

"Kipppunkte" | Eine Einordnung

Inhalt

Kipppunkte: Wie wir über klimatische Veränderungen im Erdsystem sprechen	2
Biosphäre: Lebenswelten am Rand ihrer Kräfte	5
Kryosphäre: Wo drohen Lebenswelten aus Eis aufzutauen?	9
Im Fluss: Meeres- und Luftströmungen der Erde	13



Kipppunkte: Wie wir über klimatische Veränderungen im Erdsystem sprechen

Menschen beeinflussen den Planeten wie keine andere Art von Lebewesen. Unsere Lebensweise, Technologien, die wir nutzen, oder die Art, wie wir Nahrung produzieren – sie wirken sich inzwischen auf fast jeden Teil des Erdsystems aus. Wo müssen wir entschlossen handeln, um kritische Veränderungen zu vermeiden?

Selbstständig fortschreitende Veränderungen

Wissenschaftler:innen beobachten weltweit, wie die vielfältigen Veränderungen verlaufen und welche Auswirkungen sie haben. Und sie sehen: Nicht alle Reaktionen im Erdsystem erfolgen proportional zur Stärke der Einflüsse, die auf sie wirken. Manche Teile des Erdsystems erreichen einen kritischen Zustand, jenseits dessen sich ihre Struktur und Funktion weiter verändern, auch ohne, dass der ursprüngliche Antrieb von außen wirkt. Die angestoßenen Veränderungen schreiten nun von alleine fort. Sie können sich beschleunigen, verstärken oder unvorhergesehene Ausmaße annehmen.

Den Zeitpunkt, ab dem die Veränderung von alleine weiterläuft, bezeichnen viele Forschende als den Kipppunkt eines Systems. Er ist gekennzeichnet durch einen Schwellenwert. Das lässt sich etwa am Beispiel der Eisdecke Grönlands verdeutlichen: Unterschreitet ihre Dicke einen kritischen Wert, schmilzt das Eis auch ohne weitere Erderwärmung. Unter Klima-Kippelementen verstehen Wissenschaftler:innen solche Teile des weltweiten Klimasystems, die bei einem bestimmten Maß der Erderwärmung in die unaufhaltsame Veränderung übergehen. Ihr Kipppunkt liegt also bei einer bestimmten globalen Durchschnittstemperatur.

Gerrit Lohmann, Experte für Klimadynamik am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), mahnt allerdings zu Vorsicht im Umgang mit dem Begriff. „Von einem Kipppunkt zu sprechen, erweckt den Eindruck, der Schwellenwert wäre klar definierbar – als ob eine bestimmte Temperatur oder ein CO₂-Wert automatisch zu einem abrupten Umschwung führten“, sagt er. Übergänge zwischen Zuständen im Klimasystem erfolgten aber nicht unbedingt bei einem festen Wert. „Das Klima ist ein hochgradig komplexes, stochastisches System. Es weist natürliche Schwankungen auf, die starke Ausschläge verursachen

können. Und Systeme können früher oder später kippen, je nach Zufallsvariationen, Wetterereignissen und internen Rückkopplungen.“ Lohmann und viele andere Forschende sprechen deshalb lieber von „kritischen Bereichen“ statt von Kipppunkten. „Wir wollen keine übertriebene Genauigkeit suggerieren, die Forschung nicht leisten kann.“

Prozesse verstärken oder hemmen sich gegenseitig

Für die nicht-linearen Veränderungsprozesse in Kippsystemen spielen Rückkopplungsmechanismen eine wichtige Rolle. Sie können die Abläufe vor und nach dem Kippen verstärken oder beschleunigen. Der Grönländische Eisschild schmilzt zum Beispiel schneller, je flacher er wird. Das liegt daran, dass die Oberfläche durch das Schmelzen in zunehmend wärmere Luftschichten absinkt und umso schneller taut. Manche Rückkopplungen wirken auch entgegen der Veränderung, die durch die Erderwärmung angeschoben wird. Rückkopplungen, insbesondere die verstärkenden, machen die Verläufe der Veränderungen für die Menschheit umso brisanter – und schwieriger vorherzusagen für diejenigen, die sie erforschen. Denn einzelne Rückkopplungseffekte lassen sich zwar bedingt in Modellen simulieren. In der Realität wirken aber viele Mechanismen gleichzeitig in verschiedenen Teilen des Erdsystems wie Atmosphäre, Ozean, Boden oder Biosphäre, und beeinflussen sich gegenseitig.

Kein Zurück in absehbarer Zukunft

Die angeschobenen Prozesse im gekippten System laufen aus eigenem Antrieb weiter. Auch wenn die äußeren Bedingungen von vor dem Kippen wieder hergestellt würden, kann das System nicht in seinen Ausgangszustand zurückkehren. Selbst wenn also in Zukunft die weltweite Durchschnittstemperatur

auf ein vorindustrielles Niveau sänke, würde ein schmelzender Eisschild Grönlands oder der Westantarktis nicht wieder anwachsen. Das ist gemeint, wenn das Kippen bestimmter Teile des Erdsystems als unumkehrbar bezeichnet wird. Verschiedene Teile des Klimasystems reagieren auf die Erderwärmung auf verschiedenen Zeitskalen. Kurzfristig, in Zeiträumen von Jahren bis Jahrzehnten, verändern sich Wetterlagen, Meereis und Klimamuster. Langfristig, in Zeiträumen von Jahrhunderten bis Jahrtausenden, werden große Ozeanströmungen, Eisschilde und die Kohlenstoffspeicherung zum Beispiel im Ozean, den Wäldern, Mooren oder Permafrostböden beeinflusst.

Vorbeugestrategien erfordern besonderes Risikoverständnis

Befindet sich ein Kippelement im Klimasystem erst einmal auf dem Pfad der Veränderung, ist das Ruder nicht mehr ohne Weiteres herumzureißen. Das ist der Grund, warum es wichtig ist, Kippelemente – wie beispielsweise den grönländischen Eisschild – und ihre Dynamik zu kennen und zu verstehen: Der Zeitpunkt, zu dem das System kippt, kann weit vor dem liegen, zu dem das ganze Ausmaß der Veränderungen erkennbar wird. Ihre Auswirkungen können sich in zeitlichen Dimensionen abspielen, die weit über die Zeitspannen menschlicher Generationen hinausgehen, in denen wir politisch und gesellschaftlich zu planen gewohnt sind. Um Strategien zu entwerfen, die dem Kippen eines Systems vorbeugen oder Anpassung an die Folgen erlauben, brauchen Gesellschaften und politische Entscheidungstragende ein Risikoverständnis, das diese Dynamik berücksichtigt.

Kaskaden von Kippsystemen

Zahlreiche heute bekannte Kippelemente des Erdsystems sind eng miteinander verknüpft. Kippt das eine, können weitere Teile des Erdsystems so beeinflusst werden, so dass sie ebenfalls schneller ihren Kippunkt erreichen. Dieses gegenseitige 'Mitreißen' bezeichnen Forschende als Kaskade von Kippunkten. Ein Beispiel ist die Interaktion von grönländischem Eisschild und Atlantischer Umwälzströmung (AMOC). Das Schmelzwasser des Eisschildes beeinträchtigt die Atlantische Umwälzströmung, die wiederum das Klima in weiten Teilen Europas, Afrikas und des amerikanischen Kontinentes bestimmt. Würde der Eisschild Grönlands großflächig oder gar vollständig abschmelzen, steht zu befürchten, dass die Atlantische Umwälzströmung maßgeblich schwächer würde. Die gigantische Meeresströmung ist ein Schlüsselement im globalen Klimasystem. Eine Schwächung bedingt weltweit veränderte Dynamiken der Meere, atmosphärischer Luftströmungen und in der Folge auch der Kohlenstoffspeicher wie Wälder und Moore. Gleichzeitig weist die ozeanische Strömung, wie auch andere Teile des Klimasystems, von Natur aus Schwankungen und große Variabilität auf. Daher ist ein mögliches Kippen nur schwer vorhersagbar.

Auch andere vermutete Kippsysteme sind selbst wichtige Klimaregulatoren, die Einfluss auf das weltweite Klima ausüben. Die Permafrostböden im hohen Norden stellen beispielsweise wichtige Kohlenstoffspeicher dar. Gesunde Wälder und Moore können aktiv CO₂ aufnehmen. Sie sind also nicht nur Indikatoren für ein sich wandelndes Klima sondern beeinflussen selbst, wie es sich entwickelt.

Warnsignale deuten: Ein Kippen kündigt sich an

Ein Teil der Forschung widmet sich der Suche nach frühen Hinweisen auf das bevorstehende Kippen eines Klima- oder Ökosystems. Wissenschaftler:innen durchforsten zum Beispiel Beobachtungsdaten, um zu erkennen, ob ein System sich von äußeren Einwirkungen zunehmend schlechter erholt. Ein Waldgebiet, ein Korallenriff oder ein Berggletscher können sich nämlich nach einer Hitzeperiode von den Schäden erholen, wenn sie genug Zeit und günstige Bedingungen dafür haben. Folgen aber Hitzeperioden immer dichter aufeinander, bleibt nicht genug Zeit und die Rahmenbedingungen bieten mangelnde Ressourcen zur Erholung. Sinkende Resilienz, also nachlassende Widerstandskraft oder Kapazität zur Wiederherstellung, gilt als ein Warnsignal. Sie kann anzeigen, dass ein System droht, mehr oder weniger plötzlich umzukippen.

Wie viele Kippsysteme gibt es?

In der bisherigen Literatur verwenden Forschende verschiedene Definitionen für Kippsysteme im Klimasystem. Die Definitionen unterscheiden sich beispielsweise darin, ob Veränderungen nach dem Kippen als unumkehrbar angesehen werden und ob der Umschlag abrupt geschieht. Deshalb gibt es auch keine feste Anzahl bisher bekannter Kippelemente. Viele Erdsystemwissenschaftler:innen arbeiten daran zu erkennen, welche Teilsysteme der Erde Merkmale einer Kippdynamik aufweisen – sich also abrupt und potentiell unumkehrbar verändern könnten. Die Suche nach möglichen Kippelementen stützt sich auf drei wichtige Pfeiler: laufende Beobachtungen und aufgezeichnete Daten, paläontologische und geologische Befunde sowie computergestützte Modelle von Teilen des Erdsystems. So betrachten Forschende den gegenwärtigen Zustand eines Teilsystems der weltweiten Klimas, können gegebenenfalls Teile seiner vergangenen Entwicklung rekonstruieren und versuchen, Einblicke in mögliche Zukünfte zu gewinnen.

Begriffsgebrauch in der Kommunikation

Kippunkte sind in der Klimadebatte zu einem zentralen, aber auch viel diskutierten Begriff geworden. Die Forschung dazu ist vergleichsweise jung und Erkenntnisse vorläufig. Was wir sicher wissen, ist, dass Prozesse im Klimasystem mit schwer vorhersagbarer Dynamik auf Einflüsse reagieren können. Die Annahmen über mögliche Kippunkte basieren zum Teil auf Belegen aus der erdgeschichtlichen Vergangenheit und weitgehend auf computergestützten Modellierungen von Teilen des Erdsystems. Dabei sind viele Prozesse und ihre Interaktionen nur teilweise beschrieben und Rückkopplungseffekte oder verzögerte Reaktionen zu wenig verstanden, um die zeitliche Abfolge und Auswirkungen von Veränderungen verlässlich vorherzusagen.

Klar ist, dass sich Lebensräume für Mensch und Umwelt durch die Erderwärmung dramatisch wandeln können.

- Kippunkt: Kritischer Schwellenwert dessen Überschreiten zu oft abrupten, teils unumkehrbaren Veränderungen führt
- Kippsystem: Bezeichnet generell Systeme, die durch äußere Einwirkungen oft abrupt in einen teils unumkehrbaren Zustand übergehen, z. B. ein kippender Stuhl.
- Kippelement: Der Begriff wurde in der Kommunikation über Kippsysteme innerhalb des Erdsystems geprägt. Ein Kippelement bezeichnet i. d. R. einzelne Teile des Klimasystems, die bei Überschreiten eines bestimmten Schwellenwerts oft abrupt in einen teilweise unumkehrbaren Zustand übergehen, beispielsweise der Regenwald oder Eisschilde.

Der Wandel kann sich über kürzere oder längere Zeiträume vollziehen. Das heißt auch, die Folgen werden teilweise schon wir selbst, unsere Kinder und Enkel erleben; teilweise werden sie sich über Jahrtausende entfalten.

Kontroversen gibt es darüber, was die Kommunikation über Kippelemente erreichen kann oder soll. Für viele Forschende steht das Anliegen im Vordergrund, umfassend und faktenbasiert über potentielle Risiken des Klimawandels zu informieren. Mit der Aufklärung verbinden sie oft einen Appell an Entscheidungstragende in Politik und Gesellschaft: der weiteren Erderwärmung mit allen Mitteln vorzubeugen und uns zeitig auf veränderte Lebensbedingungen einzustellen.

Viele Veränderungen des Klimas laufen graduell ab. Deren Auswirkungen sind dramatisch genug, um sofortiges Handeln zu fordern. Es ist aber auch wichtig, ein Verständnis für nicht-linearer Abläufe zu schaffen, die im Klimasystem auftreten. Dabei kann das Konzept der Klima-Kippunkte helfen, meint Gerrit Lohmann. „Auch wenn wir Kippunkte nicht exakt vorhersagen können, verdeutlichen sie, wie abrupt tiefgreifende Klimaänderungen eintreten können“, sagt er. „Und ist ein Kippunkt einmal erreicht, haben wir die Möglichkeit verloren, uns schrittweise an veränderte Lebensbedingungen anzupassen.“ Das Konzept macht also klar, wie wichtig es ist, sich frühzeitig und vorausschauend mit klimatischen Veränderungen auseinanderzusetzen. „Es zeigt, dass das Erdsystem verletzlich ist, dass Folgen des Klimawandels sich über viele Generationen auswirken und dass frühes entschlossenes Handeln den größten Unterschied macht.“

Gleichzeitig gilt es bei der Kommunikation über Klima-Kippunkte sorgfältig abzuwägen. Im schlimmsten Fall ist zu befürchten, dass die Vorstellung abrupten und unaufhaltsamen Veränderungen Menschen in eine Schockstarre versetzt. In der Resignation könnten sie dann tatenlos verharren.

Auch das Gegenteil ist nicht hilfreich: Menschen wähnen sich und die Erde in einem sicheren Bereich, solange nicht ein Kipppunkt erreicht ist. „Den sicheren Bereich haben wir aber schon längst verlassen“, sagt Gerrit Lohmann. Mehr denn je ist es jetzt entscheidend, gesellschaftliche Kräfte zu mobilisieren und zu bündeln, um jeglichen weiteren Klimaveränderungen entgegenzuwirken – unabhängig davon, ob sie schlagartig oder schrittweise eintreten.

Eine klare und transparente Kommunikation über Risiken des Klimawandels kann Staaten und Kommunen darin unterstützen, Infrastruktur, Planung und gesellschaftliche Praktiken rechtzeitig anzupassen – bevor Handlungsoptionen unwiederbringlich verloren gehen. Klar ist, dass jede Erderwärmung das Risiko für schwere, unabsehbare und teils unumkehrbar Folgen erhöht und die Menschheit sich jetzt mit Anpassungen an klimatische Veränderungen auseinandersetzen muss. „Wir sollten mehr konkrete Szenarien der Zukunft beschreiben“, meint Lohmann, „um konkrete Handlungsoptionen entwickeln zu können.“

Kipppunkte in Technologie, Wirtschaft, Gesellschaft

Im Diskurs geht es aber nicht allein um Kipppunkte des natürlichen Klimasystems. Kipppunkte gibt es auch in anderen Lebensbereichen, die für den Klimaschutz entscheidend sein können: in der Entwicklung neuer Technologien, in wirtschaftlichen und in gesellschaftlichen Verhältnissen. Die Entwicklung einer neuen Technologie kann beispielsweise einen Kipppunkt überschreiten, sobald essentielle Komponenten massenweise hergestellt werden. Das ist im Fall von Solarzellen oder auch Batterien zu beobachten. Je mehr Menschen an der Herstellung beteiligt sind und je größer die hergestellten Stückzahlen, desto schneller wachsen Erfahrungswissen und Kompetenzen in den Produktionsprozessen. Die Abläufe werden effizienter und somit kostengünstiger. Schritt für Schritt nähert sich die Technologie dadurch einem weiteren Kipppunkt – dem ökonomischen. Ist eine neue Technologie zum gleichen Preis erhältlich wie die, die sie ersetzen soll, ist ihre Verbreitung oft nicht mehr aufzuhalten und sie löst die ältere ab.

Selbstverstärkende und sektorübergreifende Effekte

Selbstverstärkende Mechanismen spielen – wie auch im Klimasystem – eine wichtige Rolle dabei, technologische und wirtschaftliche Entwicklungsprozesse an einen Kipppunkt zu

bringen. Wird die Herstellung von Solarplatten in einem Unternehmen beispielsweise mit Strom aus eigenen Solaranlagen betrieben, wird sie nicht nur klimafreundlicher – es sinken auch die Produktionskosten. Mehr Solarzellen werden produziert und günstiger verkauft. Das fördert die Nachfrage und immer mehr Strom wird aus Sonnenenergie gewonnen. Außerdem wirken sektorübergreifende Effekte, zum Beispiel zwischen Energie- und Mobilitätssektor: Elektrofahrzeuge können die Energieinfrastruktur als mobile, flexible Stromspeicher ergänzen. So begünstigen sie die Nutzung von Wind- und Sonnenenergie, die abhängig von Tageszeit und Wetter verfügbar sind. Je mehr E-Fahrzeuge als temporäre Speicher dienen, desto leichter kann mehr Energie aus klimafreundlichen Quellen zum Einsatz kommen und desto klimafreundlicher wird auch Mobilität.

Regierungen sind gefordert, aktiv nach klima- und umweltfreundlichen Innovationen Ausschau zu halten und deren Entwicklung, Markteintritt und Verbreitung gezielt zu fördern. Vielversprechend sind dabei etwa modulare Systeme wie Solarzellen, deren Einsatz inzwischen fast beliebig skaliert werden kann. Ob am Einfamilienhaus, im Block- oder zentralen Kraftwerk: Die Komponenten für die Stromerzeugung sind im Grunde die gleichen.

Wenn das Neue normal wird

Neben technologischen und wirtschaftlichen werden auch soziale Kipppunkte erforscht. Der Begriff beschreibt Momente, in denen Änderungen in Normen, Einstellungen oder Verhalten in Gruppen oder ganzen Gesellschaften so weit reichen und so tief greifen, dass gängige Praktiken sich nachhaltig wandeln können. In der Regel braucht es dafür einen kritischen Anteil von Menschen, die eine neue Technologie, Lebensweise oder auch Perspektive annehmen. Nutzen etwa 20 Prozent einer Gesellschaft eine Technologie, ist oft eine Schwelle überschritten und die Mehrheit nimmt die Neuheit ebenfalls an. Ob das geschieht, ist unter anderen abhängig von der Kommunikation mit und der Wahrnehmung von sogenannten Early Adopters – der risikofreudigeren Minderheit, die innovative Ideen als erste ausprobiert. Wird ihr Verhalten in der Gesellschaft als positiv und nachahmenswert wahrgenommen, hat das Neue eine gute Chance, vom Außergewöhnlichen zum neuen Normalen zu werden. Positive soziale Kipppunkte, etwa hin zu überwiegend pflanzenbasierter Ernährung, könnten helfen, dem fortschreitenden Klimawandel etwas entgegenzusetzen. Entscheidend dafür wird sein, besser zu verstehen, wie sich soziale Normen verändern und wie sie als Hebel wirken können, um klimafreundliches Verhalten in der Breite der Gesellschaft zu verankern.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



Prof. Dr. Gerrit Lohmann
Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und
Meeresforschung (AWI)

Biosphäre: Lebenswelten am Rand ihrer Kräfte

Der Klimawandel verändert die Lebensbedingungen für Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen. Zusammen mit anderen menschlichen Eingriffen in die natürliche Umwelt bringt er ganze Ökosysteme an die Grenze ihres Überlebens. Diese Ökosysteme zeigen den Wandel nicht nur an, in gesundem Zustand können sie helfen, das Klima zu regulieren.

Der Klimawandel verändert die Lebensbedingungen für Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen. Zusammen mit anderen menschlichen Eingriffen in die natürliche Umwelt bringt er ganze Ökosysteme an die Grenze ihres Überlebens. Diese Ökosysteme zeigen den Wandel nicht nur an, in gesundem Zustand können sie helfen, das Klima zu regulieren.

Bakterien, Pilze, Pflanzen und Tiere besiedeln fast alle Teile der Erde, je nach Umgebung in ganz unterschiedlichen Konstellationen. Mit ihrer Umwelt formen sie Ökosysteme – Wälder, Böden, Küsten- oder Meeresstrukturen. Ökosysteme unterhalten die wesentlichen Stoffkreisläufe der Erde. Sie recyceln Grundstoffe des Lebens: Wasser als Lebensbasis schlechthin, Kohlen- und Sauerstoff als Energieträger oder Stickstoff und Phosphor als essentielle Nährstoffe. Zusammengenommen konstituieren die Ökosysteme die Biosphäre des Planeten.

In der Biosphäre findet sich die potentiell größte Anzahl von Kippelementen. Einige davon werden hier vorgestellt. Weil Lebewesen so mannigfaltige, komplexe Interaktionen untereinander und mit ihrer Umwelt unterhalten, ist es besonders knifflig, Dynamiken in der Biosphäre zu erkennen, zu beschreiben und vorherzusagen. Die Interaktionen in einem Ökosystem können zudem je nach äußeren Bedingungen sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Und dennoch – oder gerade deshalb – sind sie Garant für stabile Gleichgewichte. Wann ein Ökosystem im Gleichgewicht ist, wann es an Widerstandskraft gegen äußere Einflüsse verliert und wann es gar droht, in einen ganz neuen Zustand umzukippen – das versuchen Forschende genauer zu erkennen. Dafür brauchen sie detaillierte Beobachtungsdaten und belastbare Modelle der Zusammenhänge in den Ökosystemen.

Hier beschreiben wir einige wichtige Ökosysteme, die durch den Klimawandel gefährdet sind, ihre Stabilität zu verlieren und sich in völlig andere Landschaften zu verwandeln.

Der Amazonas Regenwald

Wohl das bekannteste Beispiel eines Ökosystems von globaler Relevanz ist der Regenwald des südamerikanischen Amazonasbeckens. Weitere tropische Regenwälder liegen in Südostasien sowie im westlichen und zentralen Afrika. Wissenschaftler:innen gehen derzeit davon aus, dass der Amazonas-Regenwald am stärksten gefährdet ist, in Folge des Klimawandels und menschlicher Ausbeutung abrupt in einen komplett anderen Zustand überzugehen.

Doch wie kommt es, dass der Regenwald am Amazonas besonders anfällig ist, sich schlagartig in einen anderen Landschaftstypen zu wandeln? Das liegt unter anderem daran, dass er einen großen Anteil seines Niederschlages selbst erzeugt. Über das Blätterdach verdunsten riesige Mengen Wasser, die oft in derselben Region wieder als Regen niedergeht. Wird der Wald in einer Region geschwächt, ob durch Abholzung oder aufgrund außergewöhnlicher Trockenheit, nimmt die Verdunstung über das Blätterdach ab. Es bilden sich weniger Wolken, die normalerweise einen Teil des Sonnenlichtes zurückstrahlen, sodass die betroffenen Flächen sich zusätzlich erwärmen. Aufgrund der geringeren Verdunstung und Wolkenbildung bekommen in Windrichtung gelegene Waldteile ebenfalls weniger Niederschlag. So können stellenweise Eingriffe in den Wasserhaushalt große Flächen in Mitleidenenschaft ziehen.

Entwaldung gilt als die Hauptursache für den Rückgang der Niederschläge über dem Amazonas-Regenwald. Die Regenwälder Asiens sind weniger anfällig für die Rückkopplung zwischen Trockenheit, geschwächter Verdunstung und Niederschlagsabnahme, weil sie mehr Feuchtigkeit von umliegenden Ozeanen erhalten. Und für bestimmte Regionen Zentralafrikas sagen Klimamodelle eher einen Anstieg der Niederschläge vorher, so dass der Regenwald hier weniger durch Dürre gefährdet ist.

in zweiter Rückkopplungsmechanismus betrifft die Feueranfälligkeit des Regenwaldes. Im gesunden Zustand hält das dichte Blätterdach der mehrschichtigen Vegetation so viel Feuchtigkeit in Bodennähe, dass praktisch kein brennbares Material im Wald liegt. Durch Holzeinschlag, Dürre und Brandrodung wird der Wald ausgelichtet. Mehr Sonnenlicht dringt zum Boden durch und trocknet die Schicht abgestorbener Blätter und Zweige. Gezielt gelegte Feuer breiten sich so leichter aus. Zurück bleiben ein stark ausgelichteter, fragmentierter Wald oder gar freie Flächen. Regelmäßige Feuer, oft illegal verursacht, halten die ehemaligen Waldflächen offen und dringen vom Waldrand her weiter in das Waldesinnere vor.

Weltweit steigende Temperaturen und Abholzung haben schon heute dazu geführt, dass der Regenwald im Amazonas seine Funktion als 'grüne Lunge der Erde' nicht mehr erfüllen kann. Seit einigen Jahren mehren sich die Anzeichen, dass er inzwischen mehr CO₂ freisetzt, als er im Zuge der Photosynthese aus der Atmosphäre bindet. Forschende betrachten einen Anteil von etwa 40 Prozent der Fläche als akut gefährdet, innerhalb der kommenden Jahrzehnte in einen Zustand lichter Wälder oder Savannen überzugehen. In der Folge könnten die betroffenen Flächen etwa 30 Gigatonnen Kohlenstoff freisetzen – ein Mehrfaches aller jährlichen menschgemachten CO₂-Emissionen.

Im Amazonasregenwald spielen verschiedene Faktoren zusammen: einerseits die Abholzung und Brandrodung durch den Menschen, andererseits der Klimawandel. Er verändert die Dynamik von Jahreszeiten und Niederschlägen. Eine Schwelle für unumkehrbare Umwandlung weiterer Teile des Regenwaldes sagen Forschende anhand verschiedener Modelle bei einer Erd Erwärmung zwischen 2°C und 6°C vorher. Ob und in welchem Zustand er erhalten bleibt, hängt maßgeblich davon ab, wie Regierungen, wirtschaftliche Interessengruppen und Verbraucher:innen sich jetzt verhalten. Um das drohende Umkippen in

einen weniger produktiven Zustand zu verhindern und um den Amazonasregenwald möglichst zu regenerieren, ist es absolut notwendig, CO₂-Emissionen sehr schnell stark zu reduzieren. Zudem muss die Abholzung eingedämmt werden.

Einer der Haupttreiber der laufenden Flächenumwandlung ist die Ernährung der Menschen: Regenwald wird geopfert, um Weideflächen für Rinder und Anbauflächen für Soja zu gewinnen. Soja wiederum wird als Futter für Schweine, Geflügel und Rinder verwendet. Das steigende Interesse der Verbraucher:innen für ökologische Aspekte von Ernährungsweisen kann zu einem positiven gesellschaftlichen Kipppunkt führen, von dem an eine schnell wachsende Mehrheit aller Menschen sich für fleischarme oder -lose Ernährung entscheidet. Ihr Konsumverhalten befördert entsprechende Entscheidungen auf der Ebene von Investoren und großen Agrarunternehmen, die für die Zukunft des Amazonasregenwaldes die Weichen stellen können. Verstärkte Wiederaufforstung kann dem Wald zudem helfen, sich zu regenerieren. Innerhalb weniger Jahrzehnte können junge Bäume nachwachsen, über deren Blätter Wasser verdunstet, so dass sich der regionale Wasserkreislauf Stück für Stück wieder schließt. Nationale und internationale Politik sollte einen Wandel in Richtung ressourcenschonender Nahrungsmittelproduktion und Ernährungsweisen fördern, lokale Landwirt:innen darin unterstützen, ihren Lebensunterhalt auf nachhaltige Weise zu sichern und Aufforstungsvorhaben vorantreiben.

Boreale Nadelwälder

Hoch im Norden liegen die borealen Nadelwälder wie ein Gürtel um den Globus. Sie erstrecken sich über weite Teile Kanadas und Alaskas, Russlands und Skandinaviens. Die ausgedehnten Wälder sind Heimat für Elche, Bären und Wölfe oder auch das Waldbison. Holzabbau und Ölförderung haben die borealen Wälder stark geschädigt und Lücken in das Ökosystem gerissen. Große Teile sind durch menschliche Aktivitäten überbeansprucht.

Die Auswirkungen des Klimawandels machen sich besonders deutlich an den südlichen Säumen dieser Wälder bemerkbar. Veränderte Windmuster und Feuchtigkeitstransport fördern Trockenheit und in der Folge intensive Waldbrände. Grundsätzlich stellen Waldbrände einen natürlichen Verjüngungsmechanismus dieser Wälder dar. In den vergangenen Jahrzehnten haben die Feuer jedoch an Ausbreitung und Intensität gewonnen und sind derart häufig aufgetreten, dass die abgebrannten Gebiete sich nicht mehr erholen. Nach heftigen Bränden, wie sie beispielsweise im Jahr 2021 auf großen Flächen Sibiriens

oder in 2023 in weiten Teilen der kanadischen Wälder auftraten, bleibt die Landschaft nachhaltig verändert. Häufigere, anhaltende Trockenheit und schwere Stürme erschweren es den abgebrannten Wäldern, sich zu erholen. Und die klimatischen Veränderungen begünstigen nicht selten die Ausbreitung von Schadinsekten, für die geschwächte Bäume leichte Beute sind.

Die fehlende Baumbedeckung beeinträchtigt Luftströmungen in Bodennähe und die Verdunstung über die Baumkronen fällt weg. Einerseits bildet sich dadurch mehr Wärme – ein Mechanismus, der Jahrzehnte lang nachwirkt. Gleichzeitig legt das Waldsterben meistens Flächen frei, die mehr Sonnenlicht reflektieren als die dunklen Baumkronen. Die höhere Rückstrahlkraft dieser Flächen, Albedo genannt, sorgt für Abkühlung und wirkt der Erwärmung des Bodens entgegen. Die natürliche Thermoregulation des Waldes gerät völlig aus dem Takt.

Die verschiedenen Störungen des Ökosystems können sich also gegenseitig verstärken oder auf komplexe Art und Weise miteinander interagieren. Klar ist: Die Regenerationsfähigkeit des Waldes ist deutlich geschwächt, nachwachsende Sämlinge können sich unter den neuen Bedingungen nicht etablieren. So kann es schlagartig zum Wechsel in einen baumfreien Zustand großer Gebiete kommen. Eine Temperaturschwelle für den unumkehrbaren Wandel der südlichen Teile borealer Wälder sagen Forschende anhand verschiedener Modelle zwischen 1,4°C und 4°C globaler Erwärmung vorher. Diese Vorhersagen sind mit großen Unsicherheiten verbunden, weil die verschiedenen Auswirkungen des Klimawandels und anderer menschlicher Einflüsse auf komplexe Art miteinander interagieren, biogeophysikalische Effekte wie Albedo und Verdunstung sich gegenseitig beeinflussen und nicht alle Zusammenhänge erforscht sind.

An den nördlichen Rändern vieler borealer Waldgebiete kommt es unterdessen zu einer Verschiebung der Baumgrenze nach Norden. Bäume und Sträucher breiten sich in die angrenzende arktische Tundra aus – Forschende sprechen von 'shrubification' oder Verbuschung der ursprünglich baumfreien Landschaften. Begünstigt wird die Ausbreitung von waldartiger Vegetation durch das stellenweise Tauen der Permafrostböden. Mit Blick auf Artenzusammensetzung und Stabilität der natürlichen Offenlandgebiete birgt die Ausweitung des Waldareals nach Norden ihre eigenen ökologischen Folgen. Den Baumverlust in den südlichen Gebieten der borealen Wälder gleicht sie dabei nicht aus.

Offene Landschaften

Dass offene Landschaften wie die Tundra vom Klimawandel ähnlich beeinträchtigt sind wie etwa Regenwälder, ist weit weniger bekannt. Forschende sehen aber auch in den Trockengebieten und Graslandschaften der Erde zum Teil deutliche Anzeichen für möglichen abrupten Wandel.

Niederschlagsarme Trockengebiete machen über zwei Fünftel der Landoberfläche der Erde aus und beheimaten große Teile der Bevölkerung Afrikas, Asiens und auch Nordamerikas. Teilweise sind sie waldbedeckt, andernorts von Graslandschaften geprägt und zum Teil landwirtschaftlich genutzt. Da Niederschlagsmuster sich im Zuge des Klimawandels vielerorts drastisch verändern, drohen sie großflächig an Bodenqualität und Fruchtbarkeit einzubüßen oder gar zu Wüsten zu veröden.

In den tropischen und subtropischen Gebieten der Erde bilden Savannen häufig den natürlichen Übergang zwischen Regenwald und Wüste: Graslandschaften mit vereinzelt Bäumen und einer ausgeprägten Regen- und Trockenzeit. Gräser und krautige Pflanzen dominieren die Vegetation, regelmäßige natürliche Brände sorgen für Verjüngung und limitieren den Baumbestand. Dieses natürliche Regime ändert sich mit großflächiger Beweidung von Savannenflächen sowie mit dem gewollten Feuerschutz, der damit einhergeht. Fassen Bäume und Sträucher erst einmal Fuß, verhindern sie, dass Feuer sich wie bisher in den weiten Grasflächen ausbreitet. Sie begünstigen somit ihre eigene Vermehrung. Dieser sich selbst verstärkende Effekt kann dazu führen, dass die Landschaft einen Wandel durchmacht, der nicht ohne weiteres umkehrbar ist: Ab einem gewissen Baumbestand könnte die natürliche Feuerdynamik unwiederbringlich durchbrochen werden und der Wald Überhand nehmen. In bestimmten Regionen Afrikas können zunehmende Regenfälle, die der Klimawandel mit sich bringt, die Ausbreitung von Wäldern in die Savanne zusätzlich begünstigen.

Auch wenn 'mehr Wald' auf den ersten Blick wie etwas Gutes klingen mag, entsteht durch das Vordringen von Gehölzen in die Savanne ein 'Wald an der falschen Stelle'. Denn ein eigenes artenreiches und produktives Ökosystem geht verloren. Die Savanne ist legendärer Lebensraum von Pflanzenfressern wie Zebra, Giraffe, Elefant und Nashorn, Jägern wie Löwe und Leopard sowie aasfressenden Hyänen und Geiern. Deren Lebensraum ist durch menschliche Landnutzung bereits massiv beschnitten und gerät mit dem Klimawandel unter immer stärkeren Druck. Wandeln sich Savannen stellenweise

oder großflächig in bewaldete Flächen, sind die Folgen bisher weitgehend unabsehbar. Die Bodenqualität und -struktur, der Wasser- und Kohlenstoffhaushalt und die Artenzusammensetzung der ursprünglichen Landschaft würden sich weitreichend verändern. Es lohnt sich deshalb zum Beispiel, bei Aufforstungsprojekten, die Klimaschutz versprechen, genau hinzusehen. In der Vergangenheit wurde mit Pflanzungen von fremden Baumarten in ungeeignete Umgebung bereits wertvoller Lebensraum zerstört.

Warmwasserkorallen

Sie sind nicht nur wunderschön anzusehen, sondern auch unverzichtbarer Bestandteil der maritimen Flora und Fauna: Korallenriffe. Genau genommen betrachten wir hier Steinkorallen der warmen Küstengewässer, die in tropischen und subtropischen Regionen der Erde vorkommen. Die eher an Quallen erinnernden Nesseltiere bilden Kalkskelette, aus denen über Jahrtausende die berühmten Riffe anwachsen. Korallenriffe im Indopazifik, entlang der Ostküste Australiens sowie vor Zentralamerika stellen die Nahrungsgrundlage für Millionen von Menschen bereit. Zudem schützen sie Küsten vor Hochwasser. Und nicht zuletzt sind sie touristische Attraktionen, die den Lebensunterhalt für Menschen in vielen Regionen sichern kann, wenn sie behutsam bewirtschaftet und vermarktet wird.

Wegen der bunten Vielfalt an Arten, die sie beherbergen, werden Korallenriffe oft die tropischen Regenwälder der Meere genannt. Sie bieten Kinderstube und Speisekammer für tausende von Tier- und Pflanzenarten. Das blühende Leben in den Korallenriffen steht dabei im krassen Kontrast zur Nährstoffarmut der Gewässer, in denen sie gedeihen. Erst nach und nach lüftet die Wissenschaft das Geheimnis, wie Korallen in diesen Gewässern leben und den Grundstock eines außergewöhnlich artenreichen Lebensraums etablieren können. Etwa ein Viertel aller Meeresbewohner sind zumindest für einen Teil ihres Lebenszyklus auf dieses Habitat angewiesen. Eben in der einzigartigen Vielfalt der Interaktionen mit verschiedensten Organismen scheint der Schlüssel zum Erfolg der Korallen zu liegen. Winzige Algen produzieren mittels Photosynthese energiehaltige Kohlenhydrate, die sie im Austausch gegen Schutz und Nährstoffe mit den Korallen teilen. Bakterien, die auf den Korallen leben, versorgen ihre Gastgeber mit lebenswichtigen Stickstoffverbindungen. Weichtiere wie Schnecken und Seeigel halten die Riffe frei von Algenbewuchs, so dass die symbiotischen Mikroalgen genug Sonnenlicht für die Photosynthese bekommen. Fische ernähren sich von den

Weichtieren und stellen selbst die Nahrung für größere Jäger wie Haie dar.

Doch das Gleichgewicht, in dem all diese verschiedenen Organismen miteinander leben, ist anfällig für Störungen. Menschgemachte CO₂-Emissionen beeinträchtigen gleich zwei wichtige Faktoren der Stabilität von und in Korallen-basierten Ökosystemen: Der Treibhauseffekt erwärmt die Ozeane; und durch die Aufnahme von CO₂ aus der Luft wird das Meerwasser immer saurer.

Warmwasserkorallen gedeihen nur in einem Temperaturbereich von etwa 20 bis 29 Grad Celsius. Wird es auch nur etwas zu warm, zerbricht die Symbiose mit den Kohlenstoffliefernden Mikroalgen. Dauert der Zustand an, gehen die Korallen an Nährstoffmangel zugrunde. Mit den symbiotischen Algen verlieren die Riffe ihre Farbe, weshalb diese Reaktion auf Wärme als 'Korallenbleiche' bezeichnet wird. Der steigende Säuregehalt verändert die Chemie des Meerwassers. Er erschwert den Nesseltieren den Aufbau ihres Kalkskeletts – man denke nur an den kalklösenden Effekt von Essigreiniger.

Ein Riff braucht viele Jahre, um sich vollständig von einer Bleiche zu erholen. In den letzten Jahrzehnten folgten die Hitzeereignisse aber in immer kürzeren Abständen aufeinander. Und der Säuregehalt des Meerwassers steigt weltweit stetig an. Neben der Erwärmung und Versauerung des Meerwassers beeinträchtigen eine Vielzahl von lokalen und regionalen Faktoren das Überleben und die Regeneration von Korallenriffen. Überfischung reißt Lücken in die fein austarierte Nahrungskette. Küstennahe Bauaktivitäten oder Erosion nach Entwaldung schwemmen Sedimente in die Riffe, die den Energie- und Nährstoffhaushalt der Korallen stören. Chemische Verschmutzung und Plastikmüll kommen hinzu und können einzelne Organismen, Bestände von Arten oder Teile des Ökosystems stark schädigen. Zusammengenommen können diese Einflüsse dazu führen, dass das gesamte Ökosystem aus der Balance gerät.

Forschende beobachten, dass Korallenriffe im lokalen bis regionalen Maßstab unwiederbringlich absterben. Es braucht ein Mindestmaß an Ausdehnung sowie an Artenreichtum, damit ein Riff – oder ein Abschnitt davon – sich von einer Krise erholen kann. An vielen Orten sind diese Grenzen unterschritten. Erholt sich ein Riff über zehn Jahre lang nicht, bewerten Forschende das Ökosystem als kollabiert. Im Laufe der vergangenen 50 bis 150 Jahre sind etwa die Hälfte aller weltweiten Warmwasserkorallenriffe verloren gegangen. Etwa 44 Prozent der verbliebenen Korallen mussten nach wissen-

schaftlicher Einschätzung bereits 2005 unter suboptimalen Umgebungsbedingungen bestehen. Ob die Erwärmung und Versauerung der Ozeane zu einem weltweiten Kipppunkt für Warmwasserkorallen führen werden, ist unklar. Verschiedene Korallenarten und die regionalen Ökosysteme unterscheiden sich in ihrer Empfindlichkeit. Forschende sagen auf Basis der bisherigen Beobachtungen und computergestützter Berechnungen einen großflächigen Verlust von Riffen schon bei einer globalen Erwärmung von 1,5°C vorher. Bei einer Erderwärmung von 2°C rechnen sie mit dem quasi vollständigen Kollaps der Ökosysteme, deren Basis die Warmwasserkorallen bilden. Angesichts der beobachteten Bleichen der vergangenen Jahrzehnte ist zu befürchten, dass einzelne Riffregionen ihren Kipppunkt bereits überschritten haben.

Wenig erforscht ist andererseits die Fähigkeit verschiedener Korallenarten, sich an wärmere Temperaturen anzupassen. Zudem leiden Korallenriffe an vielen Stellen stark unter dem Druck lokaler Faktoren wie Verschmutzung oder Überfischung. Gerade darin liegt auch eine gute Nachricht: Lokale Maßnahmen zum Schutz der Riffe politisch und gesellschaftlich durchzusetzen ist wesentlich leichter, als internationale Verständigung über weltweite Klimaziele zu erreichen. Und es gibt hervorragende Beispiele dafür, wie Korallenriffe vor dem Untergang gerettet wurden – zugunsten der vielen Tier- und Pflanzenarten wie auch der Menschen, die von und mit ihnen leben.

Küstennahe Meeresökosysteme

Neben Korallenriffen gibt es weitere Meeres- und Küstenökosysteme, von denen Forschende vermuten, dass sie im Zuge des Klimawandels in einen alternativen Zustand übergehen und damit dauerhaft an Vielfalt und Funktion einbüßen könnten. Dazu gehören Seetangwälder, die in ruhigen, seichten und klaren Küstengebieten aller Ozeane gedeihen können. Auch ihnen setzen die Erwärmung und Versauerung der Meere zu. Meeresstürme, die an Intensität zunehmen und in vielen Regionen häufiger auftreten, können einen Tangwald zudem schwächen oder gar zerstören. Vielerorts gerät außerdem die Nahrungskette aus dem Gleichgewicht. Erwärmt sich das Wasser, gedeihen Seeigel besser und fressen die Tangwälder radikal ab. Wo zudem Fressfeinde der Seeigel, wie Seeotter oder Seesterne, unter den Druck der Erderwärmung geraten oder von Menschen gejagt werden, kann sich der Seetang oft nicht von so einer 'Fressattacke' erholen. Seegraswiesen und Mangrovenwälder leiden ähnlich unter den Veränderungen in Temperatur, Strömungen und Chemie

des Meerwassers wie Korallen und Seetang. Seegraswiesen können sich unter Wasser über weite Flächen ausbreiten. Sie stabilisieren den Meeresboden in Küstennähe, speichern große Mengen Kohlenstoff und produzieren Sauerstoff. Und sie bieten einer auf den ersten Blick vielleicht unerwarteten Vielfalt an Tieren Schutz und Nahrung. Seepferdchen haben hier neben Muscheln, Schnecken und Garnelen ihre Heimat. Seekühe, Meereschildkröten, Rochen, Wale und Haie finden reichlich Nahrung.

Mangrovenwälder finden sich an vielen Küsten in den Tropen und Subtropen. Salztolerante Baumarten gedeihen in den Brackwassern an Flussmündungen und Buchten und bilden einen speziellen Lebensraum im Grenzbereich zwischen Land und Meer. Der ist beliebt als Brut- und Aufzuchtort vieler Vögel, Reptilien, Fisch- und Insektenarten. Mit ihrem Wurzelwerk im Schllick des Gezeitenbereiches schützen Mangroven die Küsten zudem vor Sturmfluten ebenso wie vor Erosion.

Menschliche Eingriffe in natürliche Küstenstrukturen, Landnutzung und Wasserverschmutzung tragen neben dem Klimawandel zum Rückgang dieser Ökosysteme bei. Forschende erkennen auf regionaler Ebene Anzeichen für selbsterhaltenden oder abrupten Wandel. Und mit jedem Tangwald, jeder Seegraswiese, jedem Mangrovenwald, der verschwindet, geht ein wichtiger Teil der weltweiten Biosphäre zugrunde. Die Erde verliert wieder eine Kohlenstoffsенке, unzählige Pflanzen- und Tierarten verlieren ihr Habitat, wichtiger Küstenschutz für die Anrainerregionen fehlt.



© Petr / Adobe Stock

Für die Biosphäre gilt also wie für andere Teile des Planeten: Runter mit den Emissionen! Nur wenn der menschengemachte Ausstoß an Treibhausgasen zurückgeht, kann der unumkehrbare Wandel wichtiger Komponenten des Erdsystems in unproduktivere und sogar klimaschädliche Zustände noch verhindert werden. Die zweite entscheidende Säule für die Stabilität der Ökosysteme sind Anstrengungen zum Artenerhalt. Am Beispiel der Kippelemente in der Biosphäre wird am deutlichsten, wie eng verzahnt Klima- und Artenschutz miteinander sind. Nur wenn wir beide zusammendenken, können wir die Lebensbedingungen auf unserem Planeten erhalten.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



Prof. Dr. Josef Settele
Helmholtz-Zentrum für
Umweltforschung – UFZ

Kryosphäre: Wo drohen Lebenswelten aus Eis aufzutauen?

Welten aus Eis regulieren das Klima unserer Erde, sie speichern Süßwasser und beheimaten ihre ganz eigenen Ökosysteme. Der Klimawandel verändert die Dynamik der Eisevorkommen und damit vielerorts auch das Leben von Mensch und Natur.

Massive Eisschilde, schwimmendes Meereis, Gletscher oder Permafrostböden: Gefrorene Landschaften bilden die Kryosphäre der Erde. Sie reguliert wichtige Merkmale des weltweiten Klimas und Wasserhaushalts. Die mächtigen Eisschilde in Grönland und der Antarktis und die Meereisbedeckung strahlen zum Beispiel einen Teil des Sonnenlichtes zurück ins All und reduzieren so die Energieaufnahme der Erde. Auch Gletscher kühlen ihre Umgebung auf diese Art. Gletscher und Eisschilde speichern zudem fast drei Viertel des Süßwassers auf der Erde. Berggletscher dienen als wichtige saisonale und langfristige Wasserspeicher. Steigen im Frühjahr die Temperaturen, geben sie kostbares Süßwasser für die Tier- und Pflanzenwelt frei. Der Lebensunterhalt vieler Menschen und landwirtschaftliche Praktiken weltweit hängen von diesen Wasserspeichern ab.

Tief reichende Permafrostböden bilden in arktischen Breiten stabile Landschaften und eine Barriere für oberflächennahes Wasser. Wo sie tauen, gerät die Oberfläche buchstäblich ins Wanken und Rutschen, Mensch und Natur verlieren ihre Lebensgrundlage. Seen und deren winterliche Eisdecke, die in Permafrostgebieten eine wichtige Trinkwasserquelle darstellen, sind durch die Umbrüche gefährdet. Außerdem konservieren die gefrorenen Böden riesige Mengen organischen Materials aus vergangener Flora und Fauna. Die wärmeren Temperaturen erlauben Mikroorganismen, die uralten Kohlenstofflager abzubauen, wobei sie Treibhausgase wie beispielsweise Methan freisetzen. Diese tragen wiederum zur Erderwärmung bei.

Hier beschreiben wir einige Elemente der Kryosphäre, die aufgrund der Erderwärmung und verstärkender Mechanismen beim Überschreiten bestimmter Schwellenwerte einen neuen Zustand annehmen können.

Die Arktis: Grönländischer Eisschild und Meereis

Die Insel Grönland erstreckt sich zwischen dem 60. und dem 83. Grad nördlicher Breite vom Nordatlantik bis in den arkti-

schen Ozean. Seit über zweieinhalb Millionen Jahren sind Teile der Insel in wechselnder Ausdehnung mit Eis bedeckt. Über Jahrtausende türmen sich Niederschläge auf. Die Last des jährlich neu fallenden Schnees presst tiefere Schichten zu Eis zusammen. Auf diese Weise hat sich ein Eisschild gebildet, der heute vier Fünftel der Fläche Grönlands bedeckt und an den höchsten Stellen über drei Kilometer dick ist.

Seit über hundert Jahren beobachten und vermessen Wissenschaftler:innen den Eisschild. 1930 richtete eine Expedition um den Polarforscher Alfred Wegener die erste ganzjährig bewohnte Forschungsstation mitten auf Grönland ein. Tausende Meter tief haben Forschende seither in den Eisschild gebohrt, um ihm seine Jahrtausende alte Entstehungsgeschichte zu entlocken. Seit den 1980er Jahren erlauben satellitengestützte Messtechniken, die Dynamik der Eisschilde immer detaillierter zu erfassen. Denn auch wenn es auf den ersten Blick nicht so aussieht: Eisschilde sind ständig in Bewegung und verändern sich. Von oben türmen sich Jahr um Jahr neue Schneemassen auf, weiter unten entsteht Eis. Und aus dem Zentrum fließt das Eis ständig in Richtung der Küsten. An verschiedenen Stellen fließen mächtige Eisströme ins Meer. Wie Flüsse in Zeitlupe münden diese Auslassgletscher in den Ozean. Dort schmelzen sie und geben das aus dem Landesinneren transportierte Eis ins Meer ab.

Seit Jahrzehnten bemerken Forschende ein zunehmendes Abschmelzen, so dass im Mittel pro Jahr mehr Eis verloren geht als durch Schneefall hinzukommt. Aufgrund des Temperaturanstiegs, der in der Arktis drei bis viermal so stark wie im globalen Mittel ausfällt, schmilzt immer mehr Schnee in höheren Lagen. Liegt das Eis darunter frei, kommt ein verstärkender Effekt zum Tragen: Das dunklere Eis nimmt mehr Sonnenstrahlung auf als eine reflektierende weiße Schneeschicht und schmilzt deshalb schneller. Zudem können auf dem Eis Algen wachsen und die Oberfläche weiter verdunkeln. Das Reflexionsvermögen – oder die Helligkeit – einer Oberfläche wird als Albedo bezeichnet. Dieser Rückkopplungsprozess ist deshalb als Eis-Albedo-Feedback bekannt. Auch Ablagerungen von Ruß

und Feinstäuben aus Waldbränden und Industrieabgasen oder die Ausbildung von Schmelzwasserseen an der Oberfläche verringern die Albedo der Schneeschicht und verstärken so das Schmelzen.

Am schnellsten verliert der Eisschild an seinen Rändern an Mächtigkeit. Hier beschleunigt eine weitere Rückkopplung den Eisverlust: Wird der Eisschild dünner, sinkt seine Oberfläche in wärmere Luftschichten und schmilzt noch schneller. In den höheren Lagen maßen Forschende zwischen 2003 und 2019 dagegen stellenweise sogar mehr Schneefall. Auch das liegt an der Erwärmung der Arktis: Wärmere Luft kann mehr Feuchtigkeit aufnehmen und transportieren. So kommt es häufiger zu stärkeren Niederschlägen. „Die beobachtete Höhenzunahme des Eises ist aber nicht gleich einer Massenänderung“, erklärt Ingo Sasgen, Glaziologe am Alfred-Wegener-Institut. „Ein paar Jahre mit etwas mehr Schneefall sind nicht unbedingt relevant für die Gesamtmassenbilanz des Eisschildes.“ Die Eisverluste an den Rändern seien ohnehin weit größer, selbst ein möglicher Zugewinn an Masse im Landesinneren könne sie nicht ausgleichen. Ein Problem ist außerdem, dass statt Schnee immer häufiger Regen fällt. „Der kommt der Massebilanz des Eises nicht zugute – im Gegenteil, er verringert die Albedo der Oberfläche, so dass das Eis schneller schmilzt.“

Forschende zählen den grönländischen Eisschild zu den Kippelementen im weltweiten Klimasystem. Bei den sich abzeichnenden Entwicklungen der Durchschnittstemperaturen sei ein fortschreitendes Abschmelzen nicht auszuschließen, selbst wenn es uns gelänge, die Erwärmung langfristig zu stabilisieren. Über Jahrtausende würde Grönland nach und nach womöglich zum größten Teil eisfrei. Der Meeresspiegel könnte dadurch um über sieben Meter ansteigen. Und: Das freigesetzte Süßwasser verändert regionale und globale Meeresströmungen und hat weitreichende Auswirkungen auf das weltweite Klima.

Meereis: je wärmer, desto weniger

Der Eisbär auf einer Eisscholle – dieses Bild war und bleibt eine Ikone in der Kommunikation über Klimawandel. Denn in dem Maß, wie die Erde sich erwärmt, schmilzt den Eisbären ihr Lebensraum unter den Füßen weg. Tatsächlich nimmt das arktische Meereis, auf dem Eisbären jagen und viele Robbenarten ihre Jungen großziehen, seit Jahrzehnten an Ausdehnung und Dicke ab. Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird der Nordpol in den Sommermonaten voraussichtlich erstmals eisfrei sein.

Auch in der Wintersaison gefriert ein immer kleinerer Teil der Meeresoberfläche. Hier ist aber nicht in erster Linie die Ausdehnung, sondern die Dicke des Eises der entscheidende Faktor. Es ist jünger und weniger stabil. Ein Großteil des Meereises, das in den flachen Randmeeren des Arktischen Ozeans entsteht, schmilzt, bevor es die zentrale Arktis überhaupt erreichen kann.

Der Trend ist den bisherigen Erkenntnissen zufolge eindeutig, das heißt: Je wärmer es wird, desto weniger Eis bildet sich im Winter und desto kleiner ist auch die gefrorene Fläche im Sommer. In geografisch bedingten Meerengen verzögert sich der Rückgang des Eises zunächst. Wo die Eisfläche auf dem offenen Arktischen Ozean liegt, schmilzt mehr Eis pro Jahr, weil es dem wärmeren Wasser ausgesetzt ist. Sollte sich die Erde in fernerer Zukunft wieder deutlich abkühlen, würde die Ausdehnung des Meereises auch wieder zunehmen.

Übrigens: Auch das antarktische Meereis nimmt ab. Seit etwa 2015 bildet sich im Südpolarmeer immer weniger Meereis – eine deutliche Trendumkehr im Vergleich zu den Jahrzehnten davor, in denen das Gesamtvolumen des jährlichen Meereises sogar zunahm. Aktuelle Studien lassen vermuten, dass dieser Rückgang einen abrupten Wandel des Klimasystems in der Antarktis anzeigt.

Antarktischer Eisschild: Im Westen unterspült

Der antarktische Eisschild liegt rund um den Südpol auf dem antarktischen Kontinent. Er ist ungleich älter als der grönländische und deutlich größer. Er entstand in einer dauerhaften Form vor etwa 34 Millionen Jahren. Heute ist er mit einer Fläche von etwa 14 Millionen Quadratkilometern rund acht Mal so groß wie der Eisschild Grönlands. An den höchsten Stellen erreicht er fast fünf Kilometer Dicke.

Den größten Teil des eisbedeckten Südkontinentes bildet die

Ostantarktis, nach Westen erstrecken sich die Westantarktis und die antarktische Halbinsel. Die Ost- und Westantarktis sind durch das Transantarktische Gebirge getrennt. So gliedert sich der Eisschild in drei Teile – den ostantarktischen und den westantarktischen Eisschild, und die Eisgebiete entlang der gebirgigen antarktischen Halbinsel. Sie sind derzeit unterschiedlich stark von der Erderwärmung betroffen, Veränderungen in den Temperaturen von Atmosphäre und Ozean spielen an verschiedenen Stellen eine Rolle.

Erhebliche Teile des westlichen Eisschildes liegen unterhalb des heutigen Meeresspiegels. Das Eis ruht weit unter der Wasseroberfläche auf dem geologischen Untergrund, nur ein kleiner Teil ragt aus dem Wasser. Über zahlreiche Gletscher und Eisströme fließt Eis zu den Rändern des Eisschildes und in das umliegende Meer. Verbunden mit dem Eisschild treibt es als mächtiges Schelfeis auf der Wasseroberfläche. Um die Antarktis herum finden sich eine Vielzahl ausgedehnter Schelfeisflächen. Sie säumen etwa die Hälfte des antarktischen Eisschildes, halten das nachfließende Eis zurück und verlangsamen dessen Abfluss.

Erwärmt sich aber das Wasser unter den Schelfeisflächen, beginnen sie von unten zu schmelzen und werden dünner. Ihre Rückhaltekraft nimmt ab, so dass das Eis immer schneller ins Meer abfließt.

Je schneller es fließt, desto dünner wird der Gletscher landeinwärts. Ab einer bestimmten Dicke verliert das Eis den Kontakt zum Untergrund und schwimmt auf.

So löst sich der Eisschild von den Rändern aus zunehmend vom darunter liegenden Land und zieht sich zurück. Den Bereich, an dem das Eis noch Kontakt zum Untergrund hat, nennt man Aufsetzlinie. Das warme Ozeanwasser folgt der zurückweichenden Aufsetzlinie. Besonders ausgeprägt ist das Zurückweichen dort, wo der Untergrund zum Landesinneren hin abfällt. Dort zieht sich der Eisschild in immer tiefer unterhalb des Meeresspiegels liegende Gebiete zurück.

Von unten schmilzt nun das wärmere Wasser zunehmend das Eis, oben wird immer mächtigeres Eis in Richtung der Ränder nachgeschoben – die Schmelze und der Eistransport nehmen Fahrt auf. Der Eisstrom beschleunigt sich, je weiter die Aufsetzlinie ins Landesinnere vorrückt. Dieser sich selbst verstärkende Vorgang wird als Marine Ice Sheet Instabilität (MISI) bezeichnet und bereitet Polarforschenden große Sorgen. Modellgestützte Vorhersagen und paläontologische Belege

deuten darauf hin, dass er jenseits einer bestimmten Erwärmung im umgebenden Ozean nicht mehr aufzuhalten ist.

Während der grönländische Eisschild vorwiegend aufgrund der steigenden Lufttemperaturen schmilzt, wird dem antarktischen Eis die Erwärmung des Ozeans und der schnellere Abtransport des Eises zum Verhängnis.

Insbesondere der westantarktische Eisschild, der auf tieferen Landmassen aufliegt, verliert seit Jahrzehnten an Masse. Die Westantarktis gilt bereits bei der heutigen Erwärmung als besonders anfällig für langfristig selbstverstärkenden Eisverlust. Sollten das Schelfeis und der Eisschild der Westantarktis vollständig abschmelzen, stiege der Meeresspiegel weltweit um drei bis vier Meter. Der fortschreitende Eisverlust verändert zudem die Albedo, Ozeantemperaturen und Strömungen auf und um den antarktischen Kontinent. Ganze Ökosysteme geraten unter Druck, weil ihnen das Eis als Lebensraum fehlt und die Temperaturen und Nährstoffgehalte der Gewässer sich verändern. Die Folgen werden in den Nahrungsnetzen der weltweiten Ozeane und Küstengebiete spürbar.

Ostantarktis: Eisschild und darunter liegende Becken

Der Eisschild der Ostantarktis liegt größtenteils über dem Meeresspiegel auf dem Kontinent auf. Doch auch er hat Schwachstellen gegenüber der ozeanischen Erwärmung: ausgedehnte, unter dem Meeresspiegel liegende Senken. Zu ihnen zählt das Wilkes-, Aurora- und das weiter westlich gelegene Recovery-Becken. Anhand von Satellitenaufnahmen und Sondenmessungen beobachten Forschende, wie warmes Meerwasser stellenweise in diese Senken eindringt.

Die Eisschilde von Grönland, der Westantarktis und der Ostantarktis gelten als Kern-Kippelemente des globalen Klimasystems. Während Grönland und die Westantarktis schon bei den heutigen Temperaturen empfindlich reagieren, würde ein vollständiger Zusammenbruch des ostantarktischen Eisschildes erst bei einer anhaltenden globalen Erwärmung von etwa fünf Grad über vorindustriellen Niveau wahrscheinlich. Bis die gesamte Ostantarktis eisfrei wäre, würden Modellrechnungen zufolge mehr als zehntausend Jahre vergehen.

Einige tiefliegenden Becken des östlichen Kontinentes gelten allerdings bei einer Erwärmung von zwei Grad als instabil und könnten bei Überschreiten dieses Wertes langfristig eisfrei werden. Der Ostantarktische Eisschild könnte sich dann über viele tausend Jahre zurückziehen, deutlich langsamer als die Eisschilde der Westantarktis und Grönlands. Der gesamte Ostantarktische Eisschild enthält das Äquivalent von etwa 52 Metern Meeresspiegelanstieg. Einzelne Becken tragen dazu jeweils mehrere Meter bei. Ein vollständiges Abschmelzen würde Klima und Ökosysteme der Antarktis und weit darüber hinaus tiefgreifend verändern.

Berggletscher

Die Erderwärmung wird auch in kalten Höhenregionen der Welt immer deutlicher spürbar. Berggletscher, die in Hochlagen auf fast allen Kontinenten vorkommen, verlieren seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert weltweit an Masse. Seit den 1990er Jahren hat sich der Schwund deutlich beschleunigt. Im September 2025 machte der Watzmann in den Berchtesgadener Alpen traurige Schlagzeilen: Die Eiskapelle, eine berühmte Formation im Gletschereis, stürzte ein. Schneearme Winter und heiße Sommer hatten die Struktur in den letzten Jahren besonders geschwächt.

An vielen Gletschern wirken verstärkende Mechanismen wie die Kopplung zwischen Eisdicke und Höhenlage: Wird der Gletscher dünner, sinkt seine Oberfläche in immer wärmeren Luftschichten, was das Schmelzen weiter verstärkt. Taut der Winterschnee früh im Jahr oder fällt immer öfter Regen statt Schnee, wird dunkles Eis freigelegt. Es absorbiert mehr Strahlung als Schnee, was das Schmelzen beschleunigt. Aufgeheizter Fels und Geröll verstärken diesen Effekt lokal. Auch dünner Schutt auf der Oberfläche befördert das Schmelzen. Diese Effekte sind in den verschiedenen Erdregionen ähnlich und treten durch die Erwärmung zeitgleich auf. „Wenn es in den Höhenlagen keine Bereiche mehr gibt, die die Gletscher hangabwärts mit Eis versorgen, sind sie auf menschlichen Zeitskalen unwiederbringlich verloren“, sagt Glaziologe Ingo Sasgen. Gletscher beheimaten ganz eigene Ökosysteme und dienen Mensch und Natur als wichtige saisonale und langfristige Wasserspeicher. Mit dem Schwund der Gletscher verändert sich die Lebenswelt vieler Tiere und Pflanzen, Arten gehen verloren. Der Wasserhaushalt und die Versorgung vieler Menschen weltweit mit Frischwasser ist gefährdet.

Permafrostböden: Lokales Tauen weltweit

Von Permafrost spricht man, wenn Böden mehrere aufeinander folgende Jahre dauerhaft gefroren sind. Permafrostböden machen etwa ein Sechstel bis ein Fünftel der Landfläche der Nordhalbkugel aus. Sie finden sich vor allem in Russland, aber auch in Kanada, den USA (Alaska), in Norwegen und Grönland sowie auf der tibetischen Hochebene. In der Regel tauen die oberflächennahen Schichten (sogenannte Auftauschichten) in warmen Monaten des Jahres auf. Darunter können die Böden je nach Region bis zu mehrere hundert Meter und im zentralen Teil Jakutiens bis zu 1.500 Meter tief gefroren sein.

Je nach Beschaffenheit des Untergrundes reagieren Permafrostböden sehr unterschiedlich auf Erwärmung. Auf lokaler und regionaler Skala beobachten Forschende Anzeichen abrupten Tauprozesse. Wo massives Eis im Boden eingeschlossen ist – in Hohlräumen oder keilförmig in Bodenspalten – kann die Oberfläche in Folge des Abschmelzens stark einsinken. Es bildet sich eine ungleichmäßige Landschaft aus Gräben, Tümpeln und großen Seen. Weil das sich sammelnde Oberflächenwasser Wärme in den Boden leitet, beschleunigt sich das Abtauen des Permafrosts. In manchen Gegenden Sibiriens stellen solche plötzlichen Veränderungen schon jetzt viele Menschen und ganze Ökosysteme vor große Herausforderungen. Mit steigenden Temperaturen wird abrupter Wandel in der Landschaft einzelner Regionen wahrscheinlicher. Forschende



schätzen, dass solche selbstverstärkenden Prozesse auf einem Fünftel der arktischen Permafrostflächen auftreten könnten. Andere Flächen tauen Stück für Stück, umso tiefer je höher die globale Temperatur steigt.

Weltweit betrachtet taut der Permafrost, wenn auch stellenweise abrupt, in etwa im Gleichschritt mit dem Klimawandel. Die Sommer werden länger und die Winter reichen nicht immer aus, um die Auftauschicht wieder gefrieren zu lassen. Ob abrupt oder graduell: Mit dem Auftauen der Böden setzt der Abbau von Pflanzenresten ein, die der Dauerfrost konserviert hat. Dabei wird Kohlenstoffdioxid und auch Methan freigesetzt, das wiederum den Treibhauseffekt verstärkt.

Diese Rückkopplung wird als Permafrost-Kohlenstoff-Klima Feedback bezeichnet. Allein die oberen drei Meter der gefährdeten Böden enthalten mehr Kohlenstoff als die gesamte heutige Atmosphäre. Und die mikrobiellen Abbauprozesse erwärmen den Boden und könnten das Tauen noch beschleunigen. Wie stark die Rückkopplung tatsächlich ausfallen wird und über welche Zeiträume das Tauen voranschreiten könnte, ist jedoch unsicher. Zusammengefasst weisen derzeitige Befunde darauf hin, dass das Tauen der Permafrostböden auf globaler Skala im Verhältnis zum Anstieg der Temperaturen erfolgen wird. Ein weltweites abruptes, unaufhaltsames Tauen halten Forschende eher für unwahrscheinlich. Sollte es eintreten, tauen die Permafrostregionen im Norden wesentlich schneller auf, als die oben beschriebenen Eisschilde. Über wenige Jahrzehnte bis Jahrhunderte könnten sie unwiederbringlich verloren gehen.

Diese Beispiele aus der Kryosphäre zeigen: Die Eiskommen der Erde sind wichtige Lebensräume, regulieren das weltweite Klima und stellen essentielle Teile des Süßwasserkreislaufs dar. Die weltweit steigenden Temperaturen gefährden ihre Stabilität und an manchen Stellen drohen sie unwiederbringlich verloren zu gehen. Nur beherztes Handeln, um die Treibhausgasemissionen jetzt zu reduzieren, kann die empfindlichen Eiswelten zu bewahren helfen.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Dr. Klaus Grosfeld](#)

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und
Meeresforschung (AWI)



[Dr. Ingo Sasgen](#)

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und
Meeresforschung (AWI)



[Dr. Josefine Lenz](#)

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und
Meeresforschung (AWI)



[Dr. Marcel Nicolaus](#)

Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und
Meeresforschung (AWI)

Im Fluss: Meeres- und Luftströmungen der Erde

Strömungen in den Ozeanen und der Atmosphäre verteilen Wärme im Erdsystem. Sie verändern sich, weil die globalen Temperaturen steigen. Das hat weitreichende Einflüsse auf das Klima in verschiedenen Regionen der Welt.

Wasser und Luft, die fließenden Komponenten des Erdsystems, transportieren Energie und chemische Stoffe – zwischen Regionen des Planeten und zwischen verschiedenen Teilen des Ozeans und der Atmosphäre. Im Lauf der Erdgeschichte haben sie verschiedene Dynamiken angenommen. Seit etwa zehntausend Jahren gewähren die vorherrschenden Muster der Wärmeverteilung relativ stabile Bedingungen für das Leben von Menschen in vielen Regionen der Erde. Hier beschreiben wir einige dieser Dynamiken, die unter dem Einfluss menschlicher Aktivitäten drohen, aus dem Gleichgewicht zu geraten.

Wärmetransport im Atlantik

Unter Erdsystemwissenschaftler:innen ist die Atlantische Umwälzzirkulation ein rege diskutiertes Thema. Gerade im Jahr 2025 veröffentlichten mehrere Forschungsgruppen neue Erkenntnisse über die mächtige Meeresströmung, der West-europa sein beständig moderates Klima verdankt.

Die AMOC (engl.: Atlantic Meridional Overturning Circulation) treibt wärmeres Wasser aus dem Süden entlang der Westküste Afrikas und der östlichen Küsten Mittel- und Nordamerikas. Ein Arm dieser Meeresströmung ist der bekanntere Golfstrom, der warmes Wasser aus dem Golf von Mexiko entlang der Ostküste der USA und in Richtung Europa führt. Von der Wärme, die er transportiert, profitieren Länder wie Großbritannien, Nordfrankreich, die Beneluxstaaten und auch Deutschland. Auch die Monsunwinde und -regenfälle in westafrikanischen Regionen sind je nach Wärmetransport der AMOC unterschiedlich ausgeprägt.

Hoch im Norden sinkt abkühlendes Wasser in die Tiefe und strömt in Richtung Süden. Beständig wälzt die AMOC das Wasser des gesamten Atlantischen Ozeans um und prägt damit den Wärmehaushalt anliegender Erdgebiete. Angetrieben wird dieser Kreislauf von Unterschieden in Temperatur und Salzgehalt des Wassers von Ort zu Ort. Man spricht deshalb

auch von der thermohalinen Zirkulation. Während das Wasser an der Oberfläche in Richtung Norden strömt, kühlt es ab. Weil ein Teil verdunstet, wird das Salzwasser dabei aufkonzentriert. Je höher der Salzgehalt wird und je kühler das Wasser, umso dichter wird es und beginnt abzusinken.

In der Kälte des Nordatlantik kann sich zudem Eis an der Meeresoberfläche bilden. Beim Gefrieren wird das Salz aus dem Eis ausgeschlossen, so dass besonders salziges Wasser an der Oberfläche zurück bleibt. Im Nordatlantik, insbesondere südlich und westlich von Grönland, sinken große Mengen kaltes, stark salzhaltiges Wasser in tiefe Schichten des Ozeans. Dort strömt es südwärts und vereint sich im Südpolarmeer mit anderen Tiefenströmungen. So sind die globalen Meeresströmungen miteinander verbunden. In einem globalen Netzwerk zirkuliert das Wasser der Ozeane über Zeiträume von Jahrhunderten um die Erde.

Der von Menschen verursachte Klimawandel beeinflusst die Umwälzung des Atlantiks. Weil die Temperatur an der Oberfläche höher ist, kühlt das Wasser weniger stark ab und sinkt im Nordatlantik weniger schnell in die tieferen Schichten. Außerdem nimmt die wärmere Luft der Atmosphäre mehr Feuchtigkeit auf. Dadurch kommt es regional zu stärkeren Niederschlägen. Sie senken die Salzkonzentration des oberflächennahen Meerwassers. Nahe den Küsten Süd- und Westgrönlands verdünnt Schmelzwasser des grönländischen Eisschildes das Meerwasser. Allerdings ist bisher unklar, wie stark und in welchen Zeiträumen Schmelzwasser die AMOC direkt beeinträchtigt. Das hängt insbesondere davon ab, wie schnell das Eis schmilzt.

Weil die Forschung hierzu sehr aktuell und von öffentlichem Interesse ist, finden sich in den Medien immer wieder Titelzeilen der Art: „AMOC: Kollabiert sie, oder kollabiert sie nicht?“. Auf den ersten Blick können Forschungsergebnisse widersprüchlich erscheinen, insbesondere wenn sie auf Schlagzeilen reduziert werden. Klimaforschende diskutieren unter-

dessen rege, ob die vorhandenen Daten bereits Anzeichen einer durch menschliche Aktivitäten hervorgerufenen AMOC-Schwächung anzeigen – oder ob nicht. Direkte Beobachtungen der Strömungsstärke gibt es erst seit etwa 20 Jahren – zu kurz um sichere Aussagen über die langfristigen natürlichen Schwankungen zu erlauben (ein Umlauf der AMOC kann, je nach Route, mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern). Unser heutiges Verständnis der Strömungsdynamik stützt sich deshalb zusätzlich auf geologische und paläontologische Befunde sowie auf Computermodelle der Meeresströmungen und ihrer Treiber. Eine Schwierigkeit dabei liegt in der Vielfalt von Faktoren, welche die Dichte des Meerwassers bestimmen: vom Süßwassereintrag aus Niederschlägen und Eisschmelze über die Erwärmung der Meeresoberfläche bis hin zu Luftströmungen, die die Verdunstung beeinflussen. Diese Einflüsse interagieren miteinander. Und wenn die AMOC sich verändert, treten Rückkopplungen auf, die die Änderung verstärken oder hemmen können. Viele Schlüsselfaktoren sind noch immer unzureichend bekannt und wichtige Regionen der AMOC wenig erforscht; bisherige Messungen ergeben ein unvollständiges Bild. Hinzu kommt, dass – trotz Superrechnern – Computermodelle nicht alle Prozesse simulieren können.

Im Jahr 2025 wurden mehrere Studien veröffentlicht, in denen Forschende anhand von Computermodellen des Erdsystems und der Ozeane abzuschätzen versuchten, wie die AMOC sich zukünftig entwickeln wird. Eine der Studien beschreibt den drohenden Abbruch der Winterkonvektion im Nordatlantik: Wenn im Winter das Wasser nicht mehr hinreichend abkühlt, um in die Tiefe zu sinken, könnte die Umwälzung des Atlantiks innerhalb weniger Jahrzehnte zum Erliegen kommen. Andere Studien heben eher die Stabilität der AMOC hervor. Bestimmte windgetriebene Anteile der Zirkulation könnten beispielsweise aufrechterhalten bleiben, selbst wenn der Antrieb durch Temperatur und Salzgehalt deutlich abnimmt. „Diese Studien sind wichtig, um das grundsätzliche Verhalten der AMOC unter sich ändernden Klimabedingungen zu erforschen“, sagt Arne Biastoch, physikalischer Ozeanograph am GEOMAR Helmholtz-

Zentrum für Ozeanforschung. „Eine direkte Vorhersage über die Änderungen der AMOC in den nächsten Jahrzehnten ist aber auf ihrer Grundlage nicht möglich.“ Biastoch ist Mitautor einer Bewertung der Stabilität der AMOC, den die europäische Joint Programming Initiative (JPI) 'Oceans' und JPI 'Climate' im kommenden Jahr veröffentlichen werden.

Weitgehende Einigkeit herrscht darüber, dass der Wärmetransport entlang des Atlantiks bis zum Ende dieses Jahrhunderts spürbar schwächer werden wird. Das würden Menschen in weiten Teilen der westlichen Welt deutlich zu spüren bekommen. Europa und die Arktis könnten merklich abkühlen und häufiger extreme Kälteeinbrüche erleben. Landwirtschaftlich nutzbare Flächen würden knapper, mit drastischen Folgen für die Welternährung. Ob die AMOC tatsächlich vollständig zum Erliegen kommen wird, bleibt aber unklar. Der Weltklimarat erwartet laut aktuellem Sachstandbericht (IPCC AR6), dass die AMOC schrittweise abnimmt, sofern die Treibhausgasemissionen weiter so stark steigen. Einen vollständigen Zusammenbruch in den kommenden Jahrzehnten schätzen die Autor:innen als wenig wahrscheinlich ein. Manche Forschende stellen auf Basis der bisherigen Erkenntnisse Schätzungen darüber an, bei welcher globalen Durchschnittstemperatur ein kritischer Schwellenwert erreicht wäre. Diese recht unsicheren Schätzungen ergeben eine Erderwärmung von 1,4° bis 8° gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter. Ist sie überschritten, könnte die AMOC innerhalb einiger Jahrzehnte bis weniger Jahrhunderte einen neuen Verlauf annehmen oder zum Erliegen kommen. Die oben erwähnte Studie der europäischen JPI's 'Ocean' und 'Climate' wird die Risiken anhand der aktuell verfügbaren Daten neu bewerten.

Wenig wissen wir bisher darüber wie sich der Transport von Sauerstoff, Kohlenstoff und anderen Nährstoffen im Wasser verändert, wenn die AMOC schwächer wird. Dennoch ist es wichtig zu beachten, dass Änderungen von Meeresströmungen und die Erwärmung des Ozeans Auswirkungen auf Phytoplankton, Fisch- und Säugetierbestände haben. Sie können Menschen in vielen Anrainerregionen der Ozeane betreffen.

Wichtiger Wirbel im Norden

Der Nordatlantische Subpolarwirbel führt Wasser vom Westen Großbritanniens und Irlands, entlang der Südspitze Grönlands und der kanadischen Küsten Labradors und Neufundlands. In dem gigantischen Strudel sinken kalte, salzhaltige Wassermassen in tiefe Ozeanschichten. Sie bilden Tiefenwasser, das

hunderte oder tausende Meter unter der Oberfläche südwärts strömt und so zur Atlantischen Umwälzzirkulation beiträgt. Das als Konvektion bezeichnete Absinken findet insbesondere in der Labrador- und Irminger-See um die Südspitze Grönlands statt. Als möglicher Klima-Kipppunkt wird deshalb auch der 'Kollaps der Labrador- und Irminger See – Konvektion' aufgeführt. Eine Abschwächung oder gar ein Aussetzen der Konvektion vor Südgrönland würde den gesamten Subpolarwirbel verändern.

Der Subpolarwirbel reguliert Wasser- und Lufttemperaturen im Nordatlantik und stabilisiert das Klima Westeuropas. Wissenschaftler:innen haben Hinweise darauf gefunden, dass der Wirbel in den letzten Jahrzehnten schwächer geworden ist. Dafür beobachten sie unter anderem die Dichte des Meerwassers in verschiedenen Tiefen. Wie für die AMOC beschrieben, nimmt die Dichte mit der Menge an Süßwasser ab, das ins Meer gelangt. Niederschlag oder Schmelzwasser verdünnen das Salzwasser. Je stärker verdünnt es ist, desto langsamer sinkt es ab. Die Bildung von Tiefenwasser im Nordatlantischen Subpolarwirbel ist Teil des gesamtatlantischen Strömungssystems und trägt zur AMOC bei. Wissenschaftler:innen beobachten aber Veränderungen der Konvektion in dem Wirbel, die schneller voranschreiten könnten, als die der AMOC.

Veränderungen am arktischen Subpolarwirbel haben weitreichende Folgen. Wird der Wirbel schwächer, könnte sich der polare Jetstream nach Norden verschieben und Europa wäre mehr Wetterextremen ausgesetzt. Auch Luftströmungen und Niederschläge im südlichen Atlantik bis an den Äquator hängen mit den Meeresströmungen zusammen und könnten sich spürbar verändern.

Forschende diskutieren außerdem Auswirkungen auf die Lufttemperaturen in der Region um die Südspitze Grönlands. Ausgerechnet hier messen sie nämlich auffällig niedrige Temperaturen. Wie dieses als Cold Blob oder Warming Hole bezeichnete Phänomen mit den Meeresströmungen zusammenhängt, wird noch untersucht.

In den Tiefen der Antarktis

Der zweite entscheidende Antrieb der weltweiten Umwälzung der Ozeane liegt in der Antarktis. Hier entsteht besonders kaltes und salziges Wasser, das in großen Tiefen rund um den Kontinent das Antarktische Bodenwasser bildet.

Die Bildung von Bodenwasser beginnt damit, dass in der frostigen Kälte der Antarktis Wasser an der Meeresoberfläche gefriert. Dabei bleibt das Salz zurück. So entsteht unter dem Eis extrem salziges, sehr kaltes Wasser. Es sinkt entlang der Abhänge des Kontinentalschelfs bis in mehrere Kilometer Tiefe. Auf dem Meeresgrund breitet es sich in den Pazifischen, Atlantischen und Indischen Ozean aus. In verschiedenen Regionen steigt es wieder in höhere Meeresschichten. Zu diesem sogenannten Upwelling kommt es zum Beispiel an Orten, wo intensive Luftströmungen das Wasser an der Oberfläche auseinanderreiben, so dass ein Sog nach oben entsteht. Auch Vermischungsprozesse über Wellen und Ozeanwirbel spielen eine Rolle für das Aufsteigen von Tiefenwasser. In der Antarktis treiben unterdessen starke ablandige Winde das Eis an der Wasseroberfläche weiter aufs Meer hinaus. So entstehen neue eisfreie Oberflächen, an denen Wasser gefriert, das Salz zurücklässt und die Bildung von Tiefenwasser weiter antreibt. Die Antarktische Umwälzzirkulation ist eng verknüpft mit den Dynamiken des regionalen und des weltweiten Klimas. Das absinkende Bodenwasser transportiert Kohlenstoff aus der Atmosphäre in die Tiefen der Ozeane und lindert so die Folgen des Ausstoßes von CO₂ durch menschliche Aktivitäten. Viele Nahrungsketten und Nährstoffkreisläufe weltweit hängen von der Zirkulation der Ozeane ab, deren zentraler Motor hier in der Antarktis liegt. Forschende sehen in der Antarktischen Umwälzzirkulation deshalb ein Schlüsselement weltweiter Klima- und Ökosysteme.

Verschiedene Klimamodelle sagen eine Schwächung der Antarktischen Umwälzzirkulation im Zuge der Erderwärmung vorher. Forschende beobachten Veränderungen in den Wassertemperaturen und der Bildung von Eis auf der Oberfläche. Manche vermuten, dass ein bestimmter Schwellenwert erreicht werden könnte, ab dem sich alternative Strömungsmuster etablieren. Allerdings sind die Mechanismen hinter den bisher beobachteten Veränderungen nur zum Teil aufgeklärt. Ob und wieviel Wasser an der Oberfläche gefriert, hängt beispielsweise von verschiedenen Faktoren ab. Die wiederum interagieren miteinander – und verändern sich im Zuge des Klimawandels: Er beeinflusst Richtung und Stärke von Winden, die für die Meereisbildung entscheidend sind; er hat Auswirkungen auf den Salzgehalt und auf die Temperatur des Meerwassers um die Antarktis.

Lange beobachteten Forschende eine relativ große Ausdehnung des Meereises, die sie interessanterweise mit den weltweit steigenden Temperaturen erklären konnten. Die Wärme bringt Eis in der Antarktis zum Schmelzen. Schmelz-

Wasser des antarktischen Eisschildes und des Schelfeises fließt in das umliegende Meerwasser. Weil das Schmelzwasser so kalt und sein Salzgehalt niedrig ist, bleibt es an der Oberfläche. Es erschwert den Austausch mit wärmerem Wasser des tiefen Ozeans und begünstigt so die Meereisbildung. Etwa seit der Mitte der 2010er Jahre hat die jährliche Meereisausdehnung aber auffällig abgenommen gegenüber den vorigen Jahrzehnten. Kürzlich wiesen Forschende einen unerklärten Anstieg des Salzgehaltes im antarktischen Meerwasser nach. Dadurch verringert sich die Stabilität der Wassersäule, so dass wärmeres Wasser aus dem tiefen Ozean an die Meeresoberfläche treten kann. Das könnte der Grund dafür sein, warum weniger Meereis entsteht. Die Forschung geht nun weiteren Fragen nach: Wie wirkt sich diese Entwicklung auf die Bildung von Bodenwasser und damit auf die Umwälzung im Südpolarmeer aus?

Weil die Auswirkungen der Erderwärmung auf die antarktischen und damit verbundenen weltweiten Strömungssysteme mit vielen Unbekannten versehen sind, bleiben Vorhersagen darüber unsicher, ob die Bildung von Bodenwasser in der Antarktis sich bei bestimmten globalen Durchschnittstemperaturen unumkehrbar abschwächen oder gar zum Erliegen kommen könnte.

Tropischer Wind und Regen: das weltweite Monsunsystem

Ein Monsun ist eine Luftzirkulation, geprägt von Winden, die im Wechsel der Jahreszeiten ihre Richtung ändern. Angetrieben wird die großflächige Zirkulation durch jahreszeitliche Veränderungen in der Sonneneinstrahlung. Die Winde und damit einhergehende charakteristische Regenfälle entstehen in Äquatornähe, wo die meiste Sonnenstrahlung auf die Erde trifft. Diese Zone, in der Winde von der Nord- und Südhalbkugel aufeinandertreffen, wird 'Innertropische Konvergenzzone' oder auch 'äquatoriale Tiefdruckrinne' genannt. Sie verlagert sich regelmäßig im Jahresverlauf zwischen Breitengraden südlich und nördlich des Äquators. Das liegt daran, dass die Erdoberfläche relativ zur Sonne geneigt ist und die eintreffende Sonnenenergie mit dem Einstrahlwinkel variiert. Die saisonale Wanderung der Innertropischen Konvergenzzone teilt das Jahr in äquatornahen Erdregionen in Trocken- und Regenzeiten.

Ein System, zwei Zustände

Spontan assoziieren wir den Begriff Monsun häufig mit Bildern der starken sommerlichen Regenfälle in Indien. Monsun-

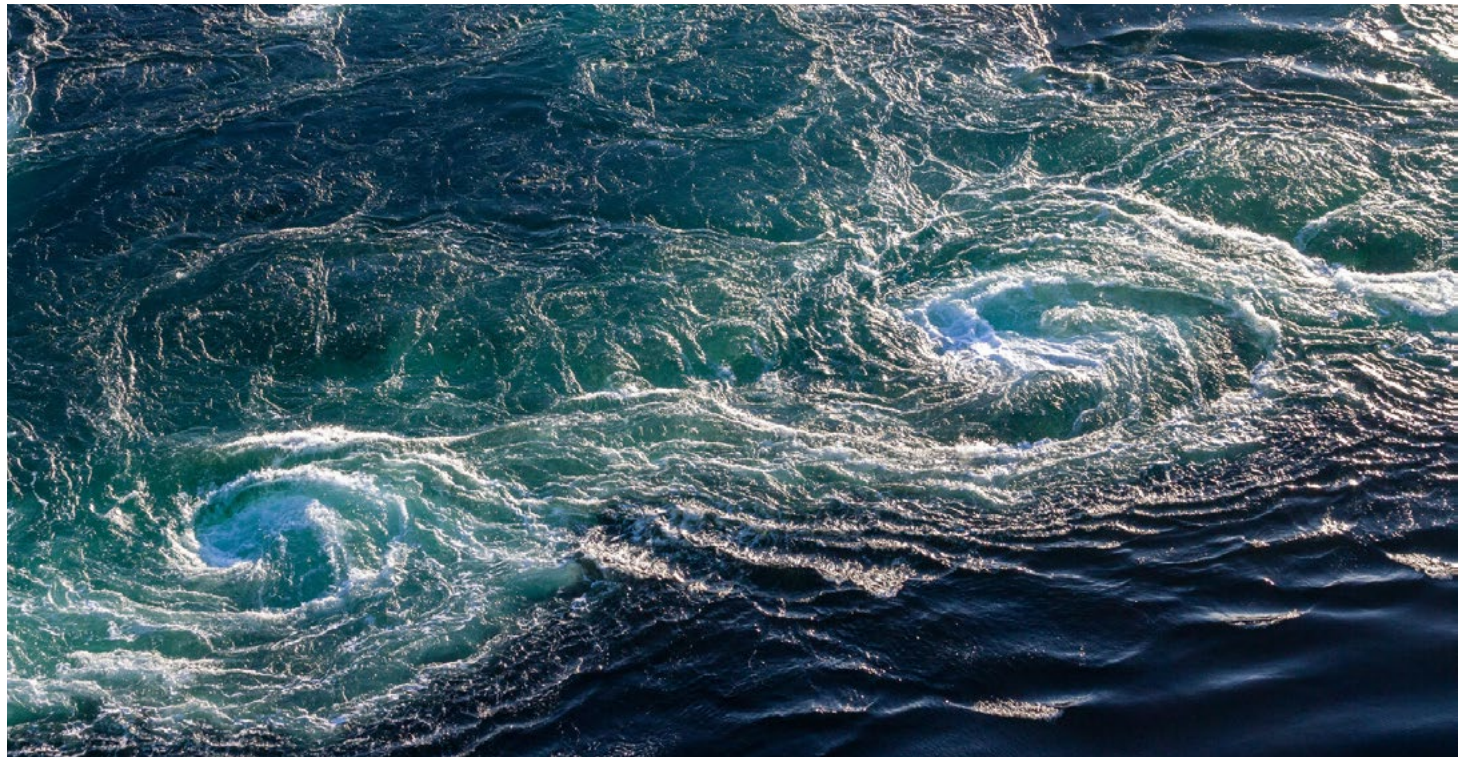
winde und die charakteristischen saisonalen Niederschläge gibt es aber rund um die Erde in Äquatornähe, zum Beispiel auch in Südamerika und Westafrika. Sie bestimmen das Klima in vielen tropischen und subtropischen Gebieten der Erde und sind ein wichtiger Teil des globalen Wasserhaushalts. Etwa ein Drittel aller Niederschläge auf der Erde sind Monsunregenfälle. Sie sind lebenswichtig für Menschen in landwirtschaftlich geprägten Regionen Südasiens, Südamerikas und Westafrikas. Veränderten sich die Dynamik der Monsune, könnten die Auswirkungen bis zu zwei Drittel der gesamten Weltbevölkerung betreffen.

Heute betrachtet die Forschung die weltweiten Monsune als Teile eines einzigen weltweiten Systems. Seine Dynamik unterliegt deutlichen natürlichen Schwankungen auf verschiedenen zeitlichen Skalen. Regenfälle können innerhalb weniger Jahre oder auch über Jahrzehnte sehr unterschiedlich ausfallen. Und erdgeschichtlich betrachtet ist es noch nicht lange her, dass der afrikanische Monsun deutlich stärker war. Die Sahara war damals eine Landschaft mit Gräsern, Bäumen und Seen.

Das Monsunsystem hat also in der Erdgeschichte teils dramatische und schnelle Veränderungen durchlaufen, die man auch als 'Kippen' im Sinne der derzeitigen Kippunkte-Diskussion interpretieren könnte.

Auf der Basis von Simulationen der aktuellsten Klimamodelle betrachten Forschende das Monsunsystem an sich als 'bistabil': Es kann zwei stabile Zustände einnehmen, zwischen denen es im Jahresrhythmus alterniert. Auch das deuten manche Forschende als Hinweis darauf, dass die charakteristischen Monsun-Luftströmungen einen Kipppunkt überschreiten könnten, wenn sich natürliche oder durch Menschen geprägte Einflussfaktoren ändern. Das System würde dann dauerhaft in einen neuen Zustand übergehen. Ob die derzeitigen Monsunsysteme tatsächlich gefährdet sind, plötzlich stillzustehen oder in deutlich andere Zustände umzuschlagen, ist bisher unklar.

Neben natürlichen externen Einflüssen und internen Schwankungen beeinflussen menschliche Aktivitäten die Monsundynamik regional und weltweit.



© Heiko Köhler-Wagner / Adobe Stock

Die wichtigsten anthropogenen Einflussfaktoren sind die Konzentration von Treibhausgasen und von Aerosolen in der Atmosphäre.

Schwächung der AMOC beeinflusst Monsun

Der weltweite Monsun ist an die Stärke der Atlantischen Umwälzströmung (AMOC) gekoppelt, die das Wasser des Atlantiks durchmischt und dadurch Wärme im Ozean und in der Atmosphäre umverteilt. In der erdgeschichtlichen Vergangenheit ging eine schwächere AMOC zum Beispiel einher mit einer Verschiebung der äquatorialen Tiefdruckrinne in südlichere Breiten, so dass auch die Monsunregenfälle sich verlagerten. Die derzeit beobachtete Abschwächung der AMOC führt dazu, dass weniger warmes Wasser von Süden nachströmt und das Oberflächenwasser des Nordatlantik kühler wird. Ob die AMOC sich weiter abschwächt oder gar zum Erliegen kommen könnte, ist Gegenstand aktueller Forschung. Anhand verschiedener Modelle sagen einige Forschende vorher, dass eine zukünftige Abkühlung im Nordatlantik sich bis in tropische Breiten fortpflanzen könnte. Die Folge könnten drastische Abnahmen der saisonalen Regenfällen der betroffenen Regionen sein. Das erhöhte Risiko, extreme Dürren zu erleiden, träfe tropische Regionen in Zentralamerika, der Amazonasregion oder Indonesien.

Häufigere Extremwetter in bestimmten Monsunregionen

In unregelmäßigen Abständen von einigen Jahren erwärmt sich der östliche und Zentralpazifik an der Meeresoberfläche deutlich über die durchschnittlichen Temperaturen. Die als 'El Niño' bekannte Erwärmung führt zu weitreichenden klimatischen Veränderungen, die über Monate anhalten können. El Niño ist ein Teil der El Niño Southern Oscillation (ENSO), eines Musters wiederkehrender Klimaschwankungen. In den zentralen Monsungebieten Indiens beobachten Forschende, dass extreme Starkregenereignisse in El Niño-Jahren häufiger als in anderen Jahren auftreten. Solche kurzfristigen extrem starken Niederschläge können verheerende Auswirkungen für die Menschen in den betroffenen Regionen haben. Sie haben das Potential, Bau- und Verkehrsinfrastruktur sowie landwirtschaftliche Flächen zu beschädigen oder zu zerstören. Im Zuge des Klimawandels erwarten Forschende eine höhere Variabilität der ENSO-Verläufe; das heißt sie rechnen damit, dass El Niño und das Gegenstück, die kalte La Niña, häufiger in extremen Ausprägungen auftreten. Damit stiege auch das Risiko extremer Starkregen während der sommerlichen Monsunsaison in Zentralindien.

Wärmere Ozeane, mehr Niederschläge – aber wo und wie?

In dem Maß, wie sich die Atmosphäre durch den Treibhauseffekt erwärmt, steigt an vielen Stellen die Oberflächen-temperatur der Meere. Da an wärmeren Oberflächen mehr Wasser verdunstet, und weil eine wärmere Atmosphäre mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann, rechnen Forschende grundsätzlich weltweit mit größeren Niederschlagsmengen. Wo und in welcher Form sie niedergehen, ob als nutzbringender Dauerregen oder als zerstörerischer Starkregen, ist allerdings extrem schwierig vorherzusagen.

Gleichzeitig können Temperaturen an der Meeresoberfläche im Zuge des Klimawandels stellenweise auch sinken, etwa durch den Eintrag von Schmelzwasser von den Eisschilden oder die oben beschriebene Schwächung der AMOC. Vermutlich beeinflusst die Oberflächentemperatur der Meere die Ausprägung der Monsune. Das legen geologische Befunde zur Stärke des Monsuns in verschiedenen Erdregionen sowie modernste Klimamodelle nahe. Die Zusammenhänge sind jedoch komplex und bisher nicht hinreichend erforscht, um regionale Veränderungen in der Monsundynamik in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur der Meere verlässlich und detailliert vorhersagen zu können.

Aerosolemissionen wirken Erwärmung entgegen

Auch Emissionen von Feinstaub und anderen Aerosolen sowie veränderte Oberflächenbeschaffenheit durch Landnutzung wirken sich auf die Dynamik der Monsune aus. Emissionsausstoß und Landnutzungsänderung spielen dabei mit den jeweiligen regionalen klimatischen und geologischen Gegebenheiten zusammen.

Aerosole in der Atmosphäre absorbieren oder reflektieren Sonnenlicht und verändern dadurch den Wärmehaushalt der Atmosphäre. Der bestimmt die Wind- und Niederschlagsdynamik, Wolkenbildung und auch die Vegetation. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nahmen daher zum Beispiel die Monsunniederschläge in Indien eher ab: Eine kühlende Schicht von Aerosolen aus Industrieabgasen wirkte den Folgen der globalen Erwärmung entgegen. Wie sich die Aerosolkonzentrationen künftig entwickeln, wird maßgeblich durch politische Entscheidungen und wirtschaftliche Entwicklungen bestimmt. Menschliche Eingriffe in die Erdoberfläche wie Bebauung oder

landwirtschaftliche Nutzung verändern die Rückstrahlkraft (Albedo). Weil die Albedo entscheidend für Wärmeentwicklung am Boden und für die Verdunstung ist, kann sich eine Änderung auf die Intensität der Monsunregen auswirken. Dabei können Rückkopplungseffekte auftreten. Nehmen beispielsweise Niederschläge in einer Region ab, kann das zu Bodentrockenheit führen; Vegetation schwindet und die Albedo steigt; es entsteht weniger Wärme an der Erdoberfläche, so dass weniger Feuchtigkeit in die Höhe steigt und noch weniger Niederschläge entstehen.

Unsichere Vorhersagen

Die Ausprägung des Monsuns ist an die Intensität der Sonneneinstrahlung gekoppelt. Die variiert mit der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, sowohl im Jahresverlauf als auch in langfristigen Zyklen von zehntausenden von Jahren. „Aus paläontologischen Funden wissen wir allerdings, dass mehrere tausend Jahre vergehen können, bis eine Änderung in der Sonneneinstrahlung sich in der Monsunzirkulation niederschlägt“, erklärt Edmund Hathorne, Geochemiker und Paläo-Ozeanograph am GEOMAR. „Das weist uns auf das komplexe Zusammenspiel und die Rückkopplungen zwischen internen Mechanismen des weltweiten Klimasystems hin – zum Beispiel die Reaktion der Eisschilde auf eine Erwärmung, Änderungen in der Oberflächentemperatur und Zirkulation der Ozeane oder den Wandel von Vegetation.“ Verändern sich die Luft- und Wasserzirkulationen, die den Monsun ausmachen, können die Änderungen aber vergleichsweise schnell erfolgen und die Folgen dramatisch ausfallen. „Vor nicht allzu langer Zeit – erdhistorisch betrachtet – sah das System ganz anders aus“, sagt Hathorne. Eine Schwächung des westafrikanischen Monsuns vor etwa 8000 bis 5000 Jahren löste den Wandel der damals grünen Sahara in die Wüstenlandschaft aus, die wir heute kennen. Vermutlich beschleunigten Prozesse wie die oben beschriebene Rückkopplung zwischen Trockenheit, Vegetation und Albedo die Wüstenbildung.

Das Monsunsystem ist also an eine Vielzahl von Elementen im weltweiten Klimasystem gekoppelt und Veränderungen können unerwartet stark ausfallen. Ob Erdregionen dabei eher von Mangel an Niederschlag bedroht sind oder ob die Regenmenge eher zunimmt, hängt von ihrer geografischen Lage, der Jahreszeit und verschiedenen regionalen und globalen Klimaelementen ab.

Auch die kurzfristigen Dynamiken der Niederschläge verändern sich. So kann innerhalb eines Tages zwar die gleiche

Menge an Regen fallen. Fällt er aber innerhalb kürzester Zeit als Starkregen, hat das eher zerstörerische Wirkung. Verteilt der Niederschlag sich dagegen über den Tag, kann das der Landwirtschaft zuträglich sein. Deshalb sind die Ausprägung von Monsunregen und ihre möglicherweise dramatischen Veränderungen im Zuge des Klimawandels gesellschaftlich hoch relevant. Um Entwicklungen des Monsuns vorhersagen zu können, ist es wichtig, seine Dynamiken und Abhängigkeiten von anderen Klimaelementen besser zu verstehen. Derzeit sei es kaum möglich, eindeutige Aussagen über zukünftige Trends zu machen, sagt Edmund Hathorne. „Bisherige Klimamodelle zeigen zwar übereinstimmend die Richtung der Veränderungen an – das heißt, ob es mehr oder weniger Niederschläge in den Monsunregionen der Erde geben wird“, erklärt er, warnt aber vor Verallgemeinerungen. „Die Vorhersagen darüber, wie stark die Veränderungen sein werden und in welchen Zeiträumen sie sich entfalten werden, unterscheiden sich deutlich auch zwischen den jüngsten state-of-the-art Klimamodellen.“

Die genannten Beispiele zeigen: Mit steigenden Durchschnittstemperaturen verändern sich globale Strömungen von Luft und Wasser. Sie stellen wichtige Wärmeleitungen im weltweiten Klimasystem dar, so dass Veränderungen sich über weite Entfernungen rund um den Globus auswirken. Die Strömungen und ihre Dynamiken detailliert zu beobachten und zu verstehen ist unerlässliche Voraussetzung dafür, dass Menschen sich auf veränderte Lebensbedingungen einrichten können.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Prof. Dr. Arne Biastoch](#)
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für
Ozeanforschung Kiel



[Dr. Markus Janout](#)
Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und
Meeresforschung (AWI)



[Dr. Edmund Hathorne](#)
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für
Ozeanforschung Kiel

Publikationen online lesen:

["Kipppunkte: Wie wir über Veränderungen im Erdsystem sprechen" \(2026\)](#)

["Biosphäre: Lebenswelten am Rand ihrer Kräfte" \(2026\)](#)

["Kryosphäre: Wo drohen Lebenswelten aus Eis aufzutauen?" \(2026\)](#)

["Im FLuss: Meeres- und Luftströmungen der Erde" \(2026\)](#)

Helmholtz KLIMA

Markgrafenstr. 22
D-10117 Berlin
Tel: 030 206 7957 44
E-Mail: dialog@helmholtz-klima.de

www.helmholtz-klima.de