

# Regeln im Chaos

## Warum sich manche Phänomene so schwer vorhersagen lassen

**Es ist eine ungewöhnliche Allianz: Mathematiker, Physiker, Meteorologen, Biologen, Ökonomen und Mediziner haben sich in Bonn zum Interdisziplinären Zentrum für komplexe Systeme (IZKS) zusammengeschlossen. Ihre Forschungsobjekte bewegen sich am Rande des Chaos.**

Jörg Kachelmann hat einen weiten Weg hinter sich: Seit Jahren weilt der umtriebige Schweizer im Wochenrhythmus medienwirksam neue Wetter-Messstationen ein – von der Nordseeinsel Sylt bis zur Mindelheimer Hütte in den Allgäuer Alpen, von Deutschlands westlichster Gemeinde Selfkant bis zur östlichsten Stadt Görlitz. Mehr als 450 Stationen betreibt Kachelmanns Firma Meteo-media bereits in Deutschland. All das, damit in Zukunft auf die Wettervorhersage ein paar Tage länger Verlass ist.

▼ Eine perfekte Wettervorhersage ist aus Prinzip unmöglich. Professor Hense und seine Kollegen können nur versuchen, das Chaos möglichst lange in die Schranken zu verweisen.

Jörg Kachelmann hat noch einen weiten Weg vor sich: Momentan beträgt die Maschenweite seines Messnetzes in Deutschland knappe 30 Kilometer. Für eine perfekte Wettervorhersage reicht das nicht ganz. „Dafür bräuchte man jeden

Millimeter eine Station“, erklärt der Bonner Meteorologe Professor Dr. Andreas Hense. Und zwar nicht nur am Boden, sondern auch in der Luft. Auf Bergen, an den Polen, über dem Meer. Weltweit. Hense lächelt ironisch. „Das ist natürlich völlig unmöglich.“

### Der Möwenflügel-Effekt

Für eine gute Wettervorhersage muss man den aktuellen Zustand der Atmosphäre möglichst genau kennen. Wenn man die Computerprogramme mit minimal unterschiedlichen Anfangswerten füttert, driften ihre Ergebnisse binnen kurzer Zeit extrem auseinander: Wetter verhält sich chaotisch. „Hier kann man das sehr schön nachvollziehen“, sagt Hense. Mit ein paar Mausklicks navigiert er durch das Internet-Angebot von WetterOnline zu den so genannten Ensemble-Vorhersagen (<http://profi.wetteronline.de/daten/profi/de/ensdia/ensdia.html>). „Hier hat man immer wieder dieselbe Prognose durchgerechnet und dabei nur die Anfangsbedingungen ein wenig variiert. Sehen Sie – das Ergebnis ähnelt fast einer Rauchföhne, die immer weiter verweht.“

Wettervorhersagen gelten aus Prinzip nicht für die Ewigkeit. Selbst wenn man jeden Millimeter in der Atmosphäre ein paar Dutzend Parameter erheben könnte, würde die Messungenauigkeit den Zeitraum für eine verlässliche Prognose begrenzen. Das hat schon vor fast 50 Jahren der Meteorologe Edward Lorenz festgestellt. Er hatte ein einfaches Wettermodell mit gerundeten Werten aus einer früheren Berechnung gefüttert. Dabei beobachtete er, dass die winzigen Änderungen zu völlig anderen Ergebnissen führten. „Das ist der viel beschworene Schmetterlingseffekt“, erklärt Hense. „Obwohl Lorenz diesen Begriff anfangs gar nicht verwendet hat.“ Er blättert in dem vergilbten Artikel, der vor ihm liegt. „One flap of a seagull's wing would forever change the future of the weather“, zitiert er den amerikanischen Forscher. „Sehen Sie, eigentlich müsste es Möwenflügel-Effekt heißen.“

Lorenz beschrieb in seinem Artikel „Deterministic Nonperiodic Flow“ erstmals, was chaotische Effekte für die Vorhersage des Wetters bedeuten. Doch was ist Chaos überhaupt? Wenn sich auf Henses Schreibtisch die Papiere stapeln, hat



das mit Chaos im mathematischen Sinne nichts zu tun. Denn Unordnung beschreibt den Zustand eines Systems, Chaos seine Veränderung. Anders gesagt: Unordnung zeigt sich in einem Standbild, Chaos erst im ganzen Film – nämlich dann, wenn kleinste Differenzen in den Anfangsbedingungen nach einer gewissen Zeit ein völlig anderes Verhalten zur Folge haben.

Im Gegensatz zum Zufall gehorcht Chaos Regeln – es ist „deterministisch“, sagen Mathematiker: Jedes Bild des Filmes hat Auswirkungen auf seinen Nachfolger. Darauf basiert auch die Wettervorhersage: Die Wetter-Software wird mit aktuellen Luftdrücken, Temperaturen, Feuchtigkeiten, Windrichtungen gefüttert. Daraus berechnet sie im Minutentakt, wie sich diese Werte gegenseitig beeinflussen, und nimmt die neuen Zahlen als Ausgangspunkt für die nächste Prognose. Schnelle Rechner, ein möglichst feinmaschiges Beobachtungsnetz und gute Modelle sind für die Qualität der Prognose immens wichtig. Heute können Meteorologen das Chaos für ein bis zwei Wochen in die Schranken verweisen. „Spätestens dann summieren sich die Fehler in den Startbedingungen sowie den Modellen so sehr, dass man von einer Vorhersage nicht mehr sprechen kann“, erklärt Hense.

Zufallsprozesse sind dagegen gar nicht vorhersagbar. Beim Würfelspiel hat selbst der ausgebuffteste Zocker gegenüber einem Neuling keine Vorteile: Beide wissen nicht, ob als nächstes die Sechs fällt. Möglich sind allenfalls statistische Aussagen: Die Wahrscheinlichkeit für jede Augenzahl beträgt ein Sechstel; bei 1.000 Würfeln wird im Schnitt knapp 170 mal eine Sechs dabei sein.

### Medienhype und Ernüchterung

In den 80er Jahren begann um die Chaosforschung ein wahrer Hype. Damals gingen bizarre Bilder durch die Medien, die mit ihren psychedelischen Farbverläufen einer Drogenfantasie zu entstammen schienen. Es handelte es sich so genannte „Fraktale“ – geometrische Muster, die man zerlegen kann, so dass ihre Einzelteile stark dem ursprünglichen Bild äh-

neln. Fraktale Formen gibt es auch in der Natur: Ein einzelner Ast verzweigt sich ähnlich wie die gesamte Baumkrone. Hinter den ästhetischen Grafiken stecken dagegen meist Gleichungen, die sich in bestimmten Zahlenbereichen chaotisch verhalten.

Etwa zur selben Zeit veröffentlichte der amerikanische Wissenschaftsjournalist James Gleick sein Buch „Chaos: Making a new Science.“ Gleick schrieb, dass chaotische Phänomene zu unserem Alltag gehören – vom unregelmäßig tropfenden Wasserhahn über Herzrhythmusstörungen bis hin zum Auf und Ab der Aktienkurse. Medienberichte schürten den Eindruck, dank der Chaosforschung werde man diese Alltagsphänomene besser und genauer vorhersagen können – Börsencrash adé. Doch gerade zur Kaufberatung am Wertpapiermarkt taugt die Chaostheorie wenig. „Eigentlich ist die Börse für die Theorie zu kompliziert“, erklärt der Bonner Mathematiker Professor Dr. Sergio Albeverio. „Es gibt einfach zu viele psychologische und politische Faktoren, die eine Auswirkung auf die Kurse haben.“ Zudem ist es kaum möglich, diese Einflüsse in Formeln zu fassen. Anders beim Wetter: Die Geschehnisse in der Atmosphäre lassen sich im Prinzip auf Gleichungen reduzieren, die seit dem frühen 19. Jahrhundert bekannt sind.

Der französische Mathematiker Benoît Mandelbrot war einer der ersten, der die Turbulenzen auf den Finanzmärkten mit Hilfe der Chaostheorie analysiert hat. In seinem aktuellen Buch „Fraktale und Finanzen“ erklärt er damit zum Beispiel, warum es so riskant ist, sein Geld an der Börse anzulegen – riskanter, als es bei einem rein zufallsgetriebenen Kursverlauf der Fall wäre. Daran ändert auch die Chaosforschung nichts – trotz der Hoffnungen, die so mancher in sie setzte.

### Nach dem Beben ist vor dem Beben

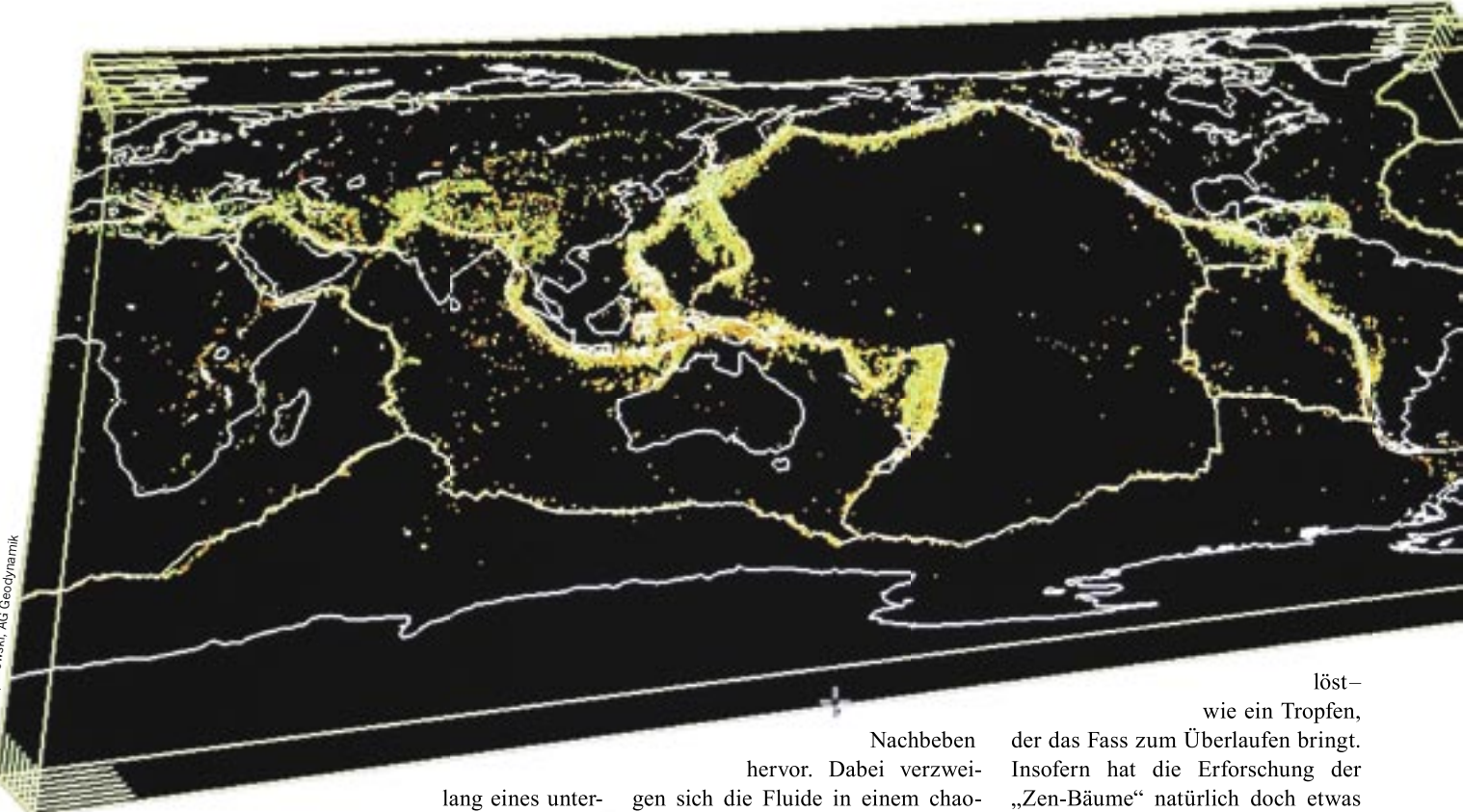
„Prognosen? Davon sind wir weit entfernt.“ Stephen Millers Gesicht zerknittert in viele Lachfältchen, als würde ihn das rein gar nicht stören. „Vielleicht sind Erdbeben überhaupt nicht vorhersagbar. Uns geht es zunächst einmal darum, ihre Physik besser zu verstehen.“ Dazu studiert der Inhaber des Lehrstuhls für Geodynamik die Verteilung der vielen tausend Nachbeben, die in den Wochen und Monaten nach einem großen Erdstoß auftreten. „Kommen Sie, ich zeige Ihnen etwas.“

Im Nachbarraum werfen zwei Beamer den Umriss Südamerikas an die Wand. Professor Miller setzt die schwarze 3D-Brille auf. Die Doppelkonturen verschmelzen zu einem plastischen Gesamtbild. An der Westküste des Kontinents ist ein Teppich von tausenden gelben und orangefarbenen Punkten zu sehen, der sich ent-

▲ Am „Apfelmännchen“ lässt sich das Prinzip der Selbstähnlichkeit besonders schön nachvollziehen.



Bild: Anna Zaporowski, AG Geodynamik



▲ Auf der so genannten „Geowall“ können die Geodynamiker den Entstehungsherd aller größeren Erdbeben der letzten zehn Jahre dreidimensional darstellen.

lang eines unterirdischen Abhangs tief in das Erdinnere zu erstrecken scheint. „Auf dieser dreidimensionalen Karte sind alle größeren Erdstöße des letzten Jahrzehnts verzeichnet“, erklärt Miller. „Jeder der Punkte markiert den Herd des Bebens – wir wissen also auf wenige Kilometer genau, wo in der Kruste es seinen Anfang genommen hat.“ Miller fertigt ähnliche Bilder für Nachbeben an. Daraus erzeugt er Filme, auf denen die Stöße in der Reihenfolge ihrer Entstehung aufblitzen. „Wenn wir das machen, stellen wir fest, dass sich die Nachbeben in komplex verzweigten Strukturen in der Erdkruste auszubreiten scheinen.“ Er wirft ein verästeltes Symbol auf das Papier, das entfernt an ein japanisches Schriftzeichen erinnert. „Ungefähr so. Ich nenne diese Figuren Zen-Bäume.“

Sollte diese Hypothese stimmen, entstehen Nachbeben nicht zufällig irgendwo in der Erdkruste, sondern hängen in fraktalen Mustern zusammen. Der Geophysiker vermutet, dass es Fluide (also Gase oder flüssige Substanzen) aus dem Erdinnern sind, die diesen Prozess antreiben: Sie sammeln sich in zehn oder zwanzig Kilometern Tiefe unterhalb der Erdoberfläche. Bei einem Beben bekommt diese Reservoirkammer einen Riss; die Fluide strömen unter starkem Druck aus und rufen auf dem Weg zur Oberfläche viele kleine

Nachbeben hervor. Dabei verzweigen sich die Fluide in einem chaotischen Prozess. Um diese Ausbreitung zu studieren, ist Miller ähnlich wie sein Kollege aus der Meteorologie auf genaue Daten angewiesen. „Wir arbeiten mit ähnlichen mathematischen Konzepten zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge wie Professor Hense.“ Momentan treiben Kollegen des Geoforschungszentrums Potsdam in der Türkei nahe Istanbul Messsonden in die Erde. Die Forscher wollen so möglichst viele Nachbeben präzise lokalisieren.

Bislang haben sich Geophysiker hauptsächlich auf die Untersuchung „großer“ Beben konzentriert. Nachbeben sind aus zweierlei Gründen interessant: Einerseits lässt sich an ihnen studieren, welchen Weg Spannkraften in der Erdkruste nehmen. Andererseits können sie auch selbst wieder zur Keimzelle eines großen Bebens werden. „Durch den Kontinentaldrift verkanten die Platten gegeneinander: Ihre Kontaktfläche gerät unter Spannung“, erklärt Miller. „Ein großes Beben entsteht, wenn sich die Spannung über Hunderte von Kilometern entlang der Kontaktfläche löst und die Plattenkanten schlagartig gegeneinander verrutschen.“

Ein Nachbeben an einer kritischen Stelle kann genau das Bisschen zusätzliche Spannung ins System bringen, das ein Jahrhundertbeben aus-

löst – wie ein Tropfen, der das Fass zum Überlaufen bringt. Insofern hat die Erforschung der „Zen-Bäume“ natürlich doch etwas mit der Prognose von Erdstößen zu tun – auch wenn der gebürtige Amerikaner keine allzu großen Hoffnungen wecken möchte.

### Ein Physiker in der Hirnforschung

„Die Chaosforschung hat viel versprochen und wenig gehalten.“ Dr. Klaus Lehnertz sitzt in seinem kleinen Büro auf dem Bonner Venusberg; aus seiner Stimme klingt leiser Spott. „Wenn Sie Ihrem Artikel etwas Gutes tun wollen, schreiben Sie nicht von Chaos, sondern von nichtlinearen dynamischen Systemen.“

Dynamisch deshalb, weil sich die Systeme verändern. Nichtlinear, weil ihre Dynamik durch so genannte „nichtlineare“ Gleichungen beschrieben wird. Vereinfacht ausgedrückt, gehorchen lineare Systeme dem Prinzip „kleine Ursache, kleine Wirkung“. Nichtlineare dynamische Systeme neigen dagegen zu chaotischem Verhalten – es gilt „kleine Ursachen können große Wirkung haben“. Das Wetter zählt dazu; die Bewegung des Erdmantels ebenfalls. Und wohl auch das Gehirn. Was einer der Gründe ist, warum der habilitierte Physiker Lehnertz in der Hirnforschung arbeitet: Im scheinbar zufälligen Auf und Ab von EEG-Kurven sucht er nach einem Muster – dem Schlüssel zur Vorhersage epileptischer Anfälle.



Schon Julius Caesar litt unter dem rätselhaften Krampfleiden. Nach Schätzungen sind rund 600.000 Bundesbürger betroffen. Bei einigen von ihnen folgen die Anfälle einer festen Rhythmik. Andere sind monatelang beschwerdefrei, um dann am selben Tag gleich zweimal wie aus heiterem Himmel zusammenzubrechen. „Diese auf den ersten Blick regellosen Epilepsien sind es, die uns interessieren“,

erklärt der Direktor der Klinik für Epileptologie Professor Dr. Christian Elger. „Unsere Vision ist ein Computersystem, das permanent die Hirnpotentialschwankungen des Betroffenen auswertet und ihn rechtzeitig vor einem Anfall warnt. Er könnte dann beispielsweise ein hoch wirksames Medikament nehmen, das den Anfall verhindert.“

Elger glaubt nicht, dass diese Vision noch zu seinen Lebzeiten Wirklichkeit wird. Zu wenig weiß die Forschung bis heute über die Arbeitsweise des Gehirns. Unter der Schädelkalotte sitzen rund 100 Milliarden Nervenzellen, die jeweils mit 1.000 bis 10.000 Nachbarn kommunizieren. Was dabei auf Zellebene abläuft, ist inzwischen bekannt. „Doch schon bei so grundlegenden Funktionen wie der Gedächtnisablage müssen wir passen.“

Klaus Lehnertz kann dem nur beipflichten. „Wir wissen noch nicht einmal genau, was wir bei einem EEG messen“, sagt er. Anders als Wetterforscher Andreas Hense setzt der Physiker daher auch nicht auf Vorhersagemodelle – was man nicht gut genug versteht, lässt sich auch nicht einigermaßen treffsicher modellieren. Was Lehnertz und seine Kollegen suchen, ist eine Art „epileptologische Bauernregel“: Aus zahllosen EEG-Kurven wollen sie die Merkmale destillieren, die auf einen nahenden Anfall hindeuten.

Weltweit fahnden die Epileptologen nach derartigen Anzeichen. Noch vor wenigen Jahren waren ihre

Bauernregeln dabei von der Qualität „Kräht der Hahn auf dem Mist, ändert sich das Wetter, oder es bleibt, wie es ist.“ Inzwischen können sie aber beachtliche Erfolge vorweisen. So bei der genauen Ortung des defekten Hirnareals: Bei vielen Patienten entspringen die Anfälle immer derselben Stelle. Oft kann man die Betroffenen heilen, indem man diesen Herd chirurgisch entfernt. „Wir können heute allein anhand der Hirnströme eines Patienten sagen, wo der Defekt sitzt“, sagt Lehnertz. Dazu müssen die Forscher nicht einmal auf einen Anfall warten – EEG-Kurven aus der beschwerdefreien Phase reichen aus.

Auch bei der Prognose machen die Wissenschaftler Fortschritte. Ein heiß gehandeltes Indiz ist die Änderung der Synchronität: Kurz vor einem Anfall beginnen verschiedene Bereiche im Gehirn augenscheinlich, im Gleichtakt zu marschieren. Lehnertz kann dieses Phänomen sichtbar machen, indem er Hirnstrom-Daten mit Methoden aus der Chaosforschung untersucht. „Schauen Sie“, sagt er und deutet auf seinen Bildschirm. Die Analyse-Methoden haben die EEG-Kurve zu einer Art Knäuel aufgewickelt. „Sehen Sie dieses Loch im Zentrum des Knäuels? Das deutet auf eine starke Synchronisierung der Hirnströme hin.“

Kurz vor einem Anfall finden sich in den EEG-Daten vieler Patienten derartige Muster. Doch auch in anfallsfreien Phasen schreitet das Gehirn hin und wieder im Gleichtakt. „Synchronität allein ist kein geeignetes Prognosemerkmal“, bedauert Lehnertz. Welche Bereiche sich synchronisieren, ist zudem von Patient zu Pati-

ent unterschiedlich – manchmal sogar von Anfall zu Anfall.

Dazu gesellt sich eine weitere Schwierigkeit: Wenn man Verkehrstaus vorhersagen könnte, würden sie an dieser Stelle vielleicht gar nicht entstehen, weil alle Verkehrsteilnehmer als Reaktion einen anderen Weg fahren würden. Ähnlich könnte das Wissen um einen nahenden Anfall theoretisch seine Entstehung beeinflussen. Hense und Miller haben mit diesem psychologischen Effekt dagegen nicht zu kämpfen: Wie auch immer die Vorhersage aussieht – weder das Wetter noch der Erdmantel scheinen sich darum auch nur einen Deut.

FL/FORSCH

▼ Klaus Lehnertz fahndet in Hirnstromdaten nach Vorzeichen für einen nahenden epileptischen Anfall.

