

Die Folgen des Klimawandels

Florian Neukirchen
Hrsg.

Die Folgen des Klimawandels

Spektrum
der Wissenschaft

 Springer

Hrsg.
Florian Neukirchen
Berlin, Deutschland

ISBN 978-3-662-59580-0 ISBN 978-3-662-59581-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59581-7>

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

Die in diesem Sammelband zusammengefassten Beiträge sind ursprünglich erschienen in Spektrum der Wissenschaft, Spektrum – Die Woche und Spektrum.de. © Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

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: © malp/AdobeStock
Planung/Lektorat: Stephanie Preuß

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

Eine Erwärmung um 1 °C seit Beginn der Industrialisierung haben wir bereits erreicht, stellt der jüngste Bericht des Weltklimarats IPCC vom Oktober 2018 fest. Es ist gerade einmal 3 Jahre her, als in einem der wenigen euphorischen Momente der Klimapolitik auf der UN-Klimakonferenz in Paris beschlossen wurde, die Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst aber auf 1,5 °C zu beschränken. Viel Zeit bleibt nicht mehr, doch wir machen einfach weiter wie bisher. Noch immer steigen die jährlichen Emissionen von Treibhausgasen. Während einige Länder ihre selbst gesteckten Ziele kaum noch erreichen können, steigt der Energiebedarf in den Schwellenländern rapide. Und manche interessieren sich höchstens halbherzig für das Klima, sie fragen sich eher, welche neuen Ölvorkommen sie erschließen können oder sie sorgen sich um die heimische Autoindustrie. Es ist offensichtlich, dass bisher die Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen und vor allem der Wandel hin

zu erneuerbaren Energien viel zu langsam ist, denn je mehr CO₂ wir jetzt emittieren, desto schwieriger und teurer wird es später, den Klimawandel auf ein Niveau zu beschränken, dessen Risiken wir noch kontrollieren können. Geht es wie gehabt weiter, haben wir in 10 bis 20 Jahren die 1,5 °C bereits überschritten.

Einprägsame Szenarien wie geflutete Küstenstädte, Dürrekatastrophen und das mögliche Aussterben der Eisbären werden in der Presse regelmäßig als warnende Beispiele wiederholt. Zu Recht. Aber was genau würden Szenarien wie 1,5 °C, 2 °C oder mehr bedeuten? Wie viel Treibhausgase können noch ausgestoßen werden, ohne entsprechende Grenzen zu überschreiten? Hängen heutige extreme Wetterlagen schon mit dem Klimawandel zusammen? Wie reagieren Ökosysteme auf die Veränderungen? Solche Fragen sind nicht leicht zu beantworten, viele Prozesse greifen dabei ineinander und oft verhalten sie sich nicht linear. Aber die Antworten der Forscher werden dank unzähliger Expeditionen, langer Messreihen und verbesserter Computermodelle immer konkreter. Die in diesem Buch versammelten Artikel, die überwiegend in der Zeitschrift *Spektrum der Wissenschaft* erschienen sind, geben tiefere Einblicke in diese Forschung, sie lassen uns an Expeditionen teilhaben und stellen Forschungsergebnisse und offene Fragen vor. Wir tauchen in die Ozeane ab, erkunden das arktische Eis und hiesige Wetterphänomene – und versetzen uns weit zurück in der Erdgeschichte. Wir erfahren neue Erkenntnisse über den Einfluss von Wolken und Wäldern auf das Klima und wie sich die Erwärmung der Arktis auf das Wetter in Europa auswirkt.

Einen Überblick über den jüngsten Bericht des Weltklimarats IPCC vom Oktober 2018 gibt Christopher Schrader in „Die wichtigsten Jahre der Geschichte“. Er zeigt, dass es mit vereinten Kräften und einer schnellen

Umsetzung erforderlicher Maßnahmen durchaus noch möglich ist, die Erwärmung auf 1,5 °C zu beschränken, was wesentlich moderatere Folgen hätte als etwa das 2-°C-Ziel. Ergänzend gibt Jeff Tollefson in seinem kurzen Artikel „Bekommen wir noch die Kurve?“ einen Überblick über aktuelle Entwicklungen und macht angesichts rapide sinkender Kosten von Wind- und Sonnenenergie Hoffnung.

Warum 1,5 oder 2 °C? Und macht das wirklich einen großen Unterschied? Für eine erste Einschätzung hilft es zu wissen, dass es in den Eiszeiten im Pleistozän im weltweiten Schnitt nur etwa 4 °C kälter war als heute. Und das Treibhausklima im Jura dürfte etwa 5 °C wärmer als heute gewesen sein. Auf der UN-Konferenz in Rio de Janeiro 1992 hatten sich die Staaten zwar verpflichtet, einen gefährlichen anthropogenen Eingriff in das Klima zu verhindern, es blieb aber unklar, was das genau bedeutet. Das später formulierte 2-°C-Ziel geht auf die Erkenntnis zurück, dass es seit mindestens 100.000 Jahren keine höheren Durchschnittstemperaturen gab. Je weiter dieser Wert überschritten wird, desto weniger sind die Folgen vorhersehbar.

Das Problem dabei ist, dass es im System Erde viele sogenannte Kippelemente gibt, Systeme, die bis zu einer Schwelle relativ stabil sind, aber beim Überschreiten schnell in einen anderen Zustand übergehen. Ist eine solche Änderung in Gang gesetzt, ist sie kaum noch zu stoppen. Oft gibt es dabei eine positive Rückkopplung, d. h. die Veränderung beschleunigt die Erwärmung.

Ein Beispiel sind Methanhydrate, die sich vor allem in kühlen Meeren in den Sedimenten der Kontinentallänge befinden. Dabei handelt es sich quasi um brennbares Eis: In der Kristallstruktur von gefrorenem Wasser sind Methanmoleküle wie in Käfigen gefangen. Wird es wärmer, werden sie instabil und das potente Treibhausgas entweicht – und

führt zu einer noch stärkeren Erwärmung. Schon öfter wurde beobachtet, dass im Meer entsprechende Gasblasen aufsteigen.

Die Atlantische Thermohaline Zirkulation ist ein weiteres Beispiel. Zu diesem System von Meeresströmungen gehört auch der Golfstrom, der West- und Nordeuropa ein vergleichsweise mildes Klima beschert. Warmes Wasser strömt nach Norden, kühlt ab und sinkt vor Grönland wegen der größeren Dichte in die Tiefe. Da jedoch von den grönländischen Gletschern immer mehr Schmelzwasser dazu strömt, wird das Meerwasser weniger salzig und damit weniger schwer. Es gibt schon jetzt Hinweise, dass sich diese Meeresströmung abschwächt. Kippt dieses System, würde dies in Europa zu einer deutlichen Abkühlung führen – global jedoch die Erwärmung beschleunigen. Bisher nehmen die Ozeane nämlich gehörige Mengen an CO_2 und Wärme auf. Das führt zwar zu einem steigenden Meeresspiegel (warmes Wasser hat ein größeres Volumen) und der Ozean versauert (mit schwerwiegenden Folgen insbesondere für Lebewesen mit Kalkschalen), aber immerhin bremst das die Klimaerwärmung. Die Meeresoberfläche steht im Gleichgewicht mit der Atmosphäre, hier hängen Temperatur und CO_2 -Gehalt direkt von der Atmosphäre ab. Die Meeresströmung sorgt dafür, dass beides in die Tiefsee gepumpt wird und das Oberflächenwasser weiter Wärme und CO_2 aufnehmen kann. Schwächt sich die Meeresströmung ab, geht ein guter Teil dieser Pufferwirkung verloren.

Das Inlandeis von Grönland ist ein weiteres Kipp-system. Beispielsweise schmilzt die Schneedecke im Frühjahr schneller ab – Schnee reflektiert Licht stärker als Eis. Im Sommer entstehen auf der Eisfläche immer größere Schmelzwasserseen, die noch mehr Licht absorbieren. Je niedriger die Dome des Eispanzers sind, desto wärmer

ist dort die Luft. Zugleich fließt das Eis immer schneller auseinander und durch die Auslassgletscher ins Meer. Ein völliger Kollaps des Eisschildes würde Jahrhunderte oder Jahrtausende dauern, aber immerhin den Meeresspiegel um 7 m steigen lassen.

Es gibt viele weitere Beispiele von Kippelementen und positiven Rückkopplungen, einige werden in diesem Buch genauer untersucht. Das Problem ist, dass niemand weiß, wo genau die jeweilige Schwelle dieser Systeme liegt, sicherlich nicht bei einer kurzen Überschreitung von 2,0 °C. Aber wenn einige Elemente kippen, hätte das apokalyptische Folgen.

Das 2-°C-Szenario vermeidet eine derartige Katastrophe, trotzdem hat es laut IPCC bereits schwerwiegende Folgen. Küstenstädte, flache Länder und Inseln müssten sich darauf einstellen, dass der Meeresspiegel bis 2100 um einen Betrag zwischen 0,26 und 0,77 m steigt, Überflutungen werden entsprechend häufiger – und selbst wenn dann die Temperatur wieder gesenkt werden kann, könnte das grönländische Inlandeis langfristig schmelzen. Extreme Hitzewellen, Dürreperioden und Starkregenereignisse würden deutlich zunehmen. Die Konvektionszellen und dazugehörigen Windsysteme verlagern sich, die Tropen breiten sich aus, Wüsten verlagern sich (die Sahelzone könnte möglicherweise davon profitieren), boreale Wälder schrumpfen, Gebirge verlieren viele Gletscher. Ökosysteme an Land und im Wasser kommen unter Druck, einige Arten dürften aussterben – am stärksten betroffen sind wohl Korallenriffe und die Arktis. Im 1,5-°C-Szenario sind die Risiken im Vergleich dazu deutlich geringer, ein guter Grund, es wenigstens zu versuchen.

Das Grundprinzip des Treibhauseffekts beschrieb 1824 Jean-Baptiste Joseph Fourier: Er experimentierte mit den Wärmeströmen in einem isolierten luftgefüllten Kasten und zog den Schluss, dass Sonnenlicht an der Erdoberfläche in

Wärme umgesetzt wird, diese Wärme aber durch die Atmosphäre teilweise zurückgehalten wird. Die Temperatur ist dabei abhängig von den Zu- und Abflüssen von Wärme. Tatsächlich macht dieser Treibhauseffekt das Leben auf der Erde erst möglich, sonst wäre es auf der gesamten Erde klirrend kalt und es gäbe enorme Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht. Verantwortlich sind Treibhausgase wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan, sie absorbieren die Wärmestrahlung und emittieren später wieder Wärme – in alle Richtungen, sodass ein guter Teil der Wärme nicht ins Weltall abgestrahlt wird. Schon 1896 spekulierte Svante Arrhenius, ob das Verbrennen von fossilen Energieträgern wegen der Erhöhung der CO_2 -Konzentration zu einer globalen Erwärmung führt. Es gab aber noch keine Beweise und diese Hypothese konnte sich zunächst nicht durchsetzen. Damals hatten die Menschen aber auch eher Angst, dass eine neue Eiszeit drohen könnte.

1953 begann Charles Keeling auf Hawaii mit systematischen Messungen der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Er stellte fest, dass sich diese zwar von Tag auf Nacht stark änderte, am Nachmittag aber immer 310 ppm betrug. Diese Messungen weit ab von CO_2 -Emissionen geben also gut die durchschnittliche Konzentration in der Atmosphäre wieder. 1958 baute er auf dem Vulkan Mauna Loa eine Messstation auf, die seither kontinuierlich misst. Er stellte fest, dass die Werte Jahr für Jahr stiegen. Der Zusammenhang mit dem anthropogenen CO_2 -Ausstoß wurde immer deutlicher, je steiler die Keeling-Kurve (Abb. 1) wurde. 2018 wurden bereits 400 ppm überschritten. „Klimaskeptiker“, die einen Zusammenhang zwischen anthropogenem CO_2 -Ausstoß und einer Klimaerwärmung leugnen, gibt es noch immer, inzwischen sind aber wohl keine ernst zu nehmende Wissenschaftler mehr darunter.

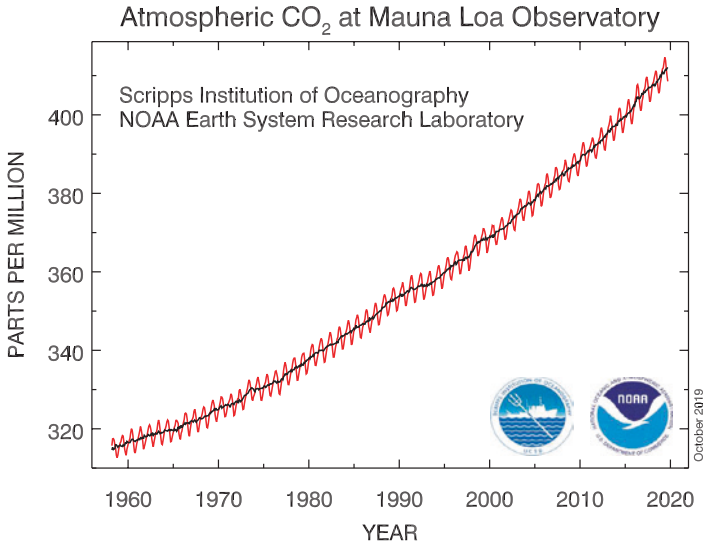


Abb. 1 Die sogenannte Keeling-Kurve zeigt den auf dem Mauna Loa (Hawaii) gemessenen Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (Scripps Institution of Oceanography/NOAA)

Trotzdem verstehen wir viele Aspekte noch nicht ganz und unsere Klimamodelle müssen mit vielen Unbekannten rechnen. Jede Abschätzung, welche Folgen ein bestimmtes Szenario hat, kann nur Wahrscheinlichkeiten von Risiken angeben, nicht die genauen Folgen an einem bestimmten Ort. Es ist nicht einmal genau klar, wie viel CO₂ wir noch ausstoßen können, ohne das 1,5-°C- oder das 2-°C-Ziel zu verfehlen.

Besonders knifflig ist es, die Wirkung der Wolken abzuschätzen. Zum einen ist Wasserdampf ein potentes Treibhausgas, zum anderen reflektieren Wolken Sonnenlicht, sie haben also zugleich eine kühlende und eine wärmende Wirkung. Wie Kate Marvel in „Das Wolkenparadox“ berichtet, hängt es von der Art der Wolken ab, welcher Effekt überwiegt. Durch den Klimawandel ändern sich

Verdunstungsraten über Ozeanen und Wäldern, das Verhältnis von Eis zu Wasser in den Wolken und außerdem verschieben sich Konvektionszellen und Windsysteme – kurz, die Wolkenbedeckung ändert sich. Leider deutet die jüngste Forschung darauf hin, dass Wolken den Klimawandel eher verstärken.

Eine weitere Schwierigkeit ist es, die einzelnen Komponenten des Kohlenstoffkreislaufs zu quantifizieren. Pflanzen und Algen betreiben Photosynthese, dabei nehmen sie CO_2 aus der Atmosphäre bzw. dem Wasser auf und bilden damit organische Substanzen. Ein Teil davon wird langfristig in Böden und Sedimenten gespeichert. Auch bei der Verwitterung von Karbonat- und Silikatgesteinen wird CO_2 verbraucht. Andererseits wird beim Ausfällen von Kalk oder beim Abbau von organischer Substanz durch Mikroorganismen CO_2 freigesetzt. Es gibt viele weitere Prozesse, die Kohlenstoff zwischen Gesteinen, Böden, Lebewesen, Wasser und der Atmosphäre umsetzen. Wie Roland Knauer in „Wie viel Kohlendioxid kann die Erde noch schlucken?“ beschreibt, verändern sich diese Stoffflüsse durch den Klimawandel – manche Kohlenstoffsenken können sogar zu Kohlenstoffquellen werden.

Es gibt auch Ideen, wie Menschen in diese Stoffflüsse eingreifen könnten, um den Klimawandel zu bremsen, was als Geoengineering bezeichnet wird. Die im Artikel beschriebenen Methoden lehnen sich an natürliche Prozesse an. Es gibt auch Pilotprojekte, bei denen CO_2 aus Abgasen abgetrennt und in geologische Speicher gepumpt wird, etwa in tiefe Aquifere, in Erdöllagerstätten oder in Basalt, in dem es durch Gesteinsverwitterung aufgenommen wird. Die Schweizer Firma Climeworks hat eine technische Anlage entwickelt, die CO_2 aus der Atmosphäre filtert – allerdings mit hohen Kosten und einem hohen Energiebedarf. Ein großes Problem bei solchen Verfahren ist, dass es um enorme Mengen CO_2 gehen müsste,

die aus der Atmosphäre zu entfernen sind: Es ist kaum möglich, die Methoden derart im großen Stil umzusetzen. Von den Kosten, dem Energieverbrauch und möglichen Auswirkungen auf Ökosysteme ganz zu schweigen. Kritiker befürchten zudem, dass die Idee solcher „negativer Emissionen“ dazu verleitet, den Klimaschutz weniger ernst zu nehmen.

Ein häufig genanntes Beispiel ist die Düngung der Ozeane mit Eisen, um das Wachstum von Algen anzuregen. Die organische Substanz soll demnach auf den Ozeanboden abregnen und zumindest teilweise im Sediment gespeichert bleiben. Experimente des Alfred-Wegener-Instituts ergaben jedoch, dass dabei viel weniger Kohlendioxid aufgenommen wird, als man dachte. Insbesondere vermehrte sich auch Phytoplankton mit Kalkschalen, das sich von den Algen ernährt und wieder CO_2 freisetzt. Hinzu kommt, dass im tieferen Wasser durch den Abbau der absinkenden organischen Substanz Sauerstoff verbraucht wird. Hier können sauerstoffarme oder gar sauerstofffreie Zonen entstehen, die für viele marine Lebewesen tödlich sind.

Selbst die Wirkung von Wäldern könnte komplizierter sein, als wir bisher gedacht haben. Ohne Frage handelt es sich bei ihnen um eine wichtige Kohlenstoffsenke. Gabriel Popkin berichtet jedoch in „Wie Wälder das Wetter beeinflussen“ von Modellierungen, nach denen es von ungeahnter Bedeutung für das Klima ist, wo sich diese Wälder befinden. Bäume absorbieren mehr Licht als beispielsweise Tundra und sie geben viel Wasserdampf an die Atmosphäre ab. Dieser Effekt ist so stark, dass sie nicht nur lokal das Klima verändern, sondern ganze Windsysteme beeinflussen können. Entsprechend hätte es schwer abschätzbare Auswirkungen, wenn bestimmte Waldflächen verschwinden und anderswo Wälder entstehen oder aufgeforstet werden.

Besonders viele Erkenntnisse verdankt die Klimaforschung den Bohrkernen aus dem Eis von Grönland und der Antarktis. Im Artikel „Ein Whiskey und der Klimawandel“ erzählt Roland Kauer packend von den Bohrungen in der Antarktis, von den ersten Anfängen mit vielen Fehlschlägen bis zu den heute vorliegenden Erkenntnissen. Es handelt sich um hervorragende Klimaarchive, die einige Hunderttausend Jahre zurückreichen – weit in das durch einen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten geprägte „Eiszeitalter“ Pleistozän hinein – und eine Vielzahl an Daten liefern: das Alter des Eises, die Meerestemperatur und die biologische Aktivität im Meer, die Luftzusammensetzung, Vulkanausbrüche usw. Es stellte sich heraus, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen der Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre und dem Klima – mit Kalt- und Warmzeiten – gibt. Selbst die Geschwindigkeit von Klimaveränderungen in der jüngsten geologischen Vergangenheit konnte so rekonstruiert werden. Und die vielleicht wichtigste Erkenntnis: In den letzten 650.000 Jahren lagen die Konzentrationen von Treibhausgasen in der Luft niemals höher als heute. Inzwischen liegt die CO_2 -Konzentration über 400 ppm, zu Beginn der Industrialisierung noch bei 280 ppm.

Neben den Eiskernen stehen uns noch weitere Klimaarchive wie Baumringe oder im Sediment erhaltene Pollen zur Verfügung. Um weiter in der Erdgeschichte zurückzugehen, müssen wir uns auf Isotopenanalysen – insbesondere die Sauerstoffisotopen in Sedimenten, die von der damaligen Meerestemperatur abhängen – und auf indirekte Hinweise wie Gletschersedimente oder die Verbreitung von Korallenriffen stützen.

Bekanntlich gab es in der Erdgeschichte nicht nur Eiszeiten, sondern auch immer wieder Phasen, in denen Treibhausklima herrschte. Die Geologie kann daher wichtige Erkenntnisse über unsere Zukunft liefern, auch

wenn die Szenarien auf den heutigen Klimawandel nicht direkt übertragbar sind. Wirklich stabil war das Klima genau genommen nie, aber es gab mehr oder weniger lange Perioden, in denen sich die Temperaturen nur langsam änderten, dazwischen vergleichsweise rapide Veränderungen. Das liegt daran, dass Schwankungen durch Rückkopplungseffekte verstärkt werden. Beispielsweise kommt es während einer Erwärmung zu einer verstärkten Freisetzung von Treibhausgasen, was die Erwärmung verstärkt. Der ursächliche Grund für ein Treibhausklima war also nicht unbedingt eine Emission von Kohlendioxid, somit ist es nicht immer einfach, bei der Rekonstruktion des Paläoklimas Ursache und Wirkung zu unterscheiden.

Mehrere natürliche Faktoren wirken sich auf das Klima aus, drei davon sind besonders wichtig. Einer ist die Veränderung der Sonneneinstrahlung auf die Erde. So gibt es leichte periodische Schwankungen der Rotationsachse der Erde und ihrer Bahn um die Sonne, die durch die Milanković-Zyklen beschrieben werden. Hierbei überlagern sich mehrere Schwankungen, die Perioden zwischen 20.000 und 100.000 Jahren aufweisen. Diese waren beispielsweise maßgeblich beim schnellen Wechsel zwischen Eiszeiten und wärmeren Phasen im Pleistozän.

Der zweite Faktor sind Vulkane. Spürbar war dies nach dem größten Vulkanausbruch in historischer Zeit, der Eruption des Tambora in Indonesien 1815. Das folgende Jahr ging als „Jahr ohne Sommer“ in die Geschichte ein, auch in Europa war es so kühl, dass es zu Ernteausfällen und einer Hungersnot kam. Der Sommer war trüb, kühl und regnerisch, der einzige Trost waren ungewöhnlich farbige Sonnenuntergänge. Vulkane können aber auch eine aufheizende Wirkung auf das Klima haben, da sie Treibhausgase freisetzen. Die kühlende Wirkung gibt es, wenn bei einem großen und sehr explosiven Ausbruch viel Staub

und vor allem SO_2 bis hinauf in die Stratosphäre aufsteigen, was vor allem bei den großen Vulkanen an Subduktionszonen passiert, etwa entlang des „Feuergürtels“ rund um den Pazifik. Das Gas SO_2 reagiert in der Atmosphäre mit Wasser und bildet winzige Schwefelsäuretröpfchen. Die Aerosole werden von Höhenwinden über den gesamten Globus verteilt und dieser Dunstschleier sorgt dafür, dass weniger Sonnenlicht auf die Erdoberfläche auftrifft. Langsam regnen die Aerosole jedoch ab, dieser Effekt wirkt nur etwa 3 Jahre. Trotzdem wird immer mal wieder vorgeschlagen, dies nachzuahmen und mit Flugzeugen Schwefelaerosole in der Stratosphäre auszubringen.

Alle Vulkane, auch weniger explosive Basaltvulkane, stoßen auch mehr oder weniger große Mengen CO_2 aus, das müssen wir als Teil des „normalen“ Kohlenstoffkreislaufs ansehen. Es gab in der Erdgeschichte aber auch Phasen mit stark erhöhtem Vulkanismus, während denen in geologisch kurzer Zeit enorme Mengen CO_2 freigesetzt wurden – was tatsächlich einen schnellen Wechsel zu einem extremen Treibhausklima auslösen kann. In Sibirien eruptierten vor etwa 250 Mio. Jahren unvorstellbare Mengen Basaltlava, etwa 7 Mio. km^2 (ca. 20-mal so groß wie Deutschland) wurden Lavastrom für Lavastrom überdeckt, mit einer Gesamtmächtigkeit bis zu 6500 m – der Sibirische Trapp. Das dabei ausgestoßene CO_2 ist vermutlich für den sehr schnellen Wechsel von einer Eiszeit hin zu extremem Treibhausklima an der Perm-Trias-Grenze verantwortlich und zugleich eine Hauptursache für das größte Massenaussterben der Erdgeschichte. In der frühen Trias waren die Durchschnittstemperaturen etwa 10°C höher als heute. Am Äquator stieg die Wassertemperatur auf bis zu 40°C an [1], in den Tropen war die Temperatur für Tiere und Pflanzen tödlich. Gegen Ende der Untertrias sanken die Temperaturen wieder zu einem moderateren Treibhausklima ab.

Der dritte Faktor, aber mit nur sehr langsamer Veränderung im Zuge der Plattentektonik, ist die Größe und relative Verteilung der Kontinente und Ozeane auf der Erde. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die Geometrie von Meeresströmungen und Windsystemen und damit den Transport von Wärme und Feuchtigkeit. Auch ist es von Bedeutung, ob ein Kontinent in Polnähe liegt, sodass sich darauf ein Eisschild bilden kann. Wie wichtig die Lage der Kontinente ist, zeigt der Superkontinent Pangäa, der im Devon und Karbon durch Kollision fast aller Landmassen entstand und im Jura und der Kreide wieder in kleinere Kontinente zerfiel. Zunächst, im Karbon und Perm, lag ein Teil dieser gewaltigen Landmasse am Südpol, es gab großflächige Vereisungen (Karoo-Eiszeit) und global ein kühles Klima. Weite Teile des Kontinents waren trockene Wüsten. Der riesige Kontinent wanderte aber weiter nach Norden und lag das gesamte Mesozoikum (Trias, Jura, Kreide) hindurch zu großen Teilen im tropischen und subtropischen Bereich. Während des gesamten Mesozoikums herrschte Treibhausklima. Den extremen Wechsel in der Trias habe ich schon im Zusammenhang mit Vulkanen genannt. Zu Beginn des Juras war es nicht ganz so heiß, aber die Temperatur nahm nun kontinuierlich bis zum Cenomanium in der Oberkreide zu, wofür die Lage der Kontinente als wichtigster Grund gilt. Trotz der hohen Temperaturen gab es aber kein Massensterben, der Temperaturanstieg war so langsam, dass sich die Organismen durch Migration oder Evolution anpassen konnten. Allerdings lag der Meeresspiegel mindestens 100 m höher als heute, weite Teile der Kontinente waren durch Flachmeere überflutet und mehrfach breiteten sich in den Ozeanen riesige sauerstofffreie Todeszonen aus – wobei übrigens einige wichtige Erdöl- und Gaslagerstätten entstanden, deren Inhalt wir heute wieder verbrennen.

Der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre gipfelte damals zwischen 700 und 1400 ppm, so eine Abschätzung anhand von fossilen Nadeln von Koniferen [2], die bei hohen Gehalten weniger Spaltöffnungen ausbilden. Das entspricht etwa den Werten, die in pessimistischen Szenarien (also ohne Anstrengungen zum Klimaschutz) bereits für das Jahr 2100 vorausgesagt werden.

Es ist offensichtlich, dass die Geschwindigkeit der Klimaveränderung entscheidet, ob sich Lebewesen und Ökosysteme anpassen können oder es zu einem Massensterben kommt. Als bestes Analog zu den heutigen Veränderungen gilt das Paläozän/Eozän-Temperaturmaximum (PETM) vor rund 56 Mio. Jahren. Durch den CO_2 -Ausstoß von Vulkanen verursacht kam es zu einem kurzen, starken Anstieg der Temperatur um etwa 5°C , die wenig später wieder abfiel. Die Ökosysteme kamen unter Druck, aber von einem Massensterben von Foraminiferen abgesehen kamen Fauna und Flora glimpflich davon. Genauere Untersuchungen ergaben aber, dass die Erwärmung damals viel langsamer ablief als heute. Von dieser Erkenntnis erzählt Lee R. Kump in „Was lehrt uns die letzte Erderwärmung?“. Nach seinen Daten aus Spitzbergen erfolgte der Temperaturanstieg damals in einem Zeitraum von 20.000 Jahren, während wir heute bei fortgesetzter Emission einen ähnlichen Anstieg in wenigen Jahrhunderten erwarten. Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung kommt auch eine jüngere Veröffentlichung [3]. Demnach ist die heutige Emissionsrate deutlich höher als im Fall des PETM, in dem sich der entsprechende CO_2 -Anstieg immerhin über 4000 Jahre hinzog. Die derzeitige Erwärmung wird wahrscheinlich schlimmere Folgen haben.

Besonders dramatisch sind schon heute die Veränderungen in der Arktis. In „Arktis: Auf dünnem Eis“ beschreibt Jennifer A. Francis, wie das arktische Klima

vor allem in den letzten 10 Jahren immer schneller von einem Rekord zum nächsten jagte und das Meereis immer weiter abnahm – viel schneller, als es Wissenschaftler in ihren pessimistischsten Szenarien vorhergesagt hatten. Verschiedene Rückkopplungseffekte führen dazu, dass sich dieser Prozess selbst verstärkt. Schon heute sind Auswirkungen auf das Ökosystem und die Bewohner erkennbar. Indirekt hat diese Veränderungen aber auch weit entfernt Auswirkungen: Schmelzende Gletscher lassen den Meeresspiegel steigen und das Abschwächen des Jetstreams führt in Europa häufiger zu extremen Wetterlagen. Wir kommen darauf später zurück.

Auf ein für die Arktis besonders „heißes“ Jahr geht Christopher Schrader in „Das Ende der Arktis wie wir sie kennen?“ ein. Nachdem das Jahr 2016 bereits außergewöhnlich warm begonnen hatte, blieb es im Herbst 2016 für arktische Verhältnisse fast sommerlich. Monatslang zeigten die Thermometer zwischen 5 und 20 °C höhere Temperaturen an, als im langjährigen Durchschnitt zu erwarten wäre. Entsprechend erreichte die Meereisbedeckung wie schon im Vorjahr einen neuen Negativrekord und die winterliche Ausbreitung des Eises wurde stark gebremst, mit entsprechenden Folgen für das folgende Jahr. Mitverantwortlich für den besonders schnellen Temperaturanstieg sind verschiedene Rückkopplungen, etwa weil Eis wesentlich mehr Licht reflektiert als Meerwasser. Entsprechend stellt der Autor die Frage, ob die Arktis bereits die Schwelle erreicht hat, an der ihr Klima kippt.

Dabei dürfte auch eine weitere Rückkopplung eine Rolle spielen, die erst in den letzten Jahren entdeckt wurde, wie Mark Harris in „Wellen als Eisbrecher“ erzählt. Während das Meereis durch die höheren Temperaturen immer weiter zurückgeht, gibt es auf den größeren eisfreien Flächen immer größere Wellen, die wiederum das

Meereis immer schneller zerbrechen. Offensichtlich führt dieser Effekt inzwischen auch zu einer erhöhten Erosion an den Küsten.

In „Tauende Tundra“ beschreibt Edward A. G. Schuur ein weiteres System mit positiver Rückkopplung. Die Permafrostböden der Polarregionen tauen im Sommer immer früher und bis in immer größere Tiefe auf. Diese Böden enthalten große Mengen an pflanzlichen und tierischen Überresten, die sich über lange Zeiträume angesammelt haben. Im aufgetauten Boden erwachen Mikroorganismen und zersetzen dieses organische Material, wobei die Treibhausgase Kohlendioxid und Methan entstehen und in die Luft entweichen. Während diese weitverbreiteten Böden im kühlen Klima eine Kohlenstoffsenske darstellen, führt die Klimaerwärmung dazu, dass große Mengen an zusätzlichen Treibhausgasen freigesetzt werden, was den Klimawandel beschleunigt. Um diesen Beitrag quantifizierbar zu machen, müssen mehrere Fragen geklärt werden, zu denen erste Abschätzungen vorliegen: Wie viel organischer Kohlenstoff ist in den Böden enthalten? Wie viel davon ist für den Stoffwechsel der Mikroorganismen geeignet? Wie schnell zersetzen diese die Biomasse? In welchem Verhältnis entstehen die Gase Kohlendioxid und Methan?

Zurück zum schmelzenden Meereis führt uns Tom Yulsman in seinem Artikel „Auf dünnem Eis“. Er erzählt von einer Expedition, bei der eine Forschergruppe ihr Schiff bewusst im Meereis einfrieren ließ, um ein halbes Jahr lang, bis zum Aufbrechen des Eises, die Veränderungen zu dokumentieren. Sie zeichneten Wetterdaten auf, vermaßen die Eisdicke und ließen kleine ferngesteuerte U-Boote unter das Eis tauchen. Wir erfahren von Algenblüten unter dem Eis und von Arten, die aus dem Atlantik in arktische Gewässer einwandern. Zugleich schürt das schwindende Meereis aber auch Begehrlichkeiten, da in der

Arktis große Mengen an Erdöl und -gas vermutet werden. Ausgerechnet der Klimawandel könnte also dazu führen, dass bald noch mehr fossile Energieträger verbrannt und mehr Treibhausgase emittiert werden.

Und die Eisbären? Auf einer schmelzenden Scholle treibend ist ihr Bild zu einem regelrechten Symbol des Klimawandels geworden. „Hat der Eisbär eine Zukunft?“ fragen Rémy Marion und Farid Benhammou im gleichnamigen Artikel angesichts des schwindenden Lebensraums dieser für ein Leben auf dem Packeis angepassten Tiere. Sie beschreiben die Lebensweise der Eisbären, ihre Evolutionsgeschichte und machen uns Hoffnung, dass sie anpassungsfähig genug sind, um wenigstens die nächsten Jahrzehnte zu überleben.

Die schnelle Erwärmung der Arktis wirkt sich bis nach Europa aus, wie Daniel Lingenhöhl in „Der Jetstream schlägt Wellen“ erklärt. Dieser auch Strahlstrom genannte Höhenwind wird schwächer und bildet häufiger weite Mäander aus, sogenannte Rosby-Wellen. Diese können über Wochen in einer Position bleiben, sodass sich in den betroffenen Regionen die Wetterlage nicht ändert. So kann in einer Region wochenlang extreme Hitze und Dürre herrschen, während es ein paar Hundert oder Tausend Kilometer entfernt Dauerregen und Überflutungen gibt. Paradoxerweise kann das auch zu besonders kalten Wintern führen, weil Luft aus der Arktis weit nach Süden strömen kann. Entsprechende Wetterlagen gab es schon immer, aber sie werden wohl immer häufiger.

Die Erforschung von Wetterextremen ist in den letzten 10 Jahren weit fortgeschritten. In „Ist das noch normal?“ führt Alexander Mäder ein Interview mit der Meteorologin Daniela Jacob, die einen Überblick über den Forschungsstand gibt.

Welche Folgen Klimaextreme haben können, zeigt gut das Jahr 2018, in Deutschland das wärmste und sonnigste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen. Schon im April begann es mit sommerlichen Temperaturen und bis November war jeder Monat viel wärmer und trockener als der Durchschnitt. Die Niederschläge waren 40 % niedriger als sonst, wobei manche Regionen fast keinen Tropfen abbekamen. Die Wasserstände in den Flüssen sanken stark. Die Spree floss in Berlin sogar rückwärts, weil kein Wasser mehr nachkam, auf dem Rhein konnten Schiffe nur noch mit halber Ladung fahren. Die BASF musste daher in Ludwigshafen ihre Produktion drosseln und in Süddeutschland wurden Notreserven mit Diesel und Kerosin angebrochen. In Brandenburg gab es Hunderte Waldbrände. Der größte konnte erst nach 9 Tagen gelöscht werden, wobei Hubschrauber und Löschpanzer eingesetzt werden mussten. Das andere Extrem sind Hochwasser wie an der Oder 1997 und 2010, die in überfluteten Orten erhebliche Schäden anrichteten. Durch Starkregenereignisse ausgelöstes Hochwasser dürfte häufiger werden. Inzwischen können Forscher recht gut abschätzen, wie groß der Beitrag des Klimawandels bei Wetterextremen ist, berichtet Quirin Schiermeier in „Der Einfluss des Klimawandels“. Sie berechnen, wie sehr sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Ereignis eintritt, erhöht hat.

Für Küstenbewohner ist es wichtiger, wie sehr sich die Wahrscheinlichkeit von Extremfluten erhöht. Alexandra Witze berichtet in „Wann kommt die Flut?“ über die Auswertung von großen Datenmengen – und dass die Auswirkungen nicht an jeder Küste gleich sind. Global steigt der Meeresspiegel derzeit um etwas mehr als 3 mm pro Jahr. Da es zugleich tektonische Hebungen und Senkungen von Landmassen gibt, sind lokale Pegelstände unterschiedlich davon betroffen. Als besonders gefährdet gelten

Flussdeltas und kleine Inseln, die zum Teil kaum aus dem Meer aufragen. Deltas sind nicht nur flach, sondern senken sich auch noch wegen des Gewichts der abgelagerten Sedimente ab. Außerdem sind sie oft sehr dicht besiedelt.

Verantwortlich für den Meeresspiegelanstieg sind vor allem zwei unterschiedliche durch den anthropogenen Klimawandel ausgelöste Prozesse: Das Abschmelzen von Gletschern und die thermische Ausdehnung von Wasser. Der Beitrag beider Effekte schwankt von Jahr zu Jahr, liegt aber in einer ähnlichen Größenordnung.

Beim Erwärmen von Wasser sinkt die Dichte, das Volumen steigt. Maßgeblich ist dabei, wie viel und wie schnell Wärme auch in tiefere Bereiche des Ozeanes gebracht wird. Das geschieht vor allem durch Meeresströmungen, ist aber relativ langsam, entsprechend reagiert das System verzögert.

Wer regelmäßig in den Alpen ist, kann buchstäblich sehen, wie schnell dort die Gletscher abschmelzen. Das ist nicht nur ein ästhetisches Problem: So kommt es verstärkt zu großen Bergstürzen, weil einst das Eis steile Bergänge gestützt hatte. In Klimazonen mit ausgeprägten Trockenzeiten sind Gletscher zudem ein wichtiges Trinkwasserreservoir, das saisonale Niederschlagsschwankungen ausgleicht. Insbesondere in Asien sind sehr viele Menschen davon abhängig. Der Einfluss der schmelzenden Hochgebirgsgletscher auf den Meeresspiegel ist aber gering. Deutlich mehr tragen große Gletscher in Alaska und der Arktis bei und in zunehmendem Maß der riesige Eisschild von Grönland und auch die Westantarktis.

Ein vollständiges Abschmelzen der großen Eisschilde wäre natürlich verheerend. Allein Grönland würde den Meeresspiegel um 7 m ansteigen lassen, die Westantarktis um 4,3 m und die Ostantarktis um weitere 53 m. Bei einer uneingeschränkten Fortsetzung der Treibhausgasemissionen könnte das in Zeiträumen von Tausenden

Jahren passieren. Grönland scheint wesentlich sensibler zu reagieren, als wir vor Kurzem dachten, und es könnte sogar sein, dass es während der Warmzeiten des Pleistozäns nahezu eisfrei war [4].

Sehr sensibel reagieren auch die Westantarktis und die daran hängende Antarktische Halbinsel. Die Antarktische Halbinsel machte 2002 Schlagzeilen, weil das 220 m dicke Schelfeis Larsen B innerhalb von 2 Monaten kollabierte. Es hatte schon in den Jahren davor erheblich an Fläche eingebüßt, nun zerbrach in kurzer Zeit knapp die Hälfte der Fläche in kleine Eisberge. Das kleinere Larsen-A-Schelfeis kollabierte bereits 1995, während 2017 am größeren Larsen C etwa ein Zehntel in Form eines riesigen Eisberges abbrach. Auf den Meeresspiegel hat das zunächst keine Auswirkungen: Schelfeis schwimmt auf Wasser, d. h., es verdrängt genauso viel Wasser wie beim Abschmelzen dazu kommt. Der Verlust von Schelfeis beschleunigt aber die Fließgeschwindigkeit der dahinter ins Meer fließenden Gletscher, die auf diese Weise schneller dünner werden, und das Meerwasser reflektiert weniger Licht als das Eis und erwärmt sich daher schneller.

In der Westantarktis ist problematisch, dass das Gestein unter dem Eis weitgehend unter dem Niveau des Meeresspiegels liegt. Wärmeres Meerwasser schmilzt unter dem randlichen Schelf das Eis von unten an, wodurch sich die Grounding Line, an der das Eis gerade noch auf Fels aufliegt, sehr schnell zurückverlagert. Hin und wieder schwimmen große Teile eines Gletschers, die eben noch auf Fels auflagen, plötzlich auf und zerbrechen zu Eisbergen. Auf diese Weise können die Gletscher sehr schnell kürzer und dünner werden, was wiederum in höheren Bereichen die Fließgeschwindigkeit und das Abschmelzen beschleunigt.

Die Ostantarktis gilt als weitgehend stabil und gebietsweise könnte es durch den Klimawandel sogar zu mehr Schneefall und daher mehr Eisbildung kommen. Inzwischen wissen wir aber, dass es auch hier stark gefährdete Bereiche gibt. Jane Qiu berichtet in ihrem Artikel „Erwacht bald der schlafende Gigant?“ von der Erforschung des Totten-Gletschers, die unser Bild einer stabilen Ostantarktis infrage stellt.

Marine Ökosysteme sind auch in wärmeren Breiten durch den Klimawandel einem größeren Risiko ausgesetzt. Das gilt insbesondere für Korallenriffe, die ja nicht so leicht abwandern können. Es ist offensichtlich, dass die Geschwindigkeit des Klimawandels den Ausschlag geben wird, wie viele Riffe erhalten werden können. Wer gerne taucht, kennt sicherlich das Phänomen der Korallenbleiche: Die Korallen haben ihre Farbenpracht verloren und sind nun eintönig hellgrau. Steinkorallen sind Nesseltiere, die in Symbiose mit Einzellern namens Zooxanthellen leben, die ihnen beim Stoffwechsel und der Kalkbildung helfen. Die filigranen Kalkskelette sind Kolonien von einzelnen Polypen, die jeweils an den Spitzen sitzen und Kalk abscheiden. Die Bleiche ist eine Reaktion auf zu hohe Wassertemperaturen, die Einzeller beginnen, Giftstoffe zu produzieren und werden daher von den Polypen abgestoßen. Die Symbiose bricht zusammen, die Korallen können kaum noch Stoffwechsel betreiben. Es dauert viele Jahre, bis sich die Korallen wieder erholt haben, im schlimmsten Fall sterben sie ab. Das gab es auch früher, vor allem im Zusammenhang mit dem alle paar Jahre auftretenden Klimaphänomen El Niño. Inzwischen sind die Wassertemperaturen auch ohne El Niño nahe oder über der kritischen Schwelle, die Bleiche tritt immer häufiger, länger und verheerender auf – manchmal in Form eines weltweiten Massenphänomens.

So wurden bei einem einzigen Vorkommnis 1998 etwa 16 % aller Riffe weltweit stark beschädigt, manche verloren in diesem Jahr 50–90 % ihrer Korallen. Die bisher längste Massenbleiche dauerte ohne Unterbrechung von 2014 bis 2016, dabei war das Große Barriereriff vor Australien besonders stark betroffen.

Das zweite große Problem für Korallen ist die Versauerung der Ozeane. Betroffen sind auch alle anderen Lebewesen, die ein Skelett oder eine Schale aus Kalk (Calcit oder Aragonit) aufbauen: Muscheln, Schnecken, Seeigel, Krebse und diverse Einzeller. Ein Teil des in Wasser gelösten CO_2 reagiert zu Kohlensäure. Je höher die CO_2 -Konzentration ist, desto saurer werden die Ozeane. Damit verringert sich die Menge an gelösten Karbonationen, weil sich das Gleichgewicht hin zu Bikarbonat verschiebt. Das macht es für die Organismen immer schwerer, Kalk auszufällen.

In größerer Wassertiefe wird es noch problematischer. Unterhalb der sogenannten Karbonat-Kompensationstiefe lösen sich Aragonit und (etwas tiefer) Calcit wieder auf. Diese Tiefe ist abhängig von der Temperatur und der Wasserzusammensetzung – und natürlich dem pH, entsprechend verschiebt sie sich durch die Versauerung nach oben. Sie variiert zwischen mehr als 3500–5000 m im Nordatlantik und etwa 200 m in manchen Teilen der Arktis und des Pazifiks. Vor allem wo sie flach liegt, bringt eine leichte Verschiebung viele Organismen in ein tödliches Milieu.

In „Meereswelt im Würgegriff“ beschreibt Danielle L. Dixon, dass auch Anemonenfische und Haie von der Versauerung betroffen sind: Experimente belegen, dass sich dies erheblich auf ihr Verhalten auswirkt und fatale Folgen haben kann. Vermutlich gilt dies auch für viele andere Meeresbewohner.

Über ein weiteres Phänomen mit verheerenden Folgen für marine Ökosysteme schreiben Clarissa Karthäuser, Andeas Oschlies und Christiane Schelten in „Dem Ozean geht die Luft aus“: In den Ozeanen gibt es in mittlerer Tiefe immer größere Zonen, die kaum oder gar keinen Sauerstoff enthalten. Für viele Lebewesen ist das tödlich. Der Grund ist eine Kombination aus Klimaerwärmung und dem zusätzlichen anthropogenen Eintrag von Stickstoffverbindungen.

Wie gesagt werden die Emissionen der nächsten Jahre und Jahrzehnte entscheiden, wie stark der Klimawandel ausfällt und wie verheerend seine Folgen sein werden. Ein „weiter so“ sollte keine Option sein, die Anstrengungen zum Klimaschutz müssen dringend verstärkt werden, um die Klimaziele zu erreichen. Immerhin geben die im 2. Artikel dieses Buchs beschriebenen Entwicklungen bei erneuerbarer Energie Grund zu einem vorsichtigen Optimismus. Es ist zu hoffen, dass sich die Politik zu einer besseren Weichenstellung durchringen wird und dass es bald technologische Durchbrüche insbesondere bei Energiespeichern gibt. Was wir schaffen können und wie ist aber nicht nur eine wirtschaftliche und technologische Frage, sondern hängt vor allem davon ab, wie sehr die Gesellschaft dahinter steht. Das wird sicherlich nicht konfliktfrei ablaufen: Gegner und Befürworter von Windrädern, Bremser und Beschleuniger beim Kohleausstieg, die streikenden Schüler von „Fridays for Future“ und ihre Kontrahenten, Vielflieger und Befürworter einer CO₂-Steuer, nicht zuletzt die „Ökos“ und „Trump-Fans“ dieser Welt werden noch viele Gelegenheiten zum Streiten haben.

Berlin,
April 2019

Florian Neukirchen

Literatur

- [1] Sun Y et al. (2012) Lethally hot temperatures during the Early Triassic greenhouse, *Science* 338: 366–370.
- [2] Passalia MG (2009) Cretaceous p_{CO_2} estimation from stomatal frequency analysis of gymnosperm leaves of Patagonia, Argentina, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 273: 17–24.
- [3] Zeebe RE et al. (2016) Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years, *Nature Geoscience* 9: 325–329.
- [4] Schaefer JM et al. (2016) Greenland was nearly ice-free for extended periods during the Pleistocene, *Nature* 540: 252–255.

Inhaltsverzeichnis

„Die wichtigsten Jahre der Geschichte“	1
<i>Christopher Schrader</i>	
Bekommen wir noch die Kurve?	13
<i>Jeff Tollefson</i>	
Das Wolkenparadoxon	25
<i>Kate Marvel</i>	
Wie viel Kohlendioxid kann die Erde noch schlucken?	39
<i>Roland Knauer</i>	
Wie Wälder das Klima beeinflussen	51
<i>Gabriel Popkin</i>	
Ein Whiskey und der Klimawandel	65
<i>Roland Knauer</i>	

Was lehrt uns die letzte Erderwärmung?	83
<i>Lee R. Kump</i>	
Auf dünnem Eis	97
<i>Jennifer A. Francis</i>	
Das Ende der Arktis, wie wir sie kennen?	109
<i>Christopher Schrader</i>	
Wellen als arktische Eisbrecher	117
<i>Mark Harris</i>	
Tauende Tundra	131
<i>Edward A. G. Schuur</i>	
Auf dünnem Eis	143
<i>Tom Yulsman</i>	
Hat der Eisbär eine Zukunft?	169
<i>Rémy Marion und Farid Benhammou</i>	
Der Jetstream schlägt Wellen	181
<i>Daniel Lingenhöhl</i>	
Extremwetter durch Erderwärmung?	195
<i>Alexander Mäder</i>	
Der Einfluss des Klimawandels	207
<i>Quirin Schiermeier</i>	
Wann kommt die Flut?	219
<i>Alexandra Witze</i>	

Erwacht bald der schlafende Gigant?	233
<i>Jane Qiu</i>	
Meereswelt im Würgegriff	243
<i>Danielle L. Dixon</i>	
Dem Ozean geht die Luft aus	257
<i>Clarissa Karthäuser, Andreas Oschlies und Christiane Schelten</i>	