

»Eine permanente Extremsituation«

Nicht nur an Land spielt das Wetter immer öfter verrückt: In den Ozeanen häufen sich Ereignisse wie Warmwasserblasen oder Säureextreme. Treten mehrere solcher Bedingungen gleichzeitig auf, geraten Meerestiere besonders unter Druck. Der Klimawissenschaftler Thomas Frölicher ist einer der Ersten, die das noch kaum untersuchte Phänomen erforschen.

» spektrum.de/artikel/2128554

Spektrum: Herr Frölicher, wir wollten ursprünglich über Hitzewellen im Ozean sprechen, aber Sie sagten mir, so genannte »compound events« seien viel spannender. Worum handelt es sich dabei?

Thomas Frölicher: Ich forsche schon eine Weile an Warmwasserextremen, also an marinen Hitzewellen. Unsere aktuellsten Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass diese marinen Hitzewellen meist nicht allein auftreten, sondern oft zusammen mit anderen Extremereignissen. Man spricht dann von kombinierten Extremereignissen, so genannten »compound events«. Das ist relativ neu.

Wie sind Sie darauf gestoßen, dass diese kombinierten Ereignisse wichtig sind?

Im Nordostpazifik ereignete sich zwischen 2013 und 2015 eine riesige Warmwasserblase – der »Blob«. Seine Auswirkungen waren verheerend, da er unter anderem schädliche Algenblüten und Massensterben von gewissen Tierarten verursachte. Die extrem hohe Wassertemperatur war durch Satellitenmessungen bekannt. Mit Hilfe eines hochaufgelösten Ozeanmodells haben wir untersucht, was während solch einer Warmwasserblase mit anderen Stressfaktoren passiert. Dabei stellten wir fest, dass die beobachteten Auswirkungen – darunter gestrandete tote Fische und Algenblüten – möglicherweise nicht nur eine Folge von warmem Wasser waren, sondern eine Konsequenz verschiedener Stressfaktoren. Und so haben wir unseren Fokus auf compound events gelegt.

Von welchen Stressfaktoren sprechen wir?

Einer der Faktoren, denen marine Organismen oft nicht gewachsen sind, ist die starke Erhöhung der Wassertem-

peratur. Die steigende Lufttemperatur auf Grund der menschengemachten Treibhausgasemissionen führt dazu, dass sich das Meer von oben nach unten erwärmt. Tatsächlich nimmt der Ozean etwa 90 Prozent der Wärme auf, die im Erdsystem durch den Anstieg der Treibhausgase gespeichert wird.

Wegen der zusätzlichen CO₂-Emissionen erhöht sich die atmosphärische CO₂-Konzentration kontinuierlich. Der Anstieg wäre noch viel größer, als er eigentlich ist, wenn nicht das Land und der Ozean jeweils 20 bis 30 Prozent der derzeitigen Emissionen aufnahmen. Die restlichen 40 bis 50 Prozent bleiben in der Atmosphäre, weshalb der CO₂-Gehalt dort steigt. Wird Kohlenstoffdioxid im Ozean gelöst, kommt es zu chemischen Reaktionen, bei denen Bikarbonat entsteht und Protonen freigesetzt werden. Der pH-Wert sinkt. Die Freisetzung von Protonen führt also zur Ozeanversauerung, was eine Bedrohung für Organismen darstellt, die Schalen aus Kalk bilden.

Die Kalkschalen lösen sich im sauren Wasser auf, richtig?

Wenn man eine Muschelschale in ein Glas Essig legt, löst sich die Muschel allmählich auf. Denn der Essig hat einen niedrigen pH-Wert, und das schadet den Kalkschalen. Einen ähnlichen Effekt findet man im Ozean: Steigt der Säuregehalt über einen gewissen Schwellenwert, dann führt das bei Kalkschalen bildenden Organismen und Korallen zu Problemen. Das ist der zweite Stressfaktor.

Und drittens?

Drittens verliert der Ozean auf Grund der globalen Erwärmung Sauerstoff. Das hat verschiedene Gründe: Erstens ist Sauerstoff in wärmerem Wasser weniger löslich, es gelangt demnach weniger davon aus der Atmosphäre in die



MIT FRIEDRICH VON THOMAS FRÖLICHER

THOMAS FRÖLICHER studierte Umweltwissenschaften an der ETH Zürich und promovierte 2009 an der Universität Bern im Fach Physik. Nach Forschungsaufenthalten an der Princeton University (USA) und der ETH Zürich ist er seit 2017 Assistenzprofessor an der Universität Bern, wo er die Forschungsgruppe Ozeanmodellierung leitet. Frölicher war einer der Leitautoren des IPCC-Sonderberichts zu Ozean und Kryosphäre und ist Mitautor im fünften und sechsten Sachstandsbericht des IPCC.

Meere. Zweitens wird der Ozean durch die Erwärmung an der Oberfläche stärker stratifiziert, also geschichtet. Das bedeutet, dass die Dichteunterschiede zwischen dem Oberflächen- und Tiefenwasser zunehmen. Dadurch werden die Wassermassen weniger stark umgewälzt. Vom sauerstoffreichen Oberflächenwasser gelangt deshalb weniger in die Tiefe – wo in der Folge der Sauerstoff fehlt, den die dort lebenden Organismen zum Leben brauchen.

Durch diese zwei wichtigen Prozesse hat der Ozean in den letzten 40 bis 50 Jahren etwa ein bis drei Prozent seines Sauerstoffgehalts verloren. Der Verlust hat insbesondere auf die Fische einen großen Einfluss, aber auch auf andere Organismen, die dann teilweise zu wenig Sauerstoff haben und unter Stress geraten können.

Wir haben also Hitzewellen, Versauerung und Sauerstoffmangel. Werden die einzelnen Extreme für sich genommen häufiger?

Ja. Die Anzahl der marinen Hitzewellen hat sich seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1982 etwa verdoppelt. Versauerungsextreme wiederum nehmen so stark zu, dass heute im Vergleich zur vorindustriellen Zeit quasi eine permanente Extremsituation herrscht. Die Sauerstoffextreme schließlich haben sich über die letzten 150 Jahre gemäß Modellstudien etwa verfünffacht.

Nach Ihren Erkenntnissen treten solche Extreme jedoch nicht zufällig gehäuft gemeinsam auf, sondern sie hängen zusammen ...

Weil die Extremereignisse in allen drei Stressfaktoren häufiger werden, steigt auch die Wahrscheinlichkeit stark, dass sie räumlich und zeitlich zusammenfallen. Wir konnten zeigen, dass Säureextreme und marine Hitzewellen beispielsweise in den Subtropen häufiger als zufällig gekoppelt auftreten, während das im tropischen Pazifik und im Südpolarmeer seltener der Fall ist als erwartet.

Haben Sie herausgefunden, warum?

Mit höherer Temperatur steigt der Säuregehalt des Ozeans. Das ist chemisch bedingt. In den subtropischen Ozeanen ist das der Hauptgrund dafür, dass Hitzewellen und Säureextreme häufig gemeinsam auftreten. Wenn der Temperaturanstieg aber noch andere Effekte hervorruft, wie etwa eine geringere Durchmischung von relativ saurem Tiefenwasser mit Oberflächenwasser, kann eine Hitzewelle ebenso den Säuregehalt reduzieren und somit die Häufigkeit von compound events herabsetzen, wie im Südpolarmeer oder im tropischen Pazifik. Um die relative Häufigkeit von kombinierten Extremereignissen zu bestimmen, ist es daher entscheidend zu verstehen, wie sich Hitzewellen auf die Zirkulation, Biologie und Chemie der zu untersuchenden Ozeanregion auswirken.

Ihren Berechnungen zufolge herrschen heute global gesehen an zwölf Tagen im Jahr kombinierte Säure- und Warmwasserextreme. Für eine um zwei Grad wärmere Welt kommen Sie auf 265 Tage ...

Ja, wir haben mit Modellrechnungen gezeigt, dass als Folge des Klimawandels und der anhaltenden CO₂-Emissionen die kombinierten Säureextreme und Hitzewellen in

SERIE OZEANE

TEIL 1: MÄRZ 2023

Heilkraft aus dem Meer

Stephanie Stone

TEIL 2: APRIL 2023

Der neue Klang der Ozeane

Tim Kalvelage

TEIL 3: MAI 2023

Das Geheimnis des Meeresleuchtens

Michelle Nijhuis

Verborgene Wanderungen

Katherine Harmon Courage
(spektrum.de/artikel/2117967)

► TEIL 4: JUNI 2023

»Eine permanente Extremsituation«

Interview mit Thomas Frölicher

der Zukunft stark zunehmen werden. Bei einer globalen Erwärmung von zwei Grad Celsius im Vergleich zu vorindustriellen Bedingungen werden diese kombinierten Extremereignisse global gesehen um das 22-Fache zunehmen.

Spricht man denn noch von Extremereignissen, wenn die Extreme von heute künftig der Normalzustand sind? Genau, man könnte sich fragen, ob eine Situation, die sich ständig wiederholt, immer noch als Extremereignis bezeichnet werden kann. Die Bedingungen im Ozean ändern sich so stark, dass beispielsweise die Versauerung fast das ganze Jahr hindurch als Extremereignis betrachtet werden kann. Es entsteht ein neues Regime, das für viele Organismen eine ungewohnte Herausforderung darstellt.

Die Hitzewellen werden vor allem deshalb häufiger, weil sich die mittlere Temperatur verschiebt. Bei den Versauerungsextremen kommt noch ein anderer Effekt hinzu: Der Säuregehalt schwankt immer stärker zwischen Sommer und Winter. Zum einen verschiebt sich also der Mittelwert, zum anderen wird die Verteilung breiter. Auch bezogen auf einen neuen »Normalzustand« wird es demnach mehr Säureextreme geben.

An Land lässt sich heute in Echtzeit aufschlüsseln, ob der Klimawandel ein Extremereignis wahrscheinlicher gemacht hat. Wie geht man im Ozean vor?

Die Methode ist die gleiche wie bei der Attributionsforschung an Land. Wir haben mit meiner Gruppe für die sieben folgenreichsten marinen Hitzewellen ermittelt, wie viel wahrscheinlicher sie der menschengemachte Klimawandel gemacht hat. Der Warmwasser-Blob im Nordostpazifik beispielsweise – die bekannteste marine Hitzewelle – wäre ohne ihn nicht aufgetreten.

Hat Sie das überrascht?

Eigentlich nicht. Wasser hat eine größere Wärmekapazität als etwa der Boden oder die Luft – man muss also mehr Energie aufwenden, bis das Wasser sich erwärmt. Deshalb variiert die Temperatur im Ozean nicht so stark wie über dem Land, wo sie sich von Sommer zu Winter, von Tag zu Nacht stark ändern kann. Verschiebt man die Temperaturverteilung über dem Land ein wenig, dann nehmen die Extreme geringfügig zu. Im Ozean hingegen gibt es keine so starken Temperaturabweichungen. Daher kann schon eine kleine Änderung der Temperatur zu einer extrem großen Zunahme von Extremereignissen im Ozean führen. Deswegen ist eine Attribution im Ozean klarer, das heißt, man kann solche Ereignisse belastbarer auf den Klimawandel zurückführen.

An Land spürt man außergewöhnliches Wetter sofort. Wie erfährt man von einem Extremwetterereignis im Ozean?

Die Extremereignisforschung im Ozean ist vergleichsweise neu. Auf Grund der Seltenheit von Extremereignissen benötigt man lange Zeitreihen von Daten. Seit 1982 haben

wir zeitlich hochaufgelöste Satellitendaten, und erst jetzt kann man über diese Extremereignisse wirklich etwas sagen.

Die Satelliten messen die Temperatur an der Oberfläche der Ozeane, und seit etwa 20 Jahren bestimmen sie außerdem die Chlorophyllkonzentration. Für die Säureextreme wiederum braucht man CO₂-Konzentrationen – die misst man meist von Schiffen aus. Seit zirka 20 Jahren gibt es zudem autonome Argo floats im Ozean. Das sind sogenannte Treibbojen, die auf 1000 Meter Wassertiefe geparkt sind. Alle zehn Tage erstellen sie ein vertikales Profil von 2000 Metern Tiefe bis zur Oberfläche. Während sie aufsteigen, ermitteln sie Temperatur, Salzgehalt, Druck und seit Kurzem den Säuregehalt sowie andere biologische Parameter. Sobald die Bojen an die Oberfläche kommen, schicken sie die Daten an Satelliten, und wir können sie in Echtzeit abrufen. Die Treibbojen haben eine große Bedeutung, da sie es uns ermöglichen, in Echtzeit Daten von unterhalb der Oberfläche des Ozeans zu erhalten.

Warmwasserblasen können Monate oder Jahre in der Tiefe verweilen und dann wieder an die Oberfläche kommen

Wie viele gibt es davon?

Etwa 4000. Für Extremereignisforschung ist das noch nicht perfekt. Denn 4000 Punkte im gesamten Ozean sind vergleichsweise sehr wenig. Es gibt aber noch andere Möglichkeiten. Zum Beispiel stattet man verschiedene Tiere mit Sensoren aus, um die Temperatur zu messen, während sie sich im Ozean bewegen. Unter dem Meereis beispielsweise spielt das eine wesentliche Rolle, wo Treibbojen nicht auftauchen können.

Um noch einmal den Vergleich zum Land zu ziehen: Dort dauern Extremereignisse Tage, vielleicht mal Wochen. Im Ozean dauern sie oft Monate, teils Jahre. Warum?

Das liegt vor allem an der unterschiedlichen Wärmekapazität. Die Warmwasserblasen im Ozean können teils sogar mehrere Monate oder Jahre in der Tiefe verweilen und dann wieder an die Oberfläche kommen.

Wie kann man sich das vorstellen?

Der Ozean ist ein dreidimensionales Medium. Der Blob im Nordostpazifik etwa verschwand irgendwann zwischen 2015 und 2016, aber in den tiefen Schichten des Ozeans war es immer noch extrem warm.

Die Warmwasserblase sinkt also ab und kommt eines Tages wieder hoch?

Zum Teil kommt sie wieder hoch oder sie diffundiert; dann verteilt sich die Wärme, so dass keine Extreme mehr herrschen. Oder die Wärme an der Oberfläche wird wieder an die Atmosphäre abgegeben. Aber wir wissen noch wenig darüber, wie lange Warmwasserblasen in der Tiefe des Ozeans verweilen können und wie sie wieder hinaufkommen.

Hängen alle compound events mit der Temperaturänderung zusammen oder beobachten Sie auch extreme Bedingungen unabhängig davon?

Es gibt ebenso biologische Prozesse, die zu compound events führen können. An der Oberfläche des Ozeans wird gelöstes CO₂ durch Fotosynthese in organisches Material überführt. Das organische Material sinkt anschließend ab und wird durch Bakterien zersetzt. Dabei wird es wieder in gelöstes CO₂ überführt. Gelöstes CO₂ bedeutet einen höheren Säuregehalt. Gleichzeitig braucht der Zersetzungsprozess viel Sauerstoff. Der Sauerstoffgehalt nimmt daher ab, zur gleichen Zeit nimmt die Säurekonzentration zu. Biologische Prozesse können also genauso kombinierte Säure- und Sauerstoffextreme verursachen. Und ebenso kann eine Änderung der Ozeanzirkulation zu compound events führen.

Wie reagieren die unterschiedlichen Organismen auf die neuen Bedingungen?

Wie Warmwasserkorallen auf die Wärme reagieren, weiß man sehr gut. 2016/2017 etwa herrschte in den Tropen fast durchgehend eine Hitzewelle. Sie hat zu einer Korallenbleiche geführt, die etwa 75 Prozent aller Korallenriffe weltweit betroffen hat. Manche Fischarten wiederum wandern, wenn es möglich ist, in kältere Gewässer – in der Nordhemisphäre nordwärts, in der Südhemisphäre südwärts. Oder sie weichen in die Tiefe aus. Je tiefer sie sich aber bewegen, desto niedrigere Sauerstoffkonzentrationen treffen sie an.

Da das Wissen über andere, kleinere Organismen wie Phytoplankton und Zooplankton noch nicht vollständig vorhanden ist, fehlt für diese Organismen sogar der Bezugswert für die Normalsituation. Deswegen ist es hier sehr schwierig, Aussagen zu treffen. Es ist noch viel mehr Forschung nötig, um überhaupt zu wissen, welche Arten vorhanden sind und ob und wie sie auf diese Stressfaktoren reagieren.

Macht es für die Tiere einen Unterschied, ob sich die Bedingungen langsam ändern oder ob Extreme schlagartig auftreten?

Man kann davon ausgehen, dass Extremereignisse die negativen Auswirkungen des Klimawandels noch verstärken. Es ist wie ein zusätzlicher Stress. Vergleichen Sie es mit Covid-19: Das Gesundheitssystem war bereits am Anschlag, dann kam dieser weitere Stressfaktor dazu. Ähnlich kann man es sich im Ozean vorstellen: Der Sauerstoffgehalt nimmt ab, die Wärme nimmt zu, der pH-Wert sinkt – und hinzu kommen noch die Extremereignisse.

Ihre Prognosen sind relativ düster. Können wir diese Zukunft verhindern?

Einer der größten Stressfaktoren ist der menschengemachte Klimawandel. Und wir haben gezeigt, dass die Änderungen in den kombinierten Extremereignissen, jedoch auch in den Hitzewellen, viel weniger gravierend sind, wenn die Ziele des Pariser Klimaabkommens eingehalten werden als wenn wir sie nicht einhalten. Das ist klar. Man muss die Ziele des Pariser Klimaabkommens anvisieren, sonst werden die Auswirkungen extrem sein.

Hilft es, weitere Stressoren zu vermeiden – etwa Störquellen wie Schiffslärm und Umweltverschmutzung?

Natürlich gibt es andere Faktoren, etwa die Fischerei. Wenn man Extremereignisse wie eine Hitzewelle vorhersagen könnte – das kann man zum Teil bis zu einem Jahr im Voraus –, dann könnte man in den entsprechenden Gebieten die Fischerei einschränken oder verbieten. Weil man weiß, dass die Ökosysteme schon durch die Hitze gestresst werden, könnte man dadurch einen Schutz vor den zusätzlichen anthropogenen Stressoren bieten. Das wird teils bereits gemacht.

Eine Art Frühwarnsystem ...

Genau, ein Frühwarnsystem gibt es zum Beispiel schon für Korallenbleichen. Wenn aber die Hitzewellen häufiger werden, sind gewisse Maßnahmen schwierig umzusetzen. Dann kann man irgendwann gar nicht mehr fischen, was zu einem Interessenkonflikt führen kann. Das Wichtigste ist und bleibt, den CO₂-Ausstoß zu verringern.

Es macht also durchaus einen Unterschied, ob wir zwei oder drei Grad Erwärmung haben. Können Sie das konkretisieren?

Ja. Ich habe in einer Modellstudie im Jahr 2018 gezeigt, dass Hitzewellen bei 1,5 Grad Erwärmung global um das 16-Fache häufiger werden im Vergleich zur vorindustriellen Zeit. Wenn sich die Erde hingegen um dreieinhalb Grad aufheizte, würden sie um das 41-Fache zunehmen. Und auch bei 2 Grad wäre das der Faktor 23. Man sieht: Jedes Zehntelgrad an Erwärmung hat einen Einfluss auf die Häufigkeit der Hitzewellen. Das gleiche Prinzip gilt ebenso für die Sauerstoffextreme, die Säureextreme sowie die kombinierten Ereignisse. ◀

Das Interview führte »Spektrum«-Redakteurin **Verena Tang**.

QUELLEN

Burger, F. A. et al.: Compound marine heatwaves and ocean acidity extremes. *Nature Communications* 13, 2022

Frölicher, T. et al.: Marine heatwaves under global warming. *Nature* 560, 2018

Gruber, N. et al.: Biogeochemical extremes and compound events in the ocean. *Nature* 600, 2021

Laufkötter, C. et al.: High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science* 369, 2020