

Wann gibt es keinen Weg mehr zurück?

Wird unser Klima plötzlich kippen, wenn wir so weitermachen wie bisher? Und wenn ja, wann und wie schnell? Welche Folgen würde das haben? Niklas Boers, Professor für Erdsystemmodellierung an der TUM, und sein Team suchen darauf Antworten. Mit mathematischen Methoden beschreiben sie, wie das Klima unserer Erde funktioniert. Sie testen ihre Modelle an Daten aus der Vergangenheit und versuchen damit Prognosen zu erstellen. Der TUM-Mathematiker Prof. Christian Kuehn sorgt dafür, dass das Ganze auch theoretisch auf verlässlichen Beinen steht.

Full Article (PDF, EN): www.tum.de/faszination-forschung

How Close is the Point of No Return?

E

The search for climatic tipping points: Participating in the European TiPES project, Niklas Boers, Professor of Earth System Modeling at TUM, is applying mathematical methods with his team to describe how our planet's climate works. The researchers use past climate data to test their models and endeavor to produce forecasts. Tipping points at which abrupt changes occur in the climate system are a particular focus of their research. TUM mathematician Prof. Christian Kuehn also ensures that the entire project is on a sound theoretical footing.

Our Earth's climate system is not the only possible stable state: instead, there may be different variants, such as warm and cold states. Between these states, there are tipping points at which the climate can transform relatively swiftly from one state to another. While paleontologists have found indications of this, geological findings have proven that the Earth has alternated between warm phases and ice ages many times.

In mathematical terms, tipping points are critical thresholds; exceeding these thresholds triggers an abrupt, lasting transformation in the state or development of a system. □

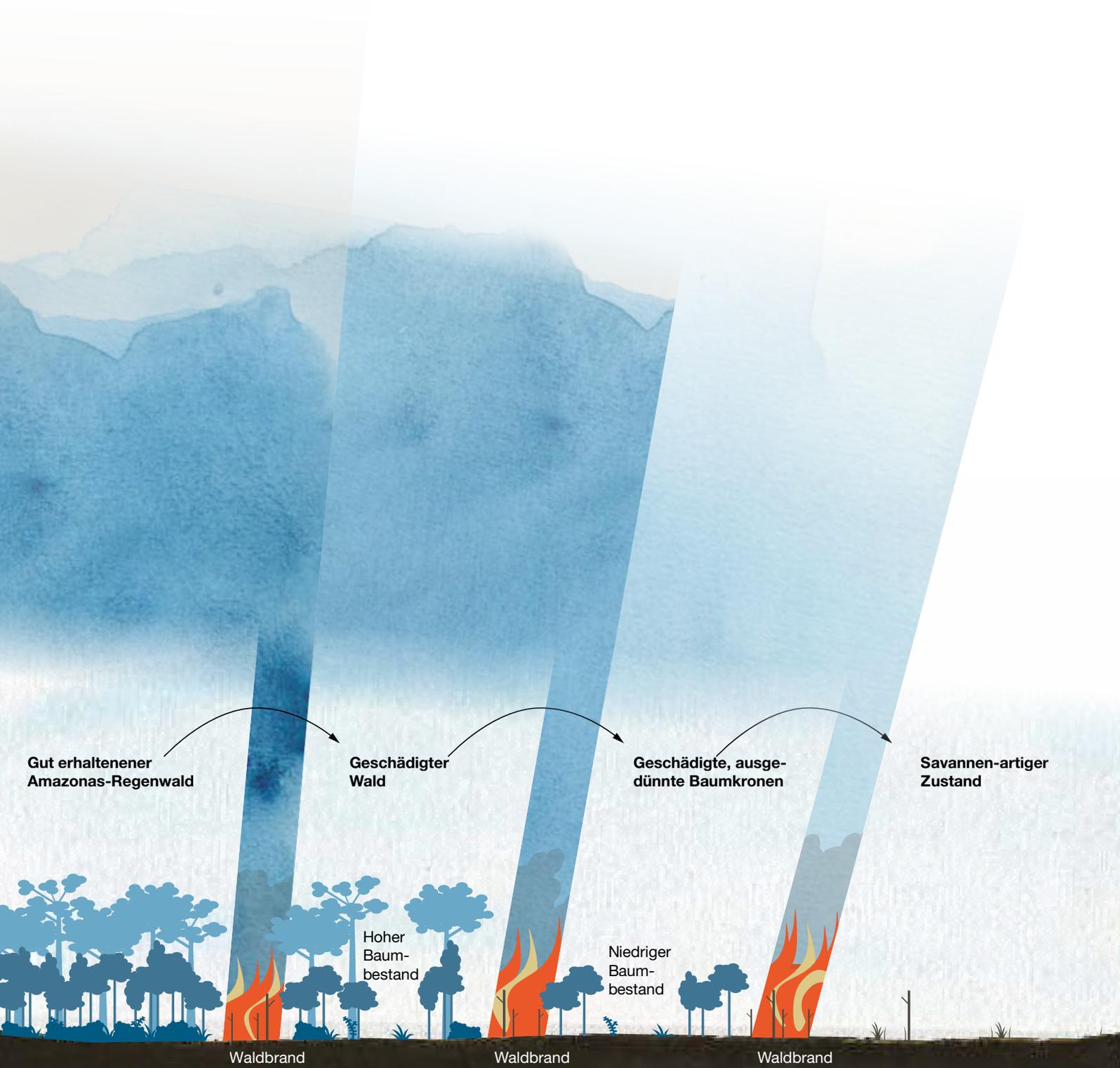


Link

www.asg.ed.tum.de/esm

www.tipes.dk/

www.math.cit.tum.de/math/personen/professuren/kuehn-christian/



Wenn der Wissenschaft vorgeworfen wird, sie sitze im Elfenbeinturm und habe keinen Bezug zur realen Welt, dann ist Niklas Boers das perfekte Gegenbeispiel. Er verbindet Mathematik und theoretische Physik mit Fragen, die heute an Relevanz kaum zu übertreffen sind: Er und seine Leute untersuchen, wie sich das Klimasystem unserer Erde in Zukunft entwickeln wird.

Der heute 39-jährige Mathematiker und theoretische Physiker Niklas Boers hatte irgendwann keine Freude mehr an der rein theoretischen Arbeit und suchte sich deshalb für seine Doktorarbeit ein Gebiet, das praktische Relevanz hat: „So kam ich zur Klimamodellierung.“ Heute ist er einer der führenden Forscher auf diesem Gebiet, und er hat ein extrem spannendes Thema im Visier, das die Zukunft der ganzen Menschheit betrifft: Kipppunkte im Klimasystem. Dazu hat er unter anderem das Großprojekt TiPES ins Leben gerufen, bei dem 18 Universitäten und Forschungslabors aus zehn europäischen Ländern zusammenarbeiten. Am 1. März 2024 startete das Folgeprojekt ClimTip, das er von der TUM aus koordiniert.

Das Kippen des Regenwalds in einen savannenartigen Zustand ist ein iterativer, mit positiven Rückkopplungen verbundener Prozess. Abholzung und Schädigung der Wälder reduzieren den Feuchtegehalt im System und erhöhen die Wahrscheinlichkeit für Brände. Feuer wiederum dünnt die Unterholzvegetation aus, der Boden wird trockener, was die Bildung neuer Feuer begünstigt usw.

Der Regenwald ist in Gefahr

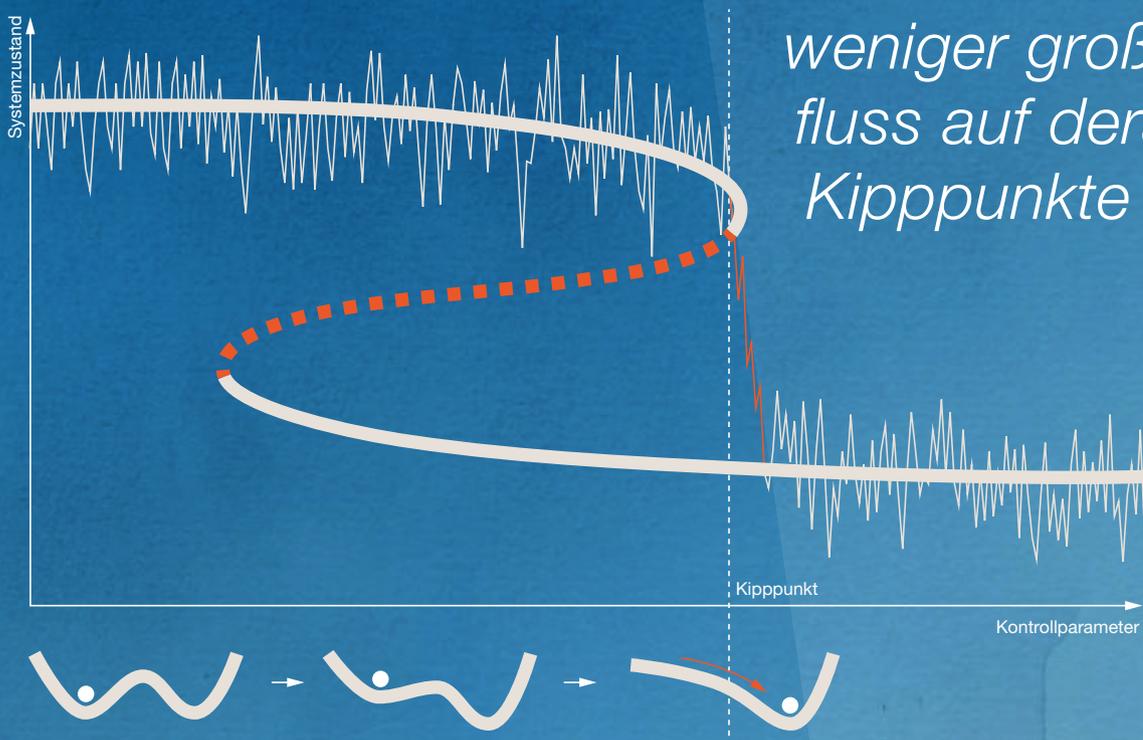
„Die Idee zu TiPES entstand 2015 in meiner Zeit als Postdoc an der Ecole Normale Supérieure in Paris bei Michael Ghil“, sagt Boers. Der israelisch-amerikanische Mathematiker und Physiker Ghil gilt als einer der Väter der theoretischen Klimadynamik. Er verstand es bereits Ende der 70er Jahre, mathematische Modelle für Luft- und Wasserströmungen zu entwickeln, die die wichtigsten Klimaphänomene beschreiben, und im Lauf der Jahrzehnte verfeinerte er sie immer mehr. Dabei wandte er Instrumente der modernsten Mathematik an. Bei seinen Berechnungen erkannte er, dass das Klimasystem unserer Erde nicht das einzig mögliche stabile ist, sondern dass es unterschiedliche Varianten geben kann, zum Beispiel warme und kalte Zustände. Dazwischen gibt es Kipppunkte, an denen das Klima relativ schnell von einem in den anderen Zustand wechseln kann. Paläontologen hatten so etwas schon vermutet, weisen doch geologische Befunde darauf hin, dass sich früher warme Phasen und Eiszeiten mehrfach abwechselten. Mathematisch gesprochen, stellen Kipppunkte oder englisch Tipping Points kritische Schwellenwerte dar, deren Überschreiten den Zustand oder die Entwicklung eines Systems abrupt und nachhaltig verändert.

Ein besonders einleuchtendes Beispiel, das heute von großer Aktualität ist, ist die Abholzung des Regenwaldes: In diesem Ökosystem zirkuliert viel Wasser und wird zwischen Atmosphäre und Regenwald ausgetauscht, was zu ausgiebigen Regenfällen führt. Roden die Menschen immer größere Flächen, vermindern sich die Wassertransporte durch die Luft, und es wird irgendwann ein Kipppunkt erreicht, an dem das Ökosystem insgesamt austrocknet und damit unaufhaltsam zusammenbricht – mit schwerwiegenden Folgen für die gesamte Flora und Fauna, aber auch für das Weltklima. Ein solches Kippen könnte innerhalb weniger Jahrzehnte passieren.

Genau solche Tipping Points zu erforschen und nach Möglichkeit vorherzusagen ist das Ziel der EU-Horizon-Projekte TiPES und ClimTip. In mühsamer Kleinarbeit gewann Boers die wichtigsten einschlägigen Forscherinnen und Forscher Europas zu dieser Zusammenarbeit. „Das ist wie ein großes Mosaik. Jeder macht das, was er am besten kann, wir tauschen uns intensiv untereinander aus und fügen am Ende alles zusammen“, so Boers als stellvertretender Koordinator von TiPES. Das Projekt wurde mit 8,5 Millionen Euro gefördert und ging am 29. Februar 2024 nach viereinhalb Jahren zu Ende. ClimTip wird sogar noch etwas umfangreicher sein, Niklas Boers wird es koordinieren. ▶

„Wir erforschen, welche Parameter man in den Simulationen besonders berücksichtigen muss und welche weniger großen Einfluss auf derartige Kippunkte haben.“

Christian Kuehn



Ein sehr einfaches Beispiel für einen Kippunkt ist das Verhalten einer Kugel in einem Potenzialtopf. So lange die Wände dieses Topfes noch relativ steil sind, wird die Kugel nach einer Auslenkung immer wieder zu ihrem Ausgangspunkt zurückrollen. Verändert sich ein Systemparameter so, dass die Wände flacher werden, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Kugel aus dem Potenzialtopf herausrollt und in einen benachbarten Topf fällt, aus dem sie nicht mehr zurück kann. Damit hätte sie einen Kippunkt überschritten. Selbst wenn man die Systemparameter zurücksetzt und so den ursprünglichen Topf wieder herstellen würde, bliebe die Kugel in ihrem neuen Zustand. Mathematisch nennt man dieses Verhalten Bifurkation, und der Wert des Kontrollparameters, an dem das System in einen anderen Zustand springt, ist der Bifurkations- oder Kippunkt. Klimamodellierer versuchen nun herauszufinden, ob man in den Klimamessungen derartige Abflachungen vor einem möglichen Kippunkt bereits beobachten kann.

Welche Daten sind wichtig, welche nicht?

Klimamodelle sind extrem komplexe Gebilde, die die Grenzen der verfügbaren Computerpower ausreizen. So rechnen die Forscherinnen und Forscher ihre Modelle auf den leistungsfähigsten Großrechnern der Welt, und manche benötigen monatelange Rechenzeit. Die Ergebnisse können zeigen, wie klimatische Veränderungen, die zum Beispiel oft jahrelang kontinuierlich ansteigen, sich plötzlich aufschaukeln und zu einem Kipppunkt führen, der womöglich unumkehrbar ist. In der Physik und Mathematik wird in diesem Kontext von Feedbacks und nichtlinearer Dynamik gesprochen, die daraus resultierenden „Bifurkationen“ sind ein mathematisches Konzept, um abrupte Übergänge im Erdsystem zu beschreiben.

Wahrscheinlichkeitsrechnung trifft nichtlineare Dynamik

Christian Kuehn untersucht auf theoretische Art und Weise, wie zuverlässig Klimamodelle sein können: „Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Arten, die Welt mathematisch zu betrachten.“

Entweder man verfolgt die physikalischen Vorgänge entlang ihrer deterministischen Gesetzmäßigkeiten und erhält so bestimmte Werte, die dann aber aufgrund vieler Störungen durch äußere Einflüsse gewisse Unsicherheiten haben (Rauschen). Diese können sich addieren oder auslöschen. Man muss deshalb bei jedem Ergebnis im Auge behalten, welche Unsicherheit es beinhaltet.

Oder man betrachtet alle Vorgänge als Wahrscheinlichkeiten, wie etwa einen Würfel, der zufällig Zahlen anzeigt. Auch aus deren Zusammenspiel kann man bestimmte Gesetzmäßigkeiten ableiten, und hier muss man beim Ergebnis die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der es eintritt. So können bestimmte Kipppunkte sehr unwahrscheinlich sein, aber wenn sie eintreten, katastrophale Folgen haben (high impact, low probability).

„Die Wahrheit liegt zwischen den beiden Sichtweisen“, sagt Christian Kuehn und entwickelt deshalb eine Kombination aus nichtlinearer Dynamik und Wahrscheinlichkeitstheorie, um Modelle robuster zu machen.

Um derartig komplexe Sachverhalte überhaupt auf dem Computer simulieren zu können, muss man viele Vereinfachungen treffen. Und hier tauchen sofort grundlegende Fragen auf: „Darf man das? Funktioniert das? Wie wirkt sich das aus?“ Um sicherzustellen, dass derartige Computermodelle auch mathematisch seriös sind und die Wirklichkeit möglichst gut beschreiben und nicht nur künstliche Effekte produzieren, kooperiert Niklas Boers mit Christian Kuehn, 41. Der Mathematiker leitet seit 2016 – nach Stationen an verschiedenen renommierten mathematischen Forschungsinstituten wie der University of Cambridge in England und der Cornell University (USA) – an der TUM die Professur für „Mehrskaligkeit und Stochastische Dynamik“. Seine Erkenntnisse wendet er auch auf viele praktische Bereiche an, etwa auf Neurowissenschaften, Epidemiologie, Meinungsbildung, Fluidmechanik oder medizinische Fragen. 2011 kam Kuehn mit dem Thema Klimamodellierung in Kontakt und fand das Thema so faszinierend, dass er sich näher damit befasste. Boers und Kuehn trafen sich 2016 auf einer Tagung, und seit 2017 arbeiten sie eng zusammen. Kuehn und sein Team entwickeln auf rein theoretischem Wege Regeln und Prüfmechanismen, die sicherstellen, dass bei solchen Modellierungen keine unsinnigen Ergebnisse entstehen. „Wir erforschen, welche Parameter man in den Simulationen besonders berücksichtigen muss und welche weniger großen Einfluss auf derartige Kipppunkte haben“, sagt Kuehn. „Insgesamt versuchen wir, eine Art Werkzeugkasten für die Klimamodellierer zu erstellen, aus dem sie sich je nach ihren Voraussetzungen und Zielen die richtigen Verfahren herauspicken können.“ Denn es gibt ganz unterschiedliche Herangehensweisen, die für einzelne Fragestellungen mal besser, mal schlechter geeignet sind. ▶

Klimasysteme, die in Gefahr sind zu kippen:

TiPES und ClimTip untersuchen eine ganze Reihe von Tipping Points im Klimasystem der Erde. Derartige Kippunkte werden vom Menschen beeinflusst, unter anderem durch die Erderwärmung. Hier vier Beispiele:

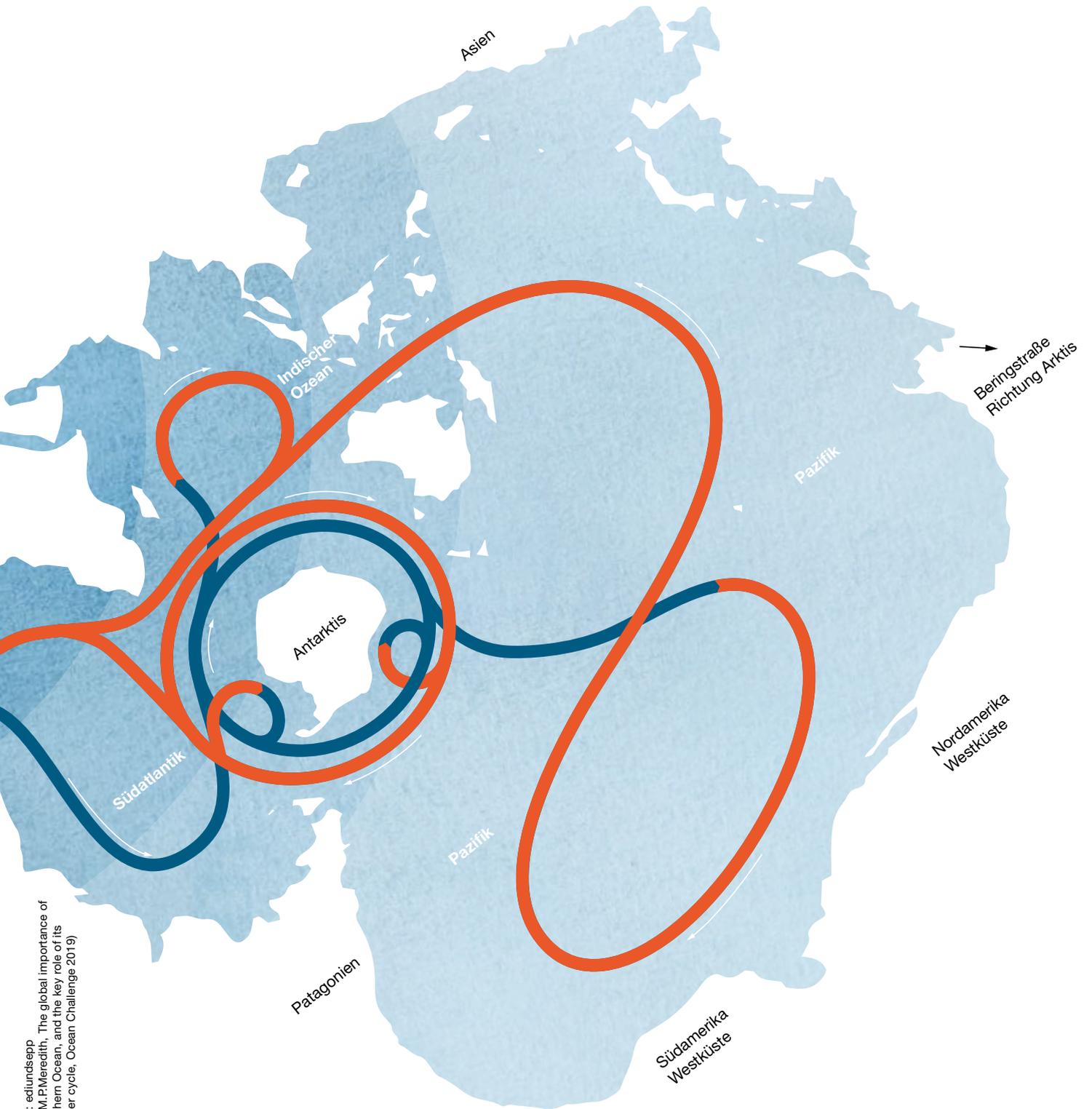
1 Wenn die obersten, weißen Schichten **des Eisschildes in Grönland** schmelzen, kommt dunkleres Eis an die Oberfläche. Dieses absorbiert immer mehr Sonnenwärme, gleichzeitig wird der Eisschild niedriger, und auf dieser geringeren Höhe ist es auch wärmer. Beides verstärkt das Abschmelzen; die Effekte schaukeln sich auf, bis sie nicht mehr reversibel sind. „In einer Studie konnte ich zeigen, dass ein Teil des Grönlandeisschildes im Lauf des letzten Jahrhunderts bereits an Stabilität verloren hat“, sagt Niklas Boers.

2 Eine Ozeanströmung, die **Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)**, fließt im Atlantik an der Meeresoberfläche von Süden nach Norden, sie wird getrieben durch Dichteunterschiede. Da auf dem Weg stetig ein Teil des Wassers verdunstet, vergrößert sich der Salzgehalt der Strömung immer weiter. Das warme, salzhaltige Wasser kommt im Nordatlantik an und kühlt dort ab. Dieses dann sehr kalte, salzige Wasser ist so schwer, dass es in die Tiefe absinkt. Das ist der Motor für die Ozeanzirkulation. Je mehr Salz durch die Strömung nach Norden transportiert wird, desto stärker ist dieser Motor. Leider gilt aber auch: Je mehr Süßwasser etwa durch Eisschmelze in Grönland in den nördlichen Atlantik kommt, desto schwächer kann die Zirkulation werden. Sollte die AMOC einen Kippunkt überschreiten, hat das weitreichende Auswirkungen auf das globale Klima. Ganz konkret würde es beispielsweise zu einer deutlichen Absenkung der durchschnittlichen Temperatur vor allem im nördlichen Europa führen.

3 Das Kippen der AMOC würde auch zu massiven Veränderungen in den **tropischen Monsunsystemen** führen. Diese könnten in Folge eines AMOC-Kollapses innerhalb kurzer Zeit kippen, was den Menschen kaum Zeit ließe, sich anzupassen.

4 Die Abholzung des **Regenwaldes**: In diesem Ökosystem zirkuliert Wasser, was zu Regenfällen führt. Roden die Menschen immer größere Flächen des Regenwaldes, vermindern sich die Wassertransporte durch die Luft, und es wird irgendwann ein Kippunkt erreicht, an dem das Ökosystem innerhalb weniger Jahre austrocknet und damit zusammenbricht – mit schwerwiegenden Folgen für die gesamte Flora und Fauna, aber auch für das Weltklima.





Grafiken: edlundsepp
(Quelle: M.P.Meredith, The global importance of the Southern Ocean, and the key role of its freshwater cycle, Ocean Challenge 2019)



Warmes, salzhaltiges Wasser strömt nach Norden und kühlt nahe der Eisschelfe ab. Das kalte und salzhaltige (und daher schwere) Wasser sinkt in die Tiefe und strömt nach Süden.



Der schmelzende Eisschild verdünnt das salzhaltige Oberflächenwasser. Es wird leichter und die Zirkulation wird schwächer.



Irgendwann stoppt die thermohaline Zirkulation. Die nördliche Hemisphäre wird kühler und trockener.

Das Grönlandeis schmilzt ab

Eine Frage, die Niklas Boers und Christian Kuehn besonders intensiv untersucht haben, sind die Wärmeströmungen im Nordatlantik. Hier wirken mehrere Effekte zusammen: Erstens die Winde, die große Wassermassen vor sich her treiben, zweitens die Temperatur, denn die nach Norden strömenden Wassermassen kühlen sich ab und werden so schwerer, und drittens der Salzgehalt des Wassers, denn mehr Salz macht das Wasser noch schwerer. Im Nordatlantik angekommen, sinken diese schweren Wassermassen in die Tiefe des Ozeans. Betrachtet man das Zusammenspiel dieser zum Teil gegenläufigen Effekte, erkennt man, dass es im Atlantik eine riesige Ozeanströmung gibt, die „Atlantic Meridional Overturning Circulation“ (AMOC). Sie ist hauptsächlich verantwortlich für die gemäßigten Temperaturen auf unserem Kontinent.

Wenn nun jedoch das Grönlandeis – auch wegen der Erderwärmung – zunehmend abschmilzt, gerät an ihrem Nordende immer mehr leichtes Frischwasser in die Strömung, was das Gesamtsystem verlangsamt. Boers und sein Team haben sich nun gefragt, wie lange das noch gehen kann, bevor es umkippt. „Der aktuelle Strömungszustand ist laut Studien der schwächste seit mindestens 1500 Jahren“, sagt Boers. „Wir wollten nun herausfinden, ob es sich um ein rein lineares Abschwächen oder um eine Destabilisierung in Richtung eines kritischen Punktes handelt. An diesem Kippunkt würde die Strömung abrupt deutlich schwächer. Wir fanden heraus, dass wir uns tatsächlich in Richtung eines potentiellen Kippunktes bewegen.“

“Der aktuelle Strömungszustand ist laut Studien der schwächste seit mindestens 1500 Jahren. Wir wollten nun herausfinden, ob es sich um ein rein lineares Abschwächen oder um eine Destabilisierung in Richtung eines kritischen Punktes handelt.”

Niklas Boers

Sollte dieser überschritten werden, hätte das weitreichende Auswirkungen auf das globale Klima. Ganz konkret würde es zu einer deutlichen Abkühlung und Austrocknung der nördlichen Hemisphäre führen, aber auch zu Veränderungen in den tropischen Monsunsystemen sowie zu einem regionalen Anstieg des Meeresspiegels. Wann dieser Punkt allerdings auftreten wird, ist noch ungewiss, und die Wissenschaft ist sich darüber uneinig. Manche glauben, es könnte schon in den nächsten Jahren passieren, Niklas Boers hingegen meint eher, dass die AMOC die nächsten Jahrzehnte noch stabil bleibt.

Ihm ist es wichtig, diese und andere Erkenntnisse in die aktuellen Diskussionen über die Klimakrise einzubringen. „Manchmal schreiben mir Menschen, die regelrecht verzweifelt sind, weil sie glauben, es gibt einen Domino-Effekt der Kippunkte und wir rasen unaufhaltsam in eine Klimakatastrophe“, sagt er. „Ich versuche sie dann zu beruhigen und ihnen zu erklären, dass wir durchaus noch die Chance haben, die gefährlichsten Folgen des anthropogenen Klimawandels zu vermeiden.“ Überhaupt versucht er, auch im Sinne der TUM Sustainable Futures Strategy 2030, seine Erkenntnisse unter die Leute zu bringen. Zugleich freut er sich auf die anstehenden wissenschaftlichen Herausforderungen. „Zum Beispiel müssen wir besser darin werden, zu berechnen, wie resilient ein reales System ist, also wie gut es in der Lage ist, Störungen auszuhalten. An dieser Frage forschen wir ebenfalls und erhoffen uns auch von Christian Kuehn dazu neue mathematische Erkenntnisse.“ ■ *Brigitte Röthlein*



Bildnachweis: Magdalena Jooss

Prof. Niklas Boers

1983 in Norddeutschland geboren, zog es ihn zum Studium der Physik und Mathematik nach München, auch der nahen Berge wegen. Danach folgten die Promotion in Berlin, Forschungsaufenthalte am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, an der Ecole Normale Supérieure in Paris und am Imperial College London. 2021 wurde Boers an die TUM berufen, was ihn wegen der Alpennähe besonders freute. Er ist politisch sehr engagiert, vor allem, wenn es um Klimafragen geht. Was ihn antreibt ist, dass er der nächsten Generation eine lebenswerte Erde hinterlassen will.



Mehr über Nachhaltigkeit an der TUM:

www.tum.de/en/about-tum/goals-and-values/sustainability