes and their Implications: The Annual Ice Cycle and its Changes. In: Letcher T (Hrsg.) Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth, 2. Aufl., Elsevier, Amsterdam.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung: Eine blaue Arktis	1
	Literatur	8
2	Eis, der magische Kristall	9
2.1	Die Kristallstruktur von Eis	9
2.2	Gefrieren und Schmelzen	15
2.3	Die Bildung von Eis im Meer	19
2.4	Die Bedeutung der Sommerschmelze	23
2.5	Wie im Eis Rinnen und Presseisrücken entstehen	24
2.6	Eis im flachen Wasser	29
2.7	Polynjas	33
	Literatur	36
3	Eine kurze Geschichte des Eises auf der Erde	39
3.1	Das erste Eis	39
3.2	Das Paradoxon der Schneeball-Erde	41
3.3	Zwei weitere Schneebälle	45

X	Inhaltsverzeichnis	
3.4	Der Übergang zu astronomisch verursachten Eiszeiten	47
	Literatur	52
4	Der moderne Zyklus der Eiszeiten	53
4.1	Das Pliozän und die Eiszeiten	53
4.2	Daten über die letzten Vergletscherungen	55
4.3	Der astronomische Einfluss auf die Eiszeiten	58
4.4	Das Archiv der Eiskerne	60
4.5	Wie die letzten Eiszeit endete	66
4.6	Wie lange noch bis zur nächsten Eiszeit?	71
	Literatur	73
5	Der Treibhauseffekt	75
5.1	Der natürliche Treibhauseffekt	76
5.2	Kohlendioxid, der Bösewicht unter den Molekülen	83
5.3	Methan und Lachgas	89
5.4	Ozon und FCKW	91
5.5	Strahlungsantrieb	93
5.6	Klimasensitivität	94
5.7	Die jüngste Temperaturgeschichte der Erde	96
5.8	Arktische Verstärkung	97
	Literatur	100
6	Das Meereis beginnt zu schmelzen	103
6.1	Meereis im 19. Jahrhundert	103
6.2	Wir treten in die Neuzeit ein	106
6.3	Der Eiskollaps der letzten zehn Jahre	111
6.4	Ein persönliches Zwischenspiel, 2007	115
6.5	Der nächste Schritt abwärts für das Eis, 2012	121

6.6	Die letzten Jahre des sommerlichen Eises	123
6.7	Wellen im offenen Wasser	126
	Literatur	130
7	Die Zukunft des arktischen Meereises – die Todesspirale	133
7.1	Wie geht es für das Meereis weiter?	133
7.2	Haben wir einen Kipppunkt überschritten?	139
7.3	Woher wissen wir, dass all das passieren wird?	141
7.4	Unmittelbare Folgen des Eistrückzugs – Navigation in der Arktis	147
7.5	Unmittelbare Folgen des Eistrückzugs – Öl und der Meeresboden	154
7.6	Das Problem der Ölverschmutzung und wie man damit umgeht	158
7.7	Wahrscheinlicher Verlauf eines weiteren Eistrückzugs in diesem Jahrhundert	163
	Literatur	164
8	Die Beschleunigung durch arktische Rückkopplungen	167
8.1	Das Konzept der klimatischen Rückkopplungen	167
8.2	Eis-Albedo-Rückkopplung	169
8.3	Rückkopplung durch Rückgang der Schneegrenze	173
8.4	Wasserdampfrückkopplung	175
8.5	Schmelzende Eisschilde und Meeresspiegelanstieg	176
8.6	Rückkopplung bei arktischen Flüssen	185
8.7	Rückkopplung durch Ruß	185
8.8	Rückkopplung bei der Ozeanversauerung	187

XII Inhaltsverzeichnis

8.9	Welche Rückkopplungen sind am stärksten?	189
	Literatur	192
9	Arktisches Methan, eine Katastrophe kündigt sich an	193
9.1	Submariner Permafrost und warmes Wasser	193
9.2	Globale Auswirkungen der Methanfreisetzung in der Arktis	200
9.3	Sofort handeln!	203
9.4	Die Bedrohung durch tauenden Permafrost an Land	207
9.5	Das Gebiet weitet sich aus	209
	Literatur	212
10	Seltsames Wetter	215
10.1	Das Wetter und der Strahlstrom	216
10.2	Ist dieser Mechanismus real?	219
10.3	Wetterereignisse und Nahrungsproduktion	224
10.4	Das Problem des Wassers	228
	Literatur	229
11	Die geheimnisvollen Konvektionsschote	231
11.1	Die globale thermohaline Zirkulation	232
11.2	Die Konvektion in der Grönlandsee	235
11.3	Das Geheimnis der Schote	242
11.4	Die Zukunft im Kino	249
11.5	Die Zukunft	252
	Literatur	253

12	Was passiert in der Antarktis?	255
12.1	Die seltsame Geschichte des antarktischen Meereises	255
12.2	Warum das antarktische Eis anders ist	257
12.3	Schnee auf dem Eis	262
12.4	Der jährliche Eiszyklus und wie er sich ändert	263
12.5	Was passiert mit dem Eis?	269
12.6	Reaktion der Antarktis auf Veränderungen anderswo	271
	Literatur	275
13	Der Zustand der Erde	279
13.1	Was können wir tun?	284
13.2	Kann uns das Pariser Abkommen von 2015 retten?	307
	Literatur	311
14	Aufruf zum Kampf	313
14.1	Stärkung der Wissenschaft	315
14.2	Kriegsgefahr	318
14.3	Die Leugner des Klimawandels	320
14.4	Zeit zu kämpfen	330
	Literatur	335
15	Nachtrag zur deutschen Ausgabe	337
15.1	Internationale Organisationen	338
15.2	Methan im Arktischen Ozean	341
15.3	Der Meereisrückzug	343
15.4	Die nächste Eiszeit	344
15.5	Schifffahrtsrouten in der Arktis	344

XIV	Inhaltsverzeichnis	
15.6	Meeresspiegelanstieg	345
15.7	Absenkung der Kohlendioxidkonzentration	345
15.8	Abschließende Gedanken	348
	Anhang	349
	Stichwortverzeichnis	353



1

Einführung: Eine blaue Arktis

Seit 1970 bin ich Polarforscher. Die meiste Zeit hatte ich das Privileg, am Scott Polar Research Institute in Cambridge tätig zu sein, auch als Direktor. Es wurde im Gedenken an Robert Falcon Scott errichtet und war ein Rückzugsort und Treffpunkt für Polarforscher jeglicher Disziplin, von denen viele von ihren Institutionen für längere Zeit freigestellt wurden, um in der unvergleichlichen Bibliothek zu studieren. In den 1970er- und 1980er-Jahren war ich jedes Jahr in den Polarregionen (meist in der Arktis), manchmal mehrmals, und wie meine Kollegen in Europa, Amerika, Russland und Japan widmete ich mich dem Verständnis der grundlegenden physikalischen Prozesse, die im Meereis ablaufen und die bestimmen, wie es wächst, zerfällt und sich bewegt. Die Feldforschung auf Eis ist sehr schwierig und manchmal gefährlich, und nur wenige von uns konnten sich dabei vorstellen, dass sich das Objekt unserer Untersuchungen, der Arktische Ozean, vor unseren Augen ändern könnte. Es war schon schwer

genug zu versuchen, überhaupt erst einmal die grundlegenden Abläufe in der Arktis zu verstehen. Doch sie veränderte sich tatsächlich. Ich hatte das Glück, als einer der Ersten dafür eindeutige Beweise zu finden: Als ich die Eisdickenmessungen verglich, die ich 1976 und 1987 mit U-Booten durchgeführt hatte, stellte ich einen Verlust von 15 % der durchschnittlichen Dicke fest! Dieses 1990 in *Nature* veröffentlichte Ergebnis (Wadhams 1990) regte eine intensivere Forschung an, die innerhalb eines Jahrzehnts zeigte, dass diese Ausdünnung nicht nur real war, sondern dass seit den 1970er-Jahren das Meereis sogar um mehr als 40 % dünner geworden war (Rothrock et al. 1999; Wadhams und Davis 2000). Etwas wirklich Dramatisches ging hier vor sich. Polarforscher blickten von ihren eigenen spezialisierten Studien auf und begannen, das Gesamtbild zu betrachten. Sie sind zu Spezialisten für den Klimawandel geworden, geradezu zu Pionieren in dessen Erforschung, denn gerade in der Arktis scheint der globale Wandel am schnellsten und drastischsten zu verlaufen.

Mein Interesse an den Polarmeeren (s. a. die Karten im Anhang) war geweckt worden, als ich im Sommer 1970 zum ersten Mal in die Arktis fuhr, an Bord des kanadischen Forschungsschiffs *Hudson*, das die erste Umrundung Amerikas durchführte. Die *Hudson-70-Expedition* hatte Nova Scotia im kalten Herbst 1969 verlassen und war bereits zur Antarktischen Halbinsel, zum Südlichen Ozean, zu den Fjorden Chiles und durch die endlose Weite des Pazifiks gefahren (Wadhams 2009). Nun sollten wir uns auf ein Abenteuer begeben, das vor uns nur neun Schiffe vollbracht hatten: Eine Fahrt durch die Nordwestpassage (Headland 2016). Das Schiff hatte einen Eisschutz, und den brauchte es auch. Entlang der Nordküsten Alaskas und der Nordwest-Territorien reichte das Meereis des Arktischen

Ozeans bis nahe ans Land und ließ uns nur einen wenige Kilometer breiten Kanal mit offenem Wasser, um unsere Untersuchungen durchzuführen. Manchmal drängte sich das Eis bis an die Küste, und wir mussten uns durch dicht gehäufte Schollen aus schwerem, dickem, mehrjährigem Eis brechen (Abb. 1.1). Schlussendlich mussten wir, als wir mitten in der Nordwestpassage waren, von einem schweren Eisbrecher der kanadischen Küstenwache gerettet werden, der John A. Macdonald. Damals galt ein Kampf mit Meereis in der kanadischen Arktis als normal. In den Jahren 1903 bis 1906 brauchte Amundsen drei Jahre, um die Nordwestpassage zu befahren, und das zweite Schiff, das die Passage schaffte, der Schoner St. Roch der Royal Canadian Mounted Police, benötigte von 1942 bis 1944 zwei Sommer.



Abb. 1.1 Das kanadische Forschungsschiff Hudson im August 1970 vor der Nordküste Alaskas, umgeben von mehrjährigem Eis (vom Hubschrauber aus gesehen)

Heute findet ein Schiff, das im Sommer von der Beringstraße in die Arktis einfährt, ein Meer mit offenem Wasser vor. Dieses blaue Wasser erstreckt sich weit nach Norden, fast bis zum Nordpol. Bis zur Veröffentlichung dieses Buches ist es möglich – und nach vielen Vorhersagen wahrscheinlich –, dass der Pol selbst zum ersten Mal seit Zehntausenden von Jahren eisfrei sein wird. Die Nordwestpassage ist heute leicht zu befahren, bis Ende 2015 haben sie insgesamt 238 Schiffe durchquert. Im September 2012 bedeckte das Meereis nur 3,4 Mio. km² der Oberfläche des Arktischen Ozeans, gegenüber 8 Mio. km² in den 1970er-Jahren. Die Bedeutung dieses Wandels für den Planeten Erde ist gewaltig und unübersehbar: Er hat seine Farbe verändert. Wir alle erinnern uns an das erste schöne Foto der Erde, die hinter dem Mond aufsteigt, aufgenommen von den Astronauten von Apollo 8. Eine zarte blaue Kugel, die im Kosmos isoliert ist, die alles enthält, was wir über das Leben wissen. Diese Kugel war an beiden Seiten weiß. Heute sieht der obere Teil der Welt im nördlichen Sommer aus dem All blau statt weiß aus. Wir haben ein Meer geschaffen, wo es einst eine Eisdecke gab. Es ist die erste große „Errungenschaft“ des Menschen bei der Umgestaltung des Gesichts unseres Planeten, wenn auch natürlich unbeabsichtigt und mit zweifelhaften und möglicherweise katastrophalen Folgen.

Es ist sogar noch schlimmer, als es der Anschein vermuten lässt. Meine Sonarmessungen zeigten, dass die durchschnittliche Eisdicke zwischen 1976 und 1999 um 43 % abgenommen hat (Rothrock et al. 1999). Aber sie zeigten auch andere Dinge. In der Vergangenheit war das meiste Eis in der Arktis mehrere Jahre alt, das sogenannte mehrjährige Eis. Es hatte eine zerklüftete und beeindruckende Topografie mit riesigen Presseisrücken, die die Wege der Entdecker blockierten, mit Kielen, die 50 m oder mehr in den Ozean ragten (Abb. 1.2). In den letzten

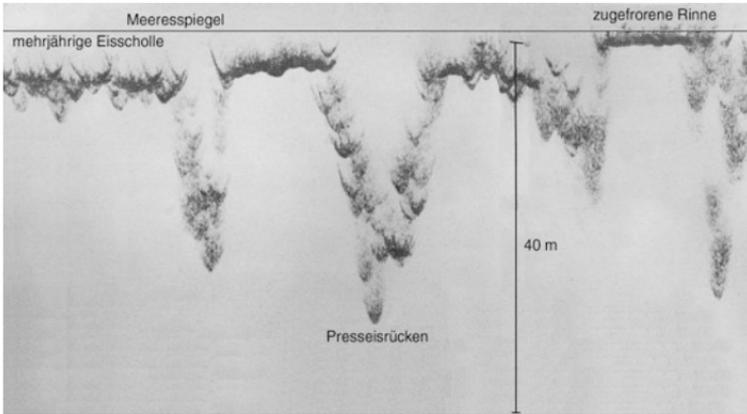


Abb. 1.2 Presseisrücken im mehrjährigen Packeis, aufgezeichnet durch ein aufwärtsgerichtetes Sonar eines U-Bootes. Der größte reicht 30 m tief

zehn Jahren hat ein sich änderndes Strömungssystem den größten Teil dieses Eises aus der Arktis verdrängt, und es wurde durch einjähriges Eis (Abb. 1.3) ersetzt, das während einer einzigen Wintersaison wächst und eine maximale Dicke von nur 1,5 m erreicht. Dieses Eis weist nur vereinzelt Rücken auf, die sich nur wenig über die sehr flache Oberfläche erheben. Eis, das in einem einzigen Winter zu dieser geringeren Dicke heranwächst, kann in einem einzigen Sommer aufgrund der wärmeren Luft- und Meerestemperaturen auch wieder vollständig abschmelzen. Es wird nicht lange dauern, bis die Sommerschmelze das Winterwachstum überall in der Arktis übertrifft, und wenn das passiert, wird die gesamte verbleibende sommerliche Eisbedeckung kollabieren. Wir sind in die sogenannte „arktische Todesspirale“ eingetreten, wie der US-Klimatologe Mark Serreze es nannte:

„Das Eis ist in einer ‚Todesspirale‘ und könnte in wenigen Jahrzehnten im Sommer verschwinden.“ (Serreze 2008)



Abb. 1.3 Eine typische Winterlandschaft mit glattem, schneebedecktem einjährigem Eis. Dessen Dicke liegt zwischen 1 und 1,5 m. Rechts befindet sich ein wieder zugefrorener Riss, dessen Eis in Aussehen und Dicke der übrigen Eisscholle ähnelt

„Von bestimmten Kreisen wird behauptet, das Meereis der Arktis würde sich erholen und wieder dicker werden. Das ist schlicht falsch. Es geht weiter abwärts in einer Todesspirale.“ (Serreze 2010)

In naher Zukunft, wie ich in Kap. 7 darlege, wird diese uns einen eisfreien September in der Arktis bescheren, und wenige Jahre später wird sich die eisfreie Saison auf vier oder fünf Monate ausweiten.

Die Folgen eines Zusammenbruchs der sommerlichen Meereisbedeckung der Arktis werden dramatisch sein, weil dadurch zwei gewaltige Effekte entfesselt werden: Erstens sinkt, wenn das sommerliche Meereis dem offenen Wasser Platz macht, die Albedo – der Anteil der einfallenden Sonnenstrahlung, der direkt in den Weltraum reflektiert wird – von 0,6 auf 0,1, was die Erwärmung der

Arktis und des gesamten Planeten weiter beschleunigen wird. Die Änderung der Albedo durch den Verlust der letzten 4 Mio. km² Meereis wird auf der Erde eine ähnliche erwärmende Wirkung haben wie die Kohlendioxidemissionen der letzten 25 Jahre. Zweitens wird durch die Entfernung der Eisdecke eine wichtige „Klimaanlage“ für die Arktis wegfallen. Solange im Sommer etwas Eis vorhanden ist – so dünn es auch ist –, kann die Meeresoberflächentemperatur nicht über 0 °C steigen, da jegliches wärmere Wasser seine Wärme verliert, wenn es einen Teil des darüber liegenden Eises schmilzt. Wenn das Eis jedoch verschwunden ist, kann sich das Oberflächenwasser im Sommer um mehrere Grad erwärmen (Satellitenbeobachtungen haben 7 °C ergeben), und an einem flachen Kontinentalschelf breitet sich diese Wärme durch windbedingte Vermischung bis zum Meeresboden aus. Dabei taut die Oberflächenschicht des submarinen Permafrostes auf, Meeresbodensedimente, die dort seit der letzten Eiszeit ungestört liegen. Dieser auftauende submarine Permafrost wird die Freisetzung riesiger Methanfahnen aus dem Zerfall von im Sediment eingeschlossenen Methanhydraten auslösen. Und als Treibhausgas ist Methan pro Molekül 23-mal wirksamer als Kohlendioxid. Eine jährlich durchgeführte russisch-amerikanische Expedition in die Ostsibirische See hat bereits beobachtet, wie solche Methanfahnen aus dem Meeresboden aufsteigen, genauso wie andere Expeditionen Methanfahnen in der Lapteewsee und der Karasee fanden. Wenn diese Freisetzung dazu führt, dass der Methangehalt in der Atmosphäre steigt, wird sie der globalen Erwärmung sofort einen weiteren Schub geben. Ich habe dieses Buch geschrieben, um diese dramatischen Veränderungen zu erklären – und wie und warum der Verlust von arktischem Eis uns alle bedroht und nicht nur eine „interessante Veränderung“ in einem entlegenen Teil der Welt ist.

Seit ich 21 Jahre alt war, habe ich mein ganzes wissenschaftliches Leben damit verbracht, mich mit der Wissenschaft des Meereises und der Polarmeere zu beschäftigen. Was bedeuten diese Veränderungen für mich, wenn ich mich persönlich von dieser magischen Landschaft verabschieden muss? Ich selbst habe das überwältigende Gefühl, dass dies nicht nur materiell eine Katastrophe für die Menschheit ist, sondern auch für eine geistige Verarmung steht. Unsere eigene Gier und Dummheit nimmt uns die schöne Welt des Meereises im Arktischen Ozean, das uns einst vor den Auswirkungen der klimatischen Extreme geschützt hat. Jetzt besteht dringender Handlungsbedarf, wenn wir uns vor den schwerwiegenden Konsequenzen bewahren wollen.

Literatur

- Headland RK (2016) Transits of the Northwest Passage to end of the 2013 navigation season. *Atlantic Ocean – Arctic Ocean – Pacific Ocean*. *Il Polo*, 71 (3), (im Druck)
- Rothrock DA, Yu Y, Maykut GA (1999) Thinning of the Arctic sea-ice cover. *Geophys Res Lett* 26:3469–3472
- Serreze, M (2008) *National geographic news*, 17. September
- Serreze M (2010) Stellungnahme. In: *Climate Progress*, 9. September. <https://thinkprogress.org/serreze-arctic-is-continuing-down-in-a-death-spiral-every-bit-of-evidence-we-have-says-the-ice-is-4e061fec87e8/>
- Wadhams P (1990) Evidence for thinning of the Arctic ice cover north of Greenland. *Nature* 345:795–797
- Wadhams P (2009) *The great ocean of truth*. Melrose Books, Ely
- Wadhams P, Davis NR (2000) Further evidence of ice thinning in the Arctic ocean. *Geophys Res Lett* 27:3973–3975



2

Eis, der magische Kristall

2.1 Die Kristallstruktur von Eis

Warum spielt das Eis eine so wichtige Rolle im Energiesystem unseres Planeten, ja sogar jedes Planeten, der Leben enthalten kann? Die Antwort liegt in den einzigartigen Eigenschaften des Eiskristalls, die wiederum aus den einzigartigen Eigenschaften des Wassermoleküls resultieren, die es zum Schlüssel des Lebens machen.

Ein isoliertes Wassermolekül, H_2O , hat eine nahezu perfekte Tetraederform, das heißt die Form einer Dreieckspyramide (Abb. 2.1). Ein Elektron, das normalerweise das Proton im kleinen Sonnensystem eines Wasserstoffatoms umkreist, wird zwischen dem Proton und dem Sauerstoffkern geteilt, wodurch eine sogenannte kovalente Bindung entsteht. Es gibt zwei solcher H–O-Bindungen im Molekül, und sie bilden eine geknickte Geometrie, wobei der Winkel zwischen den beiden Bindungen $104,5^\circ$ beträgt (bei einem perfekten Tetraeder wären es $109,5^\circ$).

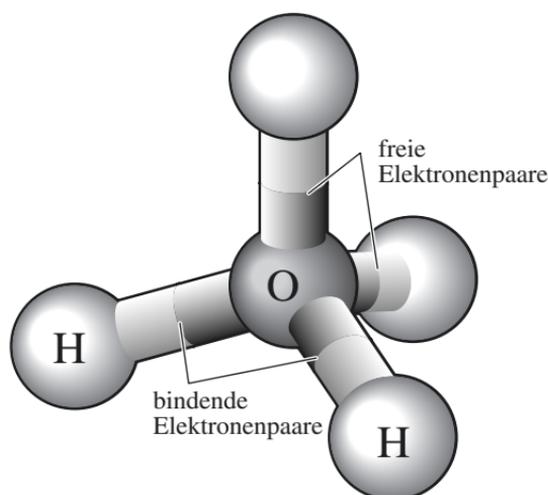


Abb. 2.1 Tetraederstruktur eines Wassermoleküls

Das Tetraeder wird durch zwei freie Elektronenpaare aus dem Sauerstoffatom vervollständigt, die nicht an etwas anderes gekoppelt sind, sondern für die Bildung einer Bindung zur Verfügung stehen. Was passiert, wenn diese in flüssigem Wasser frei beweglichen Moleküle zu festem Eis gefrieren? Das wissen wir erst seit 1935, als der bedeutende Chemiker Linus Pauling die dreidimensionale Struktur des festen Eises aufklärte (Pauling 1935).

Der Grundbaustein von Eis ist das Tetraeder, das vom freien Wassermolekül geerbt wird. Jedes Sauerstoffatom befindet sich im Zentrum eines Tetraeders, das an den 0,276 nm (Nanometer, 10^{-9} m) entfernten Eckpunkten an vier weitere Sauerstoffatome gebunden ist. Diese Sauerstoffatome sind nahe einer Reihe von parallelen Ebenen konzentriert, die als Basisebenen bezeichnet werden. Die Hauptachse oder c-Achse der Elementarzelle des Kristallgitters liegt senkrecht zur Basisebene, und die gesamte Struktur erinnert an Bienenwaben: Sie besteht

aus Schichten, die aus höckerigen Sechsecken zusammengesetzt sind (Abb. 2.2).

Diese Struktur bewirkt, dass Eis anisotrop ist, das heißt, es hat Eigenschaften, die in verschiedene Richtungen variieren. Wenn ein Eiskristall wächst, indem Wassermoleküle an ihm festfrieren, ist es energetisch günstiger, weitere Sauerstoffatome zu einer bestehenden Bienenwabe hinzuzufügen, als eine ganz neue Wabenplatte zu beginnen – so müssen nur zwei neue Bindungen anstelle von vier geschaffen werden. Eiskristalle wachsen daher leichter entlang der Achsen in der Basisebene als entlang der c -Achse – die Wachsplatten im Bienenstock werden auch eher seitlich größer, als dass eine neue Platte hinzukommt. Diese bevorzugten Wachstumsrichtungen entpuppen sich als die Richtungen der Arme von Schneeflocken, die aus Dampf in Wolken wachsen, und der Arme der zarten

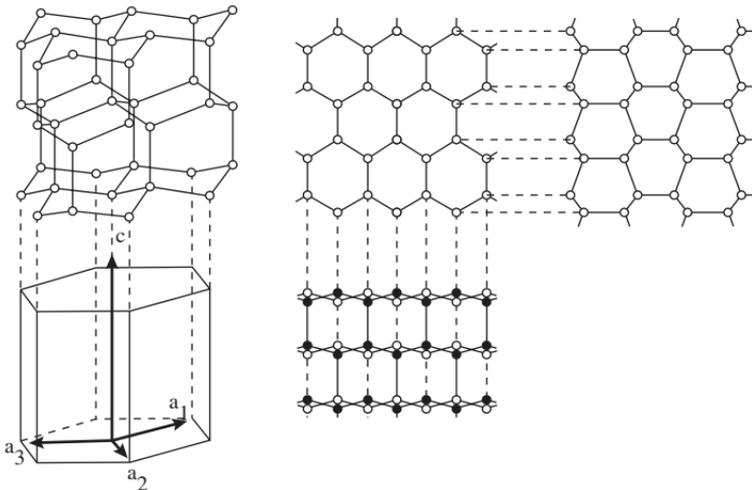


Abb. 2.2 Die Struktur eines Eiskristalls mit einer verzerrten wabenförmigen Anordnung von Sauerstoff- und Wasserstoffatomen. Die c -Achse ist die Symmetrieachse, und die anderen drei bilden die Basisebene des Kristalls. (Nach Pauling 1935)

Eiskristalle, die sich auf einer neu gefrierenden Meeres- oder Seeoberfläche bilden. Zum Verständnis des Meereises ist es am wichtigsten, dass eine davon die bevorzugte Wachstumsrichtung der Meereiskristalle in einer durch Anfrieren an der Unterseite dicker werdenden Eisscholle ist.

Das schnelle Wachstum in diese Richtungen können wir am deutlichsten beobachten, wenn eine dünne Wasserschicht auf einer Fensterscheibe gefriert und Eisblumen entstehen. Der erste Eiskristall, der sich bildet, streckt Arme aus, die in einem Winkel von 60° zueinander über das Glas schießen, und füllt dann die Lücken wie die Äste eines Baumes mit neuen Armen. In jedem Fall beträgt der Winkel 60° , und die Arme wachsen sehr schnell. Das nennt man dendritisches Wachstum, vom griechischen Wort für Baum.

Dies ist die Struktur für Eis bei Temperaturen und Drücken, wie sie auf der Erdoberfläche auftreten. Bei sehr hohen Drücken und bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt ($-273,16^\circ\text{C}$) gibt es andere, dichter gepackte Eisformen – tatsächlich sind 17 Modifikationen bekannt (Hobbs 1974; siehe auch Petrenko et al. 1999; Chaplin 2016), dies nennt man Polymorphie. Die uns vertraute und unter normalen Bedingungen auf der Erde auftretende Form ist das sogenannte Eis I_h . Einige der Hochdruckformen existieren wahrscheinlich tief im Inneren der Planeten, die weit weg von ihren Sonnen sind, und wir können sie im Labor herstellen. Tieftemperaturmodifikationen sind für einige sehr spezielle Prozesse im Weltraum verantwortlich. So bildet beispielsweise Eis den äußeren Teil der meisten Kometen, und es bedeckt die winzigen Staubkörner im Weltraum, die Sterne zum Funkeln bringen, selbst wenn ein Astronaut sie von oberhalb der Erdatmosphäre aus beobachten würde. Der Astronom Fred Hoyle schlug vor, dass das Leben möglicherweise

im Weltraum auf so winzigen Körnern entstanden sein könnte. Sie bilden ein Substrat, das Moleküle dicht genug zusammenhält, um chemische Reaktionen hervorzurufen, die schließlich zu Leben führen könnten. Vor wenigen Jahren hat die spannende Mission der Raumsonde Rosetta der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) zum Kometen Tschurjumow-Gerassimenko gezeigt, dass Eis verdampfte und in kleinen „Jets“ ins All flog, während sich der Komet der Sonne näherte und sich seine Eisdecke erwärmte.

Das Netz der Sauerstoffatome wird durch „Brücken“ zusammengehalten, bei denen jeweils ein H-Atom zwei O-Atome verbindet. Das H-Atom ist mit einem O mit einer engen kovalenten Bindung und mit dem anderen O mit einer Wasserstoffbrückenbindung (mit geringerer Anziehungskraft) verbunden. In jeder „Brücke“ liegt das H-Atom näher an dem einen O als an dem anderen, wobei es Zufall ist, welches es bevorzugt. Jedes O hat zwei benachbarte H-Atome, aber es kann in jeder „Brücke“ nur ein H geben. Vorbehaltlich dieser beiden Regeln, die sich aus der Quantenmechanik ableiten, können die Wasserstoffatome beliebig angeordnet werden. Es ist die Länge der Wasserstoffbrücke, die die offene Struktur des Eises erzeugt. Wenn das Eis schmilzt, werden einige der Wasserstoffbrücken gebrochen, was zu einem Zusammenbruch in eine ungeordnete Struktur von durcheinandergewürfelten, zufällig angeordneten H_2O -Molekülen mit einer höheren Dichte als im festen Zustand führt. Daher ist Wasser ein sehr ungewöhnliches Molekül: Die feste Form ist weniger dicht als die Flüssigkeit, anders als beispielsweise bei Metallen. Die Dichte des reinen Wassers beträgt 1000 kg m^{-3} (Kilogramm pro Kubikmeter) – das war die ursprüngliche Definition des Kilogramms – und die des reinen Eises $917,4 \text{ kg m}^{-3}$. Meerwasser hat eine höhere Dichte als reines Wasser, typischerweise 1025 kg m^{-3} ,

sodass im Meer der Dichteunterschied zwischen Wasser und Eis etwa 10 % beträgt. Deshalb ragen auch 10 % der Masse einer Eisscholle oder eines Eisbergs über die Meeresoberfläche.

Stellen wir uns einmal vor, was passieren würde, wenn der Dichteunterschied, wie in den meisten Substanzen, umgekehrt wäre und Eis im Wasser versinkt. Erstens würden Seen, Flüsse und sogar das Meer fast vollständig durchfrieren. Sobald sich an der Oberfläche einer Wassermasse, zum Beispiel an der Meeresoberfläche, aufgrund einer niedrigen Lufttemperatur, Eis bildet, würde dieses Eis bis auf den Boden sinken und dort eine Schicht aufbauen. Das ganze Bodenleben würde ausgelöscht, und im Falle eines Sees würde sich die Eisschicht am Boden verdicken, bis am Ende des Winters nur noch eine kleine Schicht ungefrorenes Wasser an der Oberfläche wäre oder vielleicht gar keines, wodurch alles Leben dort ausgelöscht würde. Das Gleiche würde auch mit dem Meer geschehen, wobei nicht klar ist, ob der Winter lang genug wäre, um auf dem Meeresboden eine ausreichend dicke Eisschicht aufzubauen, um den Ozean bis zur Meeresoberfläche zu füllen. Sicherlich wäre das Wachstum schnell: In der realen Welt bildet das Meereis eine dünne Schicht an der Oberfläche, die das Meer vor weiterem Einfrieren schützt. In unserer alternativen Welt würde das Meer jedoch die Kälte aus der Atmosphäre ungehindert den ganzen Winter über aufnehmen und eine immer dickere Eisschicht auf dem Meeresboden bilden. Ich glaube nicht, dass irgendjemand schon einmal modelliert hat, ob ein solcher Ozean bis an die Oberfläche gefrieren würde, aber wenn das der Fall wäre, würde darin alles Leben enden, vielleicht mit der Ausnahme winziger Mikroorganismen. Das Leben im Ozean würde sich auf einen Streifen entlang des Äquators beschränken, wo das Meer nicht komplett durchfrieren

kann; in höheren Breitengraden hätten wir nur feste Eismassen, die bis zum Meeresboden reichen.

Auch ein paar andere Dinge wären anders. In der realen Welt dehnt sich das gefrierende Wasser aus, sodass sich das Wasser beim Einfrieren in einem Riss ausdehnt, etwa in einem Straßenriss oder in einer Felsspalte. Das umgebende Material bricht auf und es kommt zu Frostschäden. Das würde in unserer alternativen Welt aufhören. Außerdem wäre Schlittschuhlaufen unmöglich, wenn das Eis dichter wäre als Wasser. In der realen Welt senkt der intensive Druck der Kufe auf die Eisoberfläche den Schmelzpunkt, und das Eis direkt unter der Kufe schmilzt und schmiert sie. Wäre das Wasser weniger dicht als Eis, würde der Druck auf das Eis stattdessen den Schmelzpunkt erhöhen.

2.2 Gefrieren und Schmelzen

Kehren wir in die reale Welt zurück und schauen wir uns sehr kaltes Wasser an. Normalerweise denken wir, dass Flüssigkeiten keine Struktur haben und aus zufällig angeordneten Molekülen bestehen, die umherwirbeln und -taumeln. Aber kaltes flüssiges Wasser enthält einen Teil der kleinräumigen Ordnung von Eis, wobei die kristallartig gebundene Struktur in Molekülgruppen für Sekunden oder Minuten besteht, bis sie durch thermische Bewegung wieder zerstört wird. Das ist wie eine Gruppe von Menschen auf einem belebten Bahnhof, die versuchen, im Gespräch beisammenzustehen, aber durch die wirbelnde Menge getrennt werden. Dies verursacht das seltsame Dichteverhalten von Süßwasser, das seine maximale Dichte bei $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ hat. Das bedeutet: Wenn in den hohen Breiten ein Fluss oder See im Herbst durch kalte Lufttemperaturen gekühlt wird, kühlt das Oberflächen-

wasser ab und sinkt zunächst ab (normalerweise ist das wärmere Wasser weniger dicht als das kühlere Wasser). Dabei wird es durch wärmeres Wasser aus größerer Tiefe ersetzt, ein Prozess, der als Konvektion bezeichnet wird. Dies geht so lange weiter, bis das gesamte Wasser im See auf 4 °C gekühlt ist. Jenseits dessen wird das Oberflächenwasser jedoch, wenn es weiter abgekühlt wird, weniger dicht und bleibt an der Oberfläche, sodass die Konvektion aufhört. Das Oberflächenwasser kann dann schnell auf 0 °C abkühlen und gefrieren, während die tieferen Bereiche des Sees nahe 4 °C bleiben. So gefriert eine Seeoberfläche im Herbst schnell, aber es dauert viel länger, bis der See bis zum Grund durchgefriert, und in den meisten Fällen endet der Winter, bevor dies geschieht.

Meerwasser hat diese Temperatur der maximalen Dichte nicht, beim Abkühlen wird das Wasser immer dichter bis zum Gefrierpunkt. Der Übergang vom Süßwasser- zum Meerwasserverhalten erfolgt, wenn der Salzgehalt 24,7 ‰ an gelöstem Salz im Wasser überschreitet. Das meiste Meerwasser hat einen Salzgehalt von 32 bis 35 ‰, nur wenige isolierte Meere wie die Ostsee und Regionen in der Nähe der Mündungen großer arktischer Flüsse weisen einen Salzgehalt unter 24,7 ‰ auf. Der Begriff „Brackwasser“ – umgangssprachlich für Wasser, das etwas salzig ist, aber nicht so sehr wie das Meer – hat in der Ozeanografie eine strenge Definition: Er steht für Wasser, das einen Salzgehalt von weniger als 24,7 ‰ hat und somit eine Temperatur von maximaler Dichte aufweist. Das bedeutet, dass beim Abkühlen von richtigem Meerwasser im Herbst Konvektion stattfindet, bis das gesamte Wasser den Gefrierpunkt erreicht. Der Gefrierpunkt selbst liegt unter 0 °C, da die Anwesenheit von Salz ihn senkt: bei typischem Meerwasser auf -1,8 °C