

PETER IMKELLER (Berlin, GER) und ILYA PAVLYUKEVICH (Jena, GER)

Vom Nutzen und Nachteil komplexer Klimamodelle



Im Februar und März 2013 arbeitete am ZiF die Kooperationsgruppe »Erforschung der Variabilität des Klimas: physikalische Modelle, statistische Inferenz und stochastische Dynamik« unter der Leitung von Peter Imkeller (Mathematik, Berlin), Holger Kantz (Physik, Dresden) und Ilya Pavlyukevich (Mathematik, Jena). Ein Interview über die Schwierigkeiten, das komplexe System Klima zu modellieren, wissenschaftliche Bescheidenheit und die Erwartungen der Politik.

Das Gespräch führte Manuela Lenzen.

Alle reden darüber, aber gibt es einen Klimawandel?

PETER IMKELLER: Ich denke schon, es fragt sich nur, was damit ausgesagt ist. Einen Klimawandel in Form kurz- und mittelfristiger Temperaturveränderung kann man schon sehen. Wir befassen uns in der Kooperationsgruppe z. B. mit den periodischen Phänomenen, die hinter dem Klima stehen, die das Klima auf verschiedenen Zeitskalen hervorbringen und beeinflussen. Der längste Zyklus, den wir betrachtet haben, geht über rund 400.000 Jahre. Dann gibt es andere, die gehen über etwa 100.000, 40.000 oder 20.000 Jahre. Dabei handelt es sich um astronomische Zyklen. Es gibt auch kürzere Zyklen, etwa den El Niño-Zyklus, der sich über drei bis acht Jahre erstreckt, und verschiedene etwa zehnjährige Zyklen. All diese Prozesse bestimmen das Klima. Aber was in diesen langen Zyklen geschieht – also etwa Eis- und Warmzeiten – kann man als Mensch gar nicht erfahren. Vor diesem Hintergrund muss man menschliche Einflüsse auf das Klima sehen.

ILYA PAVLYUKEVICH: Wir haben in unserer letzten Sitzung diskutiert, dass das Phänomen El Niño anscheinend der kürzeste klimatische Zyklus ist, den ein Mensch im Laufe seines Lebens mehrmals beobachten kann.

PETER IMKELLER: Wir möchten Prozesse natürlich so gut verstehen, dass wir auch ihre zukünftige Entwicklung prognostizieren können. Das Phänomen El Niño kann man bis sechs Monate vor Eintreten zuverlässig vorhersagen. Das, was sich jetzt als Temperaturerwärmung zeigt, in die fernere Zukunft zu prognostizieren, das kann niemand.

ILYA PAVLYUKEVICH: Es gab Zeiten in der Erdgeschichte, in denen die CO₂-Konzentration wesentlich höher war als heute. Es kann sich also um eine natürliche Veränderung handeln.

PETER IMKELLER: Man sieht schon, dass die Temperaturen jetzt um ein oder zwei Grad höher sind, aber wenn man das mit den Zyklen vergleicht, die hinter dem Klima stehen, und etwa die Zwischeneiszeit oder die Eiszeitzyklen betrachtet, da veränderte sich die Temperatur in sehr kurzer Zeit um sechs bis zehn Grad. Jetzt spricht man von zwei bis fünf Grad bis 2060.

Sind angesichts dieser komplexen Zyklen verlässliche Klimamodelle überhaupt möglich?

PETER IMKELLER: Modellieren kann man immer. Das reale Geschehen hinter den Modellen verstehen, das sollte man versuchen. Aber das Prognostizieren ist enorm schwierig. Wir neigen dazu, ein wenig zu übertreiben, wenn wir davon sprechen, was wir durch Wissenschaft und Technologie beherrschen können. Für mich sind die Erkenntnisse in der Klimatologie und in der Mathematik, die mit der Klimatologie zu tun hat, immer mit dem Eingeständnis einer gewissen Bescheidenheit verbunden. In der Gesellschaft hat die Klimaforschung eine hohe Akzeptanz. Aber was Projektionen unserer Einflüsse angesichts der schwer überschaubaren und komplexen z. B. astronomischen Zyklen im Hintergrund langfristig bedeuten, das ist schwer zu sagen.

Und das Prognostizieren ist in der Klimatologie auch bei guten Modellen schwierig, weil es um langfristige Phänomene geht. Man unterscheidet zwischen Wetter und Klima. Wetter ist der Zustand der Atmosphäre, die wir jeden Tag erfahren. Es dekorreliert nach vier Tagen. Nach vier Tagen ist eine Wetterprognose meist nichts mehr wert. Beim Klima spricht man von längerfristigen Zusammenhängen in der Dynamik der Ozeane und der Atmosphäre. El Niño ist das kürzeste dieser Phänomene, dann folgt die Nordatlantische Oszillation, dann kommen schon die Phänomene auf Tausend-Jahres-Skalen und noch längerfristige. Prognosen auf solchen Zeitskalen sind gar nicht mehr verifizierbar.

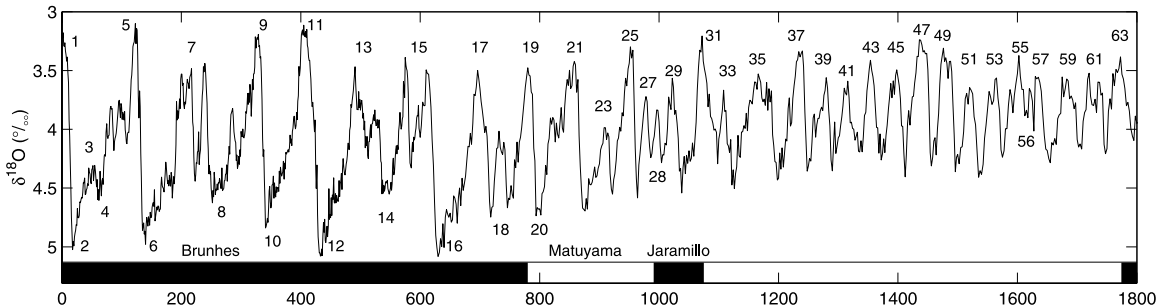
Wozu brauchen Sie dann die komplizierte Mathematik, mit der sich die Kooperationsgruppe befasst? Das suggeriert Präzision und Beherrschbarkeit.

PETER IMKELLER: Auch wenn eine mathematische Erkenntnis in der Aussage gipfelt, dass etwas nicht vorhersagbar ist, kann das präzise, sinnvoll und relevant sein und schon etwas über Beherrschbarkeit beinhalten. Wenn die Mathematik in einem konkreten Problem zu linearen Gleichungen führt, ist es sehr einfach, damit umzugehen. Da lassen sich die meisten Fragen durch Ausrechnen oder Approximieren lösen. Aber was die Mathematik der Klimatologie für die Strömungen in der Atmosphäre und im Ozean benötigt, das sind ausgehend von der Navier-Stokes-Gleichung meist nicht-lineare Gleichungen. In diesem Bereich gibt es nicht-lineare Phänomene, z. B. spontane, kurze und sehr überraschende Übergänge zwischen verschiedenen fast- oder metastabilen Zustandsbereichen. Das sieht man, wenn man mit Klimazeitreihen arbeitet, etwa mit einer Zeitreihe für die Temperatur der vergangenen 100.000 Jahre, die man aus dem Grönland-Eis gewinnen kann. Eine Zeitreihe ist eine Reihe von Daten, die z. B. für jedes Jahr in einer bestimmten Zeitspanne einen bestimmten Wert für die Jahresdurchschnittstemperatur liefern kann.

ILYA PAVLYUKEVICH: Man bohrt zylindrische Löcher in das Eis bis zum Grund und holt Proben heraus. So ein Bohrkern ist bis zu 3,6 Kilometer lang. Im Grönland-Eis kommt man mit diesen Proben auf 100.000 Jahre, im Antarktislagerschicht bis auf 400.000 Jahre. Für Millionen von Jahren bekommt man Daten aus Ozeansedimenten. Die Bohrkernkerne enthalten ähnlich wie Baumringe Schichten, die man bestimmten Jahren zuordnen kann. Und in diesen Schichten kann man gewisse Werte messen, etwa das Verhältnis der Konzentration von O_{16} , dem häufigsten Sauerstoffatom, zu O_{18} . Letzteres ist schwerer und hat eine andere Verdunstungsrate. Das heißt, bei höheren Tempera-

turen ist das Verhältnis von O_{16} zu O_{18} der Luft größer. Es ist ein Indikator für die Temperatur des betreffenden Jahres.

PETER IMKELLER: Die Variation der Durchschnittstemperaturen in längeren Zeiträumen auch der jüngeren Erdgeschichte ist ziemlich groß. Im Holozän, etwa 7.000 Jahre vor heute, gab es eine sehr warme Zeit: drei oder vier Grad wärmer als jetzt, für einen Zeitraum in der Größenordnung von einigen Jahrhunderten. Hier sieht man die Zyklen der Durchschnittstemperatur über die letzte Million Jahre:



Man sieht etwa zehn Zyklen, dann (weiter in der Vergangenheit) verkürzt sich der Zyklus etwa auf 40.000 Jahre. Das wird mit den Milankovitch-Zyklen in Verbindung gebracht. Milankovitch war ein serbischer Ingenieur, der um den Ersten Weltkrieg herum eine Theorie entwickelt hat, die die Abfolge von Eis- und Warmzeiten auf der Erde erklären möchte. Es gibt Aberrationen der Erdbahn aufgrund der Gravitationseinflüsse größerer Planeten, von Jupiter etwa. Diese Einflüsse sind klein und zyklisch. Unter der Exzentrizität der Erdbahn versteht man das Verhältnis zwischen der langen Ellipsenachse und der kurzen Ellipsenachse. Diese Exzentrizität unterliegt kleinen periodischen Schwankungen von weniger als einem Promille bei einer Periode von 100.000 Jahren. Allerdings haben die Klimatologen auf unserer Tagungen gesagt, dass dieser Effekt wegen seiner Kleinheit jetzt nicht mehr für qualitative Erklärungen ernst genommen wird. Ernst genommen werden hingegen andere Zyklen, ausgelöst durch andere astronomische Phänomene, etwa einer periodischen Schwankung der Neigung der Erdachse. Sie variiert zwischen 21,5 und 24,5 Grad, in Zyklen von etwa 40.000 Jahren. Ein weiterer ist der Präzessionszyklus, der das »Eiern« der Erdachse um eine Senkrechte zur Erdbahn herum beschreibt. Diese Zyklen beeinflussen wesentlich die Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten auf der Erdoberfläche. Hier im Nordwesten Europas kommt als weiterer Faktor die Nordatlantische Zirkulation hinzu: der Golfstrom. Auch dazu gibt es mathematische Modelle. Wenn man auf den Einfluss der astronomischen Zyklen aus der Sicht der Zeitreihen schaut: wir hatten jetzt eine Warmzeit von etwa 12.000 Jahren; die vorhergehenden Warmzeiten waren viel kürzer.

Quelle: Lisiecki, L. E., and M. E. Raymo (2005), A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records, *Paleoceanography*, 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071. (This material is reproduced with permission of John Wiley & Sons, Inc.)

ILYA PAVLYUKEVICH [lächelnd]: Wenn also astronomische Einflüsse hinter den Entwicklungen stecken, dann sollten wir uns nicht auf die globale Erwärmung vorbereiten, sondern uns auf eine Kaltzeit einstellen, eine neue Zwischeneiszeit, und zwar zeitnah.

PETER IMKELLER: Wie gesagt, ich glaube, dass die Temperaturen sich verändert haben. Wenn man unseren Klimatologen folgt, sind die besten Prognosen für lokale Veränderungen aufgrund von Modellsimulationen heute nicht besser als die, die auf linearen Prognosemodellen beruhen und mit Hilfe von sogenannten Regressionen gewonnen werden. Aber für die nicht-linearen Systeme, die hinter der Klimamathematik stehen, sind Übergänge zwischen so genannten metastabilen Zuständen typisch. Das heißt, für einige Zeit bewegen sich die Werte in der Umgebung eines bestimmten Wertes und dann plötzlich kommt ein ganz abrupter Übergang in die Umgebung eines

ganz anderen Wertes. In diesem Sinne kann sich die Temperatur innerhalb von fünfzig Jahren um zehn Grad auf- oder abbewegen. Diese zufälligen Übergänge kann man mathematisch beschreiben, aber man kann sie nicht vorhersagen.

Wie verhalten sich diese langfristigen Prozesse zu unseren Bemühungen um den Klimaschutz? Ist das naiver Aktivismus?

PETER IMKELLER: Sie können sich sicher an den Tsunami 2004 erinnern. Damals hatte eine Gruppe von Biophysikern von der Universität Potsdam die geniale und verdienstvolle Idee, ein Frühwarnsystem für den Indischen Ozean zu bauen. Die mittlere Wartezeit für Extremereignisse wie den Tsunami im Indischen Ozean beträgt allerdings 400 bis 500 Jahre. Für die Lebenszeit eines Menschen ist das eine sehr lange Zeit. Jetzt hängen im Ozean Hightech-Bojen zehn Kilometer vor der Küste von Sumatra und Java, die jede seismische Bewegung wahrnehmen können. Aber die erste Erfolgsbilanz war schlecht. Der ganze Mess- und Warnapparat funktioniert nicht, weil Fischer ihre Boote an die Bojen hängen. Man muss sich fragen: handeln die Fischer rational? Ich würde sagen, ja. Für ihre Lebenszeit hat das praktisch keine Bedeutung. Für etwas, das im Mittel weniger als einmal in unserer Lebenszeit passiert, haben wir keine Intuition. Wir haben deshalb auch keine Intuition für die Auswirkungen der kosmischen Zyklen auf unser Klima. Schutz vor den entsprechenden langfristigen Klimaänderungen ist ja auch gar nicht das Thema, wenn man von Klimaschutz redet. In Analogie zum Tsunami 2004 könnte man daher zurückfragen: wäre es naiver Aktionismus, wenn man ein Frühwarnsystem für Eiszeiten fordern würde? Ich denke, das es auf jeden Fall sinnvoll ist, sich um den bestmöglichen Schutz für unsere Umwelt zu bemühen. Wir sollten aber in der Bewertung unserer Prognosefähigkeiten angesichts der Komplexität des Systems den Ball flach halten.

In Ihrer Kooperationsgruppe befassen Sie sich vor allem mit langfristigen Prozessen, warum?

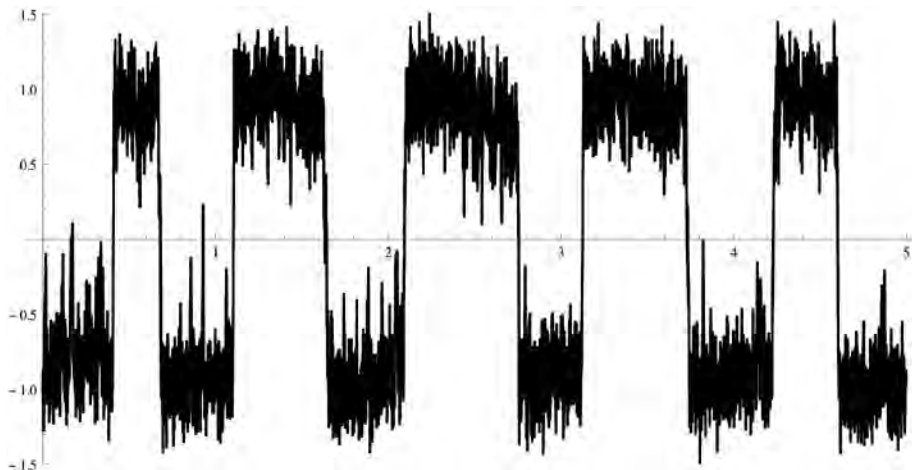
PETER IMKELLER: Die einfache Antwort ist: weil die Zeitskalen der Klimaprozesse solchen Zeiträumen entsprechen. Was menschlich erfasste Klimadaten anbelangt, hat man höchstens für die letzten achtzig Jahre seriöse und dann vielleicht noch für 250 Jahre anekdotische Beobachtungen. Sonst gibt es keine Aufzeichnungen aus der Vergangenheit. Unsere Erfahrungswelt reicht eben nicht, abgesehen von Daten aus Ozean- oder Eisbohrkernen. Deswegen sind für Projektionen Computersimulationen möglicher Klimaszenarien auch wichtig geworden. *General Circulation Models* heißen die zugrunde liegenden komplexen Computermodelle, in denen alles Wissen über die mathematischen Gleichungen der Atmosphäre und der Ozeane, Annahmen über die Wechselwirkungen von Ozeanen und Atmosphäre, Parametermessungen, Schätzungen etc. eingebracht sind. Es gibt etwa zwanzig Computer auf der Welt, die mit solchen Modellen rechnen können. Die können in die Vergangenheit zurückrechnen und in die Zukunft vorausrechnen. Die einzigen Methoden, um die Qualität der Prognosen zu beurteilen, ist der Quervergleich von Simulationen an verschiedenen Computern, das Zurückrechnen in die Vergangenheit und das Vergleichen mit Daten, die man etwa aus den Eisbohrkernen hat.

ILYA PAVLYUKEVICH: Man startet das Programm zu einem Zeitpunkt vor vielleicht 200 Jahren mit den damaligen Anfangsbedingungen, die wir ganz gut kennen. Und wenn das Programm diese zweihundert Jahre ganz gut wiedergibt, sollte es auch für die Zukunft funktionieren.

PETER IMKELLER: Ein typisches dabei auftretendes Problem lässt sich überspitzt so ausdrücken: je komplexer die Modelle sind und je näher daher ihre Prognosen der Realität kommen, desto

klarer wird, dass das, was in der Realität nicht verstanden wurde, auch über diese Modelle nicht verstanden werden kann. In den komplexen Modellen wird die Erdoberfläche diskretisiert durch Zellen von 40 mal 40 Kilometern Kantenlänge, und die Zeit in Einheiten von zehn Minuten. In dieser Auflösung werden dann hochkomplexe und lange dauernde Rechnungen durchgeführt. Und das Paradox ist: Je näher die berechneten Kurven für bestimmte physikalische Größen der Wirklichkeit kommen, desto weniger versteht man sie, weil man die Realität ja auch nicht verstanden hat. Deshalb besteht eine der Aufgaben für Klimatologen, Statistiker und Mathematiker darin, aus diesen komplexen Modellen durch Modellreduktion einfache konzeptionell-qualitative Karikaturen zu machen, in denen dann mathematisch-analytisch noch etwas erkennbar ist. Das ist für das Verständnis der komplexen Modelle von Wert. Man interpretiert dabei zugleich die virtuelle und die reale Wirklichkeit. Ohne die konzeptionellen Karikaturen verstehen wir das komplexe Modell so wenig wie die Wirklichkeit, eben weil das Modell zu gut ist.

ILYA PAVLYUKEVICH: Diese Ergebnisse sind qualitativer, nicht quantitativer Natur. Es gibt keine echten Zahlen, nur Effekte. Wir können Modelle für die Zeitreihen machen, die bestehen aus stochastischen partiellen Differentialgleichungen. Darin werden die metastabilen Klimazustände, wie man hier sieht, durch Attraktoren wiedergegeben:



Periodische Wiederkehr von Eis- und Warmzeiten kann man mathematisch mithilfe der stochastischen Resonanz modellieren.

Wir können Gleichungen aufschreiben, deren Verläufe aussehen wie die echten Prozesse. Etwa bei den Eiszeiten und den Warmzeiten. Selbst in einem einfachen Modell sieht man ganz gut die abrupten Übergänge. Die periodische Veränderung sieht man ganz gut für einen bestimmten Parameterbereich. Die Stochastizität, die auf die Gleichungen wirkt, ist mit einer gewissen Intensität an dieses deterministische System gekoppelt, und je nach der Intensität, mit der das Rauschen angekoppelt ist, wird sich eine typische Übergangszeit zwischen solchen metastabilen Zuständen ergeben. Wir können dann sagen, wie lange es typischerweise dauert, bis man von einem Klimazustand in den anderen kommt, zumindest der Größenordnung nach.

PETER IMKELLER: Dieses Vereinfachen geschieht zum Beispiel durch statistische Methoden. Damit können wir Modelle finden, die gut zur Realität passen. Bei den komplexen Modellen hat man 20 bis 30 PDEs, partielle Differentialgleichungen. Im reduzierten Modell hat man ein niedrigdimensionales System von stochastischen Differentialgleichungen, in denen kleinskalige, nicht spezifizierte Prozesse als stochastische Störungen auftauchen. Als Mathematiker interessiert uns typischerweise die Dynamik der dadurch beschriebenen zufälligen Prozesse. Man kann sich z. B. fragen, wie lange es typischerweise dauert, bis das System von einem metastabilen Klimazustand in einen anderen oder einen Grenzzyklus wechselt. Man kann das Bifurkationsverhalten des Systems untersuchen, also

globale Änderungen des Verhaltens beim Überschreiten kritischer Parameter, oder man kann seine Attraktoren beschreiben, also die Mannigfaltigkeiten, auf denen sich das Langzeitverhalten abspielt.

Können Sie feststellen, welche Ereignisse in der Welt solche Übergänge verursachen?

PETER IMKELLER: Es gibt Untersuchungen, die setzen auf Veränderungen aufgrund der zunehmenden Variabilität in der Atmosphäre durch vermehrten CO_2 -Ausstoß. Der verursacht nicht selbst die Veränderungen, er erhöht die Variabilität in der Atmosphäre und damit die Wahrscheinlichkeit für Übergänge in andere Zustände. Mathematiker haben z. B. versucht zu berechnen, wie stark sich die Wahrscheinlichkeit für solche spontanen Übergänge verändert. Die gebotene Bescheidenheit angesichts der Nicht-Linearität und Komplexität des Klimasystems drückt sich für mich auch darin aus, dass eine wichtige mathematische Aussage schon darin besteht, solche Übergänge in der Regel als nicht prognostizierbar zu erkennen.



Ilya Pavlyukevich

ILYA PAVLYUKEVICH: Man reduziert die komplexen Gleichungen auf ein paar einfache Gleichungen mit ein paar Parametern, die physikalische Bedeutung haben. Das sind nicht viele, vielleicht ein oder zwei, etwa die Salzkonzentration im Ozean. Wir können dann Aussagen machen, was passiert, wenn dieser Parameter sich in einem bestimmten Bereich bewegt. Dann kann es passieren, dass wir in bestimmten Rauschamplituden einen Übergang sehen, in einem anderen Bereich des Parameters jedoch keine Übergänge finden. Das sind also nur qualitative Aussagen, ja oder nein, unter bestimmten Bedingungen. Die Idee ist natürlich, dass wir Entwicklungen, die wir in einfachen Modellen sehen, auch in komplexen Modellen sehen werden.

PETER IMKELLER: Es gibt Statistiker, die wollen das Tipping des Klimas vorhersagen, also Bifurkationspunkte in der Entwicklung des Systems, an denen eine kleine Parameteränderung eine große Veränderung im globalen Verhalten auslöst. Dazu haben wir bei unseren Workshops einige Vorträge gehört. Es gibt Arbeiten von Statistikern, die sich mit dem Temperatursturz der Dryas-Periode, der letzten Kälteperiode vor dem Holozän, beschäftigen. Die Temperatur war vor etwa 15.000 Jahren fast schon wieder auf dem heutigen Niveau. Dann ist sie plötzlich abgestürzt. Das wird von einigen so erklärt: Als der nordamerikanische Eispanzer bis auf die geographische Position des Sankt-Lorenz-Stroms abgeschmolzen war, ist das Schmelzwasser nicht mehr über den Mississippi abgeflossen, sondern in den Sankt-Lorenz-Strom. Dort hat das Süßwasser die Salinitätsbilanz im Nordatlantik durcheinander gebracht. Die Nordatlantische Zirkulation lässt sich vereinfacht beschreiben als Ergebnis der Salinitätsdifferenz und der Temperaturdifferenz zwischen dem Golf von Mexiko und dem Nordatlantik. Nachdem nun so viel Süßwasser im Nordatlantik war, dass diese Differenz eine kritische Schwelle überschritten hatte, ist der Golfstrom zusammengebrochen, was diesen Temperatursturz ausgelöst hat. So ist es dann etwa 1.200 Jahre lang kalt geblieben, bis die Temperatur auf das heutige Niveau angestiegen ist. In diesen Arbeiten wird behauptet, man hätte diesen Temperatursturz voraussagen können. Man behauptet, nachweisen zu können, dass sich vor dem Temperatursturz die Variation der Kurve stark verändert hat. Das könne man als »frühe Warnung« verstehen.

In unserer Gruppe haben Mathematiker versucht, das nachzurechnen. Es ist aber extrem schwer, sich vorzustellen, dass das Klimasystem in seiner Evolution einen solchen Umschlagpunkt genau trifft. Bei den Prozessen, die wir angesehen haben, passiert der Übergang in der Regel schon, bevor der Bifurkationspunkt erreicht ist, weil die »zufällige Energie« des Systems so groß ist. Deshalb würde ich sagen: solche Punkte kann man praktisch nicht vorhersagen. Wenn ein System genau in einen Bifurkationspunkt hineinsteuert, mag es sein, dass man die damit verbundene globale Änderung vorhersagen kann. Aber ich glaube nicht, dass das in der Natur häufig geschieht.

Kann die Klimatologie Empfehlungen für die Politik aussprechen?

PETER IMKELLER: Ich glaube schon, dass es sinnvoll ist, Abschätzungen darüber zu haben, wie die Temperaturen in der linearen Projektion oder in der Modellsimulation steigen werden. Dann kann man auch sagen, dass dadurch die Variabilität stärker wird, die ihrerseits spontane nichtlineare Veränderungen auslösen kann. Da ist schon relevant. Aber je langfristiger die Prognosen, desto (subjektiv) wahrscheinlicher wird es für mich, dass sie aufgrund eines spontanen Übergangs wenig wert sind. Man muss wissen, dass das Klima ein nichtlineares System ist. Wenn ich auf fünfzig Jahre prognostiziere, kann es sein, dass die Prognose in fünfzig Jahren noch gültig ist. Es kann aber auch sein, dass es einen nichtlinearen Absturz oder Aufstieg gegeben hat. Dann ist die Prognose nichts mehr wert.

ILYA PAVLYUKEVICH: Man bekommt eigentlich keine Zahl, die die Temperatur in 50 Jahren angibt, sondern eine Verteilung, die die mögliche Temperatur in 50 Jahren angibt. Das bedeutet, man bekommt Aussagen wie die, dass der Temperaturanstieg eine Wahrscheinlichkeit 50 Prozent hat. Dann muss man sich fragen, was bedeutet hier Wahrscheinlichkeit? Eine Aussage wie »Die Regenwahrscheinlichkeit beträgt 80 Prozent« ist für einen Mathematiker eine Aussage ohne Wert. Sie deutet aber auf ein grundlegendes Problem, das mit solchen Aussagen verbunden ist: Man setzt die ganze Vielfalt von Wahrscheinlichkeiten auf Null oder Eins herab.

PETER IMKELLER: Es ist ja auch ganz anders gemeint. Was da ausgesagt ist, ist nicht etwas über die Realität von morgen, sondern über ein Modell von heute. Mein Modell kann mögliche Verläufe des Wetters durchrechnen. Diese Modellrechnung wiederhole ich vielleicht fünfzig Mal mit jeweils geringfügig anderen Randdaten. Über die Ergebnisse lege ich eine Statistik. Dabei kommt dann heraus: in 80 Prozent der Fälle hat es geregnet. Deshalb ist meine errechnete Regenwahrscheinlichkeit 80 Prozent. Damit habe ich aber keine Aussage über morgen getroffen, sondern nur über mein Modell.



Peter Imkeller

Was sind Ihre nächsten Projekte?

PETER IMKELLER: Wir haben 2000/2001 mit Klimatologen zusammen Symposien veranstaltet und ein Programm aufgestellt, das wir inzwischen zum Teil realisiert haben. Einen Punkt haben wir hier wieder aufgegriffen und auch eine Möglichkeit gesehen, wie wir ihn in den nächsten Jahren angehen können: das ist das sogenannte Hasselmann'sche Programm. Dabei geht es um die Herleitung stochastischer Differentialgleichungen oder ihrer Karikaturen aus gekoppelten mehrskaligen Systemen von gewöhnlichen Differentialgleichungen, also etwa einem Modell der Atmosphäre und einem Ozeanmodell: das Ozeanmodell besteht aus langsamen Variablen, das Atmosphärenmodell aus schnellen Variablen, die Windbewegung ist eben schneller als die Ozeanbewegung. Das hat Hasselmann, ein Hamburger Klimaforscher, angeregt. Aber mathematisch ist es immer noch eine große Herausforderung. Wir haben jetzt gute neue Ideen dazu. Und wir haben auch wieder Mut gefasst, vorhandene Ansätze der stochastischen Bifurkationstheorie weiter zu entwickeln und auf Bereiche der Klimadynamik anzuwenden. Die Physiker haben uns gesagt, dass sie das dringend brauchen. Wir werden uns auch Gedanken machen über die Interpretation extremer Ereignisse im Bereich der Klimatologie mit der mathematischen Theorie sogenannter großer Abweichungen.

ILYA PAVLYUKEVICH: Das beste Modell ist noch immer die Umgebung selbst.

Vielen Dank für dieses Gespräch!