

EXTREM GEWAGT

Schwere Erdbeben, Wirbelstürme und Überschwemmungen treten viel häufiger auf, als nach der klassischen Statistik zu erwarten wäre. Neue Forschungsansätze suchen nach einer besseren Erfassung extremer Ereignisse.

Von Frank Grotelüschen

In Kürze

- ▶ Traditionell versucht man, zufallsbestimmte Ereignisse mit der **Gauß-Verteilung** zu beschreiben. Dem liegen gewisse Annahmen zu Grunde, die zum Beispiel bei Erdbeben oder Monsterwellen nicht erfüllt sind.
- ▶ Extreme Ereignisse sind selten, aber nicht so selten, wie sie nach der traditionellen Annahme sein müssten: Die Verteilungskurve hat **dicke Schwänze (fat tails)**.
- ▶ Mit etlichen neuen Methoden versucht man diesen Phänomenen beizukommen: **nichtlinearen Modellen, Extremwertstatistik** und neuen Formen der **Zeitreihenanalyse**.

Monsterwellen treffen auf Schiffe, beschädigen sie schwer oder lassen sie sogar sinken (Bild rechts). Rekorderdbeben legen ganze Regionen in Schutt und Asche. Jahrhundertfluten überrollen Deiche und überschwemmen das Hinterland. Ungewöhnlich starke Hurrikane verwüsten Großstädte, extreme Regenfälle und Hagelschauer vernichten Ernten. Und eine handfeste Finanzkrise vernichtet innerhalb von Monaten Milliardenwerte an Aktienkapital.

All diese Extremereignisse haben eines gemeinsam: Sie treten höchst selten auf, können dabei aber enorme Schäden anrichten. Wann, wo und wie stark sie zuschlagen, scheint dem Zufall überlassen. Zwar versuchen Wissenschaftler seit Jahrzehnten, halbwegs verlässliche Prognosen und Frühwarnsysteme zu entwickeln. Erfolg haben sie damit bislang aber kaum. Erdbeben, Tornados oder Börsenkrisen lassen sich entweder gar nicht vorhersagen, oder die Prognosen sind zu vage, als dass sie konkreten Nutzen hätten.

Nun hofft die Fachwelt auf einen neuen Ansatz. Statt nur innerhalb der einzelnen Disziplinen nach besseren Prognoseverfahren zu suchen, arbeiten die Wissenschaftler zunehmend auch interdisziplinär und fahnden nach mathematischen Parallelen. »Wir hoffen, dass verschiedene Disziplinen voneinander lernen und wir neue, grundlegende Erkenntnisse gewinnen«, sagt Professor Holger Kantz vom

Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden. Sollten sich tatsächlich Gemeinsamkeiten zwischen Wetterextremen, Finanzkrisen und Erdstößen zeigen, dürften demnach auch die Prognosen treffsicherer werden. Noch steht dieser Ansatz der Extremforschung am Anfang. Doch erste Erfolge deuten sich bereits an.

Die Idylle des Physikers: lineare Modelle

Wie schön wäre es doch, wenn das Einzige, was die Bewegung des Meerwassers beeinflusste, die Gezeiten wären! Auf die Weltmeere wirken eine konstante und eine periodisch variierende Kraft, nämlich die Anziehungskräfte der Sonne und des Mondes (genauer gesagt: deren räumliche Variation); dem überlagert sich die ebenfalls zeitlich periodische Erdrotation, und alle Effekte addieren sich – ungefähr, was für Prognosezwecke allemal ausreicht. Deswegen ist das Extremereignis, bei dem alle Effekte maximal sind und das gleiche Vorzeichen haben, die so genannte Springflut, an und für sich keine Katastrophe; man kann sich ja darauf einstellen. Die Deiche versagen erst, wenn zusätzlich starke Winde das ohnehin hohe Wasser landeinwärts drücken.

Neuere Hilfsmittel wie Satellitenbilder oder wie hier eine Handykamera liefern Belege dafür, dass Monsterwellen kein Seemannsgarn sind. Diese Bilder entstanden 2002 vor der Küste von Neufundland.



MIT FRDL. GEN. VON LYMAN DUGGAN, NAVAL ELECTRONICS INC., ([HTTP://TV-ANTENNA.COM/HEAVY-SEAS/3/INDEX.HTM](http://TV-ANTENNA.COM/HEAVY-SEAS/3/INDEX.HTM))



DIE MATHEMATIK DES UNBERECHENBAREN

In den letzten Jahren haben sich die Extrem-Forscher gleich mehrere mathematische Werkzeuge zugelegt. Sie lassen sich in drei Kategorien einordnen:

► **Der traditionelle Ansatz ist die Extremwertstatistik.** Während gewöhnliche Datenanalysen außergewöhnliche Werte oft als »Ausreißer« ignorieren, bezieht die Extremwertstatistik diese gezielt mit ein. So schauen sich die Experten an, wie viele heftige Stürme in den letzten zehn Jahren über eine bestimmte Region gezogen sind und welche Stärke sie hatten. Anhand dieser Zahlen schätzen sie ab, mit wie vielen Stürmen man es in Zukunft zu tun haben wird und wie stark ein Jahrhundertsturm sein könnte. Auf der Basis dieser Extrapolation werden Deichprojekte, Brücken oder Hochhäuser dimensioniert. Auch viele Versicherungen und Rückversicherer bedienen sich dieser Methode, um Risiken abzuschätzen und Beiträge zu kalkulieren. Der Nachteil: Die Extremwertstatistik macht weder Aussagen über die zu Grunde liegenden Mechanismen noch über den Zeitpunkt, an dem ein Extremereignis auftreten wird.

Während die klassische Extremwertstatistik davon ausgeht, dass aufeinanderfolgende Messwerte völlig unabhängig voneinander sind, geben neuere Erweiterungen der Theorie diese Annahme auf. Dadurch lässt sich zum Beispiel beim Hochwasserschutz der Meeresspiegelanstieg, der durch den Klimawandel zu erwarten ist, berücksichtigen.

► **Seit einigen Jahren erfahren die Spielzeugmodelle** einen lebhaften Aufschwung. Hier versuchen die Forscher, die Mechanismen, die für ein Extremereignis – Erdbeben, Börsencrash oder Jahrhundertsturm – verantwortlich sind, mit stark vereinfachten theoretischen Modellen nachzubilden und dadurch die Grundlage für genauere Prognosen zu schaffen. Mit Formeln und Computersimulationen erschaffen die Experten Systeme, die sich durch Rückkopplungsschleifen und Wechselbeziehungen beim gerings-

ten Anstoß aufschaukeln können. Systematisch können alle möglichen Randbedingungen eingestellt und die unterschiedlichsten Szenarien im Zeitraffer durchgespielt werden. So ist es möglich, mit einem einfachen Sandhaufenmodell nachzuvollziehen, wie oft in einer Region größere Erdbeben drohen.

Allerdings lässt sich nur selten sicher beurteilen, inwieweit ein Spielzeugmodell die Realität abbildet oder aber Zusammenhänge vorgaukelt, die in Wirklichkeit gar nicht bestehen. Oft ist es schwierig, für ein komplexes Phänomen ein geeignetes Spielzeugmodell zu finden. So vermutet man zwar, dass Sandhaufenmodelle wesentliche Eigenschaften von Erdbeben reproduzieren, weil sie den Gesetzen der selbstorganisierten Kritizität folgen. Überzeugende Nachweise dafür stehen jedoch noch aus.

► **Bei der Zeitreihenanalyse** notieren die Fachleute nicht nur, wie viele Ereignisse in einem bestimmten Zeitraum aufgetreten sind, sondern werten im Detail die Korrelationen zwischen ihnen aus. Insbesondere studiert man die Wiederkehrzeitverteilung, also die Verteilung der Zeitabstände zwischen – zum Beispiel – zwei Nulldurchgängen einer bestimmten Variablen. Damit lässt sich herausfinden, ob bestimmte Ergebnisse gehäuft auftreten oder stets in einigem Abstand stattfinden.

Eine mathematische Spektralanalyse, die besagt, aus welchen Grundfrequenzen sich ein Signal zusammensetzt, kann verborgene Periodizitäten sichtbar machen. So lässt sich allein per Zeitreihenanalyse ausmachen, dass eine Springflut durch die Überlagerung zweier periodischer Einflüsse entsteht.

Modernere Methoden, basierend auf der fraktalen Geometrie, können auch komplexere, nichtlineare Zusammenhänge enthüllen. Damit hofft man auf charakteristische Anzeichen wie zum Beispiel bestimmte Fluktuationen auf dem Börsenparkett zu stoßen, die den Extremereignissen zuverlässig vorangehen. Die Zeitreihenanalyse funktioniert jedoch nur, wenn ausreichend Daten über das Ereignis vorhanden sind.

Dicke Schwänze einer glockenförmigen Kurve verheißen Übles: Extreme Ereignisse kommen häufiger vor, als man denkt

Bekannte, periodisch variierende Ursachen, die sich in ihren Wirkungen »linear«, das heißt einfach durch Addition überlagern – das ist die Idealvorstellung. Von ihr möchten die Theoretiker möglichst wenig aufgeben, wenn es daran geht, die hässliche Realität zu beschreiben. Das Phänomen ist nicht offensichtlich periodisch? Dann kann man zumindest versuchen, in den Daten aus der Vergangenheit einen periodischen Anteil ausfindig zu machen. Daraus erwachsen zum Beispiel Theorien von Konjunkturzyklen – leider mit sehr beschränkter Vorhersagekraft.

Die Ursachen sind unbekannt oder zumindest unserer Beobachtung nicht zugänglich? Dann nennt man sie zufällig – und muss deswegen nicht gleich die Flinte ins Korn werfen. Wir unterstellen, dass unsere Variable – zum Beispiel der Wasserstand, ein Börsenkurs oder die mechanische Spannung

im Gestein unter unseren Füßen – durch lauter zufällige Einzelereignisse beeinflusst wird. Wir müssen sie im Einzelnen nicht kennen; es genügt, wenn sie alle von der gleichen Art sind (»derselben Zufallsverteilung gehorchen«), nicht voneinander abhängen und ihre Effekte sich linear überlagern.

Unter diesen Voraussetzungen folgen nämlich die zufälligen Fluktuationen unserer Variablen der Gauß-Verteilung, deren charakteristische Glockenkurve den letzten Zehnmarktschein zierte. Sie beschreibt zufällige Fluktuationen in sehr vielen physikalischen Systemen recht passabel.

Just für die genannten Extremereignisse jedoch weicht sie an entscheidender Stelle von der Realität ab. Je größer eine Abweichung, desto seltener tritt sie auf; das gilt in der Realität wie in der Theorie. Deswegen nähern sich das linke und das rechte Ende der Glo-

ckenkurve (ihre »Schwänze«) immer mehr der Nulllinie an. Das tun die aus der Realität gewonnenen Kurven auch, nur viel langsamer; ihre Schwänze sind dicker (*fat tails*). Daher kommen bei Erdbeben und Monsterwellen Ereignisse, denen die Gauß-Verteilung eine absurd kleine Wahrscheinlichkeit (»einmal pro hundert Millionen Jahre«) zuschreiben würde, durchaus vor.

Sie sind damit zwar viel häufiger, als die Theorie behauptet, aber immer noch selten. Deswegen gibt es über Megabebeben, Jahrhundertfluten und Rekorddürren viel zu wenig Daten, auf deren Grundlage man leistungsfähige Theorien entwickeln und überprüfen könnte. Eine Grafik mit einem Maßstab, der auch die großen Häufigkeiten der kleinen Ereignisse darzustellen erlaubt, muss die dicken Schwänze unweigerlich so dünn wiedergeben, dass sie ohne Weiteres zu übersehen sind (Spektrum der Wissenschaft 12/2009, S. 92).

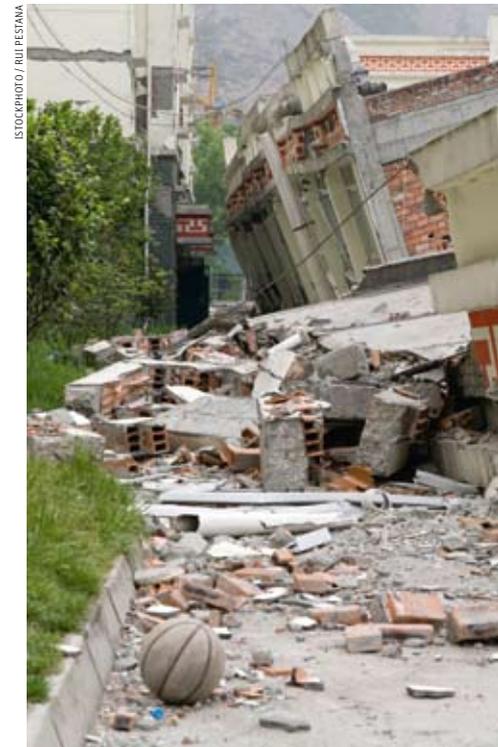
Nichtlineare Monsterwellen

Warum versagt in diesen Fällen die ansonsten vielfach bewährte Theorie? Eine Erklärung ist: Die Linearitätsannahme ist nicht erfüllt. Die meisten Systeme, die Extremereignisse zulassen, sind nichtlinear. Diese Eigenschaft öffnet der Unvorhersagbarkeit und dem Chaos Tür und Tor, selbst dann, wenn der Zufall überhaupt keine Rolle spielt (Spektrum der Wissenschaft Spezial 2/2008 »Ist Mathematik die Sprache der Natur?«, S. 47). Kleinste Ursachen genügen, um große Wirkungen zu entfalten. Weder analytisch mit Bleistift und Papier noch numerisch mit Supercomputern lässt sich voraussagen, wie sich solche Systeme verhalten werden.

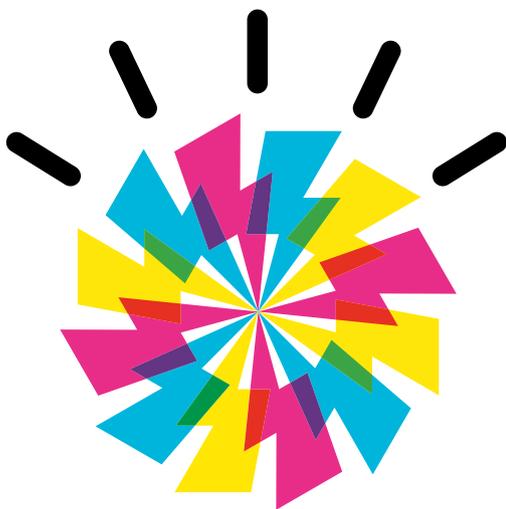
Ein Beispiel für nichtlineares Verhalten sind Monsterwellen. Experten schätzen, dass pro Jahr bis zu zehn große Schiffe durch diese *Freak Waves* in die Tiefe gerissen werden. Ein lineares Modell vermag diese Wellen nicht ausreichend zu erklären: Beschreibt man den Seegang als Überlagerung verschiedener Sinuswellen derart, dass die Beobachtungen passabel reproduziert werden, dann liefert das Modell nur etwa ein Fünfzigstel der Anzahl von Extremwellen, die es laut Satellitenaufnahmen tatsächlich gibt.

Manche Fachleute arbeiten daher bereits Vermutungen über nichtlineare Effekte aus. »Treffen in diesem nichtlinearen Szenario zwei Wellen aufeinander, kann die eine Energie von der anderen abzapfen, oder beide generieren eine neue, dritte Welle«, erläutert Eric Heller, Professor für Physik und Chemie an der Harvard University. »Solche Effekte können durch das Zusammenspiel von ozeanischen Wirbeln, Wind und Erhebungen am Meeresgrund verursacht werden.«

So könnte etwa ein ozeanischer Wirbel Wellen in ähnlicher Weise bündeln wie ein Brennglas das Licht. Im Brennpunkt einer solchen Wellenlinse bauen sich dann bevorzugt riesige Wasserwände auf. Ausgehend von dieser Vorstellung will Heller nun eine Vorhersage für Monsterwellen erstellen. Als entscheidende Maßzahl dient der *Freak Index*. Liegt er für ein Seegebiet oberhalb des Wertes 2, sollten die Schiffe eine Ausweichroute wählen. Man errechnet ihn aus einer Analyse der Richtungen, in welche die Wellen in einem bestimmten Seegebiet laufen. Diese wiederum lassen sich aus der Anzahl und Verteilung der Stürme ableiten, die in der Nähe toben. Ziel



Das Erdbeben vom 12. Mai 2008 in der chinesischen Provinz Sichuan hat ungefähr 50 000 Menschen das Leben gekostet. Das Bild zeigt die zerstörte Schule des Ortes Ying Xiu.



Ideen für einen smarten Planeten

Stromnetze, die Strom sparen.

Ein beträchtlicher Teil des Stroms, den wir erzeugen, geht auf dem Weg zum Verbraucher verloren – ein Verlust, den wir uns nicht mehr leisten können. Deshalb müssen wir unsere Stromnetze intelligenter gestalten. Zum Beispiel, indem wir Einspeisung, Netzauslastung und Verbrauch mit einem integrierten System in Echtzeit erfassen und steuern. Das minimiert Verluste, erleichtert die Einbindung neuer, nachhaltiger Energiequellen und hilft den Kunden, ihren Verbrauch bewusster zu steuern. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/energy





CHRISTOPH PÖPPE

ist ein Vorhersagehorizont wie bei einem Seewetterbericht. Für die kommenden ein, zwei Tage wäre die Prognose relativ präzise, danach ließen sich nur noch Trendergebnisse treffen.

Zumindest haben Heller und seine Fachkollegen bereits eine brauchbare Arbeitsdefinition für eine Monsterwelle gefunden: Für eine bestimmte Meeresregion wählt man von 100 Wellen die 33 höchsten aus und bildet ihren Mittelwert. Jede Welle, die um mehr als das 2,2-Fache höher ist als dieser Mittelwert, gilt als *Freak Wave*. Damit ist nicht nur der 35-Meter-Brecher im Südatlantik gemeint, sondern auch die Neun-Meter-Welle in der Nordsee, die sich bei ansonsten mäßigem Seegang unvermittelt aufrührt.

Für andere Extremphänomene steht eine präzise Begriffsklärung noch aus, ebenso wie eine allgemein gültige Definition, was ein Extremereignis überhaupt ist. Denn die abnormalen Abweichungen zeigen sich in höchst unterschiedlichen Formen – als außergewöhnliche Magnitude eines Erdbebens, als extreme Dauer einer Dürre, als Phase überschäumender Aktivität bei einem Finanzcrash.

Immerhin haben die Forscher bereits einige Kategorien zum Einteilen der Phänomene gefunden. Ein Ereignis wie ein Erdbeben, bei dem das System sich selbst aufschauelt, wird als endogen bezeichnet, im Gegensatz zu einem exogenen Ereignis wie einem Meteoriteneinschlag. Ein Ereignis, das sich an Ort und Stelle wiederholen kann (Monsterwelle im Gegensatz zu Brückeneinsturz), heißt rekurrent. Und während ein unbelebtes System wie das Wetter rein physikalisch zu beschreiben ist, spielen Biologie und Soziologie mit hinein, wenn die Katastrophe, sagen wir ein Epilepsieanfall oder ein Börsencrash, ein belebtes System trifft.

Für manche Phänomene, insbesondere Erdbeben, gibt es ein brauchbares, stark vereinfachtes Modell (»Spielzeugmodell«, siehe Kasten S. 76): den Sandhaufen. Kleinere oder größere Sandlawinen gehen ab, wenn die Steilheit des Sandbergs an einer bestimmten Stelle einen kritischen Wert überschreitet, mit dem Effekt, dass sich auf die Dauer ein bevorzugter Neigungswinkel einstellt (Spektrum der Wissenschaft 3/1991, S. 62). Die theoretische Analyse dieser »selbstorganisierten Kritizität« (*self-organized criticality*, SOC) liefert Vorhersagen, die sich zum Beispiel auch an Erdbeben bestätigen lassen. So sind – wenig

Dass der Neckar über die Ufer tritt (hier der Pegel an der Alten Brücke in Heidelberg), kommt nicht gerade selten vor – aber nicht so häufig, dass irgendeine Regelmäßigkeit erkennbar wäre.

überraschend – kleine Beben häufiger als große. Aber so etwas wie eine »typische« Ereignismagnitude sucht man vergebens. Ausgehend von der SOC-Hypothese konnte das Team um Holger Kantz zeigen, dass sich Mega-Ereignisse zeitlich abstoßen und in ein und derselben Region nicht in kurzem Abstand aufeinanderfolgen. Mit diesem Wissen lässt sich abschätzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit in naher Zukunft mit einem Extremereignis zu rechnen ist.

Ob es prinzipiell möglich ist, ein Erdbeben konkret vorherzusagen, ist umstritten. Um ein Großbeben etwa in San Francisco vorauszu sehen, müsste man mit einer Genauigkeit von einigen Zentimetern überwachen können, wie sich im Inneren der San-Andreas-Verwerfung die Spannungen zwischen den tektonischen Platten aufbauen, um sich dann ruckartig zu entladen. Da das völlig unmöglich ist, sind die Aussagen bisher wenig hilfreich. Was hat man schon von der Auskunft, dass im Großraum San Francisco in den nächsten drei Jahrzehnten mit 63-prozentiger Wahrscheinlichkeit mit einem Beben der Stärke 6,7 zu rechnen ist?

Die Blase erkennen, bevor sie platzt

Zumindest für eine kurzfristige Warnung einige Stunden vor einem Beben gibt es Fortschritte. So hat das Team um den Oldenburger Physikprofessor Joachim Peinke und seinen Kollegen Mohammed Reza Rahimi Tabar von der Sharif University of Technology in Teheran eine neue Form der stochastischen Zeitreihenanalyse entwickelt. Die Experten suchen in den seismischen Signalen, die einem Erdbeben vorausgehen, nach verräterischen Mustern, zum Beispiel charakteristischen Häufungen von Mikrobeben oder kurzen Phasen trügerischer Ruhe. Peinke und seinen Kollegen ist es gelungen, fünf bis zehn Stunden vor dem Beben einen prägnanten Übergang in den seismischen Signalen aufzuspüren. Es sieht so aus, als würden sich viele kleine, über eine bestimmte Region verteilte Mikrobeben plötzlich miteinander synchronisieren. »Bislang haben wir rund 25 Beben im Nachhinein ausgewertet«, sagt Peinke. »In allen Fällen hat unsere Methode die Vorläufer des Bebens zuverlässig erkennen können.«

Das Verfahren kommt aus der Turbulenzforschung (Spektrum der Wissenschaft 12/1997, S. 92). Turbulente Strömungen sind chaotisch, weisen aber in der Hierarchie der immer kleiner werdenden Wirbel eine Struktur auf, die man für Prognosezwecke nutzen kann. Mit demselben Ansatz arbeiten die Oldenburger Forscher daran, Windböen vorherzusagen, um Windkraftanlagen vor Überlastung zu schützen (Spektrum der Wissenschaft

2/2002, S. 10), und das Geschehen auf Finanzmärkten zu analysieren.

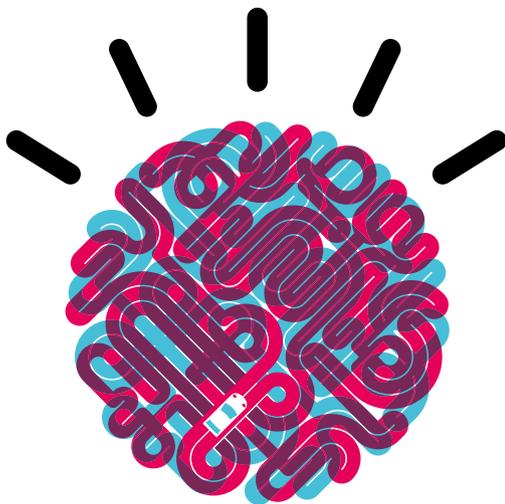
Mit den üblichen Methoden der Statistik sind Extremereignisse wie die jüngste Finanzkrise nicht zu erfassen. Die Standardverfahren der Ökonomen gehen davon aus, dass auch die größten Blasen lediglich exponentiell wachsen: Von Monat zu Monat nimmt der Börsenwert der betroffenen Unternehmen um einen konstanten Faktor zu, wie eine Geldanlage mit Zins und Zinseszins. »Wir haben festgestellt, dass eine Blase immer überexponentiell wächst«, sagt Didier Sornette, Inhaber des Lehrstuhls für unternehmerische Risiken an der ETH Zürich. »Das wäre so, als würde sich auf einem Sparkonto der Zinssatz jedes Jahr verdoppeln: erst fünf, dann zehn, dann 20 Prozent.« Das Wachstum beschleunigt sich, bis die Blase unweigerlich platzt.

Allerdings ließen die konventionellen Methoden nicht erkennen, ob sich die Finanzwelt im Jahr 2008 in einem solch kritischen Zustand überexponentiellen Wachstums befand oder nicht. Deshalb hielten Finanzexperten die Entwicklung viel zu lange für gesund. Alan Greenspan, ehemaliger Chef der US-Notenbank, vertrat die Meinung, eine Blase sei erst dann zu erkennen, wenn sie platze. »Das ist falsch«, sagt Sornette. »Mit unseren mathematischen Methoden können wir eine Blase schon bis zu drei Monate vor ihrem Höhepunkt anhand der überschießenden Wachstumsraten entdecken.« Sornette geht in seinen Modellen davon aus, dass bei der Bildung einer Blase »schlafende« Rückkopplungsschleifen aktiviert werden. Demnach sind extreme Ereignisse nicht einfach die selten auftretenden Werte in den Ausläufern einer statisti-

FOTOLIA / FINGOLFIN



Eines der häufigen Erdbeben in Peru hat 2007 eine gewaltige Erdspalte aufgerissen – ein attraktives Reiseziel für den Katastrophentourismus.



Ideen für einen smarten Planeten

Straßen, die helfen, Staus zu verhindern.

Die Straßen von heute sind dem Verkehr nicht mehr gewachsen. Allein die Staus in der EU haben 2007 mehr als 135 Mrd. Euro gekostet, Umweltfolgen nicht mitgerechnet. Bevor wir nun immer neue Straßen bauen, sollten wir die vorhandene Infrastruktur besser und intelligenter nutzen: Zum Beispiel durch Verkehrsmanagement-Systeme, die Pendlerströme effizient steuern. Das reduziert Staus, Benzinverbrauch, Abgase. Und liefert Stadtplanern wichtige Hinweise für die Gestaltung der Städte von morgen. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/traffic





SEQUENZ: ISTOCKPHOTO / SEAN MARTIN

Der Wirbelsturm, der am 20. August 2006 zwischen Bennett und Watkin im US-Bundesstaat Colorado den Boden berührte, erzeugte binnen weniger Sekunden eine gewaltige Staubwolke.

schen Verteilung. Vielmehr gehören sie zu einer zweiten Verteilung, die im Normalfall allerdings nicht wirksam ist. Vor Entstehen des Extremereignisses schaltet der Prozess gewissermaßen um und wechselt sein Verhalten. Ein mathematisch schwer zu fassender Mechanismus, bei dem Fachleute spekulieren, dass er eng mit der Komplexität menschlichen Verhaltens zusammenhängt. So hat der Mensch die Eigenart, auf Vorhersagen zu reagieren und sein Verhalten und damit auch das System zu ändern; das gilt übrigens für richtige wie für falsche Prognosen.

Eine Vorhersage kann auf zweierlei Art falsch sein: indem sie einen Fehlalarm produziert oder indem sie ein tatsächlich eintretendes Ereignis schlicht verpasst. Ein guter Vorhersagealgorithmus sollte bei kleiner Fehlalarmrate eine hohe Trefferquote liefern. In aller Regel gibt es jedoch nur einen Parameter,

den man an einem solchen Algorithmus einstellen kann: die Empfindlichkeit («Sensitivität»). Bei hoher Empfindlichkeit schlägt er beim größten Teil der echten Ereignisse Alarm, verursacht jedoch Kosten durch häufige Fehlalarme; umgekehrt ist es bei niedriger Sensitivität. Hier gilt es einen brauchbaren Kompromiss zu finden.

Doch schon die Brauchbarkeit eines bestimmten Vorhersagemodells zu bestimmen, ist alles andere als einfach. Dazu ermitteln die Experten mit speziellen Verifikationsverfahren, wie viele der Prognosen tatsächlich eingetroffen sind und wie viele nicht, um dann das Verhältnis von Treffern und Fehlalarmen auszurechnen. Ein Modell, das nur wenige, dafür aber ernst zu nehmende Warnungen ausstößt, kann dabei durchaus besser sein als ein anderes, das mehr Treffer, aber auch viele Fehlalarme produziert.

Allerdings versagen die üblichen Verifikationsverfahren oft bei Prognosemodellen für Extremereignisse – weil diese so selten sind. »Die Wahrscheinlichkeit, dass so ein Ereignis stattfindet, tendiert gegen null – und damit auch die Trefferrate eines Vorhersagemodells«, sagt Cristina Primo Ramos vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) im englischen Reading. Genau das macht die Resultate der üblichen Verifikationsverfahren wenig aussagekräftig: Manchmal bescheinigen sie einem Prognosemodell eine Qualität, die es gar nicht hat, oder sie unterschätzen seine Fähigkeiten ganz erheblich.

Wann kommt der nächste Tornado?

Abhilfe verspricht der »Extreme Dependency Score« – eine komplizierte Formel, mit der sich die Trefferquoten verschiedener Prognosemodelle genauer vergleichen lassen. Das Problem dabei: Die Zahl der Fehlalarme bleibt außen vor. »Deshalb muss man die Formel stets mit anderen Verfahren kombinieren«, sagt Primo Ramos.

Auch die Vorhersage extremer Wetterereignisse gestaltet sich schwieriger als ursprünglich erwartet. So gab der Nationale Wetterdienst der USA (National Weather Service, NWS) noch vor fünf Jahren das strategische Ziel aus, im Jahr 2012 einen Tornado 13 Minuten vor seinem Eintreffen voraussagen zu können. Inzwischen musste der NWS einen Rückzieher machen: Erst 2025 soll es eine verlässliche Tornadoprognose geben – mit einer Vorwarnzeit von dann 30 Minuten. Noch mangelt es an Daten über Hagelstürme, Tor-

nados und Platzregen. Zum anderen sieht es so aus, dass gerade bei Extremereignissen winzigste Änderungen in der Atmosphäre dramatische Folgen haben können. Ob sich ein Tornado bildet oder nicht, scheint sich manchmal innerhalb von Minuten zu entscheiden – schlechte Voraussetzungen für eine sichere Prognose.

Auch die Vorhersageverfahren für Hurrikane sind alles andere als perfekt. Aber eine gewisse Schätzung für die Häufigkeit solcher Wirbelstürme brauchen die Versicherungen schon, um die Beiträge für ihre Policen zu kalkulieren. Bis 2005 orientierten sie sich ausschließlich am statistischen Durchschnitt der vergangenen Jahrzehnte. Doch dieser Ansatz funktioniert nur, wenn die Hurrikanrate konstant ist – wovon man angesichts des Klimawandels nicht mehr ausgehen darf.

Um dennoch zu verlässlichen Prognosen zu kommen, hat die Firma Risk Management Solutions (RMS) einen ungewöhnlichen Weg eingeschlagen: Jedes Jahr trommelt das Beratungsunternehmen ein Gremium aus sieben Experten zusammen, die verschiedene Zweige der Hurrikanforschung repräsentieren. Das Panel evaluiert den aktuellen Stand der Forschung und bewertet rund 100 Prognosemodelle, welche die Hurrikanrate in den nächsten fünf Jahren voraussagen. Schließlich gewichtet das Gremium die Modelle, und mit Hilfe dieses gewichteten Ensembles kalkuliert RMS die Hurrikanrisiken und gleichzeitig auch die Versicherungsbeiträge für die US-Golfküste. Und die dürften deutlich steigen. Denn laut RMS wird die Zahl extremer Hurrikane in den nächsten fünf Jahren signifikant zunehmen. ◀



Frank Grotelüsch hat in Mainz und Hamburg Physik studiert. Er lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

Alberverio, S. et al. (Hg.): Extreme Events in Nature and Society. Springer, Heidelberg 2007.

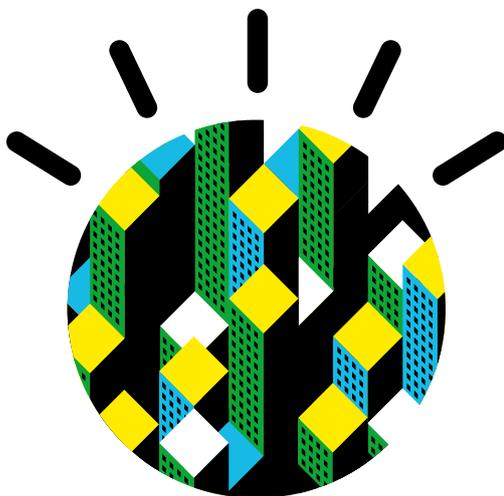
Bunde, A. et al. (Hg.): The Science of Disasters. Climate Disruptions, Heart Attacks, and Market Crashes. Springer, Heidelberg 2002.

Coles, S.: An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer, Heidelberg 2001.

Kantz, H., Schreiber, T.: Nonlinear Time Series Analysis. Cambridge University Press, Cambridge 2003.

Sornette, D.: Why Stock Markets Crash. Critical Events in Complex Financial Systems. Princeton University Press, Princeton 2004.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1014867.



Ideen für einen smarten Planeten

Städte, die uns das Leben leichter machen.

Bis 2050 werden 70% der Weltbevölkerung in Städten leben. Wenn die urbanen Infrastrukturen mit diesem Ansturm Schritt halten sollen, müssen wir sie intelligenter gestalten. Zum Beispiel, indem wir Städte als komplexe Ökosysteme begreifen und die Infrastrukturen für Verkehr, Wasser, Abfall, Verwaltung, Sicherheit, Energie miteinander vernetzen. Davon profitieren alle Aspekte der Lebensqualität – von sauberer Luft über staufreie Straßen bis zur Schulbildung unserer Kinder. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/city

