



Universität Hamburg

DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

CENTRUM

FÜR ERDSYSTEMFORSCHUNG
UND NACHHALTIGKEIT (CEN)

WENN RAPSFELDER ZUM ZANKAPFEL WERDEN

ZEHN KLIMAFORSCHER*INNEN BERICHTEN



An aerial photograph of a wind farm in a rural landscape. The landscape is a patchwork of green pastures and bright yellow rapeseed fields. Numerous white wind turbines are scattered across the terrain, some in the foreground and others receding into the distance. The sky is clear and blue. The overall scene depicts a modern energy infrastructure integrated into a traditional agricultural setting.

WENN RAPSFELDER ZUM ZANKAPFEL WERDEN

ZEHN KLIMAFORSCHER*INNEN BERICHTEN

Ein Lesebuch der Hamburger Erdsystemforschung

INHALT

4	SCHUTZGEBIETE
10	NORDSEEDÜNGUNG
16	ENERGIEPFLANZEN
24	HAMBURGER AGENTEN
29	HEISSE TAGE
33	MIKROALGEN
37	OFFSHORE-WINDRÄDER
42	HIMALAJA
50	EISWOLKEN
54	REGENMESSER

NEUE KLIMAGESCHICHTEN AUS HAMBURG

Erneuerbare Energien schützen das Klima. Doch Konflikte sind vorprogrammiert, wenn Raps und Mais die Äcker dominieren, um Biogasanlagen zu füttern. Warum entscheiden sich Bäuerinnen und Bauern für oder gegen den Anbau von Energiepflanzen? Diese und andere Fragen rund um den Klimawandel untersuchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) und am Exzellenzcluster CLICCS der Universität Hamburg.

Erfahren Sie außerdem, welche Flächen sich besonders eignen, um den Naturschutz in Europa zu stärken, warum die Vegetation in einem kleinen himalajischen Dorf trotz Klimawandel stabil bleibt und welche Maßnahmen helfen, den Eintrag von Nährstoffen in die Nordsee zu verringern.

Einmal im Monat geben unsere Forscherinnen und Forscher im Hamburger Abendblatt Einblick in ihre Arbeit. Zehn dieser Beiträge haben wir auf den folgenden Seiten für Sie zusammengefasst.

Viel Spaß beim Schmökern!

WO DER NATURSCHUTZ LÜCKEN HAT

Ein auffallender Widerspruch hat mich zu meiner Doktorarbeit inspiriert: Einerseits weist die Europäische Union mehr Naturschutzgebiete aus, andererseits sterben weiterhin Tier- und Pflanzenarten aus, verschwinden Lebensräume in einem beängstigenden Tempo.

Das ist nicht nur für den Artenschutz problematisch, der Verlust von Biodiversität wirkt sich auch auf das Klima aus. Denn vielfältige, intakte Lebensräume wie Moore und Wälder binden Kohlenstoff, der sonst als Treibhausgas Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangen könnte.

Wo noch Schutzgebiete fehlen, untersuche ich im Rahmen meiner Doktorarbeit. Dafür habe ich zunächst geprüft, was die EU bislang getan hat. Und habe festgestellt: Eines ihrer wichtigsten Vorhaben hat sie umgesetzt. 18 Prozent der europäischen Landfläche stehen unter Naturschutz; ein Prozent mehr als zugesagt. Doch ein wichtiges Ziel hat sie nicht verwirklicht. Sie hat nicht jeden Naturraum ausreichend berücksichtigt, nicht jede der 43 europäischen „Ökoregionen“ zu 10 Prozent unter Schutz gestellt. Bis 2020 sollte das geschehen, dazu hatte sich die EU verpflichtet.

4 SCHUTZGEBIETE





Sechs Ökoregionen haben Nachholbedarf. Zu ihnen gehören die „Buchenwälder der Englischen Tiefebene“ oder die „Mischwälder des Po-Beckens“ – vergleichsweise kleine Regionen, Nischenlandschaften, sozusagen. Überraschenderweise ist aber auch eine Region betroffen, die sich über ein ausgedehntes Gebiet und mehrere Länder erstreckt. Buchen, Eichen und Kiefern prägen die „Atlantischen Mischwälder“, die sich von den Pyrenäen bis zur deutsch-dänischen Grenze erstrecken. Doch diese riesige Fläche ist nicht überall gleich. Neben Wäldern kommen darin auch Lebensräume wie Fließgewässer, Moore und Wiesen vor. Will man die Artenvielfalt erhalten, muss man von jedem dieser Lebensräume einen Zipfel erfassen.

Noch ist das nicht der Fall. In den Atlantischen Mischwäldern fehlen beispielsweise typische Moorwälder, also Laubwälder mit Moorbirken oder Waldkiefern, die auf feuchten, nährstoffarmen und sauren Böden wachsen. Solche Wälder gibt oder gab es in Frankreich, Belgien, den Niederlanden – und auch in Norddeutschland waren sie einst weit verbreitet. Doch nach jahrhundertelanger Entwässerung steht es heute schlecht um sie.

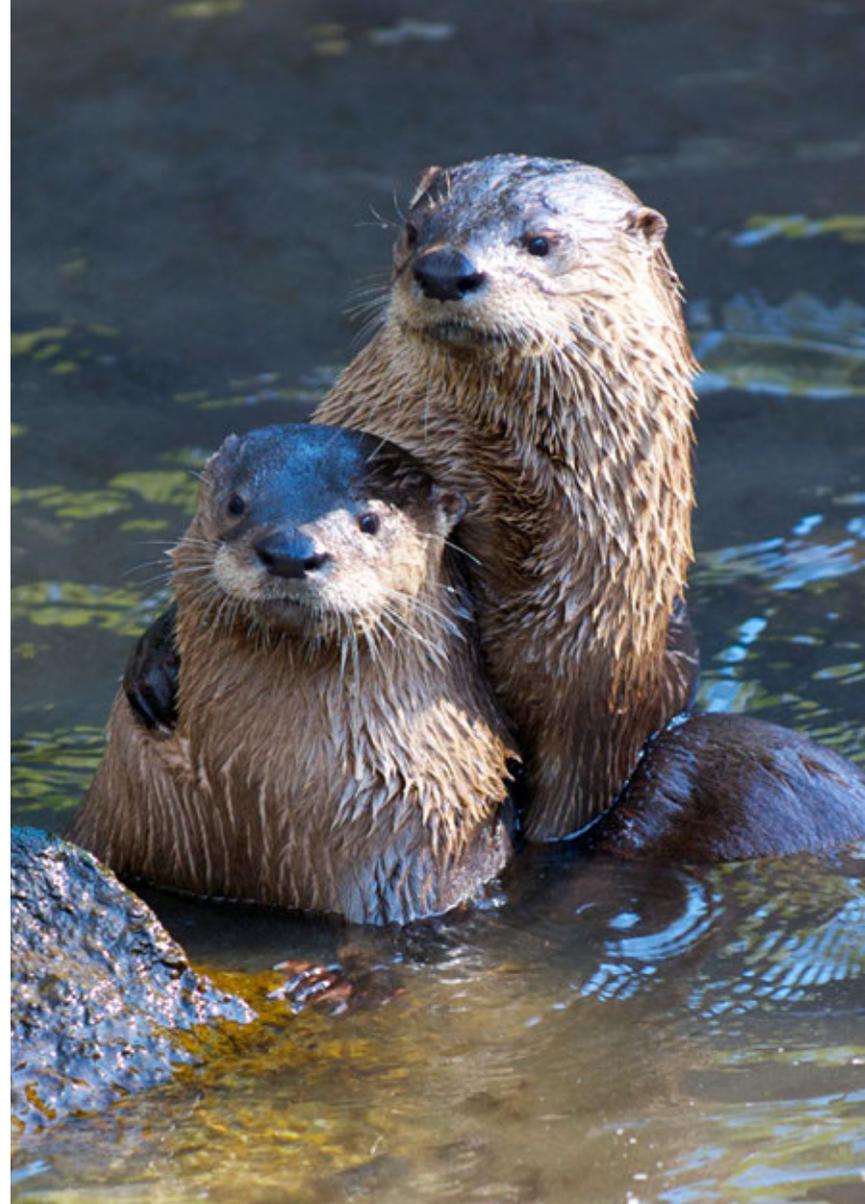
Wer muss nun tätig werden, welches Land muss die fehlenden Schutzgebiete schaffen? Vorgaben dafür fehlen. Sinnvoll wäre es, neue Schutzgebiete dort auszuweisen, wo die EU-Ziele kostengünstig erreicht werden können. Das ist meist dort

möglich, wo das Land nur geringe Erträge bringt. Sind wirtschaftliche Interessen wenig betroffen, akzeptieren die Landbesitzer mit dem Naturschutz verbundene Einschränkungen leichter. Und seltene Tiere und Pflanzen haben oft gerade auf wenig bewirtschafteten Flächen ein Refugium gefunden.

Für meine Doktorarbeit habe ich Landpreise für ganz Europa zusammengetragen. Ich habe ein Computerprogramm entwickelt, das diese mit den Vorkommen schützenswerter Lebensräume abgleicht: Knifflig – da ich erst einen passenden Algorithmus schaffen musste. Nach anderthalb Jahren traten schließlich Landkreise, Grafschaften, counties oder comtés hervor, in denen die Ausweisung neuer Schutzflächen empfehlenswert wäre. Einige liegen sogar direkt vor den Toren Hamburgs, etwa im Landkreis Rotenburg-Wümme oder Lüneburg.

Insgesamt fehlt nicht viel, um die Ziele der EU zu erreichen. Nur 0,35 Prozent der europäischen Landfläche müsste noch unter Schutz gestellt werden: Rund 15.000 Quadratkilometer – oder 20 Mal die Fläche von Hamburg.

Dr. Anke Müller hat am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit und der Forschungsstelle Nachhaltige Umweltentwicklung der Universität Hamburg promoviert.

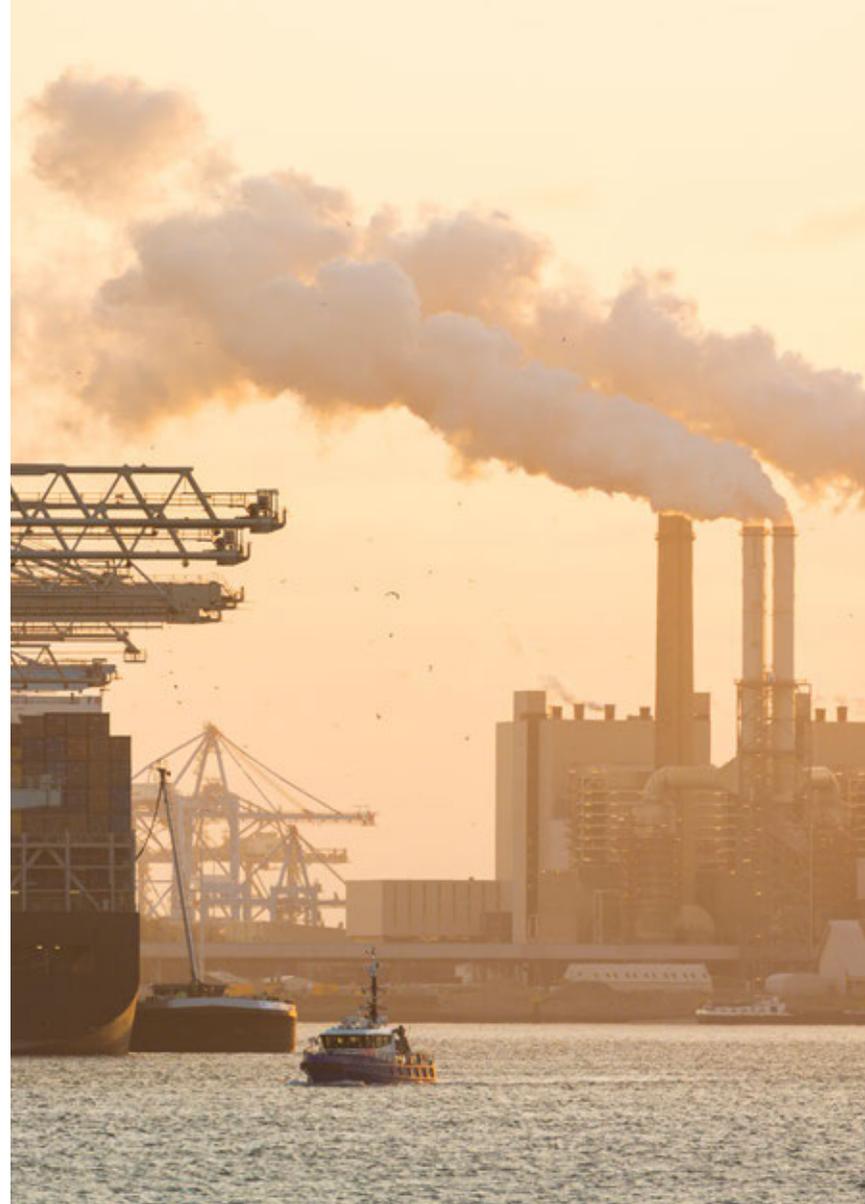


DIE NORDSEE IN 300.000 DATENSÄTZEN

Wenn Zuflüsse wie Elbe und Weser Abwässer aus Industrie und Landwirtschaft aufnehmen, befördern sie diese Richtung Meer. Auch über die Luft werden Abgase transportiert und lösen sich im Ozean. So gelangen viele zusätzliche – potenziell unerwünschte – Nährstoffe wie Phosphat und Stickstoff in die Nordsee und tragen zur Überdüngung bei.

Seit jedoch in den 1980er Jahren die Phosphate aus den Waschmitteln verboten wurden, ist ihr Anteil im Wasser erfreulicherweise gesunken. Ebenso gehen die Werte für Stickstoff zurück. Die Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union setzt hier Grenzwerte. Doch noch immer werden diese in Spitzenzeiten zum Beispiel durch Düngung auf den Feldern weit überschritten.

Mein Kollege Johannes Pätch und ich interessieren uns dafür, wie sich die Nordsee in Zukunft verändern wird. Wie stark werden sich welche Nährstoffe an Küsten und im offenen Meer verteilen? Welchen Einfluss haben Klimawandel und steigende Temperaturen? Wir nutzen ein Klimarechenmodell, das detaillierte Prognosen für den Nordseeraum





abgeben kann. Es bildet die komplexen Vorgänge mit Hilfe mathematischer Formeln möglichst genau ab. Um die Ergebnisse zu testen, werden vergangene Zeitabschnitte modelliert und mit echten Messdaten von damals verglichen. Je ähnlicher die Ergebnisse, desto besser das Modell.

Doch der für unser Modell passende Prüf-Datensatz umfasst nur Messungen aus den 1970er bis 1990er Jahren. Für einen aktuellen Abgleich ist er kaum geeignet, weil es damals noch reichlich Phosphat und Stickstoff im Wasser gab. Ein neuer Datensatz musste her. Unser Ziel: Alle offiziell gemessenen Daten für den Nordseeraum von 1960 bis heute zu sammeln, aufzubereiten und weltweit zur Verfügung zu stellen – ein Megaprojekt.

Zunächst habe ich dafür von verschiedenen ozeanografischen Zentren die Zahlenpakete für jeden Tag inklusive Messzeit und Ort abgefragt. Die Zentren erhalten diese Werte gewöhnlich von Forschungsschiffen, Messbojen oder Küstenstationen. So bekam ich mehr als 300.000 Datensätze mit Angaben zu Salzgehalt, Wassertemperatur in verschiedenen Tiefen und Nährstoffen wie Phosphat, Stickstoff und Silikat.

Jetzt mussten doppelte Nennungen gefunden und eliminiert, Ausreißer identifiziert und auf Plausibilität geprüft werden. Aus den bereinigten Daten haben wir eine interaktive Karte der Nordsee mit Messwerten für jeden Monat entwi-



ckelt. Sie ist online frei zugänglich im ICDC-Datencenter des CEN – ein Schatz für Kolleginnen und Kollegen in der Meeresbiologie und Modellierung.

Schon jetzt geben uns die neuen Daten wichtige Hinweise, wo das Rechenmodell noch hakt. In den Simulationen sinkt zum Beispiel der Wert für Phosphat nie ganz auf Null. Im Meer ist dies aber häufig der Fall, wenn im Sommer sämtliche Nährstoffe aufgebraucht sind. So muss das Modell noch weiter verfeinert werden, bis es die tatsächlichen Zustände immer besser abbildet. Erst wenn es die vergangenen 30 Jahre möglichst passgenau simuliert, ist es fit für Rechnungen in die Zukunft: Als nächstes werden wir Szenarien für die Nordsee bis 2100 vorausberechnen.

Solche Prognosen sind gefragt. Denn was hilft wirklich, den Eintrag von Nährstoffen zu begrenzen? Ein neues Klärwerk? Autoabgase ohne Stickstoff? Die Politik ist daran interessiert, die vorgeschriebenen EU-Grenzwerte einzuhalten. Das verbesserte Nordsee-Modell trägt dazu bei, sinnvolle Maßnahmen zu finden.

Dr. Iris Hinrichs ist Ozeanografin am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg.



ENERGIEWENDE: WENN RAPSFELDER ZUM ZANKAPFEL WERDEN

Der Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland hat sich in den letzten Jahren stark erhöht. Windränder, Biogasanlagen oder Solarfelder stoßen aber immer wieder auf Kritik: Lassen sich Konflikte im Vorfeld umschiffen?

Die Umstellung auf klima- und umweltfreundliche Energien wirkt sich auf unsere Landschaften aus: Windräder oder Energiepflanzen für Biogasanlagen brauchen viel Raum – das bringt Konflikte mit sich. Am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) der Universität Hamburg gehen wir der Frage nach, wie künftige „Energiewälder“ aussehen könnten. Mein Kollege Jürgen Scheffran und ich arbeiten dabei mit Modellen, die Entwicklungen über längere Zeiträume hinweg simulieren. Zum Beispiel nutzen wir agentenbasierte Modelle, die abbilden, warum Akteure wann wie handeln.

Solch ein Modell haben wir auf Schleswig-Holstein angewendet. Wie prägt der Bedarf an Bioenergie die Landnutzung? Jede Gemeinde ist dabei ein Akteur. Wir nahmen außerdem vier Kulturpflanzen in den Blick, die zum Teil als Energiepflanzen genutzt werden: Weizen, Mais, Zuckerrüben und Winterraps.





Dabei vergleichen wir die Größe der Anbauflächen und Pflanzenauswahl im Jahr 2010 mit der Entwicklung bis zum Jahr 2100.

Die Idee dahinter: Die Landwirte in jeder Gemeinde entscheiden nach bestimmten Regeln, welche Pflanzen sie im jeweiligen Jahr anbauen möchten. Das heißt, sie handeln bewusst mit Blick auf die jeweilige Gewinnerwartung – und werden dadurch ein Stück weit berechenbar. Aus dem Marktpreis der geernteten Menge und der Nachfrage ergibt sich der potenzielle Profit.

Für Preise und Erntemengen nehmen wir im Modell an, dass sich die Trends der letzten 20 Jahre in etwa fortsetzen. Andere Faktoren variieren wir jeweils dazu. So prüfen wir zum Beispiel, wie sich der Anbau verändert, wenn insgesamt mehr Ackerland zur Verfügung steht oder Energiepflanzen durch Subventionen aktiv gefördert werden.

Es zeigt sich: Steht den Gemeinden jedes Jahr etwas mehr Anbaufläche zur Verfügung, schmälert das nicht die Fläche für die Nahrungsproduktion. Zusätzlich geht der Anteil an Energiepflanzen sogar zurück. Stattdessen wird vor allem mehr Weizen angebaut, während der Anteil von Mais sinkt, der typischerweise als Energiepflanze dient. Erst durch externe Anreize, wie zum Beispiel finanzielle Förderungen, erhöht sich der Anteil von Energiepflanzen. Dabei steigt er nicht kontinuierlich, sondern nimmt zunächst nur mäßig zu. Ab einem



BIOSPRIT
MACHT HUNGER

INKOTA
netzwerk e.v.

gewissen Punkt beschleunigt sich diese Entwicklung jedoch deutlich – was das Landschaftsbild stark verändert.

Unser Modell ist dabei wertungsfrei: Es zeigt, welche Entwicklungen auftreten können, aber nicht die Reaktion der Menschen, zum Beispiel Proteste. Wir können aber Situationen identifizieren, in denen Konflikte wahrscheinlich sind – beispielsweise wenn Monokulturen entstehen oder Nutzflächen mit Naturschutz konkurrieren. Reagieren die Anwohner mit Demonstrationen, könnte das die Entscheidung der Bauern für oder gegen eine bestimmte Pflanzenart verändern – die Entwicklung bis 2100 sähe dann anders aus.

Um verschiedene Szenarien und Fragen zu diskutieren, bringen wir auf einer jährlichen Konferenz „Energiewirtschaften Norddeutschland“ Wissenschaft, Politik und Gesellschaft zusammen. Gemeinsam suchen wir nach Lösungen und schätzen Entwicklungen ab. Interessant ist zum Beispiel: Was ändert sich, wenn Bioenergie nicht mehr nur lokal, sondern deutschlandweit genutzt wird? Entscheiden sich mehr Bäuerinnen und Bauern für Raps, wenn dieser auch als Energiepflanze in Bayern gefragt ist?

Dr. Peter Michael Link ist Geograf am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg.



HAMBURGER „AGENTEN“ IM DIENST DER KLIMAFORSCHUNG

Meine Agenten tragen keine schwarzen Sonnenbrillen, und nur einige von ihnen fahren Auto. Vor allem Bob: Wenn er irgendwohin muss, bevorzugt er den Wagen. Alfred radelt dagegen durch die Stadt, solange die Sonne scheint, während Earl bevorzugt den öffentlichen Nahverkehr nutzt.

Tag für Tag fahren Bob, Alfred und Earl zur Arbeit im Stadtteil Hoheluft, bringen ihre Kinder zur Kita oder kaufen ein. Doch sie existieren nicht wirklich. Sie sind „Agenten“, die sich in einem Computermodell durch ein virtuelles Hamburg bewegen. Mit einem solchen Modell untersuche ich mit meinen Kolleginnen und Kollegen wie typische Lebensumstände und Einstellungen von Agenten etwa die Wahl der Verkehrsmittel beeinflussen. So hat Bob wenig Zeit, Earl wenig Geld, und Alfred ist umweltbewusst. Zusätzlich verändern Faktoren wie das Wetter, Sprit- oder Buspreise ihre Entscheidungen.

Mit Hilfe des Modells können wir auch abschätzen, wie stark die Agenten durch „Umweltstressoren“ beeinträchtigt werden, also durch potenziell gesundheitsschädliche Fakto-





ren wie Hitze, Lärm, Luftverschmutzung oder die Folgen des Klimawandels. Solche Stressoren wirken in Städten mit einer hohen Dichte von Menschen, Gebäuden oder Verkehr besonders stark: Allein die schlechte Luft verursacht weltweit schätzungsweise zwei Millionen Todesfälle pro Jahr. Weil Gebäude Wärme speichern, führen extreme Hitzewellen — die künftig wahrscheinlich häufiger werden — in vielen Städten zu noch höheren Temperaturen als im Umland.

Weltweit leben bereits mehr als die Hälfte aller Menschen in Städten, mit steigender Tendenz. Für Stadtplaner und Politiker ist es wichtig, diese lebenswert und gesund zu gestalten. Dazu tragen die Erkenntnisse bei, die wir durch Agentenbasiertes Modellieren gewinnen. Am Computer können wir ausprobieren, wie sich lästige Baustellen, steigende Kosten im öffentlichen Nahverkehr oder zusätzliche Radwege auf die Entscheidungen Einzelner auswirken — und was dies für die Gesundheit der Individuen und für die Stadt als Ganzes bedeutet.

Die Methode wurde durch das Aufkommen von Computern möglich. Für meine 1989 abgeschlossene Doktorarbeit habe ich sie erstmals benutzt, um mit einem selbst programmierten Modell die Folgen unterschiedlicher Handlungsoptionen im Ost-West-Konflikt zu simulieren. Zwischen den beiden möglichen Szenarien der Aufrüstung und Abrüstung zeigte mein Modell einen chaotischen Übergang als Folge wachsenden



Vertrauens zwischen den Supermächten. Wenige Wochen nach der Simulation endete der Kalte Krieg mit dem Zerfall des Ostblocks. Dass eine Modellanalyse so schnell von der Wirklichkeit überholt werden konnte, kam auch für mich überraschend.

Heute ist Agentenbasierte Modellierung aus der Forschung nicht mehr wegzudenken. Wenn wir verstehen wollen, wie sich eine Gruppe in einer bestimmten Umgebung verhält, liefert die Methode wertvolle Einsichten. Sie eignet sich auch für die Erforschung der Auswirkungen städtischer Umweltstressoren – das hat der Test mit Bob, Alfred und Earl gezeigt. Die bisher gewonnenen Ergebnisse schaffen die Voraussetzung für eine Erweiterung des Modells mit Daten realen Verhaltens. Damit lassen sich beispielsweise die Folgen von Wetterextremen simulieren, um zu prüfen, ob Fluchtwege und Versorgungsrouten in der Stadt funktionieren. Möglich wäre auch, die Methode auf weitere Ballungsräume zu übertragen – denn Städte müssen sich weltweit an den Klimawandel anpassen.

Jürgen Scheffran ist Professor für Integrierte Geografie. Er leitet die Forschungsgruppe Klimawandel und Sicherheit (CLISEC) am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg.

EXTREME TEMPERATUREN: EUROPA WIRD WÄRMER, TÜRKEI KÜHLT AB

In Europa können wir auf Temperaturdaten ab 1950 zurückgreifen, die in einem engen Netz von Messstationen erhoben wurden. Ein gigantischer Datenschatz, der uns viel über das Klima verrät.

Fest steht: Im Durchschnitt wird es eindeutig wärmer. Doch wie sieht das konkret vor Ort aus? Um dies herauszufinden habe ich am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) der Universität Hamburg die Messreihen noch einmal anders betrachtet – und Erstaunliches entdeckt.

Normalerweise bilden wir aus Messwerten Mittelwerte. Sie geben uns einen Überblick. Ich kann zum Beispiel die durchschnittliche Temperatur eines Jahres mit anderen Jahren vergleichen. Oder ich betrachte alle Sommer seit 1950 in einer bestimmten Region und untersuche die Entwicklung.

Mittelwerte sind jedoch nur ein Teil der Wahrheit. Wenn zum Beispiel an einem Ort die Nächte immer kälter und die Tage gleichzeitig immer wärmer würden, würde dies den Mittelwert nicht verändern – hätte aber einen starken Effekt auf Mensch und Natur. Mich interessieren deshalb beson-

ders die extremen Temperaturen und ob diese sich ebenfalls ändern. Denn ökologische Systeme sind unter radikalen Bedingungen oft besonders verwundbar.

Aber welche Werte sind extrem? Dazu definiere ich 90 Prozent aller Temperaturwerte als „normal“. Nur die jeweils kältesten und wärmsten fünf Prozent gelten als extrem. Eine bekannte Methode in der Statistik, in der Klimaforschung wurde sie allerdings bisher noch nicht angewendet.

Wir würden erwarten, dass sich die globale Erwärmung einfach als Plus auf die „normalen“ Temperaturen aufschlägt. Die heißen Tage werden also noch heißer, die kälteren Tage wärmer.

Die Ergebnisse zeigen aber deutlich: Während der Mittelwert der Temperatur – besonders in Frankreich und Deutschland – durchgängig gestiegen ist, haben sich die Extremwerte in Europa ganz unterschiedlich entwickelt. In Mittel- und Osteuropa wurden heiße Tage in den letzten 60 Jahren wie erwartet noch heißer. In Norwegen und Süd-Ost-Europa kühlten sich dagegen die heißen Tage tatsächlich ab. Ein Sonderfall ist die Türkei: In den letzten Jahrzehnten sind hier sowohl die heißen wie die kalten Tage kälter geworden.

Wie passt dies mit der Erwärmung durch den Klimawandel zusammen? Regional kann es starke natürliche Schwankungen des Klimas geben, die die globale Temperaturerhöhung quasi maskieren. Für einzelne Landstriche sind solche



Ergebnisse enorm wichtig: Anstatt pauschal von zwei Grad Temperaturerhöhung auszugehen, kann die Politik unsere Ergebnisse nutzen und Stadtplanung und Landwirtschaft gezielt an die lokalen Bedingungen anpassen.

Zusätzlich habe ich deshalb Profile für einzelne Städte erstellt. Für Trondheim in Norwegen zeigt sich zum Beispiel, dass sich die Bandbreite der Temperatur seit 1950 verringert hat. Während damals die kältesten Temperaturen bei durchschnittlich minus 18 Grad Celsius lagen, betragen sie heute nur noch rund minus 14 Grad. Die wärmsten Tage liegen unverändert bei sechs Grad. Den Trondheimern sind also in den letzten 60 Jahren mehrere Gradpunkte im kalten Bereich „abhandengekommen“.

Ganz anders Berlin: Die kälteren Tage blieben mit durchschnittlich sieben Grad Celsius in etwa gleich. Die heißen Tage stiegen um rund zwei Gradpunkte auf etwa 32 Grad an: Berlins Temperaturprofil hat sich erweitert. Zurzeit analysiere ich die Daten der Messstation Fuhlsbüttel um einen Trend für Hamburg zu zeichnen.

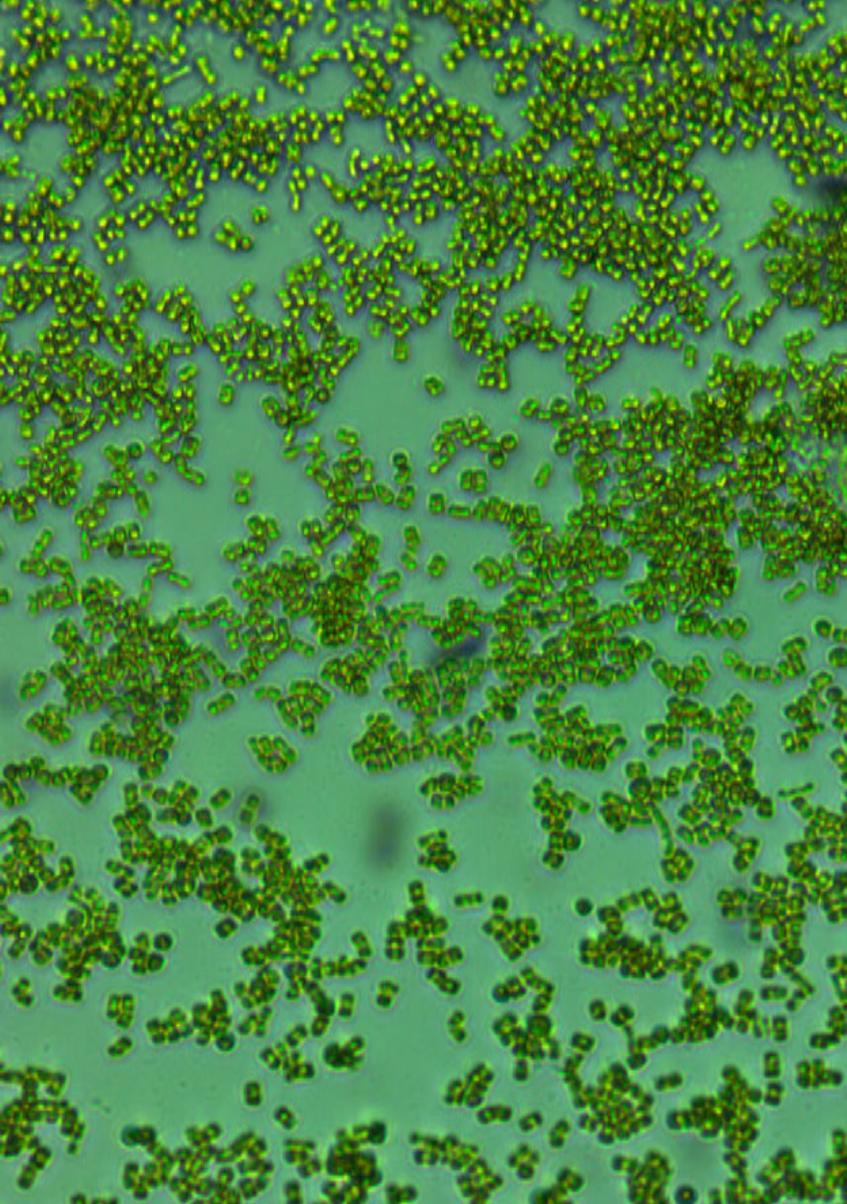
Dr. Christian Franzke hat als Experte für Statistik in der Klimaforschung am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg geforscht.

ALGEN IN DER KLIMA-ACHTERBAHN

Aus dem Meer stammt die Hälfte des Sauerstoffs, den wir atmen. Winzige Algen, das Phytoplankton, produzieren diesen Sauerstoff. Gleichzeitig sind sie die Basis der gesamten Nahrungskette im Ozean. Durch den Klimawandel verändert sich ihr Lebensraum jedoch.

Im Jahr 2100 wird sich womöglich schon einiges im Meer verändert haben. Ich möchte deshalb herausfinden, wie Algen auf neue und extreme Bedingungen reagieren werden. Auf zehn Grad wärmeres Wasser? Auf deutlich mehr gelöstes CO₂ im Meer – und damit saureres Wasser? Viele Algen von heute hielten dies nicht aus. Modellrechnungen sagen voraus, dass der Bestand langfristig um ein Fünftel schrumpfen könnte – mit weitreichenden Folgen für Ozean und Atmosphäre.

Doch ist die Alge von heute wirklich die Alge von morgen? Algen vermehren sich schnell und ihre Populationen sind riesig. Nach ein bis zwei Tagen hat sich eine Generation komplett ausgetauscht – eine gute Voraussetzung für Mutationen, die zu günstigen genetischen Anpassungen führen können. Wir haben deshalb die Kieselalge *Thalassiosira pseudonana* in hunderten von Mini-Aquarien verschiedenen Temperaturen



ausgesetzt. Ihre „Wohlfühltemperatur“ liegt bei 22 Grad Celsius, parallel halten wir sie in wärmerem Wasser bei 26 Grad. Laut Weltklimabericht könnte sich die Temperatur bis zum Jahr 2100 durchschnittlich etwa so weit erhöht haben. Da dies nur ein Mittelwert ist, werden Spitzenwerte – wie zum Beispiel bei einer Hitzewelle – weitaus höher ausfallen. Deshalb wollen wir die Alge noch mehr reizen. Wir setzen sie in weiteren 100 Behältern dauerhaft sogar 32 Grad aus.

Wenn ein Experiment eingerichtet ist, dann hieß es für mein Team bisher: mehrmals in der Woche kontrollieren, reinigen und Algen füttern. Ein bis zwei Jahre lang! Auch Weihnachten, auch im Sommerurlaub. Evolution ist zwar wunderschön, aber sie dauert! Wir beenden die Versuche meist erst nach 300 Generationen. Und manchmal kommt am Ende heraus, dass die Alge sich nicht dauerhaft an den getesteten Faktor anpassen kann und schlecht gedeiht.

Könnten die Algen nicht dazu gebracht werden, sich in kürzerer Zeit anzupassen? Ich probierte erstmals eine neue Methode aus: Anstatt *Thalassiosira* langsam an die veränderten Bedingungen heranzuführen, habe ich sie einer Achterbahnfahrt ausgesetzt. Ich tauchte sie buchstäblich in ein Wechselbad. Wärmer, kälter, wärmer, kälter, etwa alle vier Tage drehte ich den Thermostat von 22 auf 32 Grad hoch und nach vier Tagen wieder runter. Hält sie das aus?

Die überraschende Antwort: Sehr gut sogar! Während die Alge im stabilen 32-Grad-Modus von der Hitze überfordert war und sich etwa ein Jahr lang sehr schlecht entwickelte, konnte sie dieselbe Temperatur im schwankenden Modus problemlos tolerieren. Die Population kam – ebenso wie bei 26 Grad – prima in Schwung und wuchs schnell. Schneller sogar, als bei den gewohnten 22 Grad. Unsere Analysen zeigen auch, dass sich *Thalassiosira* unter schwankenden Bedingungen genetisch am stärksten veränderte.

Ein instabiles Milieu befördert also die genetische Anpassung bei Algen – eine bahnbrechende Erkenntnis. Sie sind dann besser gewappnet, sich an künftige extreme Situationen anzupassen. Praktischer Nebeneffekt: Unsere Experimente können kürzer werden. Um das flexible Phytoplankton müssen wir uns also zunächst keine Sorgen machen. Vielmehr sollten wir dessen Räuber im Auge behalten, die sich womöglich nicht so schnell anpassen können. Die wandlungsfähigen Algen sind anscheinend stets einen Schritt voraus.

Elisa Schaum ist Juniorprofessorin und Expertin für die Evolution von Plankton am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg.

WIE KLEINE MIXER IM MEER: OFFSHORE-WINDRÄDER

Vor der deutschen Küste schießen sie wie Pilze aus dem Boden: Offshore-Windparks. Dutzende Windräder, jedes über 100 Meter hoch, erzeugen Strom aus erneuerbaren Energien. Aber stören solche Anlagen die Ökosysteme im Meer? Oder haben sie sogar positive Auswirkungen?

Um diesen Fragen nachzugehen, untersuchen wir zwei Parks nördlich der ostfriesischen Küste. Einmal pro Jahr kreuzen wir mit dem Forschungsschiff Heincke durch diese Offshore Windparks. Auf den zweiwöchigen Expeditionen haben wir immer unser Sensorsystem Triaxus im Schlepptau. Dieses ist mit verschiedenen Messgeräten ausgestattet und bewegt sich selbstständig zwischen der Oberfläche und dem Meeresgrund auf und ab. Es misst unter anderem die Temperatur des Wassers und die Konzentration von Phytoplankton, das sind winzig kleine Algen.

Die beiden Windparks erstrecken sich über eine Fläche von mehr als 10.000 Fußballfeldern. Mit ihren Turbinen decken sie zusammen den Strombedarf von rund 800.000 Haushalten



für ein Jahr. Zusammen mit meinen Kolleginnen und Kollegen vom Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) der Universität Hamburg, vom Helmholtz-Zentrum Geesthacht und von der Universität Oldenburg durften wir schon vor der Inbetriebnahme die ersten Daten erheben – denn auch die Fundamente der Windräder könnten die Strömung des Wassers beeinflussen.

Unsere Daten bestätigen diese Vermutung: Auf der strömungsabgewandten Seite der Fundamente kommt es zu Verwirbelungen, ähnlich wie hinter einem Brückenpfeiler in einem Fluss. Sie wirken wie kleine Mixer im Meer – durch die Verwirbelungen steigert sich die Durchmischung des Wassers und die übliche „Schichtung“ wird schwächer. Denn normalerweise ist das Wasser dort im Sommer in eine wärmere Schicht oben und eine darunterliegende kältere Schicht getrennt. Wir kennen das Phänomen vom sommerlichen Bad in einem See: Die Füße paddeln manchmal in deutlich kälterem Wasser als der Oberkörper.

Zwischen beiden Schichten findet normalerweise nur wenig Austausch statt. Da die Mikroalgen schon im Frühling viele der Nährstoffe in der oberen Schicht aufgebraucht haben, vermehren sie sich im Sommer normalerweise nur langsam. Durch die Verwirbelungen werden jetzt Nährstoffe aus den tieferen Wasserschichten in die Deckschicht transportiert und die kleinen Algen können sich schneller vermeh-

ren. Wir konnten regelrechte „Phytoplankton-Säulen“ finden, Wassermassen mit mehreren hundert Metern Durchmesser und besonders hohen Algen-Konzentrationen. Jetzt wollen wir herausfinden, wie diese Säulen genau entstehen und welche Effekte sie haben.

Denkbar wäre, dass von diesen erhöhten Algen-Konzentrationen beispielsweise das Zooplankton profitiert. Zu diesem gehören zum Beispiel mikroskopisch kleine Krebstiere. Diese ernähren sich von den Mikroalgen des Phytoplanktons. Wenn ja, könnten auch Fische, die Zooplankton fressen, einen reich gedeckten Tisch zwischen den Windrädern vorfinden. Auch größere Fische wie der Kabeljau, die andere Fische fressen, würden auf diese Weise von dem eventuell erhöhten Beuteangebot profitieren. Die Parks könnten ein Refugium für verschiedene Fischarten werden und sich positiv auf das Ökosystem auswirken. Auch der Wind, der durch die Rotoren abgebremst wird, könnte die sommerliche Schichtung des Wassers auf einer Fläche, die wesentlich größer als der Windpark selbst ist, verändern. Um diesen Effekten auf die Spur zu kommen, wollen wir wieder hinaus aufs Meer: Die nächste Seereise ist schon geplant.

Dr. Jens Floeter ist Experte für Fischereiwissenschaft am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg.

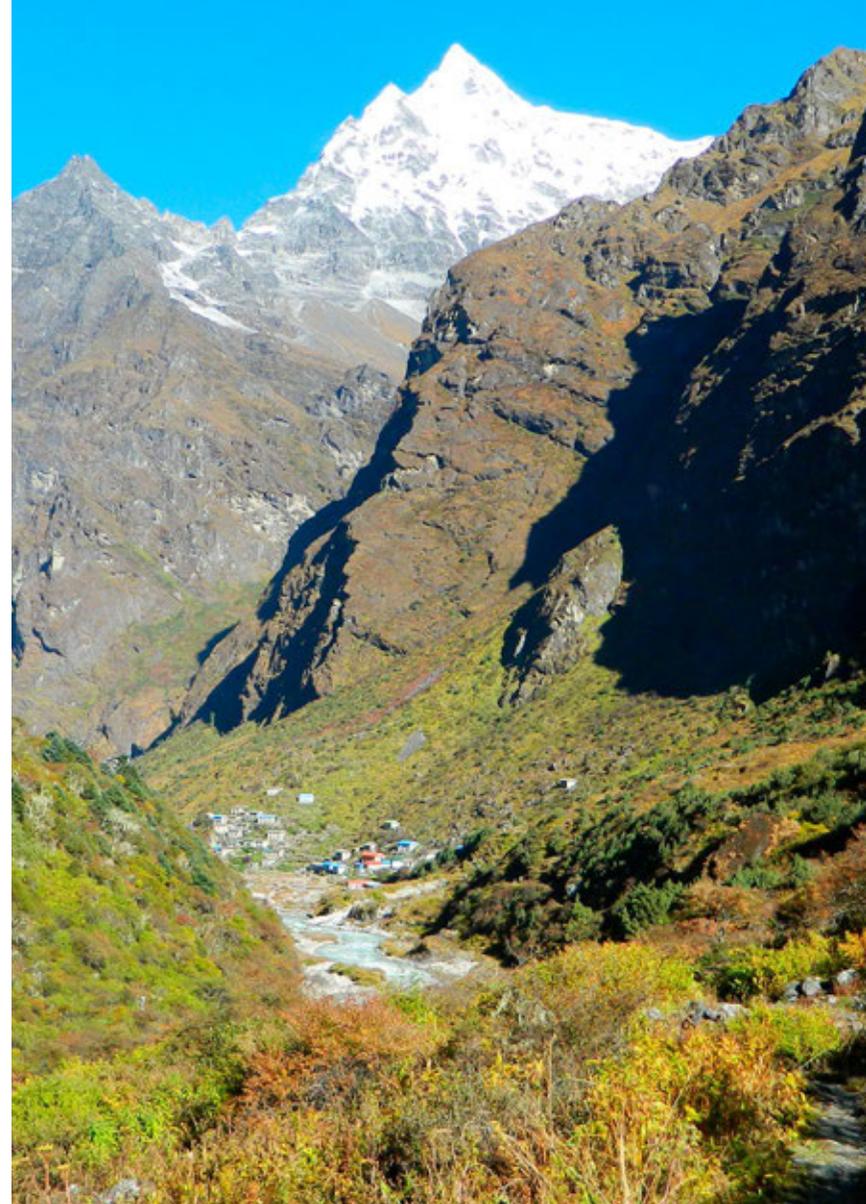


WIE EIN TAL IM HIMALAJA DEM KLIMAWANDEL TROTZT

Das kleine Dorf Beding schmiegt sich in rund 3.700 Meter Höhe an einen Berghang. Wir befinden uns im urwüchsigen Rolwaling-Tal – etwa 100 Kilometer östlich der nepalesischen Hauptstadt Kathmandu.

Hier, in der Bergwelt des Himalaja, schreitet der Klimawandel schneller voran als im globalen Mittel. Laut Messungen und Trendberechnungen ist die durchschnittliche Lufttemperatur von 1991 bis 2012 in dieser Höhe um 1,5 Grad Celsius gestiegen. Während in anderen Bergregionen die Waldgrenze mit den steigenden Temperaturen weiter nach oben klettert, ändert sie sich im Rolwaling-Tal nicht. Das erscheint paradox, denn für Bäume gibt es nun auch hier in höheren Lagen eine ausreichend lange Vegetationsperiode. Doch warum ist die Waldgrenze so stabil? Am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) der Universität Hamburg gehen meine Kollegin Birgit Bürzle und ich dieser Frage nach.

Wegen der kurzen Vegetationsperiode und niedrigen Temperaturen wachsen die Bäume an der Waldgrenze rund um Beding als geducktes Krummholz. Während in den Alpen





die Latschenkiefer die Krummholzzone prägt, dominieren hier robuste Rhododendron-Büsche. Sie sind zwei bis drei Meter hoch und bilden ein undurchdringliches Dickicht.

Die naturbelassene Baumgrenze bietet optimale Bedingungen für unsere Untersuchung. Weltweit gibt es nur noch wenige solcher unberührten Übergangsbereiche zwischen zwei verschiedenen Ökosystemen. In den Alpen etwa sind sie kaum noch zu finden. Da Menschen dort in den hohen Lagen Bäume gerodet haben und zuvor als Almen genutzte Flächen vom Wald zurückerobert werden, vermischen sich die Effekte, die durch den Klimawandel oder die Eingriffe des Menschen entstanden sind. Der Nordhang bei Beding dagegen wurde nicht verändert, weil er Buddhisten als heilig gilt.

Hier haben wir die Vegetation in verschiedenen Höhenstufen untersucht – sowohl auf der Ebene des Rhododendrongürtels sowie in den Bereichen unmittelbar darüber und darunter. Ich habe die Bäume gezählt und kartiert und dafür unter anderem ihre Höhe, den Durchmesser der Stämme und der Baumkronen ermittelt und Holzproben entnommen. Neben den Rhododendren wachsen hier Birke, Tanne, Esche, Ahorn und Wacholder. Meine Kollegin hat zudem alle Pflanzengesellschaften untersucht. Dazu zählen neben den Bäumen und ihrem Jungwuchs alle Sträucher, Kräuter und Gräser. Im gesamten Untersuchungsgebiet fand sie über 100 Arten. Doch





sie stellte fest, dass im Krummholzgürtel lediglich zwölf Arten in der Krautschicht wachsen. Es scheint so gut wie unmöglich, dass sich hier neue Arten ansiedeln.

Unsere Studien zeigen, dass die Zusammensetzung der Vegetation und die Position der Waldgrenze nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Nährstoffangebot und der Topografie abhängen. Darüber hinaus schaffen die immergrünen Rhododendren unwirtliche Bedingungen für andere Pflanzen. Da sie dicht wachsen, ist es am Boden dunkel. Und selbst wenn ein Pflänzchen keimt, können seine Wurzeln kaum durch das schwer zersetzbare Laub in die Erde dringen. Es gibt außerdem Hinweise, dass die Blätter toxische Stoffe an den Boden abgeben, die das Wachstum hemmen. So riegele die Rhododendren ihren Lebensraum gegen andere Arten ab. Gleichzeitig bilden sie eine Barriere, die verhindert, dass die Pflanzen aus dem Übergangsbereich der Waldgrenze nach oben wandern. Diese Hürde können auch Samen nicht überwinden. Der Effekt ist so stark, dass er trotz Klimawandel den Anstieg der Waldgrenze bisher verhindert.

Dr. Niels Schwab und **Birgit Bürzle** forschen im Bereich Vegetations- und Landschaftsökologie am Institut für Geografie der Universität Hamburg.



DAS GEHEIMNIS DER RÄTSELHAFTEN EISWOLKEN

Meine Forschungsobjekte kann ich an schönen Tagen aus den Fenstern meines Büros studieren: Cirruswolken, die aussehen wie Federn, mit zarten Pinselstrichen über den Himmel getupft. Sie befinden sich in sechs bis vierzehn Kilometern Höhe, bestehen aus winzigen Eispartikeln und spielen eine entscheidende Rolle im Klimageschehen. Wie sie aber genau wirken, verstehen wir erst ansatzweise.

Um mehr über die Cirren herauszufinden, habe ich am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) ein Messgerät entwickelt, das von einem Satelliten aus in die Eiswolken hineinsehen kann. 13 Jahre lang habe ich versucht, dieses Messgerät bei der Europäischen Weltraumagentur ESA unterzubringen. Nun hat es endlich geklappt: Im Jahr 2023 startet „ICI“ (für „Ice Cloud Imager“) mit dem Wettersatelliten MetOp-SG in den Weltraum und beobachtet Cirren und andere Eiswolken zwanzig Jahre lang aus 800 Kilometern Höhe.

Wolken haben einen enormen Einfluss auf unser Klima. Einerseits reflektieren sie einen Teil der von der Sonne kom-



menden Strahlung zurück in den Weltraum. Andererseits halten sie einen Teil der von der Erde ausgehenden Wärmestrahlung zurück, die sonst in den Weltraum entweichen würde. So beeinflussen sie die Temperatur auf unserem Planeten.

Allerdings gibt es Unterschiede. Tiefhängende Wolken aus flüssigen Wassertropfchen reflektieren vergleichsweise viel kurzwellige Sonnenstrahlung und lassen viel langwellige Wärmestrahlung der Erde entweichen – ihren kühlenden Effekt kann man oft am eigenen Leib spüren. Cirren und andere Wolken aus Eisteilchen haben hingegen ganz andere physikalische Eigenschaften. Sie lassen mehr Sonnenstrahlung durch und halten gleichzeitig mehr Wärmestrahlung zurück; wirken also eher erwärmend als kühlend.

ICI wird messen, wie viel von der Erde kommende Strahlung eine Eiswolke durchlässt. Bisher können Forscherinnen und Forscher diese Strahlung nur in bestimmten Abschnitten des elektromagnetischen Spektrums messen: Ein Drittel entweicht unbeobachtet in den Weltraum. ICI dringt in diesen unerforschten Bereich vor und erfasst Strahlung im sogenannten „Submillimeterbereich“, zwischen 1,5 und 0,5 Millimetern Wellenlänge.

Dass solche Messungen mit heutigen Sensoren möglich sind, haben wir in verschiedenen Tests geprüft. So haben wir zusammen mit britischen Wissenschaftlerinnen und Wissen-

schaftlern einen Prototyp des Instruments auf ein Flugzeug montiert und über Eiswolken fliegen lassen. Mit den Ergebnissen sind wir sehr zufrieden. Das ist zwar noch keine Garantie, dass ICI auch im Weltraum fehlerfrei arbeiten wird, aber eine gute Voraussetzung.

Mit Hilfe der gewonnenen Daten können wir bestimmen, wie sich eine Wolke zusammensetzt: Wie viel Eis sie enthält, wie groß die einzelnen Kristalle sind und ob neben Eispartikeln auch Wassertropfchen vorhanden sind. Diese Informationen brauchen wir, um unsere Klimarechenmodelle zu verbessern. Sie können Wolken nur stark vereinfacht darstellen: Die Wolken, die es heute gibt, und erst recht die Wolken, die es in Zukunft geben wird. Denn der Klimawandel wird sich auf sie auswirken. Ob es zukünftig allerdings mehr oder weniger Eiswolken geben wird, ob sie an anderen Orten auftreten oder sich anders zusammensetzen werden, wissen wir noch nicht. Dank „ICI“ werden wir das besser vorhersagen können – und die ersten Veränderungen quasi „live“ miterleben.

Stefan Bühler ist Professor am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg und geschäftsführender Direktor des Meteorologischen Instituts.

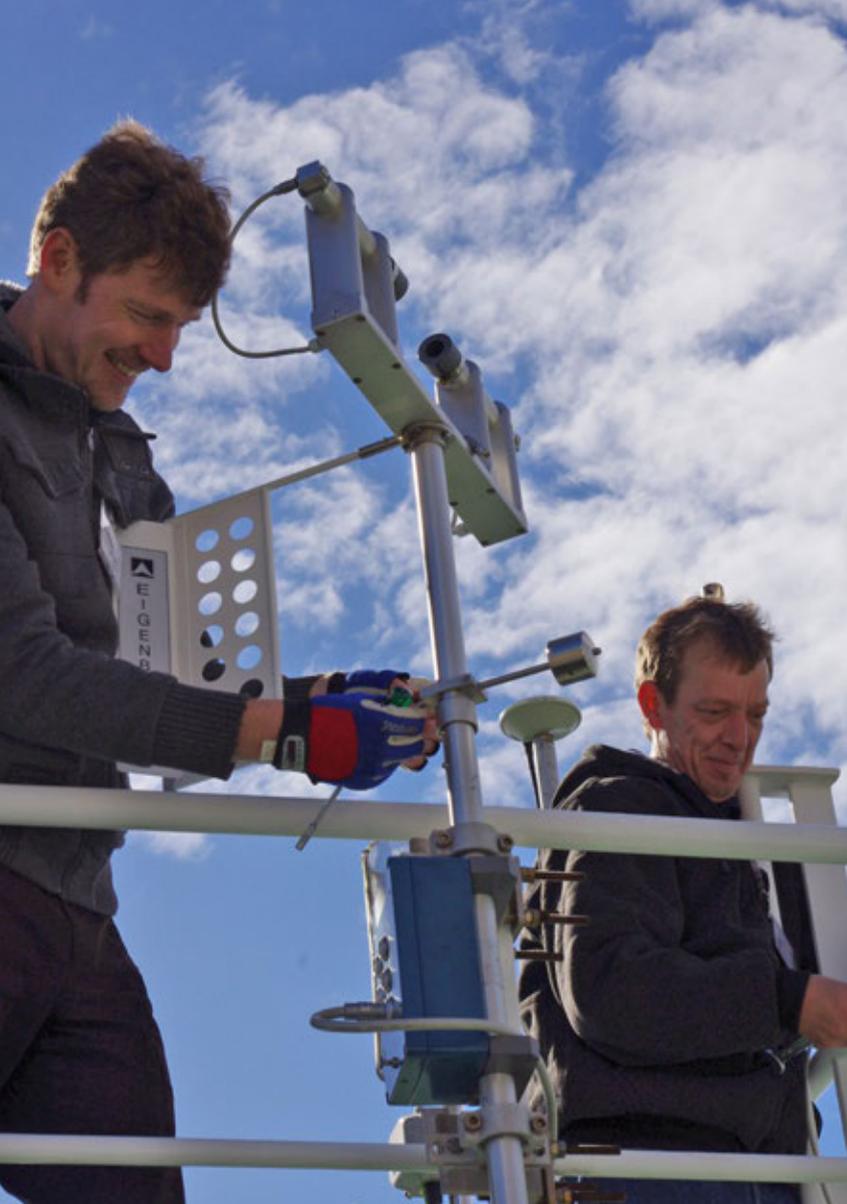
DIE REGENFÄNGER AUF DEM OZEAN

„Wie eine Wand aus Wasser! Es schüttete so sehr, dass ich meine Hand am ausgestreckten Arm nicht sehen konnte“, so berichtete ein Besatzungsmitglied des Forschungsschiffs Meteor von einem heftigen Tropenschauer vor der Küste Guineas.

Zur selben Zeit, am 14. September 2015, war auch eines meiner Messgeräte an Bord. Es zeichnete mehr als 40 Liter Regen pro Quadratmeter in 20 Minuten auf. Der Wolkenbruch über dem Meer muss gewaltig gewesen sein. Zum Vergleich: Eine Unwetterwarnung in Deutschland erfolgt bei acht Litern Regen pro Quadratmeter in derselben Zeit.

Das extreme Messergebnis ist Teil eines neuen Datensatzes der Weltozeane, den ich am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) entwickle. Mein Projekt OceanRAIN schließt eine Forschungslücke, denn der Niederschlag über dem Meer wurde bislang nicht präzise und umfassend von Schiffen aus gemessen. Doch rund 80 Prozent aller Niederschläge fallen über den Ozeanen. Die Meere spielen also eine Schlüsselrolle für den Wasserkreislauf im Klimasystem. Dazu gehört auch die Verdunstung, die wir ebenfalls messen.





Ein globales Bild liefern spezielle Satelliten. Sie bestimmen den Niederschlag indirekt über ein gemessenes Strahlungsfeld. Dazu sind Rechenvorschriften nötig – Algorithmen, die das Strahlungsfeld in Niederschlag umrechnen. Weltweit erstellen zahlreiche Forschungsinstitute solche Algorithmen. Ihnen fehlten bisher jedoch hochqualitative Schiffsmessungen des Niederschlags über den Ozeanen. Mit deren Hilfe lassen sich die Satellitendaten jetzt erstmals überprüfen, kalibrieren und verbessern: Die Satelliten sind dann richtig eingestellt, wenn sie das erzeugen, was unsere Geräte gemessen haben. So lassen sich auch Klimamodelle verbessern, die wiederum mit den Satellitendaten geprüft werden.

Bislang fehlten Messungen über den Ozeanen, weil es keine geeigneten Geräte gab. Während an Land spezielle Messtöpfe den Regen – und mit Unsicherheiten auch Schnee – auffangen, erfordern die Messungen an Bord eine andere Methode. Denn hier fegt der Wind den Niederschlag häufig über die Behälter hinweg, sodass sie leer bleiben. Auf dem Schiff sind die Töpfe mehr Bewegungen ausgesetzt – zum Beispiel starkem Fahrtwind oder zusätzlichen Turbulenzen durch die Aufbauten an Deck.

Die Lösung bietet ein elektronisches Gerät, mit dem ich Menge und Art des Niederschlags ermitteln kann: ein optisches Distrometer. Es registriert jeden einzelnen Regentropfen

und jede Schneeflocke und bildet dabei jeweils eine Schattenfläche ab. Zusammen mit dem Hersteller habe ich das Gerät für den automatischen Betrieb optimiert. Den bisherigen Satellitendaten ist es sogar überlegen, weil es zwischen Regen, Schnee und Mischphasen unterscheidet. Mit einem Distrometer konnten wir auch Schneefall bei minus vierzig Grad präzise messen. Es erfasst Niederschlag in 128 verschiedenen Partikelgrößen von 0,1 bis 22 Millimeter Durchmesser.

Mittlerweile fahren weltweit vierzehn Schiffe mit unseren Distrometern. Die längste kontinuierliche Datenserie sammelte der Eisbrecher Polarstern: Sieben Jahre lang hat er Regen, Schnee und Mischphasenniederschlag vom Nordpolarmeer bis zur Antarktis aufgezeichnet. Vor Beginn meines Projekts gab es insgesamt nur etwa 10.000 Regenmessungen über den Weltmeeren in vergleichsweise geringer Qualität. Inzwischen haben wir mehr als sieben Millionen Messungen durchgeführt, von denen etwa zehn Prozent Niederschlag enthalten. Diese stellen wir der Fernerkundung und Klimaforschung zur Verfügung – und der Datensatz wächst weiter.

Dr. Christian Klepp arbeitete als Geowissenschaftler am Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit der Universität Hamburg.



Bildnachweis

©picture alliance/Bildagentur-online/Fischer (Titel), ©picture alliance/ZB/euroluftbild/Hans Blosssey (Titel innen), ©iStock.com/Markus Volk (S. 5 o.), ©iStock.com/Andyworks (S. 5 u.), ©iStock.com/yrabota (S. 6), ©iStock.com/moose henderson (S. 9), ©iStock.com/spooh (S. 11), ©Thomas Wasilewski/Universität Hamburg (S. 12), ©iStock.com/Bim (S. 15 o.), ©iStock.com/style-photography (S. 15 u.), ©iStock.com/Extreme Media (S. 17 o.), ©iStock.com/kontrast-fotodesign (S. 17 u.), ©iStock.com/fotojog (S. 18 o.), ©Silvio Wyszengrad/Augsburger Allgemeine (S. 18 u.), ©picture alliance/Wolfgang Kumm (S. 20/21), ©iStock.com/Jan-Otto (S. 23), ©iStock.com/Marcus Millo (S. 25 o.), ©iStock.com/Thomas Demarczyk (S. 25 u.), ©picture alliance/Angelika Warmuth (S. 26 o.), ©picture alliance/Daniel Bockwoldt (S. 26 u.), ©iStock.com/Koraysa (S. 31 o.), ©iStock.com/Andrey Danilovich (S. 31 u.), ©Elisa Schaum/Universität Hamburg (S. 34), ©Jens Floeter/Universität Hamburg (S. 38), ©Øystein Paulsen (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meganyctiphanes_norvegica2.jpg), „Meganyctiphanes norvegica2“, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode> (S. 41 o.), ©August Linnman from Stockholm, Sweden, a.k.a Alinman contribs (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Portrait_of_Cod.jpg), „Portrait of Cod“, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode> (S. 41 u.), ©Niels Schwab/Universität Hamburg (S. 43-44 o.) ©Michael Wandinger (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rolwaling_Beding.jpg), „Rolwaling Beding“, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode> (S. 44 u.), ©Niels Schwab/Universität Hamburg (S. 46-49), ©Stefan Bühler/Universität Hamburg (S. 51 o.), ©<http://airbusdefenceandspace.com> (S. 51 u.), ©iStock.com/borchee (S. 55), ©Christian Klepp (S. 56-59)

Herausgeber

Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN),
Universität Hamburg
www.cen.uni-hamburg.de

Redaktion

Julika Doerffer, Stephanie Janssen, Christina Krätzig, Ute Kreis,
Franziska Neigenfind, Lisa Wolf
Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN)

Gestaltung

HAAGEN design, Hamburg

Auflage: 3.000

Hamburg, 2020

mit freundlicher Unterstützung des Hamburger Abendblatts