1 Die Weltmeere, Motor des globalen Klimas

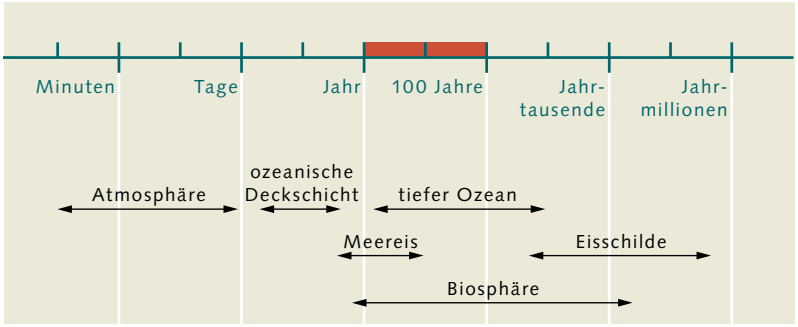
> Die Ozeane bedecken circa 70 Prozent der Erdoberfläche. Sie spielen daher für das Klima auf der Erde und die globale Erwärmung eine große Rolle. Eine wichtige Aufgabe der Ozeane besteht darin, die Wärme aus den Tropen in höhere Breiten zu transportieren. Sie reagieren träge auf Veränderungen in der Atmosphäre und nehmen neben der Wärme große Mengen des von uns Menschen produzierten Klimagases Kohlendioxid auf.

Ein komplexes Gefüge – das Klimasystem der Erde

> Das Klima der Erde wird durch viele Faktoren wie Sonnenstrahlung, Wind oder Meeresströmungen geprägt. Forscher versuchen diese Einflussgrößen in Modellen zu vereinen. Inzwischen hat man viele Prozesse verstanden. Das Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren ist aber derart komplex, dass noch immer viele Fragen offen sind.

Die Trägheit des Klimas

Der Weltozean ist eines der wichtigsten Elemente des globalen Klimasystems. Das lernt man schon in der Schule. Aber was ist eigentlich Klima? Der Unterschied zwischen Wetter und Klima lässt sich durch einen einzigen Satz verdeutlichen: Klima ist das, was man erwartet; Wetter ist das, was man bekommt. Demnach gibt es einen fundamentalen Unterschied zwischen Wetter und Klima. Die Wetterforschung befasst sich mit der Entstehung, Verlagerung und der Vorhersage einzelner Wetterelemente, etwa eines bestimmten Tiefdruckgebiets. Die Klimaforschung ist hingegen an der Gesamtheit der Tiefs und Hurrikans interessiert und widmet sich beispielsweise der Frage, wie viele Tiefs oder Hurrikans es nächstes Jahr geben wird oder ob sie sich infolge der globalen Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten häufen oder intensivieren werden. Mit dem Begriff Wetter bezeichnet man also die kurzfristigen Geschehnisse in der **Atmosphäre,** während sich der Begriff Klima auf längere Zeiträume bezieht. Zur Beschreibung des Klimas verwendet man in der Regel eine Zeitspanne von 30 Jahren als Bezugszeitraum.

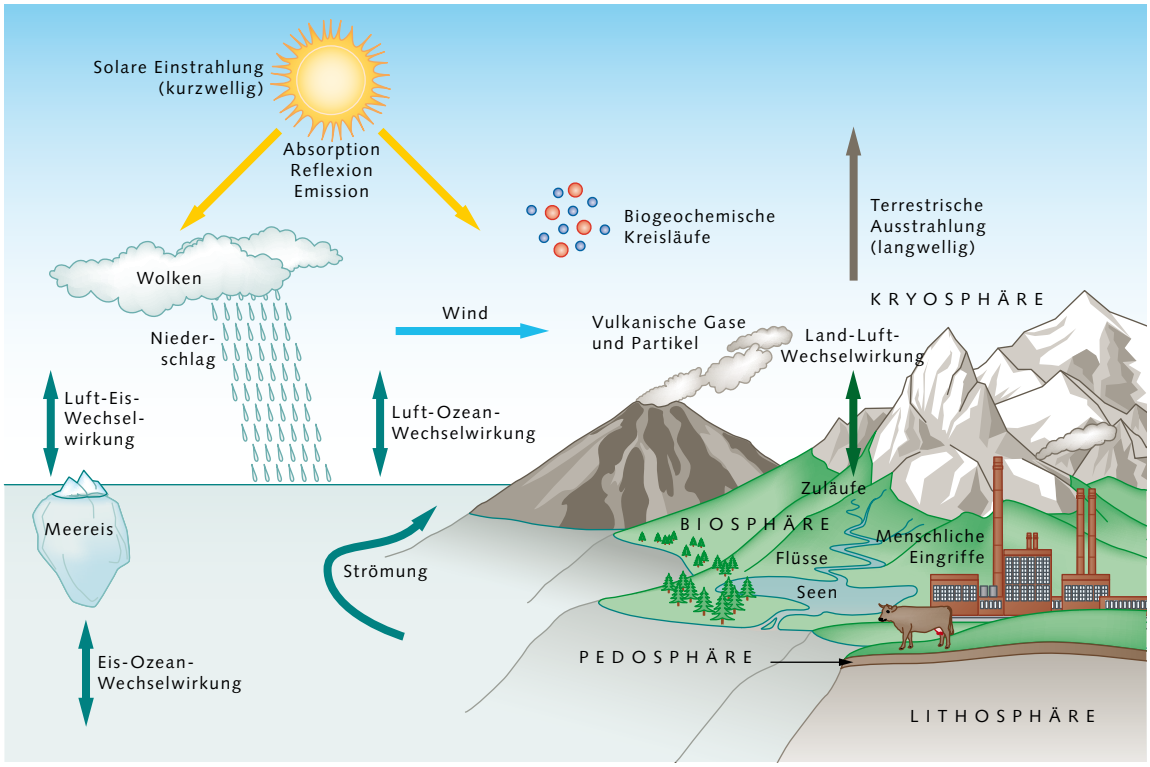


1.1 > Die verschiedenen Komponenten des Klimasystems reagieren unterschiedlich schnell oder träge auf Veränderungen. Der tiefe Ozean zum Beispiel ist eine wichtige Ursache der Trägheit des Klimas. Der farblich markierte Skalenbereich oben stellt den kurzen Zeitausschnitt eines Menschenlebens dar.

Klimaänderungen nimmt der Mensch vor allem durch die Änderung atmosphärischer Größen wahr, etwa Änderungen der Temperatur oder des Niederschlags. Im Prinzip kann die Atmosphäre selbst wegen ihrer chaotischen Dynamik viele natürliche Klimaänderungen erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist die **Nordatlantische Oszillation (NAO),** die das Klima über Teilen Europas und Nordamerikas erheblich beeinflusst. Sie ist eine Art Druckschaukel zwischen dem **Islandtief** und dem **Azorenhoch,** welche die Stärke der winterlichen Westwinde über dem Nordatlantik bestimmt: Sind sie stark, gibt es in Westeuropa mildes und regenreiches Wetter. Sind sie schwach, ist es eher trocken und kalt. Derartige Schwankungen machen es schwer, Klimaveränderungen zu erkennen, die auf den Einfluss des Menschen und den Treibhauseffekt zurückgehen.

Die Atmosphäre ist kein isoliertes System, sondern steht mit anderen Komponenten des Erdsystems in Wechselwirkung, dem Ozean etwa. Sie ist aber auch mit der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Biosphäre (Tiere und Pflanzen), der Pedosphäre (Böden) und der Lithosphäre (Gestein) in Kontakt. Alle Bestandteile zusammen bilden das Klimasystem, dessen Einzelkomponenten und -prozesse auf vielfältige Weise miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig beeinflussen.

Alle diese Komponenten reagieren unterschiedlich schnell auf Veränderungen. Die Atmosphäre passt sich in Stunden bis Tagen den Bedingungen an der Erdoberfläche wie etwa der Meerestemperatur oder der Eisbedeckung an. Das Wetter ist zudem wechselhaft und daher nur einige Tage im Voraus zu prognostizieren. In der Tat kann man zeigen, dass die theoretische Grenze der Wettervorhersagbarkeit bei etwa 14 Tagen liegt. Die Strömungen der Tief-



1.2 > Das Klimasystem, seine Teilsysteme und relevante Prozesse und Wechselwirkungen.

see hingegen reagieren erst in vielen Jahrhunderten voll auf veränderte Randbedingungen, wie etwa Variationen der Nordatlantischen Oszillation und die daraus resultierenden Änderungen von Temperaturen und Niederschlägen an der Meeresoberfläche, die die Bewegungen in der Tiefe antreiben. Ein großes Inlandeisgebiet wie die Antarktis wird durch den Klimawandel vermutlich sogar über viele Jahrtausende sein Gesicht verändern und ohne Gegenmaßnahmen in diesem Zeitraum nach und nach abschmelzen.

Die Vorhersagbarkeit des Klimas basiert auf den Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und den trägeren Klimasubsystemen, allen voran dem Ozean. Dabei bewegen sich die verschiedenen Komponenten des Klimasystems mit völlig unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Tiefdruckgebiete wandern innerhalb von Tagen Hunderte von Kilometern weit. Meeresströmungen hingegen schleichen oftmals mit wenigen Metern pro Minute dahin. Zudem haben die einzelnen Komponenten verschiedene Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten. Wasser etwa speichert für lange Zeit große Mengen an Sonnenwärme.

Änderungen des Klimas können auf zwei verschiedene Weisen ausgelöst werden – durch interne und externe Anregungen. Unter internen Anregungen versteht man:

- Veränderungen in einer einzelnen Klimakomponente – zum Beispiel eine abweichende Meeresströmung;
- veränderte Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Klimakomponenten – zum Beispiel dem Ozean und der Atmosphäre.

Im Vergleich dazu haben die externen Anregungen mit dem Klimasystem zunächst nichts zu tun. Dazu gehören unter anderem:

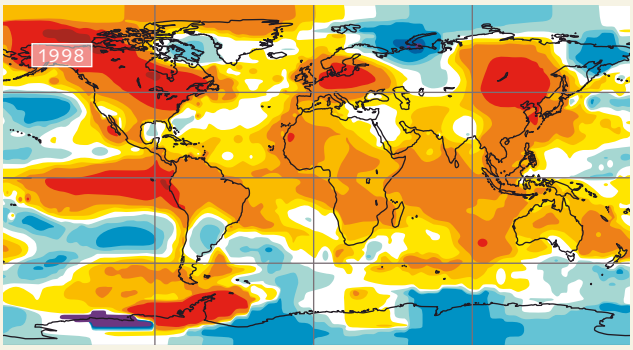
- die sehr langsame Kontinentalverschiebung, die die Landmassen in Jahrmillionen in andere Klimazonen bewegt;
- die Veränderung der Strahlungsintensität der Sonne – sie schwankt mit den Jahren, wodurch sich auch die Temperatur auf der Erde ändert;
- Vulkanausbrüche, die durch in die Atmosphäre ausgestoßene Asche- und insbesondere Schwefelmassen die Sonnenstrahlung in der Atmosphäre und das Klima verändern können.

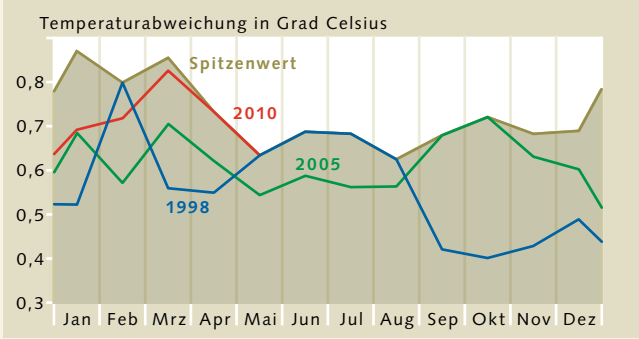
Von der Schwierigkeit, den Einfluss des Klimawandels zu erkennen

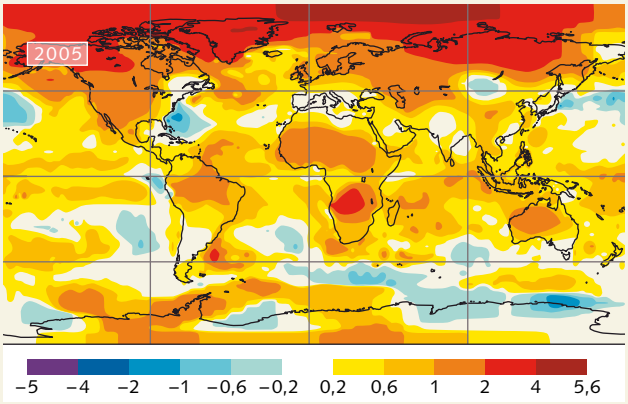
Klimaschwankungen sind nichts Ungewöhnliches. Für den Nordatlantik zum Beispiel ist bekannt, dass die durchschnittlichen Winde oder Temperaturen im Laufe von Jahrzehnten, von Dekaden, schwanken können. Auch die durch den Menschen verursachten Veränderungen des globalen Klimas sind erst im Laufe von Jahrzehnten spürbar. Natürliche dekadische Veränderungen und die durch den Menschen verursachten Veränderungen überlagern sich damit. Das macht es schwer, den Einfluss des Menschen auf das Klima sicher abzuschätzen. Anders als in der dynamischen Nordatlantikregion lassen sich die Auswirkungen des Klimawandels in ruhigeren Gebieten wie etwa dem tropischen Indischen Ozean daher besser messen.

Als sicher gilt, dass die Ozeane Treiber jährlicher oder dekadischer Klimaschwankungen sind. So korrelieren die dekadischen Schwankungen des Niederschlags in der Sahelzone oder der atlantischen Hurrikanaktivität recht gut mit den Schwankungen der nordatlantischen Meerestemperatur. Obwohl man den genauen Mechanismus hinter diesen dekadischen Änderungen noch nicht völlig verstanden hat, ist man sich darin einig, dass Variationen der Meeresströmungen im Atlantik eine wichtige Rolle spielen. Diese Hypothese wird auch dadurch gestützt, dass im Rhythmus von mehreren Jahrzehnten Temperaturanomalien an der Meeresoberfläche des Atlantiks auftreten, die man als interhemisphärischen Dipol bezeichnet. Strömt Wasser verstärkt nach Norden, erhöht sich im Nordatlantik die Lufttemperatur, während sie im Südatlantik fällt. Wird es im Norden kälter und im Südatlantik dagegen wärmer, deutet dies auf schwache Meeresströmungen hin. Die Lufttemperaturdifferenz zwischen Nord- und Südatlantik ist somit ein Maß für die Stärke der Meeresströmungen.

Grundsätzlich können heutige Klimamodelle das gegenwärtige Klima und die historischen Klimaschwankungen einigermaßen gut darstellen. Diese Modelle beschreiben das Klima vor allem auf globalem Maßstab mit befriedigender Zuverlässigkeit. Je kleiner aber



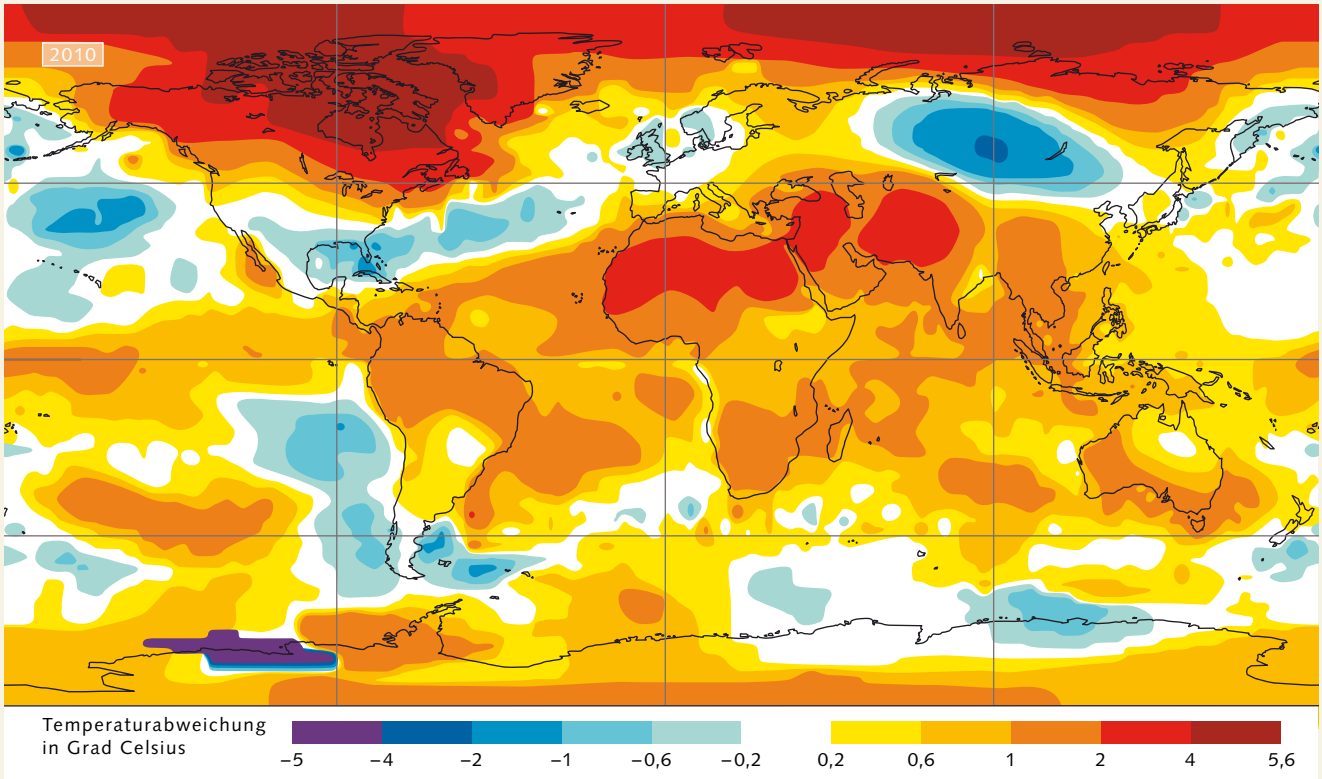


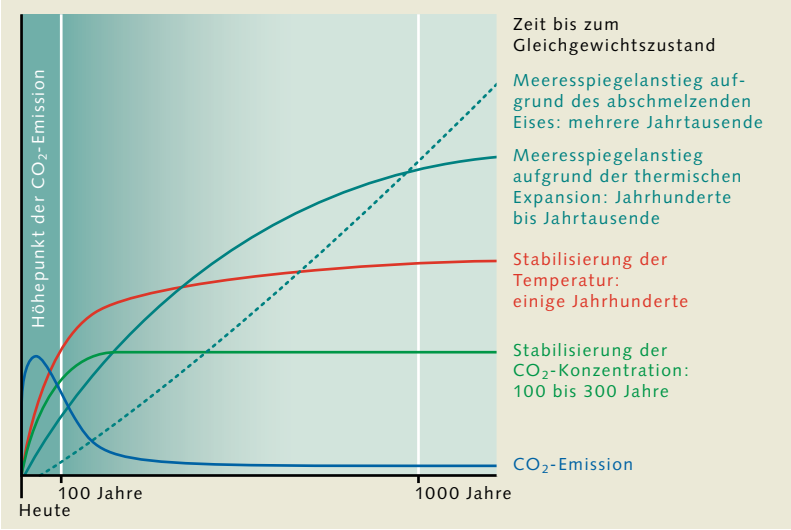


1.3 > Das Jahr 2010 hat Europa einen ungewöhnlich kalten Jahresbeginn beschert. Weltweit gesehen aber war der Winter 2010 der drittwärmste seit 131 Jahren. Betrachtet man die ersten fünf Monate wie auf den Karten dargestellt, ist das Jahr 2010 sogar das wärmste und erreicht In den Monaten April und Mai zudem die bisherigen Temperaturspitzenwerte (oben). Auch die Jahre 1998 und 2005 waren überaus warm und lagen ganzjährig über dem langjährigen Mittelwert (gemittelte Periode 1951 bis 1980).

die räumlichen Abmessungen sind, desto weniger zuverlässig sind die Modelle. So ist es deutlich einfacher, eine Aussage über die global gemittelte Temperatur zu machen als über den künfigen Niederschlag in Berlin. Für die regionale Einschätzung des Klimas sind ausführliche Messreihen nötig. Für viele Gebiete der Erde wie etwa den Südozean gab es aber lange kaum Messwerte. Heute liefern hier vor allem die Satelliten Daten.

Es gibt inzwischen zahlreiche mathematische Modelle, die die Auswirkungen des menschlichen Handelns auf das Klima ermitteln. Sie analysieren zum einen, wie das Klimasystem auf natürliche und anthropogene, also vom Menschen verursachte externe Anregungen reagiert, aber auch in welcher Weise es mit den **biogeochemischen** Kreisläufen wie etwa dem **Kohlenstoffkreislauf** (Kapitel 2) wechselwirkt. Daher entwickelt sich die Klimaforschung immer mehr zu einer umfassenden Erdsystemforschung, die die heutigen Klimamodelle entsprechend zu Erdsystemmodellen weiterentwickelt. Nur so kann man die vielen Wechselwirkungen studieren. Der Einfluss der globalen Erwärmung auf die **stratosphärische** Ozonschicht beispielsweise lässt sich erst dann ermitteln, wenn man auch die chemischen Abläufe in der Atmosphäre betrachtet. Ein anderes Beispiel ist die Aufnahme von CO_2 ins Meer, die zu einer Versauerung des Wassers führt (Kapitel 2). Noch kann niemand abschätzen, wie die Erwärmung und Versauerung der Ozeane in Zukunft die Aufnahme von anthropogenem CO_2 beeinflusst, wovon wiederum der CO_2-Gehalt der Atmosphäre und die künftige Temperaturentwicklung abhängen. Zwischen Ozean und Atmosphäre gibt es also Wechselwirkungen in beide Richtungen. Einerseits bestimmt der Ozean in großem Maße den Grad der Klimaänderung und vor allem seine regionale Ausprägung mit. So kommt es zwar im weltweiten Durchschnitt zu einer Erwärmung. Diese wirkt sich aber in verschiedenen Regionen, etwa im Gebiet des Golfstroms, durchaus unterschiedlich aus. Andererseits reagiert der Ozean selbst auf den Klimawandel.





1.4 > Selbst wenn es gelingt, den Ausstoß der Klimagase und insbesondere von CO_2 bis zum Ende dieses Jahrhunderts deutlich zu reduzieren, dürften die Folgen erheblich sein. CO_2 ist langlebig und wird für viele Jahrhunderte in der Atmosphäre bleiben. Damit wird die Temperatur auf der Erde noch für ein Jahrhundert oder länger um wenige Zehntelgrad steigen. Da die Wärme nur langsam bis in die Tiefen des Meeres vordringt, wird sich auch das Wasser nur allmählich ausdehnen und der Meeresspiegel über lange Zeit langsam weiter steigen. Auch das Abschmelzen der großen Inlandeismassen in der Antarktis oder in Grönland ist träge. Über Jahrhunderte oder gar Jahrtausende wird dort Schmelzwasser ins Meer fließen und zum Meeresspiegelanstieg beitragen. Die Abbildung ist eine prinzipielle Veranschaulichung für eine Stabilisierung auf beliebigen Niveaus zwischen 450 und 1000 parts per million (ppm) und trägt daher keine Einheiten auf der Auswirkungsachse.

Wie der Mensch das Klima verändert

In den vergangenen hundert Jahren hat der Einfluss des Menschen auf das Klima stark zugenommen. Der Mensch setzt Unmengen von klimarelevanten Spurengasen in die Atmosphäre frei. Er verändert dadurch die Strahlungsbilanz der Atmosphäre und führt so eine globale Erwärmung herbei. Zu diesen klimarelevanten Spurengasen gehört nicht nur das Kohlendioxid, sondern auch Methan, Distickstoffoxid (Lachgas), die halogenierten Fluorkohlenwasserstoffe, die perfluorierten Kohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid. Von besonderem Interesse aber ist das Kohlendioxid (CO_2), weil der weltweite Ausstoß enorm ist. Es wird vor allem bei der Verbrennung der fossilen Rohstoffe (Erdöl, Erdgas und Kohle) freigesetzt – in Automotoren, in Kraftwerken oder in den Heizungskesseln von Wohngebäuden. Inzwischen hat sich sein Gehalt in der Atmosphäre gegenüber dem vorindustriellen Wert von 280 parts per million (ppm) auf heute fast 390 ppm erhöht. Damit hat auch die Temperatur im Laufe von wenigen Jahrzehnten zugenommen. Auf der Zeitskala von Jahrzehnten oder einigen Jahrhunderten finden auch die – intern angeregten – Veränderungen in den Ozeanen statt, zum Beispiel Änderungen des **Golfstroms**. Diese haben einen entscheidenden Einfluss auf das Klima und auf die Konzentration der Klimagase in der Atmosphäre, da sie ganz erheblich an den globalen Stoffkreisläufen wie dem Kohlenstoffkreislauf beteiligt sind. Kohlendioxid etwa löst sich gut im Wasser. So haben die Ozeane bis heute etwa die Hälfte des vom Menschen seit dem Beginn der Industrialisierung ausgestoßenen und durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe entstandenen Kohlendioxids aufgenommen. Ob und wie stark sich das Klima ändern wird, ist daher auch aus den Meeren ablesbar.

Das Klima wird sich künftig nur sehr langsam verändern, weil die Ozeane mit ihrem riesigen Wasserkörper sehr träge auf Veränderungen reagieren. Daher werden viele Auswirkungen des durch den Menschen ausgelösten Klimawandels nur allmählich sichtbar. Tatsächlich könnten einige dieser Auswirkungen irreversibel sein, wenn erst bestimmte Schwellenwerte überschritten sind. So werden sich das völlige Abschmelzen der grönländischen Gletscher und ein damit verbundener globaler Meeresspiegelanstieg von 7 Metern ab einem bestimmten Punkt nicht mehr aufhalten lassen. Die Lage der Schwellenwerte ist nicht genau bekannt. Eines aber ist klar: Selbst wenn man den Ausstoß von CO_2 auf dem heutigen Niveau stabilisierte, würde das nicht zu einer Stabilisierung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre führen, weil CO_2 ausgesprochen langlebig ist und die sogenannten **Senken,** vor allem das Meer, es nicht so schnell aufnehmen, wie wir Menschen es nachliefern. Anders verhält es sich bei kurzlebigeren Spurengasen wie etwa Methan (CH_4). Stabilisierte man die Methanemissionen auf dem heutigen Niveau, würde sich die Methankonzentration in der Atmosphäre tatsächlich ebenfalls stabilisieren, da das Methan in etwa so schnell aus der Atmosphäre verschwindet, wie es neu ausgestoßen wird. Will man die CO_2-Konzentration auf einem bestimmten Niveau halten, so muss man die Emissionen auf einen Bruchteil der derzeitigen Mengen reduzieren.

1.5 > Um auf die Gefahren der globalen Erwärmung aufmerksam zu machen, hielt die Regierung der Malediven im Herbst 2009 eine Sitzung auf dem Meeresboden ab.

Eine schleichende Katastrophe

Die Trägheit des Klimas wird dazu führen, dass sich selbst lange nach der Stabilisierung der CO_2-Konzentration das Klima weiter verändern wird. Klimamodelle zeigen, dass sich die oberflächennahe Lufttemperatur noch über mindestens ein Jahrhundert erhöht. Der Meeresspiegel wird sogar noch über mehrere Jahrhunderte weiter ansteigen, weil sich erstens das Meerwasser durch die langsame Erwärmung der Tiefsee nur allmählich ausdehnt und weil zweitens die kontinentalen Eisschilde in der Arktis und Antarktis vermutlich nur sehr langsam auf die Erwärmung der Atmosphäre reagieren, wodurch sich das Abschmelzen der Gletscher über einen langen Zeitraum von vielen Jahrtausenden hinziehen wird. Es wird daher sehr lange dauern, bis ein neuer Gleichgewichtszustand des Meeresspiegels erreicht wird.

Wissenschaftler halten es allerdings ebenso für möglich, dass der grönländische Eisschild bei einer zu starken Erwärmung noch in diesem Jahrtausend komplett abschmilzt und im Meer verschwindet. Der Eispanzer könnte förmlich auseinanderbrechen. Riesige Teile würden ins Meer gelangen. Durch die enormen Mengen an Süßwasser könnte sich die Ozeanzirkulation, beispielsweise beim Golfstrom, grundlegend ändern. Zudem würde der Meeresspiegel im Extremfall um deutlich mehr als einen Meter pro Jahrhundert steigen.

Die Trägheit des Klimasystems und die Gefahr, dass die Entwicklungen irreversibel sind, sollten Anlass für vorausschauendes Handeln sein. Die heute bereits messbaren Auswirkungen des Klimawandels zeigen in keiner Weise das ganze Ausmaß der bisher durch den Menschen verursachten Klimaänderung. Die Menschheit wird sie erst in einigen Jahrzehnten deutlicher zu spüren bekommen.

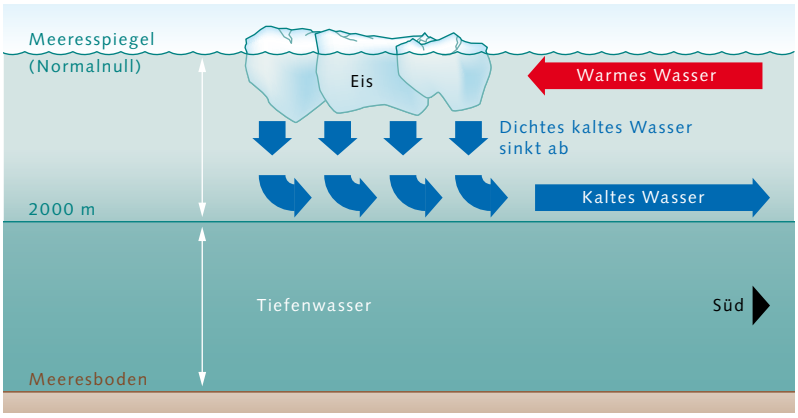
Kohlendioxid und Treibhauseffekt
Kohlendioxid (CO_2), oder chemisch korrekt: Kohlenstoffdioxid, und andere klimarelevante Spurengase reichern sich in der Atmosphäre an. Sie lassen die kurzwellige Strahlung der Sonne zunächst passieren. Diese wird an der Erdoberfläche in Wärme umgewandelt und als langwellige Strahlung zurückgeworfen. Wie die Glasscheibe eines Treibhauses verhindern die Gase, dass diese langwellige Wärmestrahlung in den Weltraum entweicht. Die Erde heizt sich auf.

Antrieb des Klimas – die großen Meeresströmungen

> Die Meeresströmungen transportieren gigantische Mengen Wärme um den Globus. Damit sind sie eine der wichtigsten Schubkräfte des Klimas. Da sie ausgesprochen träge auf Veränderungen reagieren, werden die Auswirkungen des globalen Wandels langsam, aber über Jahrhunderte zu spüren sein. Schneller könnten Klimaveränderungen beim Wind und beim Meereis sichtbar werden.

Was die Wassermassen antreibt

Im Klimasystem spielt das Wasser eine zentrale Rolle. Je nach Salzgehalt und Temperatur hat es eine unterschiedlich hohe Dichte. Kaltes salziges Wasser ist schwer und sinkt in die Tiefe ab. Im Meer werden dadurch Millionen von Kubikmetern Wasser umgewälzt. Fachleute nennen dieses Phänomen, das in einigen wenigen polaren Meeresregionen auftritt, Konvektion. Durch die Konvektion sinkt das kalte Oberflächenwasser im Nordatlantik bis in etwa 2000 Metern Tiefe ab. Dort lagert es sich wie auf einem Plateau auf dem noch dichteren Tiefenwasser ab, das aus den antarktischen Regionen stammt. Dieses Tiefenwasser reicht bis hinab zum Meeresgrund. Während das kalte salzige Oberflächenwasser durch die Konvektion absinkt, strömt salziges Wasser aus benachbarten wärmeren Meeresgebieten aus Richtung Äquator nach. Dieses Wasser kühlt sich in der arktischen Luft ab und beginnt ebenfalls abzusinken, sodass die Konvektion nie zum Halt kommt.



1.6 > Die Funktionsweise der Konvektion im Nordatlantik: In den polaren Regionen, wie etwa in der Labradorsee südlich von Grönland, sinkt kaltes salziges Meerwasser ab. Diese Wassermassen schichten sich in etwa 2000 Metern Tiefe über dem noch dichteren Tiefenwasser antarktischen Ursprungs ein und wandern dort weiter Richtung Äquator. Wärmeres Wasser strömt aus den oberen Meeresschichten in das Konvektionsgebiet nach.

Zuvor nimmt es an der Meeresoberfläche Gase wie etwa Kohlendioxid auf und transportiert diese dann rasch in die Tiefe. Daher sind die Konvektionsgebiete auch die Meeresgebiete, in denen man den höchsten Anteil an Kohlendioxid findet. Die durch die Konvektion ins Meer gepumpten hohen Kohlendioxid-Konzentrationen lassen sich heute bis in Tiefen von etwa 3000 Metern nachweisen. Bis in 2000 Metern Tiefe wird das Kohlendioxid durch die Konvektion recht schnell transportiert. Der Weg weiter hinab dauert im Nordatlantik deutlich länger, da das Kohlendioxid und andere Gase nur über langsame Durchmischungsprozesse ins Tiefenwasser vordringen können.

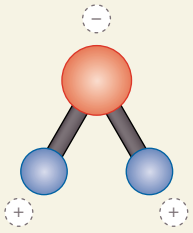
Die Kälte und der hohe Salzgehalt sind die wesentlichen Kräfte der Konvektion. Sie reißen das dichte Wasser in den polaren Regionen hinab und treiben damit eine weltumspannende Konvektionsmaschine an – die thermohaline Zirkulation (*thermo* – angetrieben durch Temperaturunterschiede; *halin* – angetrieben durch Salzgehaltsunterschiede). Das kalte salzige Wasser sinkt vor allem in der Labrador- und Grönlandsee in die Tiefe, um dann Richtung Äquator und darüber hinaus zu strömen. Die Konvektion tritt demnach nur lokal begrenzt in den polaren Regionen auf und treibt die thermohaline Zirkulation an, die wie ein gigantisches Förderband den Globus umspannt. Auch der Golfstrom und seine Ausläufer werden letzten Endes durch die Konvektion und die thermohaline Zirkulation angetrieben. Zwar tragen auch die Winde mit zum Transport der Wassermassen bei, ihr Anteil daran ist aber deutlich geringer.

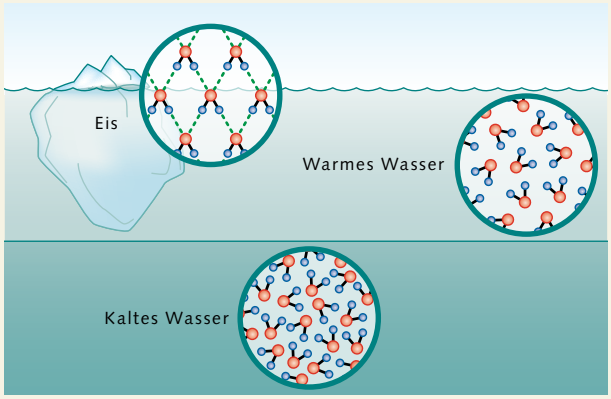
Wasser – ein ganz besonderes Molekül

Wasser verhält sich anders als die meisten anderen chemischen Stoffe. In fast allen Substanzen fügen sich Atome und Moleküle umso dichter zusammen, je kälter es wird. Sie erstarren. Wasser hingegen hat seine größte Dichte bei 4 Grad Celsius, weil sich die Wassermoleküle bei dieser Temperatur am dichtesten zusammenlagern. Viele Süßwasserseen weisen an ihrer tiefsten Stelle eine Temperatur von 4 Grad auf, weil das schwere Wasser zu Boden sinkt. In der festen Phase, im Eiskristall, liegen die Wassermoleküle erstaunlicherweise wieder weiter auseinander. Man spricht daher auch von der Anomalie des Wassers. Eis ist also leichter und schwimmt oben. So sind auch die großen Meeresgebiete in polaren Breiten mit Eis bedeckt. Die Ursache für diese Anomalie sind die besonderen Eigenschaften des Wassermoleküls (H_2O). Sein Sauerstoffatom (O) und die beiden Wasserstoffatome (H) sind asymmetrisch angeordnet. Das Wassermolekül wird damit zum Dipol, zu einem Molekül mit einem negativ und einem positiv geladenen Ende.

Je nach Temperatur ordnen sich diese Dipole nach ihren Ladungen zu Aggregaten zusammen – beispielsweise zu einem Eiskristall. Der Dipolcharakter des Wassers ist für das Klima ganz entscheidend: Da die Wasserdipole wie kleine Magnete zusammenhalten, reagiert Wasser relativ träge auf Erwärmung oder Abkühlung. Tatsächlich besitzt Wasser die höchste Wärmekapazität unter den flüssigen und festen Stoffen – mit Ausnahme von Ammoniak. Das bedeutet, dass Wasser große Mengen Wärme aufnehmen kann, bevor es verdampft. Auch der Gefrier- und der Siedepunkt des Wassers (0 beziehungsweise 100 Grad Celsius), die so alltäglich erscheinen, sind eher ungewöhnlich. Wäre das Wassermolekül symmetrisch und damit kein Dipol, würde Wasser schon bei minus 110 Grad Celsius schmelzen und bei minus 80 Grad sieden. Die Trägheit des Klimas ist vor allem Folge dieser hohen Wärmekapazität.

Das Wasser beeinflusst das Klima aber nicht nur im flüssigen oder festen Zustand. In Form von Wasserdampf hat H_2O einen entscheidenden Einfluss auf den Wärmehaushalt der Erde: Wasserdampf allein trägt zu etwa zwei Dritteln zum natürlichen Treibhauseffekt bei. Zudem verstärkt es die Klimawirkung anderer Stoffe. Steigt beispielsweise die Temperatur infolge eines höheren Kohlendioxidgehalts, so steigt auch der Gehalt an Wasserdampf, da eine wärmere Atmosphäre dauerhaft mehr Wasserdampf speichern kann. Da Wasser wegen seines Dipols Infrarotstrahlung sehr wirksam absorbiert, verdoppelt es in etwa die ursprüngliche durch das Kohlendioxid hervorgerufene Erwärmung. Eine weitere Eigenschaft des Wassers ist, dass es Salze lösen kann. Der Salzgehalt des Meeres beträgt durchschnittlich 34,7 Promille. Dieser verändert wiederum die Eigenschaften des Wassers. So verschiebt sich das Dichtemaximum von plus 4 Grad beim Süßwasser auf minus 3,8 Grad. Dieser Wert liegt sogar unter dem Gefrierpunkt von Meerwasser von minus 1,9 Grad. Anders als im Süßwasser nimmt die Dichte des Salzwassers also zu, wenn es unter plus 4 Grad Celsius abkühlt. So bildet sich dichtes Wasser, bis schließlich die Eisbildung einsetzt. Diese Dichteeigenart ist der Motor für eines der wichtigsten Elemente des Klimasystems – die Konvektion: Abgekühltes dichtes und damit schweres Salzwasser sinkt in die Tiefe ab. An der Meeresoberfläche strömt relativ warmes Wasser nach.





1.7 > Das Wassermolekül ist asymmetrisch und weist daher auf seinen beiden Seiten unterschiedliche Ladungen auf (links). Man spricht von einem Dipol. Dadurch verhält es sich anders als andere Substanzen. Eis ist weniger dicht (oben) und schwimmt an der Oberfläche. 4 Grad kaltes Süßwasser ist am dichtesten (unten) und sinkt in die Tiefe. Warmes Wasser schichtet sich darüber ein (Mitte).

Doch wie entstehen in den Ozeanen eigentlich Wassermassen unterschiedlicher Dichte, die letztlich auch die Konvektion antreiben? Zu den wichtigsten Faktoren zählen die Lufttemperatur, die Verdunstung und der Niederschlag. In den polaren Konvektionsgebieten spielt darüber hinaus auch noch das Gefrieren des Wassers eine zentrale Rolle. Da Eis nur ungefähr 5 Promille Salz enthält, setzt es während des Gefrierens eine beträchtliche Menge Salz frei, wodurch der Salzgehalt in den umgebenden Meeresgebieten zunimmt und sich somit zugleich die Dichte des Wassers erhöht. Das kalte salzreiche Wasser ist so dicht, dass es bei der arktischen Konvektion bis in etwa 2000 Metern Tiefe absinkt. Dieses Wasser bezeichnet man als Nordatlantisches Tiefenwasser (North Atlantic Deep Water, NADW).

Das weltweite Förderband

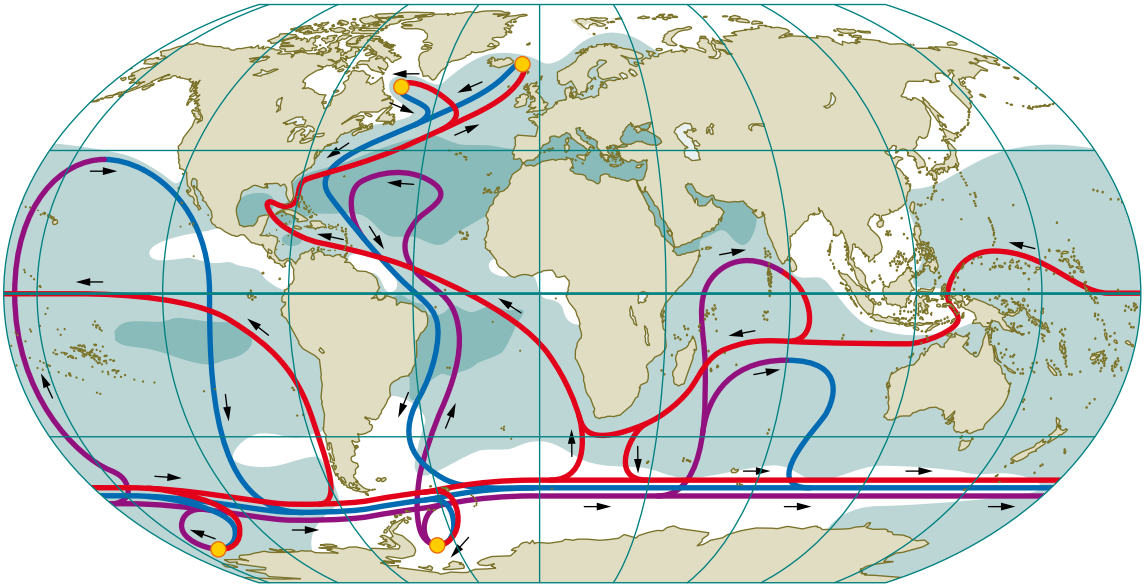
Auch in den antarktischen Gebieten findet Konvektion statt. Hier entstehen jene Wassermassen, die aufgrund ihres noch höheren Salzgehalts bis ganz zum Meeresboden hinabsinken. Man bezeichnet sie als Antarktisches Bodenwasser (Antarctic Bottom Water, AABW), das am Meeresboden um den halben Globus bis hinauf in den Nordatlantik wandert. Das Antarctic Bottom Water ist also zugleich jenes Tiefenwasser, über dem sich das North Atlantic Deep Water während der Konvektion als mächtige Zwischenschicht einlagert. Das North Atlantic Deep Water entsteht in der Grönlandsee und der Labradorsee. Die nebenstehende Abbildung zeigt schematisch den globalen Verlauf seiner Ausbreitung und den Rückstrom warmen Wassers in die oberflächennahen Schichten – das eindrucksvolle globale Förderband der thermohalinen Zirkulation. Das North Atlantic Deep Water und vor allem auch das Antarctic Bottom Water bleiben erstaunlich lange in der Tiefe: Wie man heute aus Datierungen von Tiefenwasser anhand radioaktiver Kohlenstoffisotope weiß, beträgt die Zykluszeit vom Abtauchen in die Tiefe bis zum Wiederauftauchen einige Hundert oder sogar bis zu etwa tausend Jahre.

Die meiste Zeit befindet sich das Wasser im kalten Bereich des thermohalinen Förderbands in der Tiefe, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit dort aufgrund der höheren Dichte mit etwa 1 bis 3 Kilometern pro Tag gering ist. Die Menge des am Kreislauf beteiligten Wassers ist geradezu gigantisch. Sie beträgt 400 000 Kubikkilometer, was etwa einem Drittel des gesamten Ozeanwassers entspricht. Damit ließe sich ein Becken von 400 Kilometern Länge, 100 Kilometern Breite und 10 Kilometern Tiefe füllen. Pro Sekunde transportiert das ozeanische Förderband etwa 20 Millionen Kubikmeter Wasser, was fast 5000-mal mehr ist, als an den Niagarafällen in Nordamerika in die Tiefe rauscht.

Der Weg des Wassers in die Tiefe

Nirgends sonst in den Ozeanen gleitet Oberflächenwasser so schnell in die Tiefe wie in den Konvektionsgebieten, und an keiner anderen Stelle machen sich Veränderungen an der Meeresoberfläche oder in der Atmosphäre so schnell im Innern des Meeres bemerkbar wie hier – etwa der wegen der steigenden Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre wachsende Kohlendioxidgehalt im Wasser. Die Konvektion verbindet also zwei Bereiche des Ozeans miteinander, die sich voneinander unterscheiden: die oberflächennahen Schichten, die mit den variierenden atmosphärischen Wind-, Strahlungs- und Niederschlagsfeldern in Kontakt stehen, und die tiefen Bereiche des Ozeans. Oben schwanken Strömungen, Temperaturen oder Salzgehalte innerhalb von Wochen oder Monaten. In der Tiefe hingegen ändern sich die Umgebungsbedingungen eher im Laufe von Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten.

In den gleichmäßig warmen Meeresgebieten der Tropen (die warmen Regionen der Erde zwischen 23,5 Grad nördlicher bis 23,5 Grad südlicher Breite) und Subtropen (die Regionen zwischen dem 23,5. und dem 40. Breitengrad auf der Nord- und auf der Südhalbkugel) gibt es keinen mit der Konvektion vergleichbaren Austausch zwischen Oberfläche und Tiefe. Der Grund: Im Jahresmittel findet eine ständige Erwärmung der Oberflächenschichten statt. Dieses mindestens 10 Grad Celsius warme Wasser hat eine relativ geringe Dichte und schwimmt deshalb als warme Deckschicht auf den tieferen kälteren Wassermassen. Beide Schichten sind klar voneinander getrennt. Sie gehen nicht allmählich ineinander über. Stattdessen gibt es dort, wo sie sich berühren, einen starken Temperatur- und damit Dichtesprung, der das Vordringen der Wärme in die Tiefe behindert. Die warme Deckschicht ist mit durchschnittlich einigen Hundert Metern Mächtigkeit, gemessen an der Tiefe der Ozeane, relativ dünn. In sehr warmen Meeresgebieten wie dem westlichen äquatorialen Pazifik schließlich gibt es kaum Durchmischungen. Zu den Polen hin aber sind die Meere stärker durchmischt und weniger stark geschichtet. Da ein klarer Temperatur- und Dichtesprung fehlt, können Veränderungen an der Meeresoberfläche dort bis ins Innere des Ozeans ausstrahlen. Die Konvektionsgebiete aber bleiben der Expresslift in die Tiefe.



1.8 > Die weltweiten ozeanischen Strömungen der thermohalinen Zirkulation sind ausgesprochen komplex. Nur im Atlantik erkennt man deutlich, wie kaltes salzreiches Oberflächenwasser (blau) in der Tiefe gen Äquator strömt. Warmes Oberflächenwasser (rot) strömt in der Gegenrichtung polwärts. Nicht überall sind die Strömungsverhältnisse so deutlich wie im Golfstromsystem (zwischen Nordamerika und Europa). So fließt etwa um die Antarktis der sogenannte Zirkumpolarstrom in der gesamten Wassersäule. Die kleinen gelben Kreise in den Polarregionen zeigen Konvektionsgebiete. Die dunklen Gebiete sind durch hohen Salzgehalt gekennzeichnet, die weißen durch niedrigen. Salzige Wassermassen findet man, abgesehen von den Konvektionsgebieten, vor allem in den warmen Subtropen, da hier die Verdunstung besonders stark ist.

Die Angst vor dem Versiegen des Golfstroms

Lange haben Experten diskutiert, inwieweit die thermohaline Zirkulation und mit ihr die Umwälzbewegung im Atlantik durch den Klimawandel beeinflusst werden könnten. Immerhin könnte sich die Konvektion in den höheren Breiten durch die anthropogene, also vom Menschen verursachte Erwärmung der Atmosphäre und eine damit verbundene Verringerung der Dichte des Oberflächenwassers abschwächen. Diese Dichteabnahme ist vor allem auf das Aussüßen des Wassers im Nordatlantik zurückzuführen, wobei der Klimawandel vermutlich auf mehreren Wegen die Süßwasserzufuhr verstärken und damit auf die Konvektion und die thermohaline Zirkulation einwirken würde. Zum einen dürften die Niederschläge über dem Meer und über dem Festland zunehmen. Zum anderen wird Süßwasser vermehrt durch das Abschmelzen der Gletscher ins Meer gelangen. Außerdem bildet sich weniger Eis, wenn es wärmer wird, sodass sich die Salzkonzentration im Oberflächenwasser nur in geringem Maße erhöht.

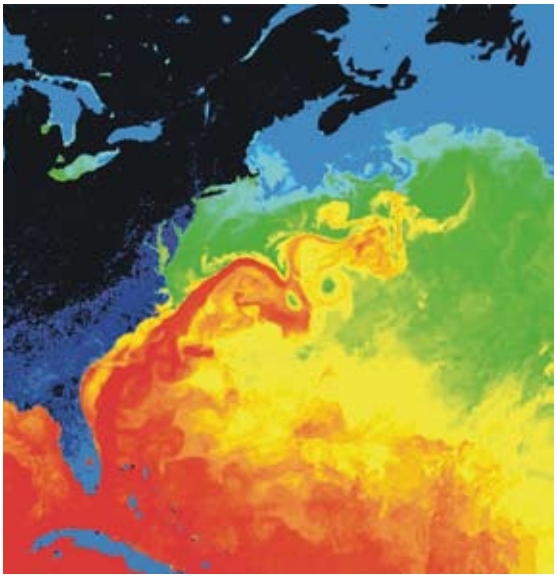
Die heutigen Klimamodelle gehen von einer Abschwächung der Umwälzbewegung im Atlantik bis zum Ende dieses Jahrhunderts um etwa 25 Prozent aus. Damit würde zugleich auch weniger Wärme aus den Tropen und Subtropen nach Norden transportiert. Eiszeitszenarien, wie sie schon oft in der Literatur oder in Kinofilmen gezeichnet wurden, sind trotzdem völlig unangebracht, selbst dann, wenn die Zirkulation völlig zusammenbrechen sollte. Denn die daraus resultierende verringerte Wärmezufuhr wird bei Weitem durch die künftige globale Erwärmung aufgrund des verstärkten Treibhauseffekts wettgemacht. Die Erde heizt sich durch die isolierende Wirkung des Kohlendioxids in der Atmosphäre auf. Diese Temperaturzunahme würde den verringerten Wärmetransport aus den Tropen nach Norden im Bereich des Nordatlantiks ausgleichen und auf den angrenzenden Landgebieten sogar deutlich übertreffen. Die Wissen-

schaftler sprechen daher im Zusammenhang mit dem menschlichen Einfluss auf das Klima von einer „Heißzeit“ und keineswegs von einer „Eiszeit“.

Wirbel im Meer – eine wichtige Klimakomponente

Wärme wird im Meer nicht nur durch das große globale Förderband der thermohalinen Zirkulation, sondern auch durch Wirbel transportiert, ähnlich wie die Tiefdruckgebiete in der Atmosphäre. Im Vergleich zu den oft mehrere Hundert Kilometer breiten Tiefdruckgebieten sind sie jedoch deutlich kleiner. Diese sogenannten mesoskaligen Wirbel entstehen, wenn Wasser zwischen Gebieten mit großen Dichte- oder Temperaturunterschieden strömt. Sie sind auf Satellitenaufnahmen deutlich zu erkennen. Messungen zeigen, dass sie nicht nur an der Meeresoberfläche wie beispielsweise im Bereich des Nordatlantiks auftreten, sondern sich auch in ausgesprochen großen Tiefen von einigen Tausend Metern wie etwa vor Brasilien bemerkbar machen. Diese Tiefseewirbel spielen aufgrund ihres starken Einflusses auf die großräumigen Wärmetransporte für das langfristige Klimageschehen ebenfalls eine wichtige Rolle.

Die Corioliskraft
Die Erddrehung führt dazu, dass alle freien und geradlinigen Bewegungen wie etwa Luft- oder Wasserströmungen auf der Erde seitlich abgelenkt werden. Die ablenkende Kraft nennt man Corioliskraft oder Coriolisbeschleunigung. Auf der Nord- und Südhalbkugel wirkt sie in entgegengesetzter Richtung. Benannt ist die Corioliskraft nach dem französischen Naturforscher Gaspard Gustave de Coriolis (1792 bis 1843), der sie mathematisch hergeleitet hat.



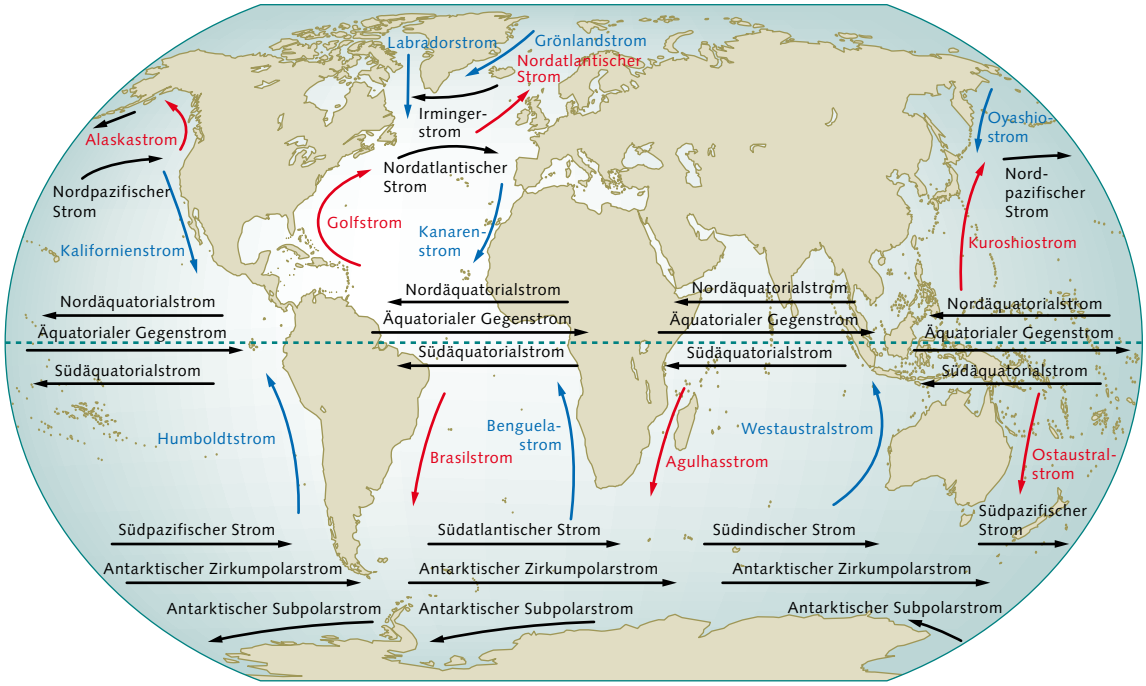
1.9 > Momentaufnahme des Golfstroms und seiner Verwirbelungen. Warme Bereiche sind rot eingefärbt, kalte Bereiche blau.

Wechselhaft und dynamisch – der Einfluss des Windes

Neben der Konvektion regen auch die Winde die Strömungen im Meer an. Zusammen mit der ablenkenden Kraft der Erdrotation (Corioliskraft) und der Gestalt der Meeresbecken verleiht der Wind dem weltweiten System der Oberflächenströmungen seine charakteristische Form. Besonders auffällig sind Wirbel, die sich über ganze Meeresbecken, etwa zwischen Amerika und Europa, erstrecken. Zu diesen Oberflächenströmungen gehören auch der Golfstrom im Atlantischen Ozean, der durch den Wind und die thermohaline Zirkulation zugleich angetrieben wird, sowie der Kuroshio im Pazifischen Ozean, dessen Intensität mit der Tiefe abnimmt.

Der Golfstrom ist ein relativ schneller Strom. An der Küste Nordamerikas erreicht er an der Meeresoberfläche Geschwindigkeiten von etwa 3,6 Kilometern pro Stunde, was einem gemächlichen Fußgängertempo entspricht. Er reicht bis in eine Tiefe von etwa 2000 Metern hinab, wo er etwa zehnmal langsamer fließt, weil der Einfluss des Windes hier geringer und die Dichte des Wassers größer ist. Nichtsdestotrotz kann der Wind durchaus direkt bis hinab in größere Tiefen wirken. So kommt es vor, dass sich für längere Zeit die typischen Windverhältnisse ändern – dass etwa die stetigen **Passatwinde** über Monate aus anderen Richtungen wehen. Dadurch kann sich der Auftrieb der Wassermassen verändern, wodurch im Innern des Ozeans Wellen mit Strömungen entstehen, die für Jahrzehnte in der Tiefe nachschwingen. Solche Wellen können auch die Meerestemperatur und damit das regionale Klima verändern. Vom Satelliten aus werden die Wellen als langsam wandernde Ausbeulungen der Meeresoberfläche wahrgenommen.

Darüber hinaus verursachen die vorherrschenden Winde in bestimmten Regionen beständige Auftriebs- und Absinkbewegungen. In manchen Gebieten treiben die Winde Oberflächenwasser von den Landmassen weg, sodass kaltes Wasser aus der Tiefe aufsteigen kann. Dort sind daher die Temperaturen an der Meeresoberfläche besonders niedrig. Wichtige Auftriebsgebiete finden sich an den westlichen Rändern der Kontinente, an denen die Winde küstenparallel wehen (Chile, Kalifornien, Namibia). So wird aufgrund der Corioliskraft beispielsweise auf

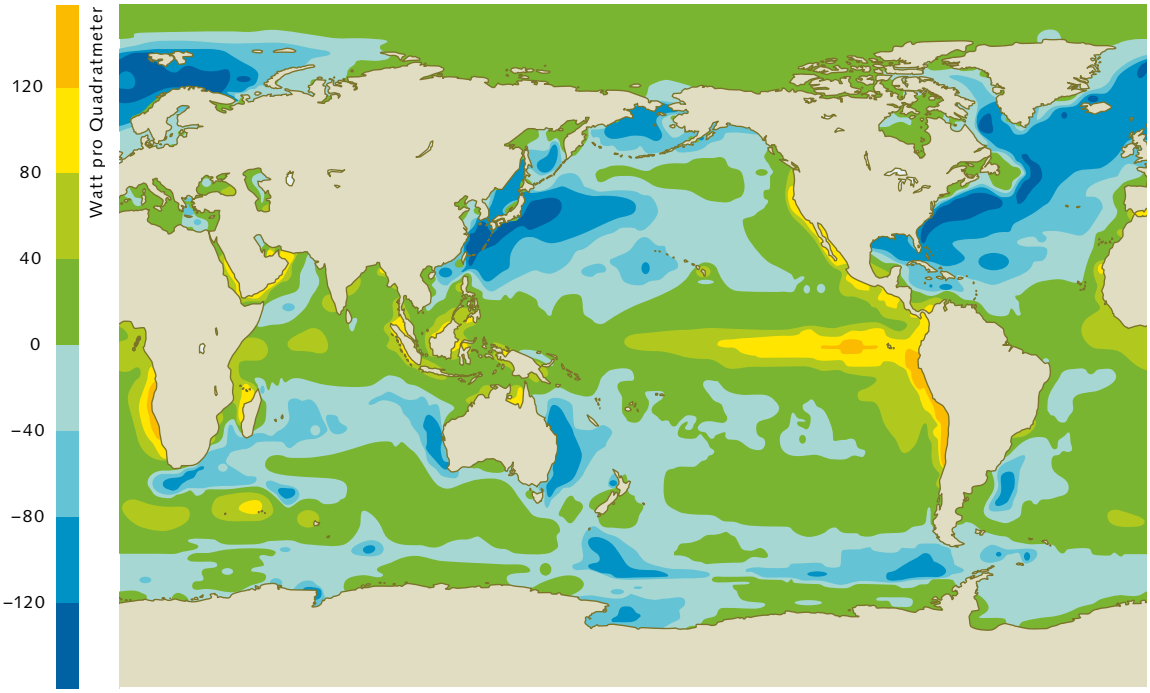


1.10 > Die großen Meeresströme der Welt sind auch das Ergebnis der vorherrschenden Winde. Warme Meeresströme sind rot, kühle Meeresströme blau gekennzeichnet.

der Südhalbkugel das Wasser nach links von der Küste weggeführt, wenn der Wind aus Süd weht. Dadurch kommt eine Art Walzenbewegung in Gang: An der Oberfläche wird das Wasser wegbewegt, aus der Tiefe steigt Wasser auf. Dieses aufsteigende Wasser ist häufig nährstoffreich, weshalb viele Auftriebsgebiete auch besonders fischreich sind.

Der Ozean – der globale Wärmespeicher

Die großen Meeresströme transportieren nicht allein riesige Wassermassen, sondern zugleich auch gigantische Wärmemengen um den Globus. So wie der Wassertank einer Heizungsanlage Wärme aus der Solaranlage auf dem Dach speichert, wirken auch die Ozeane wie ein gewaltiges Wärmereservoir, in dem die Sonnenenergie lange erhalten bleibt. Die großen Meeresströme transportieren diese Wärme über Tausende von Kilometern und beeinflussen damit erheblich, wie der Golfstrom zeigt, das Klima in vielen Regionen der Erde. In den warmen Tropen und in den Subtropen bis etwa zum 30. Breitengrad trifft im Jahresdurchschnitt mehr Wärme auf die Erdoberfläche, als diese abgibt. In den höheren Breiten und zu den Polen hin ist dieses Verhältnis umgekehrt. Die Folge ist, dass die Atmosphäre und die Ozeane zum Ausgleich Energie vom Äquator nach Norden und nach Süden transportieren. In manchen Tropenregionen wie etwa dem Ostpazifik gewinnt das Meer mehr als 100 Watt Wärme pro Quadratmeter – in etwa so viel wie ein Heizkessel liefert, um eine Wohnung behaglich zu machen. In den höheren Breiten gibt das Meer die Wärme wieder ab. Am größten ist der Verlust mit Werten von bis zu 200 Watt pro Quadratmeter vor den Ostküsten Nordamerikas und Asiens sowie in Teilen der Arktis. Im Bereich des Nordatlantiks und des Nordpazifiks geben die Ozeane die Wärme durchaus großräumig ab. Versorgt werden all jene Regionen, in die die großen Stromsysteme das warme Wasser tragen – etwa Europa. Die riesigen Meeresströme transportieren eine maximale Wärmemenge von knapp 3 Petawatt (Billiarde Watt) in Richtung Norden – rund 600-mal mehr, als alle Kraftwerke der Welt zusammen leisten. Aber auch die Atmosphäre trägt zum Energieausgleich zwischen den Tropen und den kälteren, höheren Breiten bei. Sie transportiert weitere 2,5 bis 3 Petawatt Wärme, sodass sich ein

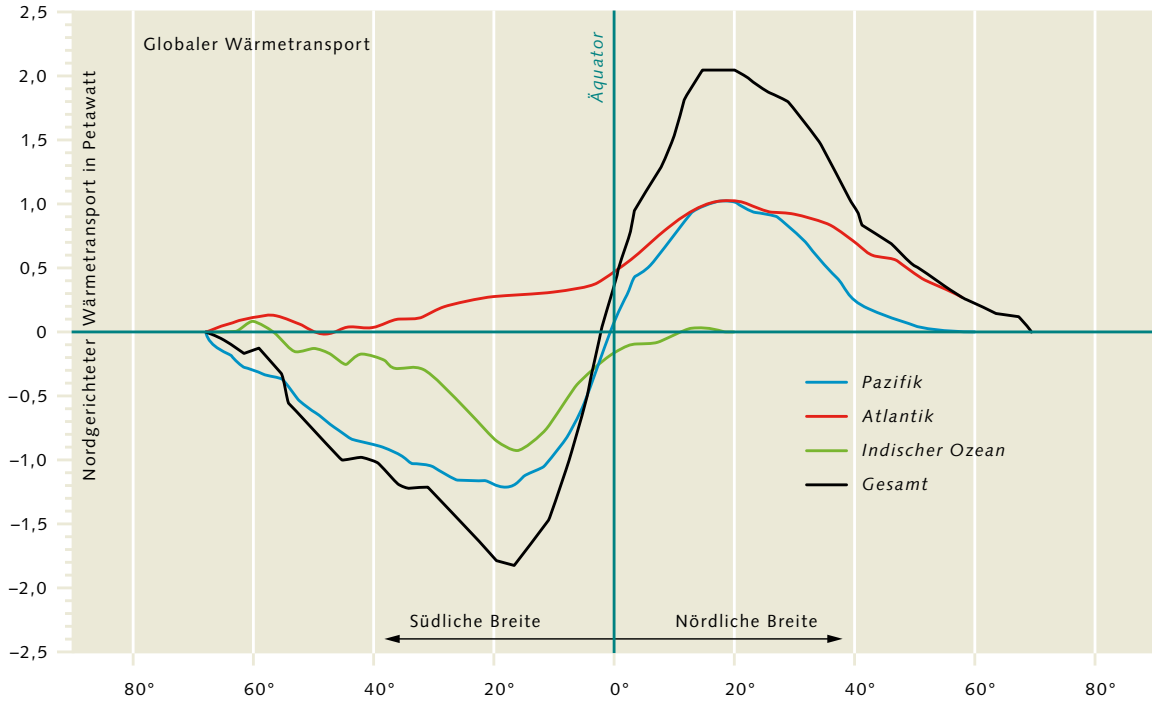


1.11 > Der Wärmeaustausch zwischen der Atmosphäre und der Meeresoberfläche (in Watt pro Quadratmeter) ist je nach Meeresgebiet recht unterschiedlich. Positive Werte geben eine Wärmeaufnahme – vor allem in den Tropen – und negative Werte einen Wärmeverlust – vor allem in den nördlichen Breiten – des Meeres an. In den arktischen Regionen ist der Wärmeverlust relativ gering, da das Meereis die Wärme wie eine Isolierschicht im Wasser zurückhält.

nordgerichteter Wärmetransport von insgesamt 5,5 bis 6 Petawatt ergibt. In der Atmosphäre erfolgt der Wärmetransport in europäischen Breiten vor allem durch kreisende Tiefdruckgebiete. Im Atlantischen Ozean sind die Strömungen hingegen sehr viel geordneter, sodass die Wärme direkt nach Norden transportiert wird. Dort strömt warmes Wasser aus den Tropen nordwärts bis weit in den Arktischen Ozean, wo sich das Wasser abkühlt und Wärme an die Umgebung abgibt. Durch die Abkühlung nimmt die Dichte des Meerwassers zu. Es sinkt in die Tiefe und wandert gen Süden. Das atlantische Stromsystem transportiert demnach riesige Mengen Wärme nach Norden. Bei diesem Transport übersteigt der thermohaline den durch die Winde angetriebenen Anteil bei Weitem.

Der Atlantik und auch der Pazifik tragen jeweils etwa 1 Petawatt Wärme aus den Tropen und Subtropen in nördliche Richtung. Der Anteil des Indischen Ozeans hingegen ist vernachlässigbar gering.

Dabei nimmt der Atlantik eine Ausnahmestellung unter den Meeren ein. Er ist das einzige Ozeanbecken, in dem der Wärmetransport überall, also auch auf der Südhalbkugel, nach Norden gerichtet ist. Die Tendenz nach Norden kennt jeder Nordwesteuropäer dank des Golfstroms und des Nordatlantikstroms: Das Klima im Bereich des Nordatlantiks, speziell in Nordwesteuropa und auch in Deutschland, ist besonders milde. So sind die Winter in anderen Regionen, die auf denselben Breitengraden liegen, deutlich kälter. In Kanada etwa liegen die Temperaturen im Winter um rund 10 Grad Celsius niedriger als in Westeuropa. Allerdings bewirkt nicht allein die Ozeanzirkulation diese Milde. Auch Luftströmungen tragen erheblich dazu bei. Durch die Verteilung der Gebirge, vor allem die Lage der Rocky Mountains, die sich von Nord nach Süd die nordamerikanische Westküste entlangziehen, und den Einfluss der Corioliskraft entstehen in der Atmosphäre sehr stabile großräumige Wirbel, sogenannte stehende



1.12 > Die Ozeane tragen unterschiedlich stark zum globalen Wärmetransport bei. Nur der Atlantik transportiert auf der Südhalbkugel Wärme nach Norden (positive Werte). Der Äquator liegt bei 0 Grad. Sowohl der Atlantik als auch der Pazifik tragen jeweils etwa 1 Petawatt Wärme bis 20 Grad nördlicher Breite. Weiter nördlich überwiegt der Anteil des Atlantiks. Der Indische Ozean wiederum beeinflusst den nördlichen Wärmetransport kaum.

planetare Wellen. Ein solcher Wirbel liegt auch über den USA, weil die Rocky Mountains als Hindernis große Luftmassen ablenken. Ein Teil dieses Wirbels beschert uns im Durchschnitt Westwinde, die relativ milde Luft vom Atlantik bis nach Nordwesteuropa tragen und uns vor der Kälte aus dem Osten schützen.

Zukunft ungewiss – das Meereis

Das Meereis der arktischen Regionen hat einen erheblichen Einfluss auf den Wärmaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean, denn es wirkt wie eine Dämmschicht, die die im Wasser enthaltene Wärme zurückhält. Vergegenwärtigt man sich, wie groß die Eisflächen sind, wird deutlich, dass auch sie Auswirkungen auf das globale Klima haben. Im Arktischen Ozean ist das Meereis, das gemeinhin auch als Packeis bezeichnet wird, im Mittel 3 Meter dick. Im Südlichen Ozean misst es im Schnitt etwa 1 Meter. Die Meereisfläche wächst und schrumpft mit den Jahreszeiten. Im Jahresdurchschnitt sind rund 7 Prozent der Ozeane (circa 23 Millionen Quadratkilometer) mit Eis bedeckt, was in etwa der dreifachen Fläche Australiens entspricht. Dagegen sind die Landeismassen relativ stabil. Sie bedecken permanent etwa 10 Prozent der Landoberfläche (14,8 Millionen Quadratkilometer). Wissenschaftler bezeichnen die vereisten Gebiete der Erde als Kryosphäre. Neben dem Landeis und dem Meereis zählt dazu auch das Schelfeis, die ins Meer ragenden Teile kontinentaler Eisschilde. Die Veränderungen des Meereises, wie etwa die Ausdehnung, der Bedeckungsgrad, die Dicke und die Bewegung, werden durch dynamische Prozesse (beispielsweise Meeresströmungen) und durch **thermodynamische Prozesse** (Gefrieren und Schmelzen) hervorgerufen. Diese wiederum werden durch die Sonnenstrahlung sowie die Wärmeflüsse in den Ozeanen beeinflusst.

1.13 > Eisberge bestehen in der Regel aus Süßwasser oder enthalten nur geringe Mengen an Salz. Aufgrund ihrer im Vergleich zum Meerwasser etwas geringeren Dichte ragt nur ein kleiner Teil aus dem Wasser. Der weitaus größere Teil befindet sich unter der Wasserlinie.

Eines der auffälligsten und wichtigsten Merkmale der Klimaschwankungen ist die Veränderung der Meereisausdehnung in den Polargebieten. So reicht das arktische Meereis in manchen Wintern deutlich weiter nach Süden als in anderen. Geophysiker betrachten das Meereis nüchtern als eine dünne, durchbrochene Schicht auf den polaren Ozeanen, die von Wind und Meeresströmungen bewegt wird und sich in ihrer Dicke und Ausdehnung verändert. Meereis bildet die Grenze zwischen den beiden großen und wichtigen Komponenten des Erdsystems, der Atmosphäre und dem Ozean. Es beeinflusst deren Wechselwirkung ganz erheblich. So besitzt Meereis ein hohes Reflexionsvermögen, eine hohe Albedo, und reflektiert einen beträchtlichen Teil des einfallenden Sonnenlichts. Dieser Effekt verstärkt sich noch, wenn Schnee auf dem Eis liegt. Das Meereis beeinflusst also die Strahlungsbilanz der Erde und spielt damit eine wichtige Rolle im Klimasystem.

Der Einfluss des Meereises auf das Klima wird noch dadurch verstärkt, dass es die Atmosphäre und den Ozean voneinander isoliert. So können Wärme und Windenergie zwischen Atmosphäre und Ozean nur sehr schlecht ausgetauscht werden. Über den Meereisflächen ist die Atmosphäre daher deutlich kälter als über dem offenen Ozean. Dadurch verstärkt sich auch der Temperaturunterschied zwischen den Tropen, Subtropen und den Polargebieten. Denn in warmen Regionen steigt Luft verstärkt auf, der Luftdruck sinkt entsprechend. In den sehr kalten Bereichen hingegen lastet die Luft schwer, sodass sich starke Hochdruckzonen bilden. Die ausgleichende Luftströmung zwischen Hoch und Tief ist entsprechend stark und bewirkt im Zusammenspiel mit der Corioliskraft in den mittleren Breiten stärkere Westwinde.

Natürlich beeinflusst das Meereis auch die Konvektion im Ozean und die Bildung von Tiefen- und Bodenwasser. Das Meereis spielt daher eine bedeutende Rolle für die großräumige Ozeanzirkulation, insbesondere für die thermohaline Zirkulation. Wie die globale Erwärmung auf die Meereisbildung und die damit gekoppelten Prozesse genau wirkt, weiß man heute noch nicht. Eis schmilzt, wenn es wärmer wird. Welche Auswirkungen das aber auf die Strömungen hat, lässt sich nur schwer einschätzen. Immerhin simulieren alle Klimamodelle eine beschleunigte Erwärmung in der Arktis bei weiter steigenden Spurengaskonzentrationen.

Zudem beobachtet man in den letzten Jahrzehnten einen deutlichen Rückgang der arktischen Meereisbedeckung. Dabei spielt die sogenannte Eis-Albedo-Rückkopplung eine Rolle, eine positive Rückkopplung. Helle Oberflächen besitzen eine recht große Albedo. Wenn sich das Meereis infolge der globalen Erwärmung also zurückzieht, verringert sich die Albedo und es steht mehr Sonnenenergie zur Verfügung, die zu einer zusätzlichen Erwärmung führt, wodurch noch mehr Eis schmilzt. Dieser Prozess wirkt sich vor allem am Rand des Meereises

aus. Ähnlich wie die dunkle Grasnarbe an den Rändern einer löchrigen Schneedecke erwärmt sich das Meerwasser am Eisrand stärker, sodass das Eis dort schneller abtaut. Je weiter sich das Eis zurückzieht, desto größer wird wiederum die freie, relativ dunkle Meeresfläche. Das Abschmelzen verstärkt sich.

Das Schrumpfen des Meereises könnte den Klimawandel künftig also noch verstärken. Ironischerweise beschert er dem Menschen aber etwas, wovon er schon lange träumt – die Öffnung des nördlichen Seewegs von Europa über die Arktis nach Asien: die Nordostpassage. In den vergangenen Jahren hat sich das Eis im Sommer so weit zurückgezogen, dass die arktischen Gewässer entlang der russischen Nordküste künftig durchgängig von Handelsschiffen durchfahren werden könnten – eine Strecke, die um mehrere Tausend Kilometer kürzer als die Fahrt durch den Suezkanal ist. So hat erst im Frühherbst 2009 eine Bremer Reederei als eines der ersten Privatunternehmen weltweit die Nordostpassage mit einem Handelsschiff durchfahren. Doch die harten Konsequenzen des Klimawandels werden vermutlich schwerer wiegen als die Vorteile einer befahrbaren Nordroute – auch die negativen Folgen für arktische Lebewesen wie etwa den Eisbären, dessen Lebensraum wegschmilzt, sind beträchtlich.

Die großen Meeresströmungen und ihre Antriebskräfte sind heute gut erforscht. Im Detail aber bleiben noch viele Fragen offen. Noch hat man beispielsweise die thermohaline Zirkulation und das Wechselspiel der treibenden Kräfte nicht restlos aufgeklärt. Verschiedene mathematische Modelle kommen zu verschiedenen Ergebnissen. Zwar nutzen alle Modelle dieselben Gleichungen, Messgrößen und Eingabeparameter. Es ist aber schwierig, kleinräumige Klimaeinflüsse auf regionaler Ebene richtig einzuschätzen und korrekt in die großen, globalen Modelle zu übertragen.

Conclusio

Zeit zu handeln

Der Klimawandel wird sich in vielerlei Hinsicht auf die Meere auswirken und nicht allein die Strömungen oder den Wärmehaushalt des Ozeans verändern. Steigende Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre bringen steigende Konzentrationen in den Ozeanen mit sich. Dadurch bildet sich verstärkt Kohlensäure im Wasser, die die Meere versauern lässt. Die Folgen für die Lebewesen sind heute noch kaum absehbar. Ebenso wenig weiß man, wie sich das Abschwächen der thermohalinen Zirkulation oder des Golfstroms konkret auf die Lebensgemeinschaften im Meer auswirken wird, auf Krebs- oder Fischlarven, die mit den Strömen durch die Ozeane transportiert werden. Während des Klimagipfels in Kopenhagen wurde erneut vor den Gefahren des Meeresspiegelanstiegs gewarnt. Fachleute sind sich heute weitgehend darin einig, dass der Meeresspiegel bis zum Ende dieses Jahrhunderts um etwa einen Meter steigen wird, falls sich der weltweite Ausstoß von Treibhausgasen durch uns Menschen weiter so schnell erhöht wie in den letzten Jahrzehnten. Für Inselstaaten wie etwa die Malediven ist das fatal. Innerhalb weniger Jahrzehnte könnten die Einwohner ihre Heimat verlieren. Dass die Wissenschaftler heute noch nicht mit letzter Sicherheit sagen können, wie sich der Klimawandel künftig im Detail auswirken wird, sollte keinesfalls ein Argument dafür sein, nichts zu tun. Die Gefahr ist real. Die Menschheit sollte alles daransetzen, das Experiment Klimawandel so schnell wie möglich zu beenden. Das Klimasystem reagiert träge auf die menschengemachten Veränderungen. Damit besteht die Gefahr, dass bestimmte Entwicklungen schon heute irreversibel sind. Dieses Risiko sollte Anlass sein, vorausschauend zu handeln und den Ausstoß klimarelevanter Gase erheblich zu drosseln. Was die Durchführung von Klimaschutzmaßnahmen betrifft, ist keine Zeit zu verlieren. Vieles deutet darauf hin, dass sich die ärgsten Folgen des Klimawandels noch vermeiden lassen, wenn heute in CO_2-arme Technik investiert würde. Es ist an der Zeit zu handeln.

Abbildungsnachweis

S. 8–9: Nick Cobbing, Abb. 1.1: nach Meincke und Latif (1995), Abb. 1.2: maribus, Abb. 1.3: NASA Goddard Institute For Space Studies, Abb. 1.4: nach IPCC (2001), Abb. 1.5: action press/Ferrari Press Agency, Abb. 1.6: maribus, Abb. 1.7: maribus, Abb. 1.8: nach Meincke et al. (2003), Abb. 1.9: NASA, Abb. 1.10: maribus, Abb. 1.11: nach Barnier et al. (1994), Abb. 1.12: nach Trenberth und Solomon (1994), Abb. 1.13: [M], Bryan & Cherry Alexander/Arcticphoto/laif,

Reproduktion, Übersetzung in fremde Sprachen, Mikroverfilmung und elektronische Verarbeitung sowie jede andere Art der Wiedergabe nur mit schriftlicher Genehmigung der maribus gGmbH. Sämtliche grafischen Abbildungen im „World Ocean Review“ wurden von Walther-Maria Scheid, Berlin, exklusiv angefertigt. Im Abbildungsverzeichnis sind die ursprünglichen Quellen aufgeführt, die in einigen Fällen als Vorlage gedient haben.

Impressum

Gesamtprojektleitung: Jan Lehmköster
Redaktion: Tim Schröder
Lektorat: Dimitri Ladischensky
Redaktionsteam Exzellenzcluster: Dr. Kirsten Schäfer, Dr. Emanuel Söding, Dr. Martina Zeller
Gestaltung und Satz: Simone Hoschack
Bildredaktion: Petra Kossmann
Grafiken: Walther-Maria Scheid für maribus
ISBN der Printversion: 978-3-86648-000-1

Herausgeber: maribus gGmbH, Pickhuben 2, 20457 Hamburg

www.maribus.com