

Diesen Artikel können  
Sie als Audiodatei beziehen,  
siehe: [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

# Das Meer wird sauer

Ein großer Teil des Kohlendioxids, das bei der Verbrennung fossiler Energieträger in die Luft entweicht, gelangt schließlich in die Ozeane und verändert das Säuregleichgewicht des Meerwassers. Die Folgen für die marine Tierwelt könnten verheerend sein.

Von Scott C. Doney

Im Jahr 1956 wiesen Roger Revelle und Hans Suess darauf hin, wie wichtig es sei, den Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre und im Meer zu messen, um »mehr über die wahrscheinlichen klimatischen Auswirkungen des vorhergesagten starken industriellen Ausstoßes von Kohlendioxid in den nächsten 50 Jahren« zu erfahren. Nach Ablauf dieser Spanne und inmitten einer globalen Erwärmung, welche die damaligen Befürchtungen vollauf bestätigt, erstaunt es, dass die beiden Geochemiker die Bedeutung solcher Beobachtungen eigens betonen mussten.

Doch vor einem halben Jahrhundert waren sich die Klimatologen noch nicht sicher, ob sich das aus Auspuffrohren und Schornsteinen entweichende Treibhausgas Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) tatsächlich in der Atmosphäre anreichern würde. Einige bezweifelten das. Ihrer Meinung nach sollte das Gas vollkommen vom Meer absorbiert oder von einer üppiger sprießenden Vegetation aufgenommen und damit unschädlich gemacht werden.

Revelle und sein Mitarbeiter Charles David Keeling, den er als jungen Forscher für dieses Projekt angeheuert hatte, waren sich klar darüber, dass sie ihre Instrumente in entlegenen Gegenden aufstellen müssten – weit weg von CO<sub>2</sub>-

Quellen oder -Senken, die zufällige Schwankungen in den Messwerten hervorrufen könnten. Deshalb entschieden sie sich für den Südpol, den Ort mit der größtmöglichen Entfernung von jeglicher Vegetation und industrieller Aktivität überhaupt, sowie für eine neu installierte Wetterstation am Gipfel des Vulkans Mauna Loa auf Hawaii.

Die Aufzeichnungen am Mauna Loa laufen nun schon seit 1958 mit nur einer kurzen Unterbrechung. Da Hawaii nicht so abgelegen ist wie die Antarktis, steigen und fallen die CO<sub>2</sub>-Werte dort zwar im Rhythmus des Vegetationszyklus auf der Nordhalbkugel. Doch am Ende eines jeden Jahres ist die Kohlen-



Korallenriffe mit ihrem großen Artenreichtum sind vielen belastenden Einflüssen ausgesetzt. Künftig zählt dazu auch eine Veränderung der Ozeanchemie, verursacht durch die Verbrennung fossiler Energieträger. Ein Drittel des dabei freigesetzten Kohlendioxids gelangt letztlich ins Meer und senkt dessen pH-Wert. Diese Verschiebung zu saureren Bedingungen hemmt das Wachstum der Korallen und vieler anderer Meeresorganismen.

▷ dioxidkonzentration stets höher als zwölf Monate zuvor. Deshalb dauerte es nicht lange, bis selbst die hartnäckigsten Zweifler zugeben mussten, dass ein großer Teil des in die Atmosphäre gelangten CO<sub>2</sub> dort bleibt. Eine beträchtliche Menge endet allerdings auch im Meer, wie Revelle bereits richtig erkannt hatte. Anders als viele gerne glauben möchten, ist das Kohlendioxid im Ozean freilich keineswegs harmlos. Vielmehr greift es merklich in die Chemie des Meerwassers ein. Während die drohende Klimaänderung in aller Munde ist, wird über diesen Effekt – im Wesentlichen eine Versauerung der Ozeane – kaum gesprochen. Dabei beginnt er sich inzwischen deutlich zu zeigen.

Die von Keeling gelieferten Kohlendioxidwerte über fünf Jahrzehnte hinweg sind extrem wertvoll. Doch der Zeitraum reicht nicht aus, um die heutige Situation richtig einzuordnen. Die dafür nötige längerfristige Perspektive liefern Luftblasen, die in Eisbohrkernen eingeschlossen sind. Dieses natürliche Archiv zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre über Jahrtausende hinweg annähernd konstant blieb und erst mit Einsetzen der Industrialisierung zu Beginn des 19. Jahrhunderts rasch anzusteigen begann. Heute enthält die Luft etwa 30 Prozent mehr Kohlendioxid als noch zu Lebzeiten Napoleons, und bis zum Ende dieses Jahrhunderts wird es voraussichtlich doppelt bis dreimal so viel sein.

Dieser rasante Anstieg rührt großenteils von der Verbrennung fossiler Energieträger her, also Kohle, Erdöl und Erdgas. Einen gewissen Beitrag leisten zwar auch die Zementproduktion und die Brandrodung in tropischen Wäldern; er bleibt jedoch vergleichsweise gering und

sei der Einfachheit halber deshalb hier vernachlässigt. Im Gegensatz zu lebenden Organismen enthalten fossile Brennstoffe wenig oder keinen radioaktiven Kohlenstoff-14, ein Isotop mit acht Neutronen im Kern statt der üblichen sechs. Fossile Brennstoffe weisen außerdem ein charakteristisches Verhältnis der zwei stabilen Atomsorten Kohlenstoff-12 und -13 zueinander auf. Ihre Verbrennung hinterlässt demnach eine charakteristische Isotopen-Signatur in der Atmosphäre. Deshalb besteht kein Zweifel, wo der wachsende CO<sub>2</sub>-Überschuss herkommt.

### Alarmierende Messergebnisse

Ungeachtet gelegentlicher Schwankungen verbleiben im Durchschnitt etwa vierzig Prozent des von fossilen Brennstoffen stammenden Kohlendioxids in der Atmosphäre. Den Rest nehmen Landpflanzen und die Ozeane auf, momentan etwa zu gleichen Teilen.

Noch fällt der Eintrag von Kohlendioxid aus fossilen Energiequellen ins Meer im Verhältnis zu den gewaltigen natürlichen CO<sub>2</sub>-Vorräten der Ozeane nicht stark ins Gewicht. Um herauszufinden, ob und wie viel von dem Gas aufgenommen wird, braucht es daher Instrumente, die mindestens bis zur vierten Stelle genau messen. Außerdem können die Werte von Ort zu Ort beträchtlich variieren.

Deshalb erfordert es erhebliche Mittel und große Ausdauer, die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen weltweit aufzuzeichnen. Dieser Mammutaufgabe unterzogen sich Ozeanografen Ende der 1980er und in den 1990er Jahren im Rahmen einer globalen Messkampagne, die unter zwei Abkürzungen firmierte: JGOFS (für *Joint Global Ocean Flux Survey* = Gemeinsame globale Verfolgung der Stoffflüsse in die

Ozeane) und WOCE (für *World Ocean Circulation Experiment* = Experiment zur Zirkulation der Weltmeere).

Ihre Ergebnisse als solche zeigten allerdings noch nicht, welcher Teil des gemessenen Kohlendioxids natürlich ist und welcher auf anthropogene Emissionen zurückgeht. 1996 entwickelten Nicholas Gruber, inzwischen an der Universität von Kalifornien in Los Angeles, und zwei seiner Kollegen deshalb eine Methode, diesen Unterschied herauszufinden. Das Verfahren auf alle JGOFS- und WOCE-Daten anzuwenden dauerte bis 2004. Doch dann lag das Ergebnis vor. Demnach haben die Weltmeere die Hälfte des fossilen Kohlenstoffs aufgenommen, der seit Beginn der industriellen Revolution in die Luft gelangt ist.

Statt eine Bestandsaufnahme des gesamten Ozeans zu machen, kann man sich aber auch auf eine Meeresregion beschränken und dort wiederholt Messungen vornehmen. Dabei muss man nur penibel darauf achten, das CO<sub>2</sub> aus fossilen Brennstoffen von dem aus den diversen biologischen Quellen zu unterscheiden. Zudem sollten die Beobachtungen mindestens ein Jahrzehnt umfassen, um vor dem Hintergrund natürlicher Variationen den allgemeinen Trend aufzudecken, der von der Verbrennung fossiler Energieträger herrührt. 2005 leiteten Rik Wanninkhof von der National Oceanic and Atmospheric Administration der USA (NOAA) und ich eine Forschungs-expedition mit genau diesem Ziel.

Zusammen mit 31 Wissenschaftlern, Technikern und Studenten verbrachten wir fast zwei Monate an Bord unseres Forschungsschiffs damit, stichprobenartig die physikalischen und chemischen Eigenschaften des westlichen Südatlantiks zu bestimmen – von der Oberfläche bis zum Meeresboden. Wir begannen in der Nähe der Antarktis und endeten nicht weit vom Äquator. Exakt diesen Abschnitt hatte ich 1989 als Doktorand zusammen mit anderen Wissenschaftlern schon einmal untersucht.

Beim Vergleich der beiden Messungen zeigte sich, dass die oberen Wasserschichten des Südatlantiks bis in einige hundert Meter Tiefe heute durchweg mehr Kohlenstoff enthalten als seinerzeit – in Einklang mit der Vermutung, dass das Meer CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufnimmt. Andere Ozeanografen haben im Pazifischen und Indischen Ozean ähnliche Trends festgestellt. Was bedeu-

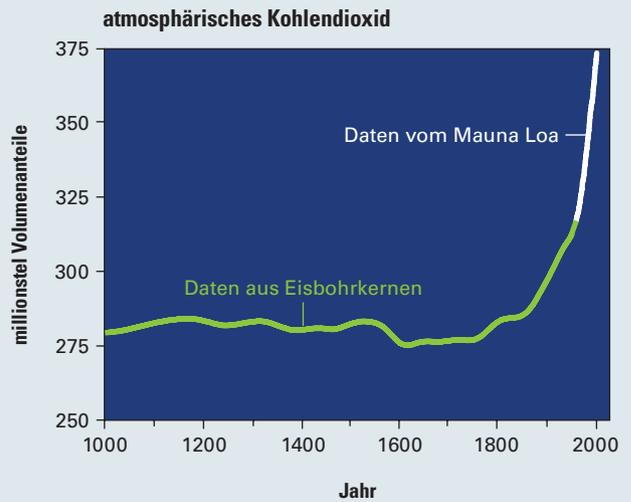
## IN KÜRZE

- ▶ Etwa ein Drittel des bei der **Verbrennung fossiler Energieträger** freigesetzten Kohlendioxids gelangt schließlich ins Meer. Dort bildet es **Kohlensäure**, was den pH-Wert des Meerwassers, der im leicht basischen Bereich liegt, herabsetzt und das Gleichgewicht zwischen Karbonat- und Hydrogenkarbonat-Ionen verändert.
- ▶ Dadurch fällt es Meereslebewesen schwerer, Skelette und Gehäuse aus Kalk aufzubauen. Das **zusätzliche Kohlendioxid im Ozean** gefährdet daher eine Vielzahl von Organismen, darunter die Korallen, deren Riffe zu den **vielfältigsten Lebensräumen** auf der Erde zählen.
- ▶ In hundert Jahren werden an der Oberfläche des Südpolarmeers sogar Bedingungen herrschen, unter denen die Gehäuse winziger Schnecken, die ein entscheidendes **Glied der marinen Nahrungskette** in dieser hochproduktiven Zone bilden, sich zersetzen und auflösen.

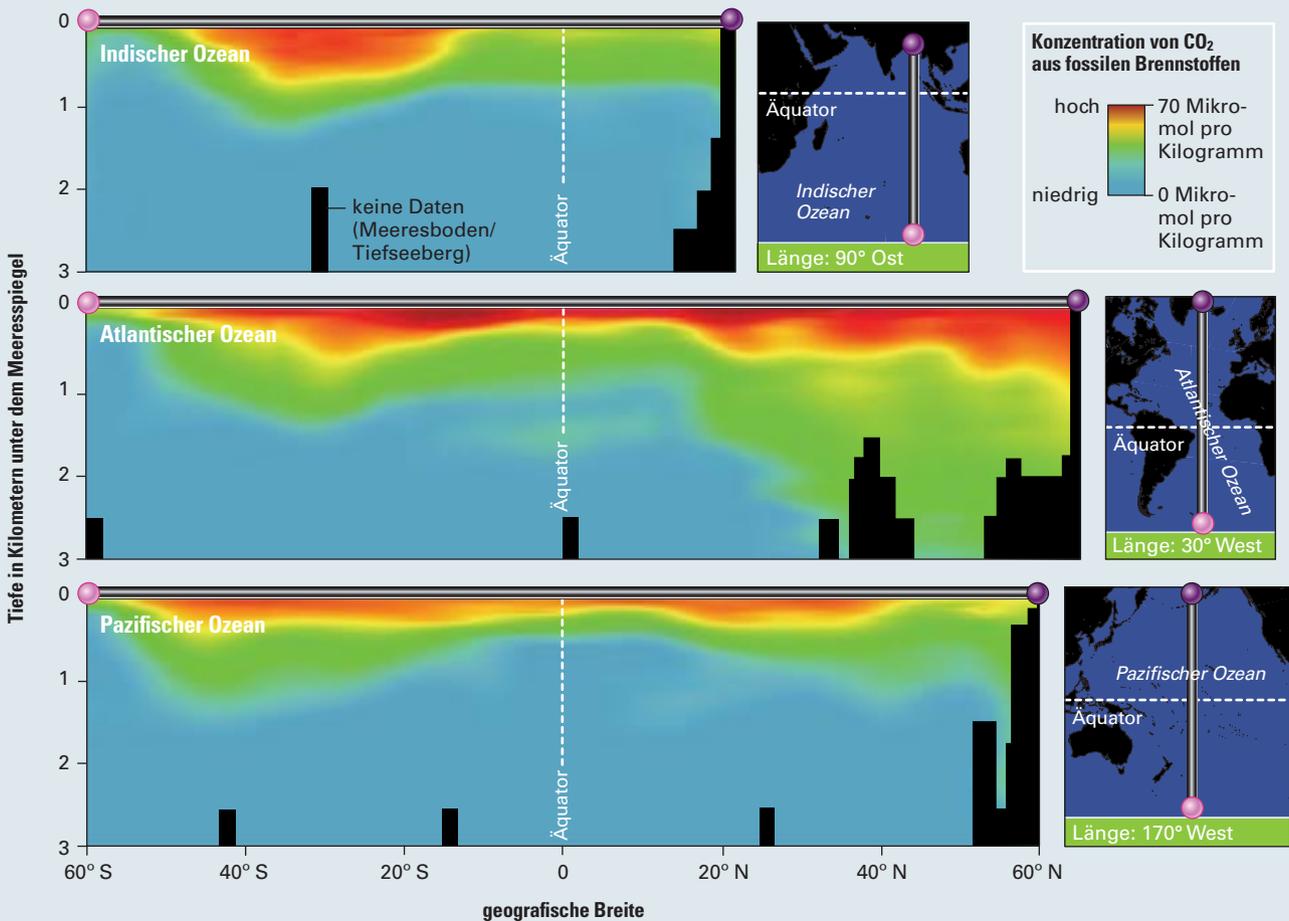
# Aus der Luft ins Meer

**Der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre** hat im 20. Jahrhundert stark zugenommen. Dieser bedenkliche Trend ist gut dokumentiert (rechts). Bis in die 1950er Jahre hinein lässt sich der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration durch die Analyse von Luftblasen in Gletschereis ermitteln. Für diesen Zeitraum sind hier Durchschnittswerte über jeweils 75 Jahre hinweg aufgetragen (grüner Kurvenabschnitt). Danach gab es direkte Messungen in der Atmosphäre. Aus dieser Periode zeigt die Grafik Jahresmittelwerte von der Wetterstation am Gipfel des Mauna Loa auf der Insel Hawaii (weißer Kurvenabschnitt).

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre wäre noch viel stärker gestiegen, wenn nicht ein erheblicher Teil des Gases vom Meer aufgenommen würde. Dies ließ sich jüngst durch detaillierte ozeanografische Untersuchungen nachweisen. Daraus erstellte Profile (unten) zeigen, dass sich etwa die Hälfte des bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzten Kohlendioxids inzwischen in den oberen Meeresschichten befindet.



## ozeanisches Kohlendioxid



JEN CHRISTIANSEN, NACH CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER, OAK RIDGE NATIONAL LAB., (HTTP://CDIAC.ORNL.GOV) UND ROBERT KEY, PRINCETON UNIVERSITY

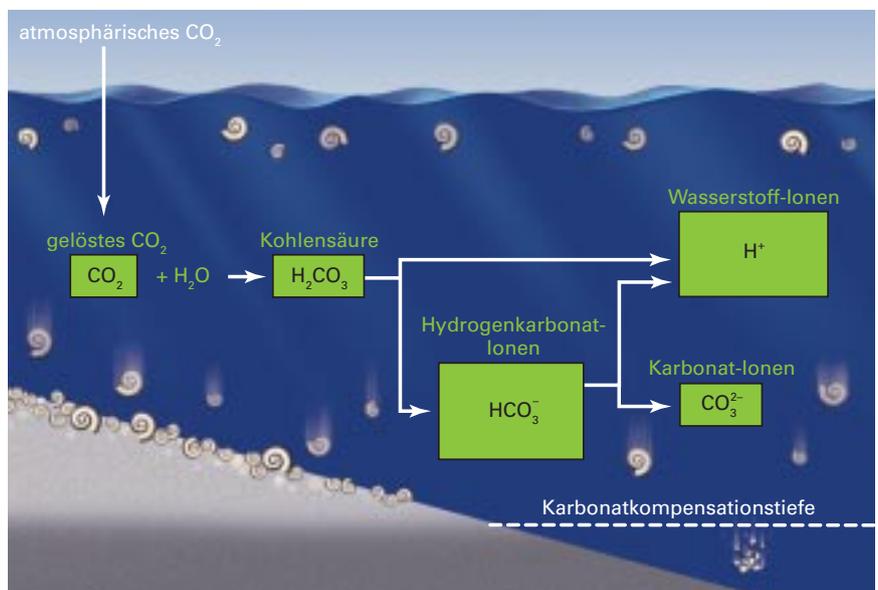
tet diese Veränderung nun für die marine Umwelt?

Kohlendioxid reagiert teilweise mit Wasser zu der aus Erfrischungsgetränken bekannten Kohlensäure (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Diese gibt wie alle Säuren Wasserstoff-Ionen

(H<sup>+</sup>) in die Lösung ab. Dabei bleiben Hydrogencarbonat- (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) und Carbonat-Ionen (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) zurück.

Chemiker geben normalerweise nicht die Konzentration der Wasserstoff-Ionen selbst, sondern ihren negativen Logarith-

mus an. Diesen bezeichnen sie als pH-Wert. Nimmt er um eine Einheit ab, entspricht das einer Verzehnfachung der Konzentration an Wasserstoff-Ionen. Dadurch wird das Wasser saurer. Umgekehrt ist eine Erhöhung des pH-Werts



◀ Aus der Luft aufgenommenes Kohlendioxid verbindet sich mit Wasser zu Kohlensäure. Ein Teil davon zerfällt in Wasserstoff- und Hydrogenkarbonat-Ionen. Letztere dissoziieren ihrerseits partiell in Karbonat- und noch mehr Wasserstoff-Ionen. Durch diese chemischen Veränderungen verlagert sich die »Karbonatkompensationstiefe« für Kalzit und Aragonit nach oben. Das ist die Grenze, unterhalb derer die Hartteile von Meeresorganismen, die aus diesen Mineralen bestehen, sich auflösen.

▷ um eine Einheit gleichbedeutend mit einer Abnahme der Konzentration an Wasserstoff-Ionen um den Faktor zehn. Das Wasser wird dabei basischer. Neutrales, reines Wasser hat einen pH-Wert von 7, ursprüngliches Meerwasser dagegen einen zwischen 8 und 8,3. Der Ozean ist also von Natur aus leicht basisch.

Durch die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft liegt der pH-Wert des Oberflächenwassers heute schon um etwa 0,1 niedriger als in vorindustrieller Zeit. Falls die Menschheit ihren Verbrauch an fossilen Brennstoffen nicht bald deutlich drosselt, ist bis zum Jahr 2100 ein weiterer Rückgang um 0,3 zu erwarten. Laut Ken Caldeira, Ozeanograf an der Carnegie Institution in Washington, dürfte der pH-Wert des Meeres in einigen Jahrhunderten niedriger liegen als zu irgendeinem Zeitpunkt während der letzten 300 Millionen Jahre.

Diese Änderungen in der Konzentration der Wasserstoff-Ionen mögen gering erscheinen, geben aber dennoch Anlass zur Sorge. Nach den Resultaten jüngster Experimente reichen sie nämlich aus, um einigen Lebensformen im Meer zu schaden – speziell Organismen, die Karbonat-Ionen brauchen, um daraus ihre aus Kalk (Kalziumkarbonat) bestehenden Skelette oder -gehäuse zu bauen.

Auf den ersten Blick erscheint das paradox. Sollte bei einer Zunahme der im Meer gelösten Menge an Kohlendioxid, von dem sich ja ein Teil via Kohlensäure in Karbonat umwandelt, die Konzentration dieser Ionen nicht sogar noch steigen? Doch man muss auch die gleichzeitig gebildeten Wasserstoff-Ionen berücksichti-

gen. Diese neigen dazu, sich mit Karbonat- zu Hydrogenkarbonat-Ionen zu verbinden. Insgesamt nimmt deshalb der Karbonat-Gehalt ab. Bei einem Rückgang des pH-Werts um 0,3 bis Ende dieses Jahrhunderts würde er sich halbieren.

### Bedrohung für Kalkbildner

Dies könnte die Fähigkeit gewisser Organismen zur Kalkbildung derart hemmen, dass sie Wachstumsprobleme bekommen. Davon betroffen wäre vor allem eine Form pflanzlichen Planktons, die zu den verbreitetsten Lebewesen zählt: die Coccolithophoriden. Diese einzelligen Algen sind von kleinen Kalkplatten bedeckt und treiben gewöhnlich nahe der Meeresoberfläche im Wasser, wo sie das dort reichlich vorhandene Sonnenlicht für die Photosynthese nutzen. Schaden nehmen könnten auch die Foraminiferen – mit den Amöben verwandte planktonische Organismen – und kleine Meeresschnecken: die Pteropoden. All diese winzigen Kreaturen bilden eine bedeutende Nahrungsquelle für Fische und Meeressäuger, darunter einige Walarten.

Biologen fürchten auch um die Korallen, bei denen es sich ungeachtet ihres pflanzenähnlichen Aussehens um Kolonien kleiner Tiere handelt, die mit den Seeanemonen verwandt sind. Diese Polypen ernähren sich, indem sie Plankton aus dem Wasser filtern. Außerdem scheiden sie Kalk aus und bauen so mit der Zeit große, manchmal bizarre Skelette auf. Korallenriffe gehören zu den marinen Ökosystemen mit der größten biologischen Vielfalt. Einen Beitrag zu dieser fantastischen Unterwasserwelt leisten

auch bestimmte Algen, die ebenfalls Kalk ausscheiden und teils verzweigte Gerüste daraus bilden. Sie und Korallen haben über Generationen hinweg zum Beispiel das Great Barrier Reef vor der Küste Australiens geschaffen – die gewaltigste biologische Struktur der Welt. Weniger spektakuläre Kalkgebilde finden sich in tieferen Meeresregionen, wo Kaltwasser-Korallengemeinschaften verbreitet auf Kontinentalrändern und Seebergen gedeihen und wichtige Lebensräume für Fische darstellen.

Flachwasserkorallen verdanken ihre schönen Farben teilweise symbiotischen Algen, die in den Zellen der Polypen leben. Als Reaktion auf verschiedene Formen von Umweltbelastung verlassen diese Untermieter manchmal ihre Wirte, wodurch das weiße Kalkskelett darunter zum Vorschein kommt. Dieses Ausbleichen kann zum Beispiel durch sehr hohe Temperaturen hervorgerufen werden. Einige Wissenschaftler sehen aber auch in der Versauerung des Meeres – genauer gesagt in der Abnahme seiner schwachen Basizität – einen möglichen Auslöser.

Das Ausbleichen ist jedoch nicht die einzige Gefahr. Tatsächlich könnten Korallen und andere Kalk bildende Meeresorganismen vom zunehmenden Kohlendioxidgehalt der Ozeane auf noch fundamentalere Weise geschädigt werden: Vielleicht lösen sich ihre Kalkstrukturen einfach auf. Wer den Vorgang mit eigenen Augen erleben will, braucht nur ein Stück Kreide, die auch aus Kalziumkarbonat besteht, in ein Glas Essig (eine schwache Säure) zu tauchen: Es beginnt sofort, sich sprudelnd aufzulösen.

Kalk tritt in zwei verschiedenen Mineralformen auf: als Kalzit und Aragonit. Einige Kalzit ausscheidende Organismen bauen zusätzlich Magnesium ein, wobei Dolomit entsteht. Aragonit und Dolomit sind besser löslich als Kalzit. Deshalb dürften Korallen und Flügelschnecken, die beide Aragonitgehäuse produzieren, sowie Kalkstöcke bildende Algen, die Dolomit herstellen, besonders anfällig gegenüber einer Versauerung der Ozeane sein.

Die Löslichkeit von Kalk hängt wesentlich von der Konzentration an Karbonat-Ionen ab – und damit indirekt vom pH-Wert. Doch auch Temperatur und Druck spielen eine Rolle. So lösen sich selbst beim heutigen relativ hohen pH-Wert der Ozeane in tiefen, kalten Bereichen bereits Kalkschalen auf. Diese Regionen werden als untersättigt bezeichnet. Dagegen sind flache, warme Oberflächenwässer im Hinblick auf Kalzit und Aragonit »übersättigt«, was bedeutet, dass diese Minerale dort nicht durch Auflösung bedroht sind. Der Übergang von übersättigten zu untersättigten Bedingungen wird als Karbonatkompensationstiefe (CCD, nach englisch *carbonate compensa-*

*tion depth*) bezeichnet. Unterhalb dieses Niveaus beginnt die Zersetzung.

Durch den Eintrag von Kohlendioxid aus der Atmosphäre hat sich die CCD von Aragonit und Kalzit gegenüber der Position zu Beginn des 19. Jahrhunderts um 50 bis 200 Meter nach oben verlagert. Den Ergebnissen jüngster Untersuchungen zufolge dürfte sie in den nächsten Jahrzehnten weiter großflächig ansteigen. Bei zunehmender Versauerung des Ozeans wird der obere, »muschelfreundliche« Teil also immer dünner, sodass der Lebensraum für Kalk bildende Meeresorganismen schrumpft.

### Versuch im künstlichen Korallenriff

Anfangs hielten viele Forscher die Versauerung der Weltmeere nur für ein kleines Problem, weil das Wasser an der Oberfläche ihrer Ansicht nach trotzdem übersättigt bleiben würde – zumindest gegenüber Kalzit, der stabilsten Form von Kalk. Ende der 1990er Jahre machte Christopher Langdon, Meeresbiologe an der Universität Miami, einen ersten experimentellen Test. Dafür benutzte er das künstliche Korallenriff von »Biosphere II« – jenem

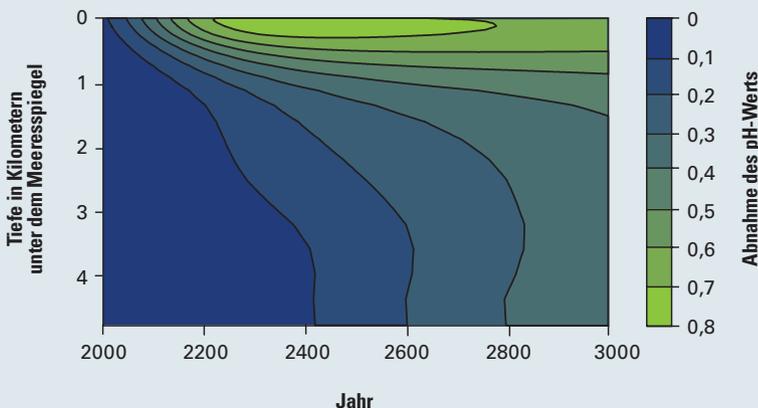
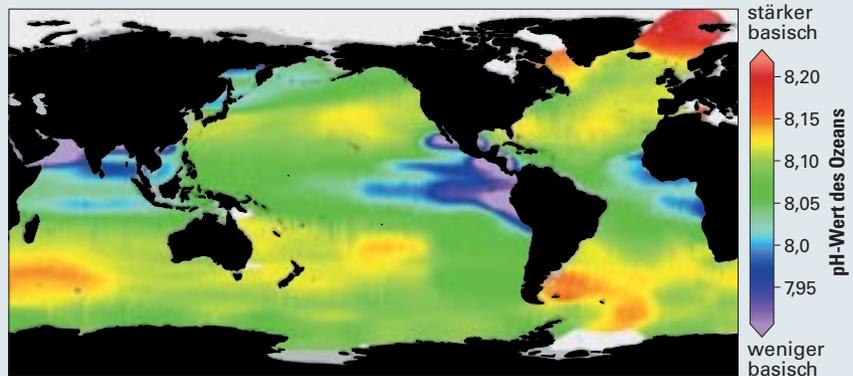
berühmten Gebäudekomplex in der Wüste von Arizona, der Anfang der 1980er Jahre als autonomes, von Menschen bewohnbares Ökosystem errichtet und nach dem Scheitern des Experiments 1996 von der New Yorker Columbia-Universität als Labor übernommen worden war.

Langdon manipulierte den Säuregrad in dem riesigen Wassertank mit dem artifiziellen Riff. Überraschenderweise stellte er dabei fest, dass die Geschwindigkeit der Kalkproduktion in den Korallen bei sinkendem pH-Wert abnahm, obwohl das Wasser immer noch stark mit Aragonit übersättigt war. Wenig später fand ein Team um Ulf Riebesell, derzeit am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften der Universität Kiel, bei planktonischen Coccolithophoren eine ähnliche Entwicklungshemmung. Inzwischen wurden in etlichen weiteren Laborexperimenten für alle wesentlichen Gruppen von Meeresorganismen mit stützenden Kalkkonstruktionen schädliche Effekte eines CO<sub>2</sub>-Anstiegs und der resultierenden Erniedrigung des pH-Werts nachgewiesen.

Kaltes Wasser ist von Natur aus weniger übersättigt an den verschiedenen For- ▷

## Der Säuregehalt des Meeres – heute und morgen

Wie Messungen zeigen, schwankt der pH-Wert der Ozeane in den oberen fünfzig Metern beträchtlich von Ort zu Ort. Bereiche mit relativ niedrigem pH-Wert – also weniger basischen Bedingungen – kommen vorwiegend dadurch zu Stande, dass hier infolge natürlicher Meeresströmungen Tiefenwasser aufsteigt. Diese Zonen, wie etwa der östliche äquatoriale Pazifik, könnten sich gut dafür eignen, jene Effekte zu untersuchen, die schon bald größere Gebiete betreffen.



**Zwar ist die Versauerung der Weltmeere**, ausgedrückt durch den Abfall des pH-Werts, bisher noch gering, doch für die Zukunft erwarten Forscher stärkere Veränderungen. Zunächst sind hauptsächlich die obersten Wasserschichten betroffen, aber mit der Zeit pflanzt sich der Effekt in die Tiefe fort.

Viele marine Lebewesen dürften unter der Versauerung der Weltmeere leiden – so die Korallen und die Kalkstöcke bildenden Algen in Rifffkolonien. Aber auch die Foraminiferen und Coccolithophoren in den oberflächennahen Schichten der meisten Meere sind betroffen. Ferner droht den Pteropoden – kleinen Meeresschnecken in kalten, polaren Gewässern – der Untergang.



Koralle (*Millepora tenella*)



Algenstock (*Amphiroa anceps*)

PHOTO RESEARCHERS INC., ALEXIS ROSENFELD (KORALLE); FISHPICS HAWAII, KEOKI STENDER (ALGE)

men von Kalziumkarbonat als warmes. Deshalb dürften Tiefsee-Ökosysteme in hohen Breiten als Erste durch die Versauerung der Weltmeere Schaden nehmen. Die Polarmeere werden vermutlich noch vor Ablauf dieses Jahrhunderts bis an die Oberfläche für Aragonit übersättigt sein. Das könnte nach Untersuchungen von Victoria J. Fabry von der California State University in San Marcos dazu führen, dass die polaren Flügelschnecken entweder völlig verschwinden oder in niedrigere, wärmere Breiten übersiedeln müssen, falls sie sich an die dortigen Umweltbedingungen anpassen können. Niemand weiß, wie sich eine Dezimierung der Pteropoden auf andere Teile des marinen Ökosystems auswirken wird. Grund zur Sorge besteht jedenfalls: Im Südpolarmeer mit seinen großen Populationen von Fischen, Walen und Seevögeln bilden die kleinen Schnecken ein entscheidendes Glied in der Nahrungskette.

Ein ähnliches Schicksal könnte dem kalkhaltigen Phyto- und Zooplankton in höheren Breiten bevorstehen. Allerdings hätte es eine zusätzliche Galgenfrist von einigen Jahrzehnten; denn die Gehäuse dieser Organismen bestehen aus Kalzit. Korallenkolonien in tiefen Meeresregionen werden wohl gleichfalls betroffen sein, besonders im westlichen Nordatlantik. Dort strömt Wasser des Golfstroms, das hohe Konzentrationen an Kohlenstoff aus der Verbrennung fossiler Energieträger enthält, nach dem Abkühlen und Absinken im Eismeer dicht über dem Atlantikboden zurück nach Süden.

Die Aussichten für Korallenriffe sind aber auch nicht rosig. Diese wertvollen Ökosysteme leiden ohnehin schon unter Treibhauserwärmung, örtlicher Meeresverschmutzung und Überfischung. Für sie ist die Versauerung der Weltmeere als zusätzliche Umweltbelastung deshalb besonders schwer zu verkraften. Viele Ko-

rallenriffe befinden sich schon auf dem Rückzug, und die Absenkung des pH-Werts könnte einigen den Rest geben.

### Ist Plankton der Gewinner?

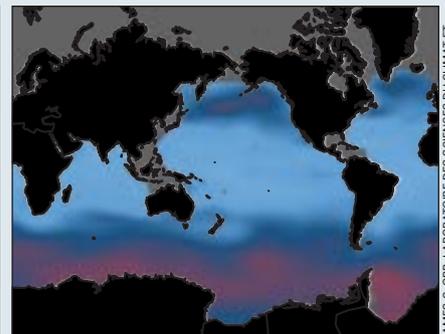
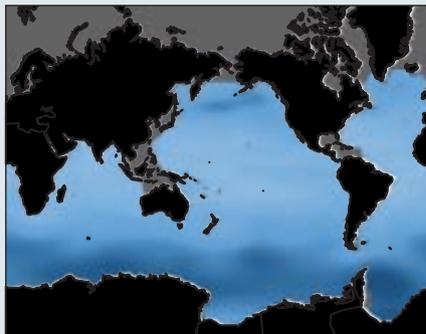
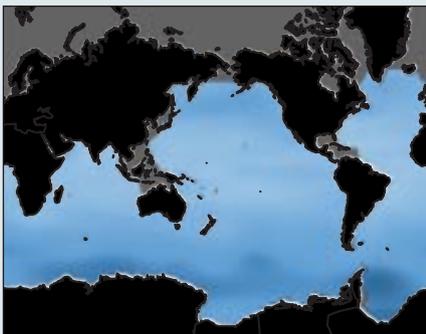
So trübe die Aussichten für viele Meeresorganismen sind, wird es freilich auch Gewinner geben. Derzeit liegt nur ein kleiner Teil des Kohlenstoffs im Meerwasser als gelöstes CO<sub>2</sub> vor, was das Wachstum einiger Formen pflanzlichen Planktons begrenzt. Viele von ihnen verwenden wertvolle Energie darauf, das Gas in ihren Zellen anzureichern, und würden deshalb womöglich von einer Zunahme an gelöstem CO<sub>2</sub> profitieren. Sicher lässt sich das jedoch nicht sagen, weil noch zu wenig über diesen vermuteten Düngungseffekt bekannt ist.

Genauso wenig weiß man deshalb, ob höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen den Fotosynthese treibenden Algen zugute kommen würden, die im Inneren der

## Angenagt: die Zukunft des Aragonits

**Sinkende pH-Werte dürften die Fähigkeit** gewisser Meeresorganismen beeinträchtigen, ihre Skelette und Gehäuse aufzubauen. Als Erste werden das – in regional unterschiedlichem Maße –

solche Lebewesen zu spüren bekommen, die für ihre Karbonatstrukturen die empfindlichste Form von Kalk verwenden: das Mineral Aragonit.



JAMES C. ORR, LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT, CEA-CNRS, UMR 1572, LSCE

**Vor der industriellen Revolution** (links) waren die oberflächennahen Wasserschichten großenteils »übersättigt« gegenüber Aragonit (hellblau), sodass die Meeresorganismen dieses Mineral leicht bilden konnten. Im polaren Oberflächenwasser wird heute (Mitte) die Sättigungskonzentration nur noch knapp überschrit-

ten (dunkelblau). Gegen Ende dieses Jahrhunderts (rechts) dürfte kaltes Wasser – insbesondere rund um die Antarktis – dagegen übersättigt sein (purpurrot). Dann können die Lebewesen dort keinen Aragonit mehr bilden, und noch vorhandene Strukturen aus dem Mineral lösen sich auf.



Foraminifere (*Globigerina quinqueloba*)



Coccolithophore (*Emiliana huxleyi*)



Flügelschnecke (*Candida atlanta*)

WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION (FORAMINIFERE); PHOTO RESEARCHERS INC., STEVE GSCHMEISSNER (COCCOLITHOPHORE); UNIVERSITY OF ALASKA-FAIRBANKS / NOAA, RUSS HOPCROFT (FLÜGELSCHNECKE)

Korallen leben. Viele Arten von marinem Phytoplankton verwenden Hydrogenkarbonat als Ausgangsmaterial für die Fotosynthese. Weil sich dessen Konzentration kaum ändern wird, dürfte die Zahl solcher Organismen nicht deutlich zunehmen. Einige höhere Wasserpflanzen wie die Seegrasgewächse verwenden dagegen gelöstes CO<sub>2</sub> und werden vielleicht von dessen steigender Konzentration profitieren – ähnlich wie der zunehmende Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre den Landpflanzen nutzt.

Den Wissenschaftlern bleibt noch viel zu tun, um die Reaktion der Meeresökosysteme auf die Versauerung besser einschätzen zu können. Derzeit bestehen die meisten Untersuchungen aus kurzfristigen Laborexperimenten an einzelnen Arten. Vereinzelt wurden auch kleinräumige Feldstudien durchgeführt. Dabei ging es um die akuten Auswirkungen des gezielten Eintrags von atmosphäri-

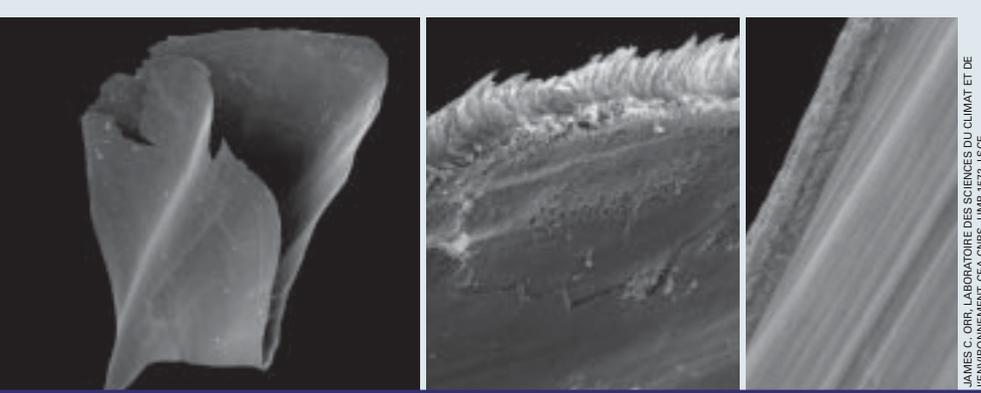
chem Kohlendioxid in die Tiefsee – einer der Strategien zum Deponieren von CO<sub>2</sub> aus Abgasen (Spektrum der Wissenschaft 3/2006, S. 72). So wertvoll die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind, erlauben sie doch kaum Rückschlüsse auf die Folgen einer mäßigen, aber großräumigen und anhaltenden Verminderung des pH-Werts. Auch ist es nicht ohne Weiteres möglich, Resultate von Laboruntersuchungen auf komplette Ökosysteme mit ihrem komplexen Beziehungsgeflecht zwischen vielen verschiedenen Organismen zu übertragen.

Um zu einer realistischeren Einschätzung zu gelangen, könnte man beispielsweise den CO<sub>2</sub>-Gehalt des Meerwassers an einer ausgewählten Stelle oder an einem Korallenriff monate- bis jahrelang künstlich erhöhen. An Land wurden entsprechende Experimente schon durchgeführt. Meereswissenschaftler und -ingenieure sind dabei, die logistischen Probleme

zu prüfen, die es mit sich bringen würde, diesen Forschungsansatz auf den Ozean auszudehnen. Eine weitere Möglichkeit wäre, zu untersuchen, wie es marinen Organismen in Regionen ergeht, wo schon seit Längerem ein relativ niedriger pH-Wert herrscht. Das gilt etwa für die Galapagosinseln, deren Gewässer von Natur aus reich an Kohlendioxid sind.

Eine dritte Strategie könnte darin bestehen, geologische Zeugnisse aus Zeiten zu untersuchen, in denen die Atmosphäre weit mehr CO<sub>2</sub> enthielt und der pH-Wert im Ozean vermutlich viel niedriger lag als heute. So herrschte vor etwa 55 Millionen Jahren – am Übergang vom Paläozän zum Eozän – ein abnorm warmes Klima, in dem viele Meeresorganismen ausstarben. Zahlreiche Forscher befürchten, dass Ähnliches in naher Zukunft geschieht, zumal die Versauerung derzeit viel rascher vonstatten geht als je zuvor und den Lebewesen in den Ozeanen keine Zeit zur Anpassung lässt. Auch wenn die Auswirkungen dieses Umweltwandels den direkten Blicken der Menschen entzogen bleiben – für die marine Umwelt sind sie dramatisch. ◀

**Flügelschnecken (Pteropoden) bilden im gesamten Südpolarmeer** ein entscheidendes Glied in der Nahrungskette. Für diese Tiere und alle, die von ihnen abhängen, könnte die Versauerung der Ozeane verhängnisvoll sein. Nach 48 Stunden in Wasser, das gegenüber Aragonit untersättigt ist, zeigt die Schale eines Pteropoden Auflösungserscheinungen an der Oberfläche (links), die besonders deutlich bei starker Vergrößerung zu erkennen sind (Mitte). Zum Vergleich ist auch die Schale einer unversehrten Flügelschnecke in Nahaufnahme abgebildet (rechts).



JAMES C. ORR, LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT, CEA-CNRS, UMR 1572, LSCE



**Scott C. Doney** forscht an der Abteilung für Marine Chemie und Geochemie der Woods Hole Oceanographic Institution, wo er 1991 auch in chemischer Ozeanografie promoviert hat. Er gehört zum wissenschaftlichen

Team des Orbital Carbon Observatory der Nasa und ist Vorsitzender der Ocean Carbon and Climate Change Scientific Steering Group im Rahmen des U.S. Global Change Research Program.

Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Von James C. Orr et al. in: Nature, Bd. 437, S. 681, 29. 9. 2005

Anthropogenic carbon and ocean pH. Von Ken Caldeira und Michael E. Wickert in: Nature, Bd. 425, S. 365, 25. 9. 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE