

GEO WISSEN

CHAOS + KREATIVITÄT

WELTBILD

**Die schöpferische
Revolution**

SOZIOLOGIE

**Die unvernünftige
Gesellschaft**

KOSMOS

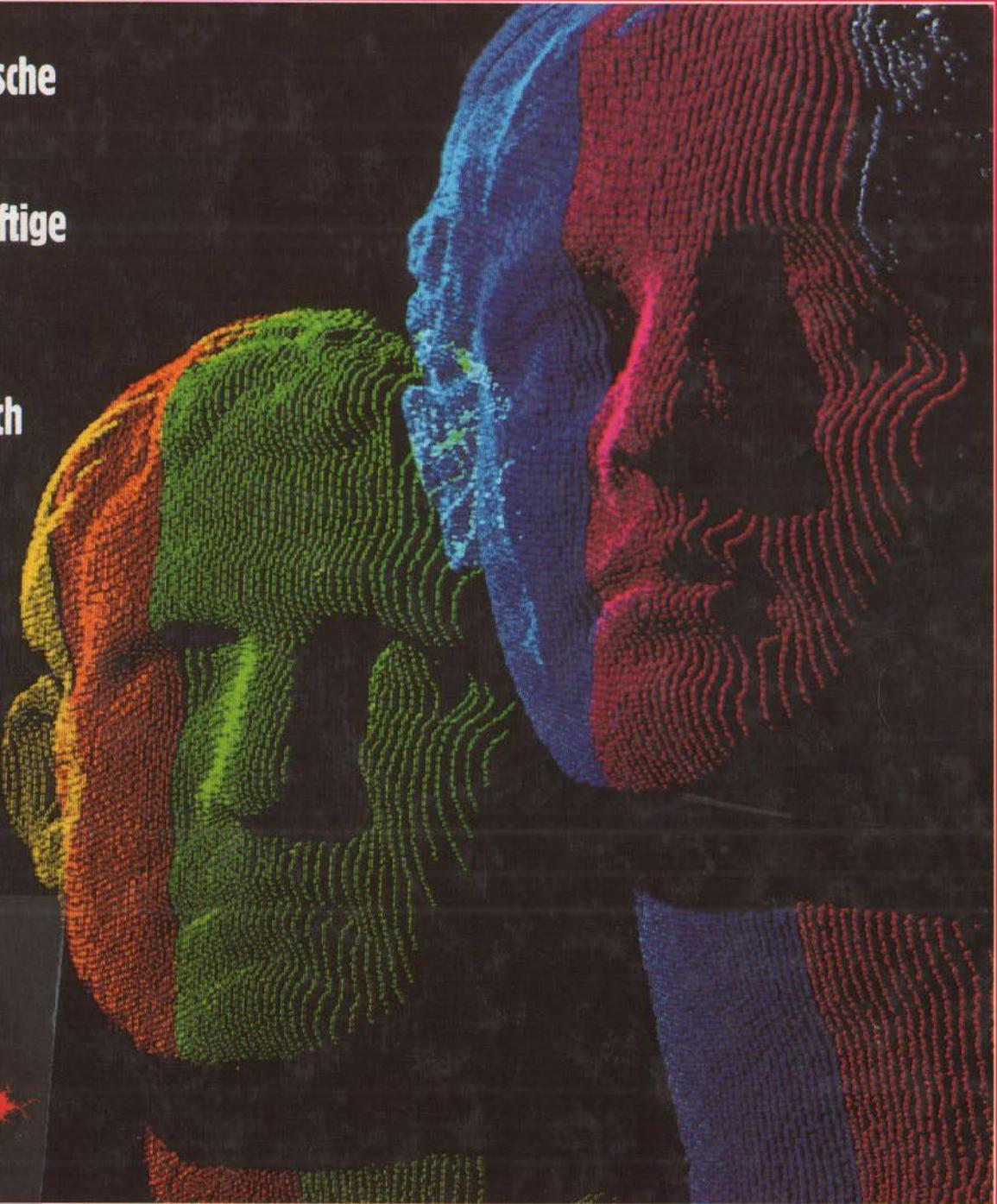
**Selbst
organisiert sich
die Welt**

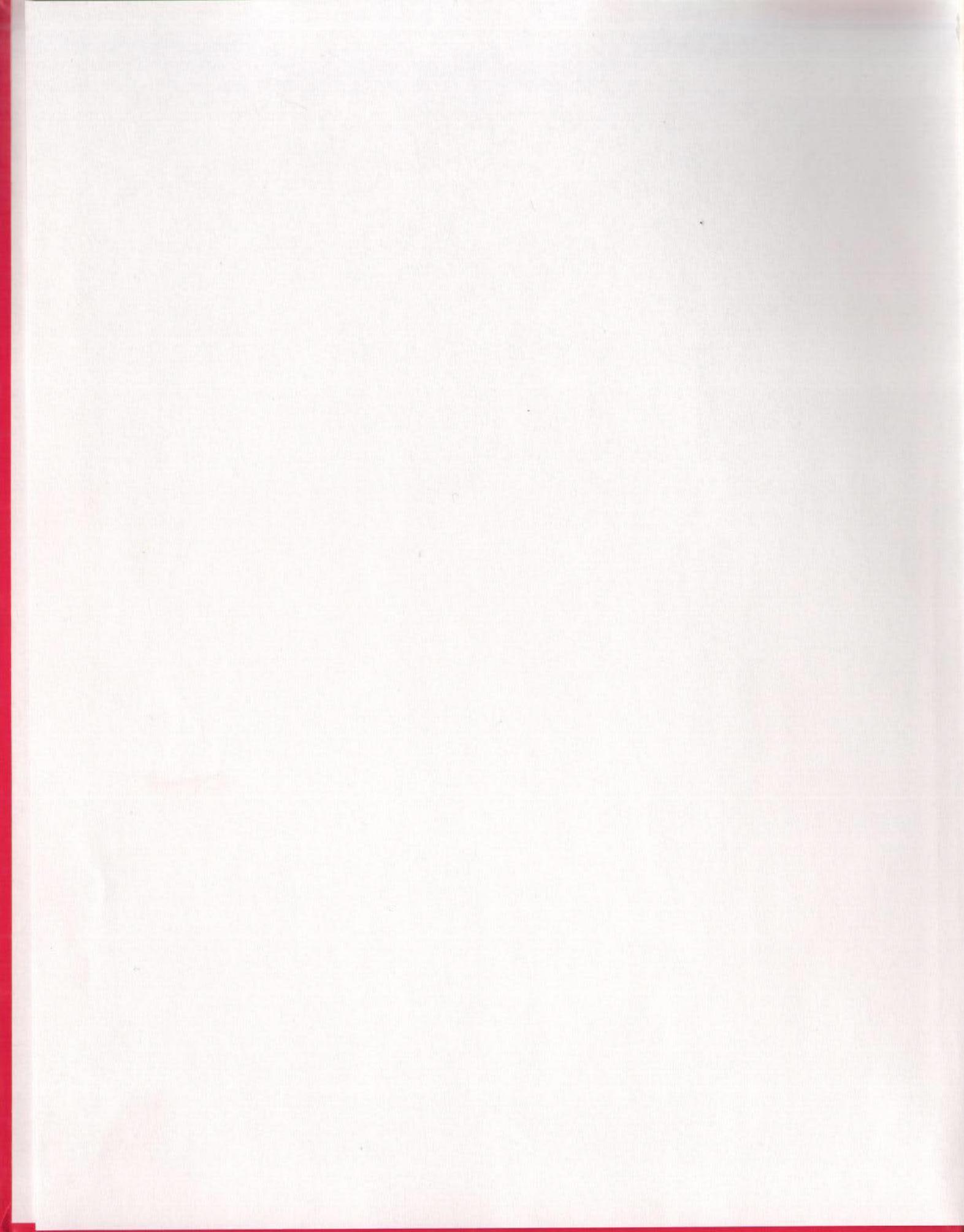
MEDIZIN

**Hab Chaos
im Herzen**

COMPUTER

**Wo
das Apfel-
männchen
herrscht**







lieber Leser, lieber Leser,

GEO WISSEN

Verlag Gruner + Jahr AG & Co, Warburgstraße 50, 2000 Hamburg 36. Redaktion: Warburgstraße 45, 2000 Hamburg 36. Postanschrift für Verlag und Redaktion: Postfach 30 20 40, 2000 Hamburg 36. Telefon: 0 40/4 11 81. Telefax: 0 40/41 18 22 53. Telex: 2 1 952-16 u. 1740277ggeo. Teletex: 40227-GJGEO.

CHEFREDAKTEUR

Hermann Schreiber

STELLVERTRETENDER CHEFREDAKTEUR

Emanuel Eckardt

ART DIRECTOR

Erwin Ehret

REDAKTIONSLEITER

Günter Haaf

GESCHÄFTSFÜHRENDE REDAKTEURE
Ernst Artur Albaum (Text), Christiane Breustedt (Bild)

TEXTREDAKTION

Dr. habil. Reinhard Breuer, Franz Mechsner.

Dr. Jürgen Neffe, Dr. Manfred Pietschmann

Assistenz: Angelika Janssen

BILDREDAKTION

Barbel Edse, Josef Hurban

LAYOUT

Franz Braun (Leitung), Vera Hülsmann,

Andreas Krell

SCHLUSSREDAKTION

Hinnerk Seelhoff, Dr. Friedel H. Bastein,

Jürgen Brüggemann, Manfred Feldhoff.

Peter Jordan, Hans-Werner Kühl

Assistenz: Hannelore Koehi

MITARBEITER

Barnabas Thwaites (Dokumentation), Klaus Bachmann, Horst Brandt, Prof. Dr. Friedrich Cramer, Prof. Dr. Hermann Haken, Charlotte Kerner, Karthorst Klotz, Dr. Bernd-Olaf Küppers, Dr. Mario Markus, Prof. Dr. Gottfried Mayer-Kress, Christopher Schrader, Jürgen Scriba, Dr. Volker Sommer, Dr. Stephan Wehowsky, Holger Everling (Grafiken), Vladimir Renčin (Cartoons)

GEO-BILDARCHIV

Birgit Heller, Gunda Guhl-Lerche, Peter Müller

FARBIMPRIIMATUR

Norbert Kunz

GEO-BÜROS

Moskau: Helga Engelbrecht, Kutusowskij Prospekt 7/4, Kw 314, Tel. 2 43 42 64;

New York: Brigitte Barkley, Wilma Simon, 685 Third Avenue, 23st Fl., New York, N.Y. 10017,

Tel. (212) 599-4040/43/44/45

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Günter Haaf

VERLAGSLEITER

Heiner Eggert

ANZEIGENLEITER

Rolf Grimm

(verantwortlich für Anzeigen)

VERTRIEBSLEITER

Udo Steinmetz

HERSTELLER

Bernd Zahn

GEO-Wissen-LESER-SERVICE

Gruner + Jahr AG & Co

Postfach 10 25 25, 2000 Hamburg 1

Postcheckkonto Hamburg 240 00-209

BLZ 200 100 20

Tel. 0 40/41 18 33 24

Schweiz: GEO-Wissen-Leser-Service, 6045 Meggen
Tel. 041-37 36 78

Heftpreis: DM 13,50 ISBN-Nr.: 3-570-06644-4
Buchhandel fassung Preis DM 19,80 ISBN-Nr.: 3-570-0121-X

Auslandsspreise: Schweiz sfr 13,50, Österreich öS 100,-; übriges Ausland auf Anfrage.

© 1990 Gruner + Jahr, Hamburg

ISSN-Nr.: 0933-9736

Anzeigenpreisliste Nr. 4 vom 1. 1. 1990.
Bankverbindung: Deutsche Bank AG, 2000 Hamburg 1, Konto-Nr. 03 22 800

Repro: Werner Hirt KG, Hamburg

Druck: Mainpresse Richterdruck, Würzburg

Gelegentlich – das sei hier zugegeben – keimt bei uns ein klammheimlicher Neid auf die Kollegen vom „Blauen“, wie wir das GEO-Special intern nennen: Wenn sie ein Themenheft planen, dann fahren sie eben nach Rom, nach Alaska oder in die DDR. Und wir von GEO-Wissen? Wo liegt das Land „Chaos“? Wo sind die „Fraktale“ zu Hause?

Die Antwort haben meine Kollegen und ich zwar geahnt. Aber erschrocken waren wir hin und wieder doch, als wir bei unseren „Expeditionen“ zu spüren bekamen, worauf wir uns mit dem Thema Chaos + Kreativität eingelassen hatten: Das ist mehr als „Neuland“, das ist ein neues Universum des Denkens. Kein Wunder, daß sich der Bogen dieses Heftes von der Entstehung – der Kreation – des Kosmos und des Lebens bis hin zur „Musterbildung“ in menschli-

chen Gehirnen und Gesellschaften spannt.

Bereut haben wir die Strapazen, die journalistische Kärrner-Arbeit bei der Übersetzung abstrakter Sachverhalte nicht: Selbstverständlich muß GEO-Wissen über eine wissenschaftliche Revolution berichten – und die „Chaos-Forschung“ ist ein solcher Umsturz des Weltbildes.

Schönwetter - Journalismus war noch nie die Sache von GEO. Unser Mutterblatt – das „Grüne“ – hat im Juni 1984 als erste Zeitschrift die damals sensationellen „fraktalen Bilder“ von Heinz-Otto Peitgen und Peter Richter veröffentlicht; neue Produktionen des Bremer Mathematikerteams finden Sie auf den Seiten 124 bis 131 dieses Heftes. Und Reinhard Breuer hat bereits im Juli 1985 in GEO den ersten großen Bericht über „Das Chaos“ veröffentlicht.

Mein Freund Reinhard war auch an der Themenplanung

dieses Heftes von Anfang an beteiligt. In vielen Fragen beriet uns Bernd-Olaf Küppers vom Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen, Autor des in diesen Wochen auch in den USA erschienenen Buches „Der Ursprung biologischer Information“. Für GEO-Wissen schrieb der Physiker und Philosoph den Essay „Wenn das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile“ (Seite 28).

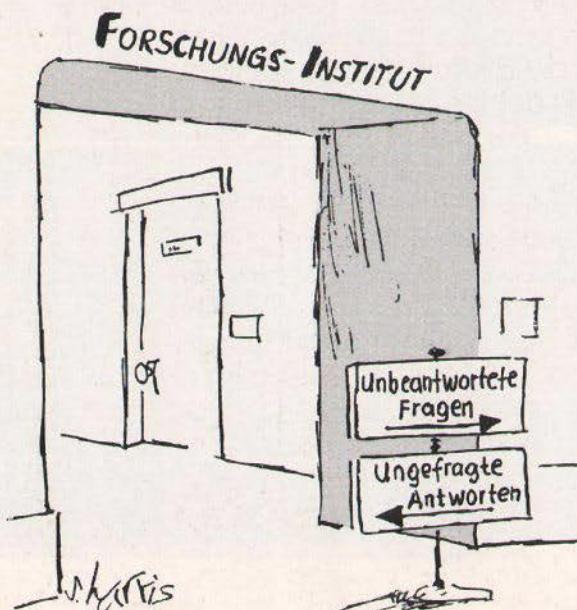
Küppers ist Mitglied des Forschungsteams um den Nobelpreisträger Manfred Eigen. Dessen Versuch, theoretisch und in Experimenten die Entstehung des Lebens durch „Selbstorganisation“ von Molekülen zu verstehen, hat meinen Kollegen Franz Mechsner fasziniert. Er, der studierte Neurobiologe, berichtet auch über die Chaos-Forschung in seinem Fach: „Kann das Hirn das Chaos bändigen?“

Große Hilfe hatten wir dieses Mal von drei jungen Diplomphysikern: Ohne Christopher Schrader, Jürgen Scriba und Barnabas Thwaites – er hat dieses Heft dokumentiert – wäre unsere Expedition womöglich „abgestürzt“.

All unsere Bemühungen, mit Worten das Wachsen und Werden einer neuen Gedankenwelt zu beschreiben, wären nur die Hälfte wert ohne die Arbeit der Bildredaktion: Josef Hurban hat – wieder einmal – eine herkulische Leistung vollbracht. Freuen Sie sich also auf eine intellektuelle und sinnliche Entdeckungsreise ins Reich der „nichtlinearen Phänomene“.

Herzlich Ihr

Günter Haaf
Günter Haaf



CHAOS + KREATIVITÄT

Selbst organisiert sich die Welt

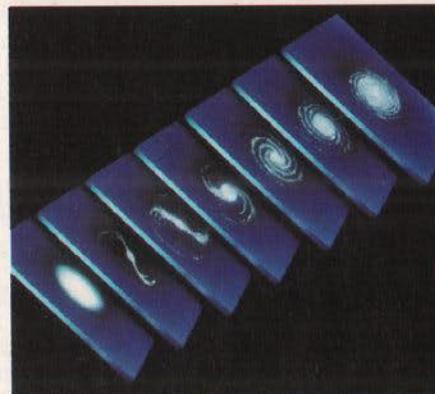
Unvorhersagbar, aber doch gesetzmäßig: So offenbart sich uns die Fülle der Natur. Wenn der Wind dem Meer rund um ein kolumbianisches Pfahldorf Wellenmuster aufprägt, wenn Berge, Bäume und Gesellschaften Strukturen ausbilden - stets folgen sie universalen Gesetzen, denen die Chaos-Forscher auf der Spur sind. Seite 6



KOSMOS

Ein ordentliches Chaos

Im Spiel der kosmischen Kräfte wird aus Chaos Ordnung geboren. Alle Materie im Welt Raum ist penibel in Hierarchien geordnet - vom Atomkern bis zur Galaxis. Eine Reise durch alle Größenordnungen des Alls enthüllt ein selbstähnliches Universum. Seite 32



MYTHEN

Das schöpferische Spiel

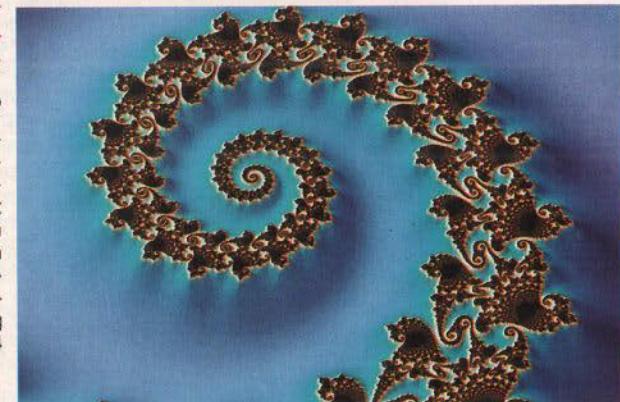
Viele Religionen glauben, daß die Welt dem Chaos entwuchs. Bei uns jedoch standen die Kreativität des Ungeplanten, das göttliche Spiel, der wirbelnde Tanz bis vor kurzem im Geruch der Unvernunft. Seite 64



MAGAZIN

Expedition ins Reich der Fraktale

Im Panoptikum der Chaos-Forschung sitzt das Apfelmännchen neben dem Computer, der »glaubt«, überlastet zu sein. Tornados wirbeln im Laborgefäß, und Bronchien enthüllen ihre »fraktale« Struktur, während vertonte Übergänge von Chaos zu Ordnung erklingen. Seite 124



EVOLUTION

Im Anfang war der Hyperzyklus

Der Nobelpreisträger Manfred Eigen postuliert: Das Leben ist durch Selbstorganisation entstanden. Im Zentrum seiner Theorie steht der »Hyperzyklus«, eine Gemeinschaft kooperierender Moleküle. Nun werden Teile seines Modells im Labor überprüft. Seite 72

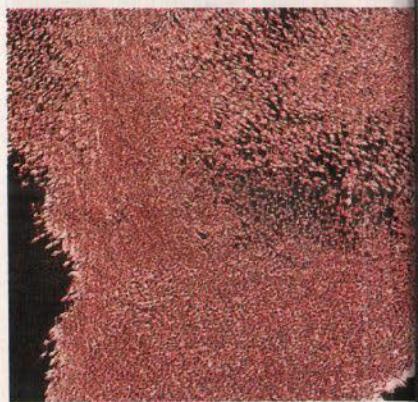


ÖKOLOGIE

Wenn Räuber Opfer ihrer Beute werden

Flamingos stehen, einer rosa-roten Wolke gleich, in einem See und suchen ihr Futter. Auch hier gilt die Regel vom Fressen und Gefressenwerden, hinter der sich »deterministisches Chaos« verbirgt - ein Schlüssel zum Verständnis ökologischen Reichtums?

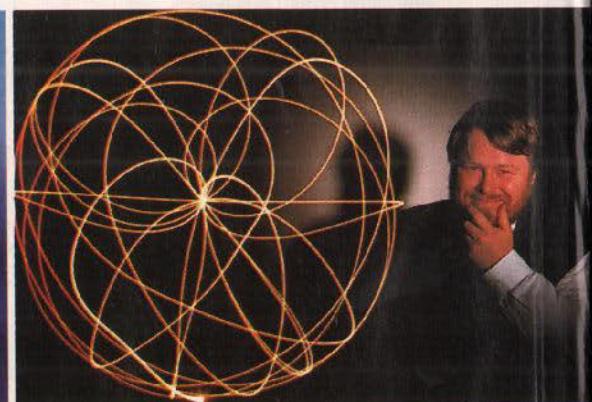
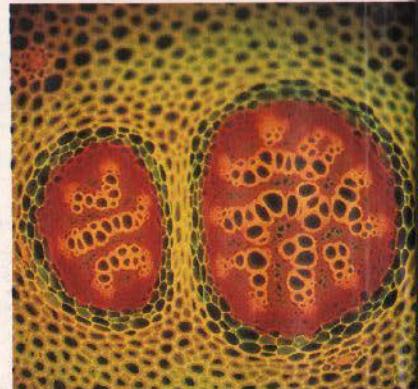
Seite 88



BIOLOGIE

Der gezähmte Zufall

Die unendliche Vielfalt des Lebens basiert auf der kreativen Wiederholung relativ simpler Grundmuster. Dieses »fraktale« Prinzip der Selbstähnlichkeit findet sich in den Zellen von Pflanzen wie im Gefieder von Vögeln. Seite 98

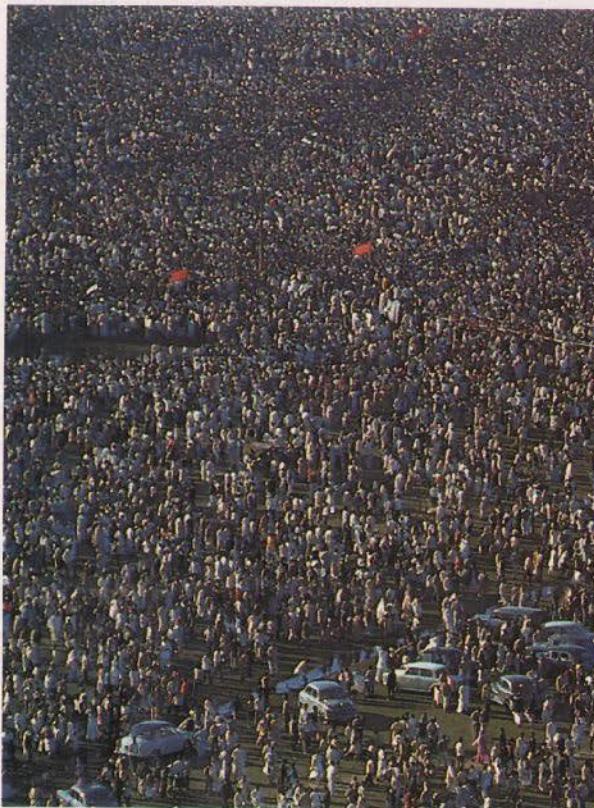


SOZIOLOGIE

Die unvernünftige Gesellschaft

Planung der Gesellschaft? Schon die Vorstellung findet der Bielefelder Soziologe Niklas Luhmann naiv. Komplexe soziale Systeme wie »die Wirtschaft« oder »die Politik« reagieren auf die Umwelt, indem sie sich selbst beobachten. Mit seinen Thesen zur Selbstorganisation der Gesellschaft hat der »Forscher mit den Zettelkästen« wütende Reaktionen seiner Kollegen auf sich gezogen.

Seite 152

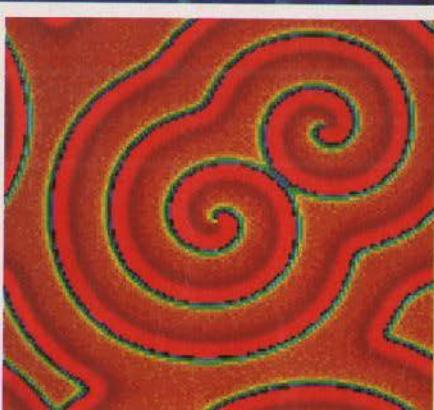
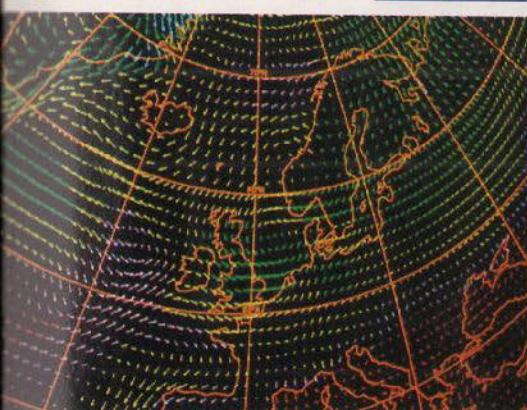


ALLTÄGLICHES

Chaos regiert die Welt

Fraktaler Schaum in der Badewanne, Hurrikane in der Kaffetasse, Wirbel im Marmorkuchen und Zigarettenrauch: Die Wissenschaft schickt sich an, die Regeln des Chaos zu entdecken. Und wer mag, kann diese Gesetze überall am Werke sehen.

Seite 164



Selbst organisiert sich die Welt

6

Wenn das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile

Bernd-Olaf Küppers über die Revolution des wissenschaftlichen Weltbildes

28

Ein ordentliches Chaos

32

Der kreative Pfeil

Ohne Zeit gäbe es weder Chaos noch Ordnung

62

Das schöpferische Spiel

64

Im Anfang war der Hyperzyklus

72

Wenn Räuber Opfer ihrer Beute werden

88

Der gezähmte Zufall

98

Kann das Hirn das Chaos bändigen?

118

MAGAZIN

Expedition ins Reich der Fraktale

124

Dynamische Systeme Wo das Apfelmännchen herrscht

131

Wettervorhersage Im Winde verwehen die Prognosen

132

Computernetze Wenn alle den Vorteil wittern

135

Chemie Das Ballett der Moleküle

136

Medizin

Hab Chaos im Herzen

139

Hören

Wenn die Tonleiter steigt und steigt

142

Experimente Dem Chaos die gewünschte Richtung geben

146

Die unvernünftige Gesellschaft

152

Rüsten bis das Chaos herrscht

Computer simulieren den Wettkampf der Waffen

162

Chaos regiert die Welt

164

Enzyklopädie der Ignoranz

Vier renommierte Fachleute antworten

174

Von Anfangsbedingung bis Zufall

Die wichtigsten Begriffe zu Chaos + Kreativität – in alphabetischer Ordnung

178

Literatur

191

Vorschau, Bildnachweis

192

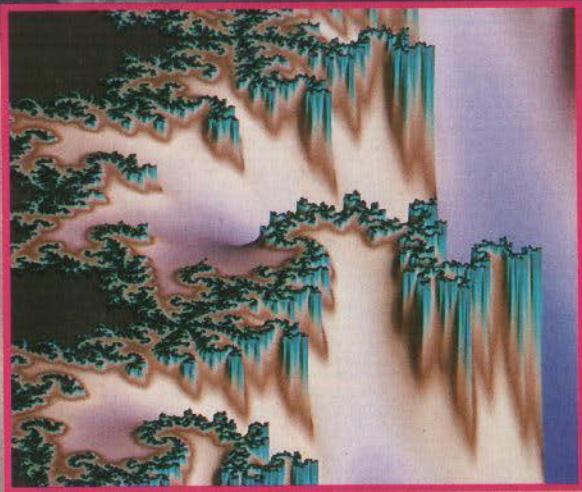
Titelfoto: M. Oshima & T. Yoshimi / Electrotechnical Laboratory/MITI – N. Miki/Newton

Redaktionsschluß: 23. 3. 1990

Wenn etwas Wirkliches wie das Eis am Kilimandscharo unwirklich wirkt und Unwirkliches wie das »Potentialgebirge der Mandelbrot-Menge« auf dem Com-

Die Entdeckung, wie Neues gesetzmäßig,

puterschirm Wirklichkeit wird, dann sind Chaos-Forscher in ihrem Element: Solche Ähnlichkeiten entstehen keineswegs rein zufällig, sondern sind Ausdruck einer universalen Gesetzmäßigkeit: »Nichtlinearität« regiert das Wechselspiel zwischen Ordnung und Chaos, sie sorgt auch für die »Selbstähnlichkeit« sogenannter fraktaler Gebilde, deren Struktur sich im großen wie im kleinen immer wieder gleicht



aber unvorhersagbar entsteht, erschüttert das naturwissenschaftliche Weltbild

Selbst organisiert sich die Welt



Wenn der Fluß der Energie Struktur erhält

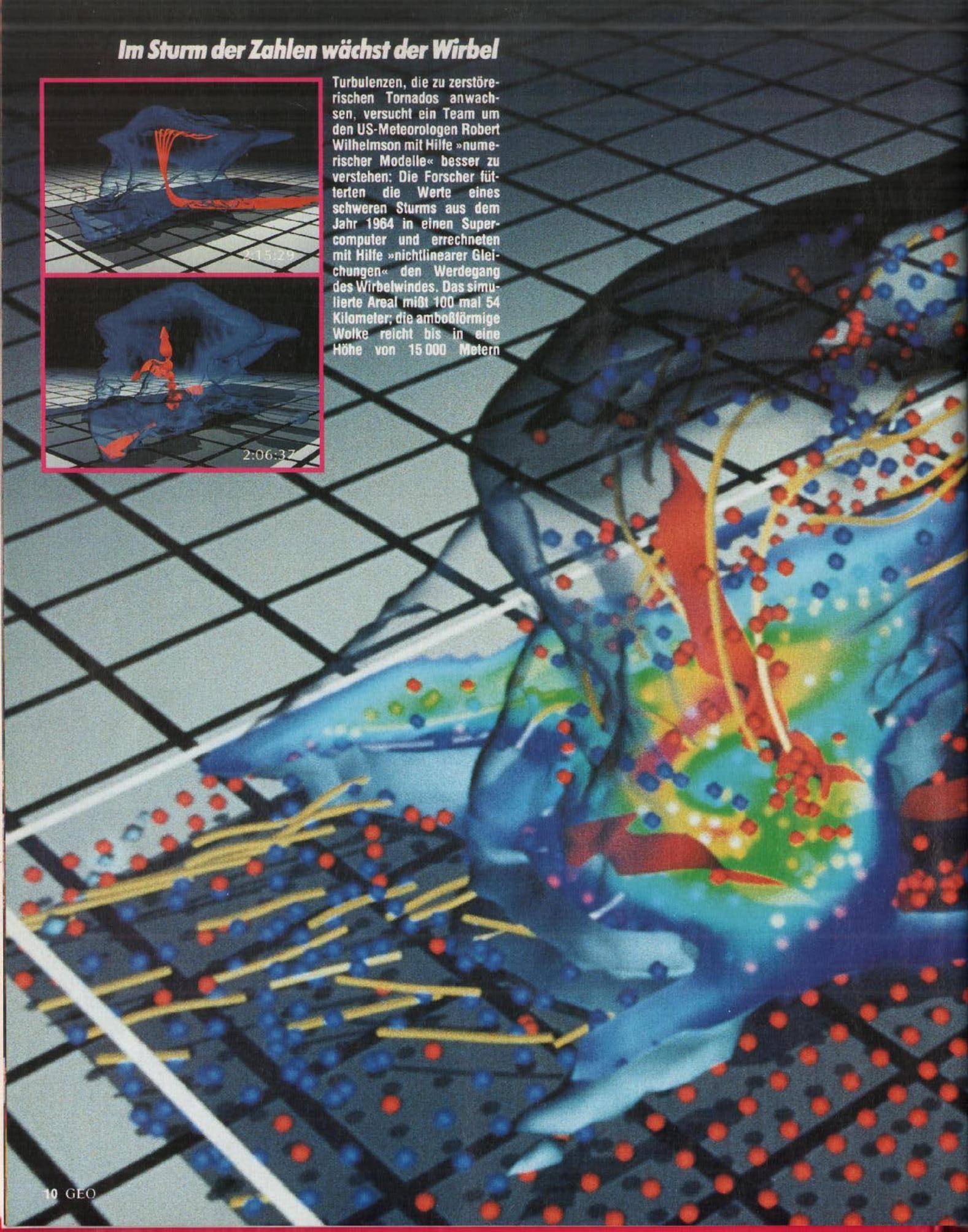
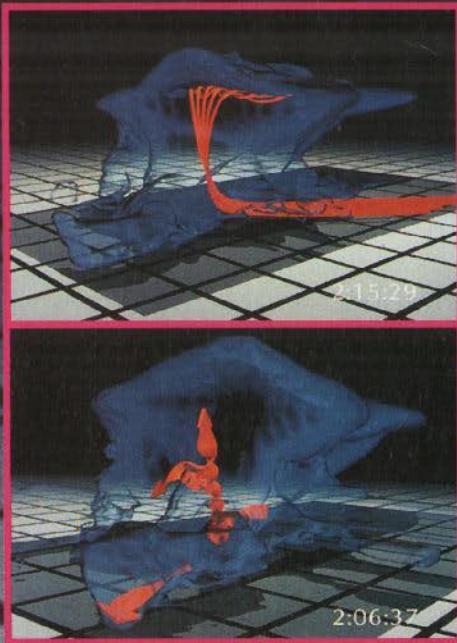


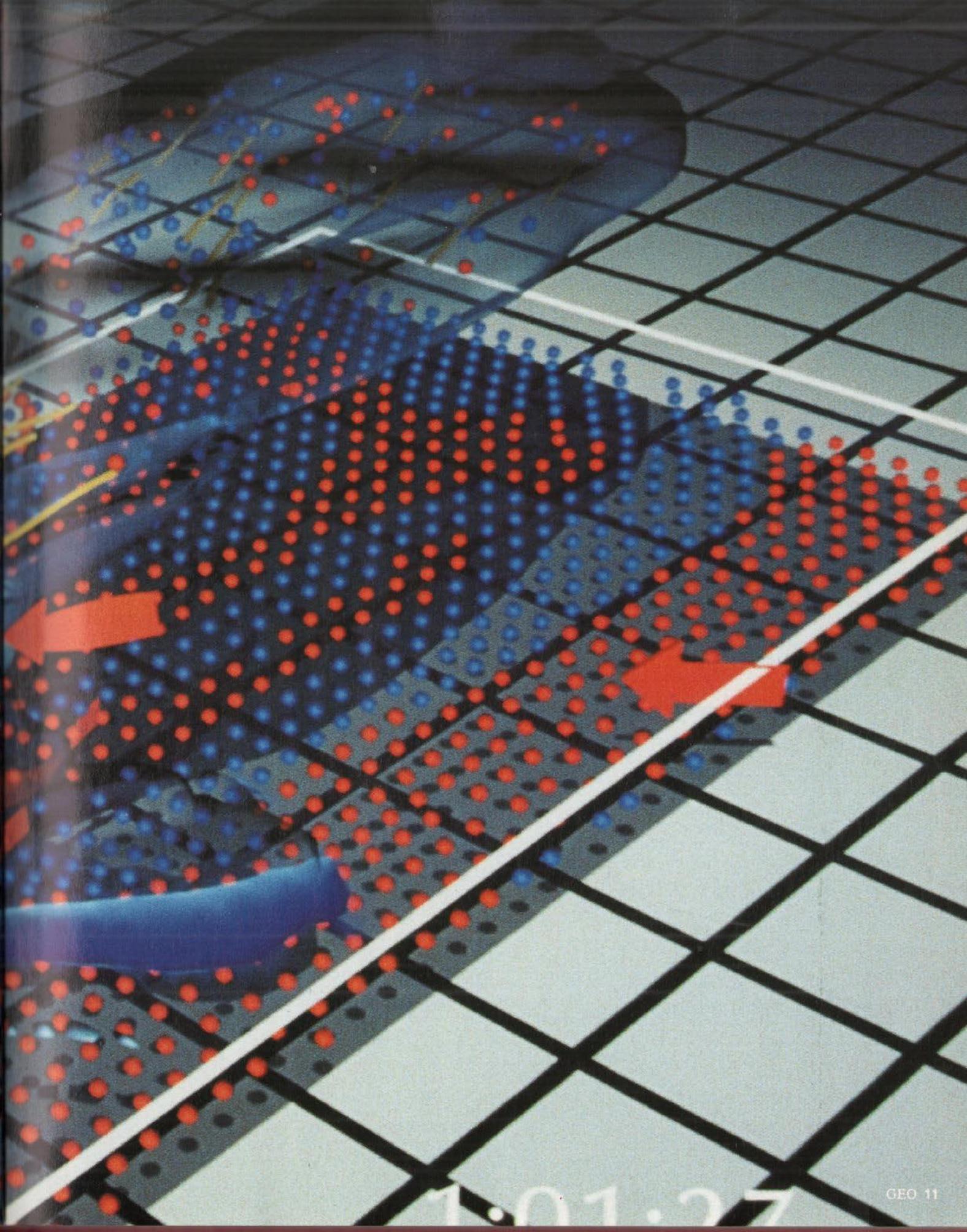
Die Faszination flammender Formen nutzt der Berliner Künstler Kain Karawahn in seinen »Pyromanien«: Feuer als eine »zunächst destruktive Realität, die sich dann in eine kreative Hyper-Realität verwandelt«. Das klassische Element Feuer, physikalisch ein »Fließgleichgewicht«, ist auch im Schöpfungs-Traktat des englischen Philosophen Robert Fludd aus dem Jahr 1617 abgebildet: als Teil des »Chaos, in dem Heiß und Kalt, Feucht und Trocken in wirim Kampf befangen sind«



Im Sturm der Zahlen wächst der Wirbel

Turbulenzen, die zu zerstörenden Tornados anwachsen, versucht ein Team um den US-Meteorologen Robert Wilhelmson mit Hilfe »numerischer Modelle« besser zu verstehen: Die Forscher fütterten die Werte eines schweren Sturms aus dem Jahr 1964 in einen Supercomputer und errechneten mit Hilfe »nichtlinearer Gleichungen« den Werdegang des Wirbelwindes. Das simulierte Areal misst 100 mal 54 Kilometer; die amboßförmige Wolke reicht bis in eine Höhe von 15 000 Metern





1.01.27

GEO 11



Wenn es wallet und woget, brauset und zischt, ist stets auch das »deterministische Chaos« am Werk. Seine Gesetzmäßigkeiten sorgen letztlich dafür, daß Meeresströmungen etwa den Sand in der Moreton Bay an der australischen Ostküste nicht formlos, sondern in Unterwasser-Dünen ablagern. Schlammvulkane des Yellowstone-Parks brodeln in Blasenmustern, und auch die Lava des Vulkans Kilauea auf Hawaii fließt immer wieder in der für ihre Konsistenz typischen Struktur

Wo Chaos für ordentliche Wogen sorgt





Ökologische Rätsel im Netz des Exponenten

Ein Faden des Begreifens verbindet Spinnennetze und »Ljapunow-Exponenten« - mathematische Maße für das Chaos, die Mario Markus vom Dortmunder Max-Planck-Institut für Ernährungsphysiologie auf einem Monitor sichtbar gemacht hat. Die Exponenten verraten, wie sich etwa die Größe einer Spinnenbevölkerung bei begrenztem Angebot an nahrhaften Fliegen verhalten könnte: chaotisch im blau gefärbten Bereich, stabil im gelben und schwarzen







Gewisse Kreise finden sich in jeder Gesellschaft

Alljährlich treffen sich die Männer des Schweizer Kantons Appenzell-Innerrhoden zur Abstimmung per Hand: sichtbares Ergebnis eines komplexen gesellschaftlichen Vorgangs. Ergebnis sozialer Prozesse sind auch Krankheitsepidemien, die sich spiralförmig ausbreiten können; gerade so wie die Wellen einer oszillierenden chemischen Reaktion, die Dortmunder Forscher auf einem Bildschirm sichtbar gemacht haben





Konzentrische blaue Ringe umrahmen den Siphon der tropischen Muschel *Tridacna maxima* – eine von Abermillionen Tier- und Pflanzenarten. Zur Evolution der phantastischen Fülle des Lebens trug dessen Fähigkeit zur »Selbstorganisation« bei. Dieses Prinzip studieren Forscher mit »zellulären Automaten«: Computerprogrammen, in deren eckigen »Welten« elektronische »Wesen« entstehen und munter draufloswuchern oder aussterben



Für Zellen kann Freiheit fast grenzenlos sein

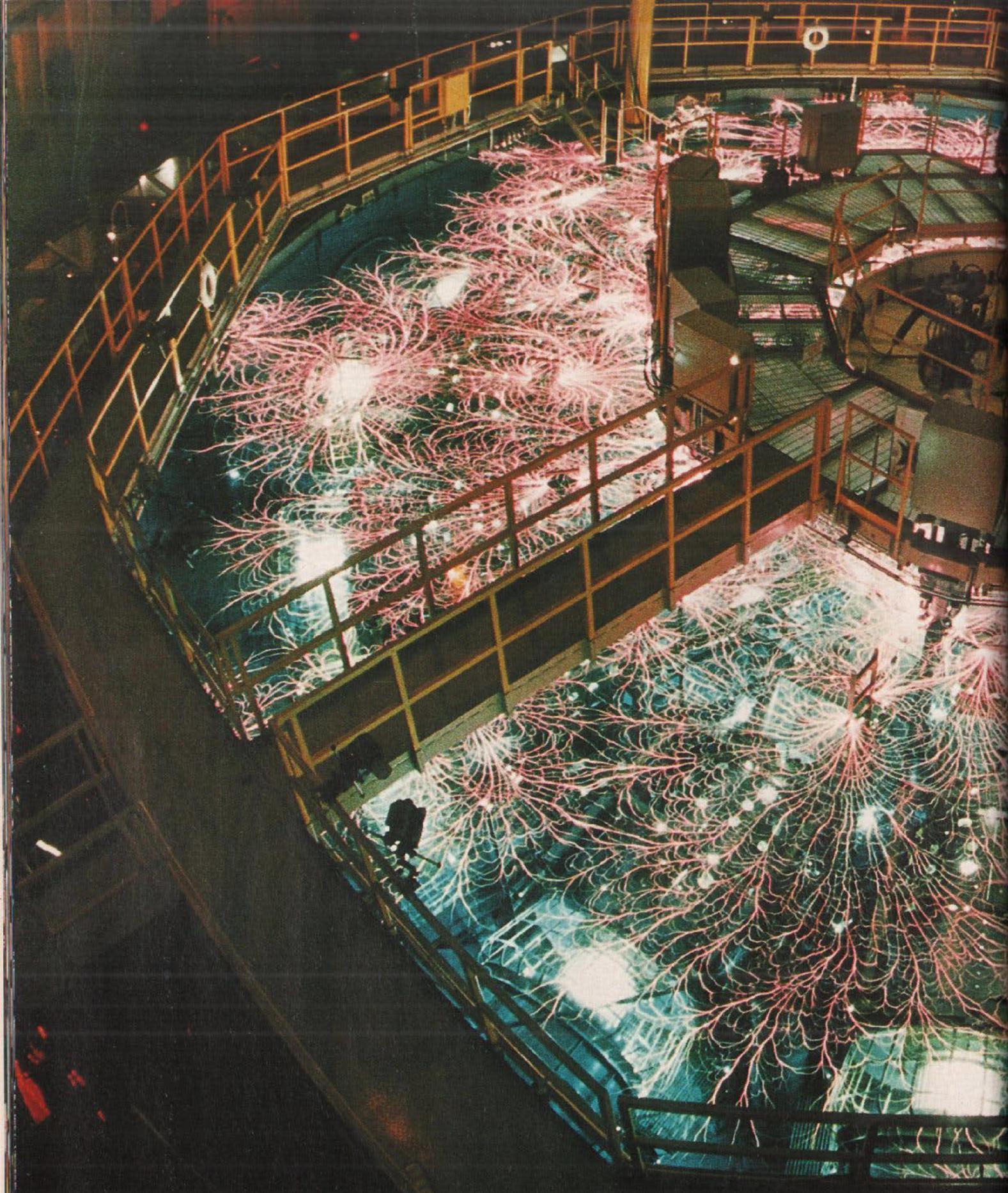




Fraktal verästelt sich's im Wald und im Computer

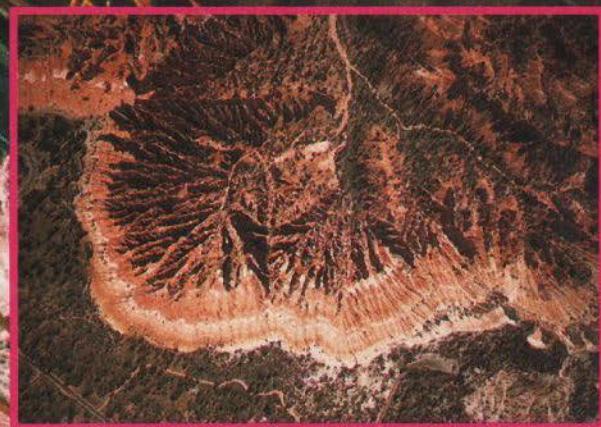


Das vertraute Muster aus Stämmen, Ästen und Zweigen wächst nicht nur im Park: Es resultiert auch aus den Rechenmodellen, mit denen US-Forscher die Evolution uralter Landpflanzen simulieren. Obwohl dem Computer nur zwei «genetische» Vorschriften für die Verzweigung eingegeben werden, «finden» die rechnerischen Gewächse - fast wie im richtigen Leben - Formen, die fossilen Pflanzen ähneln



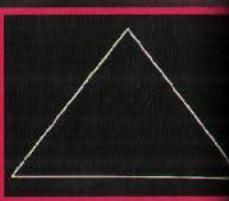


Blitze und Berge gehorchen gleichen Gesetzen



In wild zuckenden Blitzen entlädt sich gigantische elektrische Spannung während eines Experiments zur kontrollierten Nutzung der Kernfusion an den Sandia National Laboratories in New Mexico. Solche einander selbstähnliche -fraktale- Verzweigungen werden nach dem griechischen Wort für Baum »Dendriten« genannt: ein allgegenwärtiges Muster, das im Luftbild des Bryce Canyon in Utah ebenso erscheint wie bei der Computer-Simulation »diffusionsbegrenzten Wachstums«



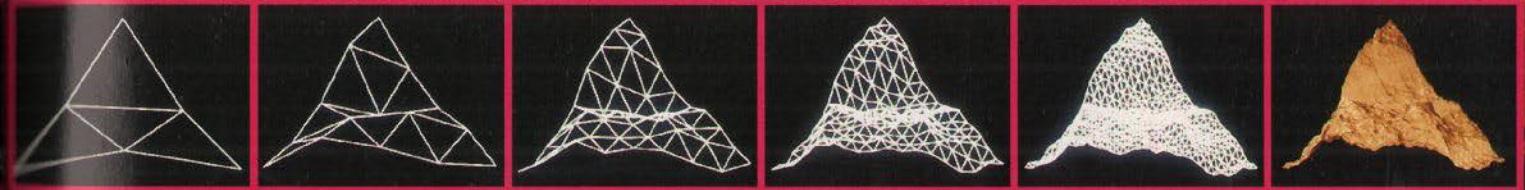




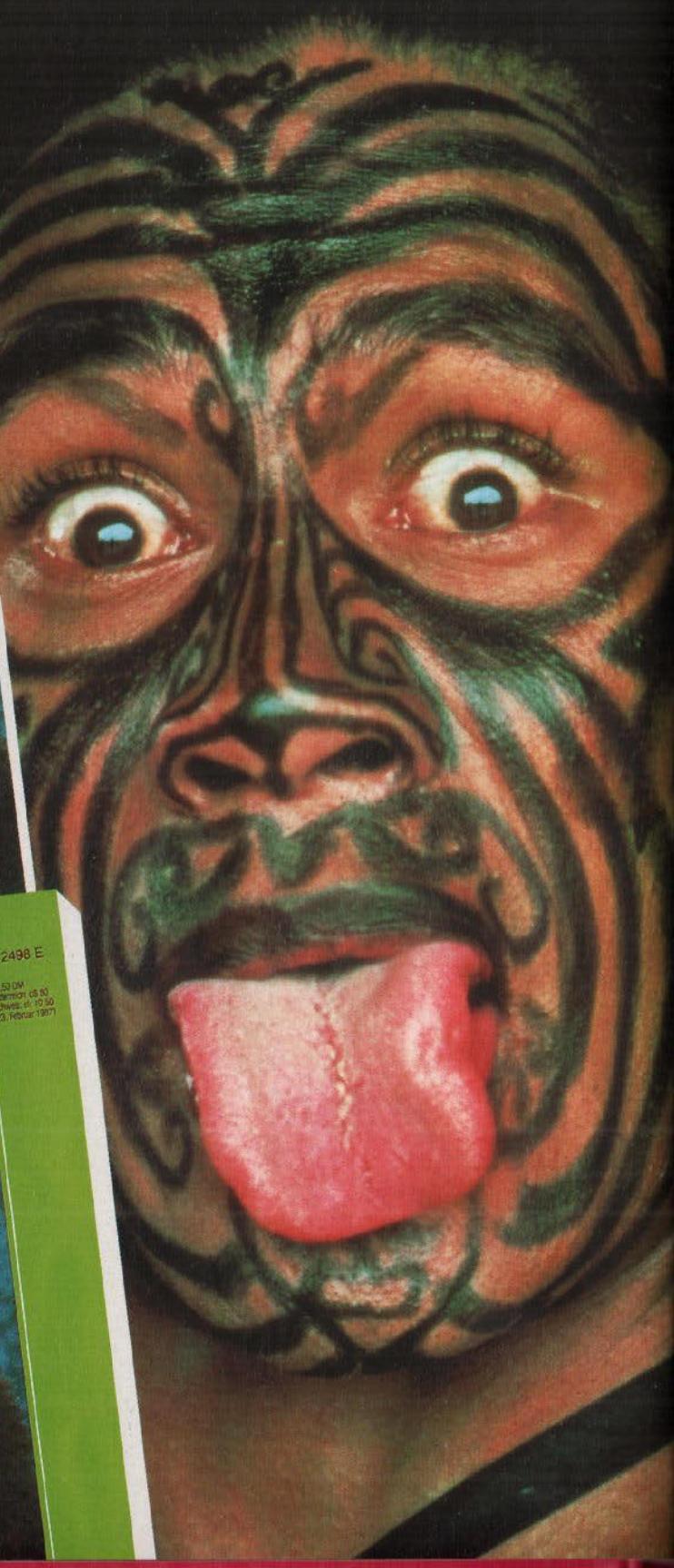
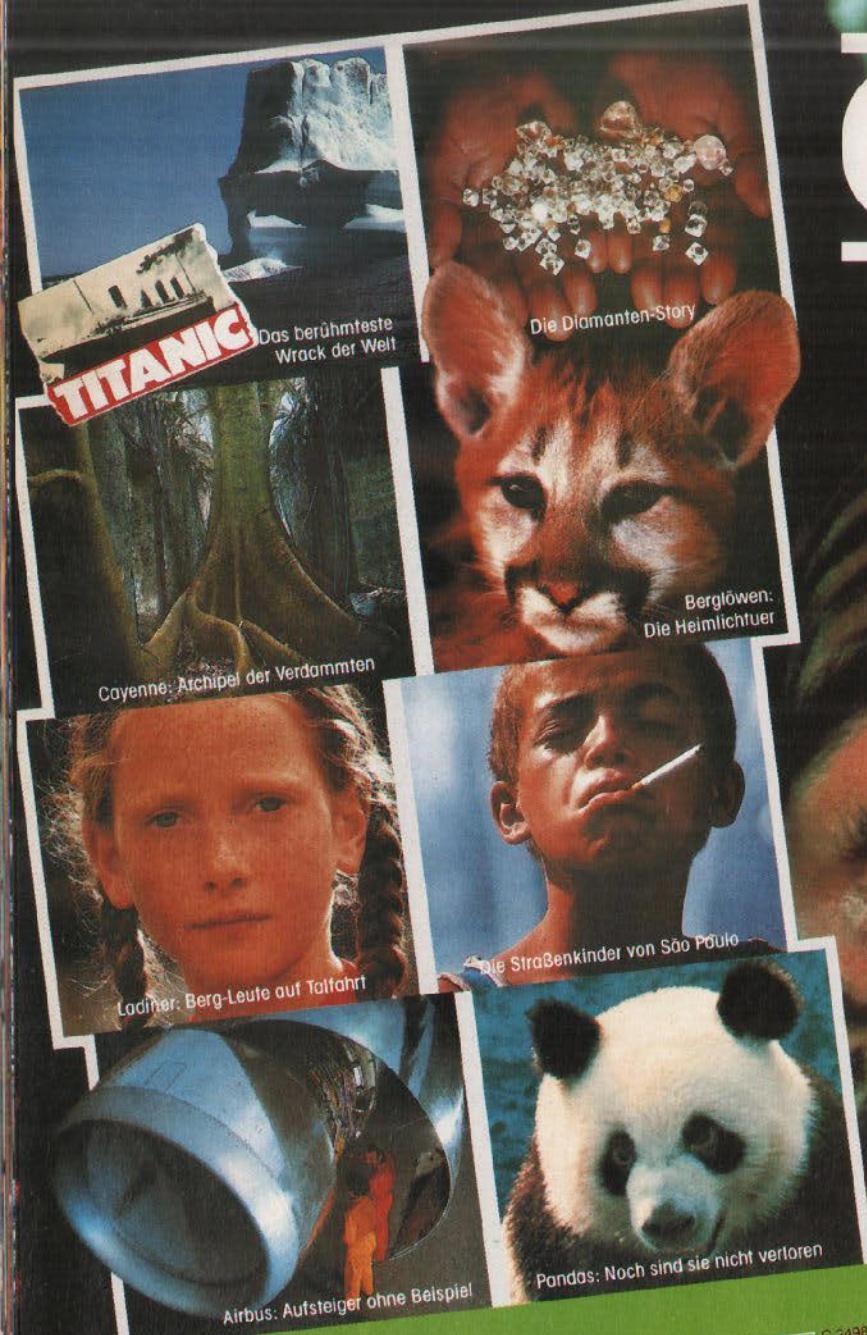
So läßt uns denn mit Apfelmännchen spielen

Der realen Welt auf geheimnisvolle Weise ähnlich sind die Computer-Kreationen von Richard Voss. Der Mitarbeiter des Fraktal-Pioniers Benoit Mandelbrot am Thomas Watson Research Center der Firma IBM spielt virtuos mit mehreren fraktalen Grundmustern, so daß nach unzähligen Rechenschritten schließlich »Gebirge«, »Wolken«

und »Monde« auf dem Monitor erscheinen. Die sternähnlichen Gebilde – graphische Umsetzungen der »Mandelbrot-Menge« – werden ihrer Form wegen auch »Apfelmännchen« genannt. Wie aus einem Dreieck mit Hilfe der fraktalen Technik ein mathematisches Matterhorn entsteht, demonstriert die Sequenz von Alvy Ray Smith



GROSSE



REPORTAGEN...



Haben Sie Interesse, mehr darüber zu erfahren? GEO lädt Sie ein, jetzt kostenlos eine aktuelle Ausgabe anzufordern. Lernen Sie GEO kennen. Das große Reportage-Magazin lässt Sie mit erleben, mit dabei sein, wo faszinierende Ereignisse das Bild der Erde prägen.

Die Bilder dieser Seite stehen für GEO-Reportagen. Jede 20, 30 Seiten lang, jeweils 7 Reportagen erarbeitet die Redaktion für eine GEO-Ausgabe. Fordern Sie jetzt ein aktuelles Heft zum Kennenlernen an (extra dazu: 4 GEO-Farldrucke als Geschenk!). Postkarte (Seite 143) bitte noch heute abschicken.

Aus GEO: Maori auf Neuseeland.
Nur noch für Touristen traditionelle
Muster aufs Gesicht gemalt.

»Chaos-Forschung« oder »Nichtlinearität«? So schnell kam die jüngste wissenschaftliche Revolution über die akademische Welt, daß sie noch keinen allgemein akzeptierten Namen besitzt. Welch ein Umbruch unseres Weltbildes sich hier anbahnt, schildert der Physiker Dr. Bernd-Olaf Küppers, 45, vom Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen



Wenn das

Als Monument objektiver und wahrer Erkenntnis ruhen, so scheint es, die Naturwissenschaften im geistigen Zentrum unserer Welt: ein imposantes Denkgebäude, fest gefügt aus soliden Einsichten in die Struktur der Materie und die Organisation des Lebendigen.

Doch der Eindruck des Ehernen täuscht. Das Monument wandelt sich, und das nicht einmal gleichförmig. Denn wissenschaftliche Erkenntnis verändert sich unvorhersehbar, also sprunghaft. Manchmal erschüttert sogar ein besonders heftiger Erkenntnisschub unser bequem gewordenes Weltbild bis in seine Grundfesten.

Wir befinden uns inmitten einer solchen Revolution, die weit über die klassischen Naturwissenschaften Physik, Chemie und Biologie hinausgreift. Sie zieht Mathematiker in ihren Bann und fasziniert Sozialwissenschaftler ebenso wie Ökologen und Ökonomen. So schnell hat sie die akademische Welt ergriffen, daß sie noch nicht einmal einen allgemein akzeptierten Namen besitzt: »Chaos-Forschung« klingt manchen zu salopp und »Nichtlinearität« zu abstrakt, »Strukturwissenschaft« und »Theorie komplexer Systeme« müssen sich erst noch auf dem Markt der Begriffe durchsetzen.

Die Wurzeln des sich formenden neuen Weltbildes liegen in der Physik. Sie hatte zu Beginn des 20. Jahrhunderts mit der Relativitätstheorie und der Quantentheorie das seit Newton gewachsene wissenschaftliche Weltbild entscheidend verändert und erweitert. Diese Umwälzungen machten deutlich, daß die herkömmlichen, dem Menschen

gleichsam angeborenen Anschauungen von Raum, Zeit und Kausalität nicht ausreichen, um alle Phänomene unserer natürlichen Welt angemessen zu beschreiben. Ist doch vieles in unserem Gehirn nur an jenen Teil der Welt angepaßt, der zu unserer direkten Lebenswelt gehört und zu dem unsere Sinnesorgane Zugang haben. Die Welt im großen und im kleinen, das Universum und die Atome, können wir dagegen nur indirekt mit Hilfe hochentwickelter Meßinstrumente erschließen. Infolgedessen müssen unsere Anschauungen versagen, sobald wir in die Welt der größten und kleinsten Dimensionen vorstoßen.

Es gibt aber noch einen weiteren Bereich der Realität, der uns zu einer Grenzüberschreitung nötigt: die Welt des Komplexen. Beim Vorstoß in diese neue Dimension ist ganz allgemein unsere Fähigkeit zur Abstraktion gefordert. Die Gabe, in der Vielfalt der Erscheinungen das Einfache und Regelmäßige zu erkennen, macht gesetzmäßige Zusammenhänge überhaupt erst sichtbar. Sie ermöglicht uns, in einer auf den ersten Blick unüberschaubaren Welt zu überleben. Sie macht die Welt für uns erst »berechenbar«.

Tatsächlich sind die Begriffe »Komplexität« und »Berechenbarkeit« gegenläufig miteinander verknüpft. Berechenbar wird für uns ein System, wenn wir über mathematisch exakt formulierbare Naturgesetze verfügen. Das Geschehen läßt sich dann vorausberechnen, sofern wir den momentanen Zustand des Systems – die »Anfangsbedingungen« – hinreichend genau angeben können. Die Berechnung der Planetenbewegung, die ge-

**Die Naturgesetze,
die das Entstehen von
Komplexität steuern, sind
überraschenderweise
ganz einfach**

Ganze mehr ist...

naue Voraussage von Sonnen- und Mondfinsternissen sind wohl immer noch die eindrucksvollsten Belege für eine von Naturgesetzen beherrschte Welt.

Naturgesetze steuern auch das Entstehen von Komplexität. Dabei sind die Gesetze selbst, wie sich inzwischen herausgestellt hat, überraschenderweise ganz einfach. So entstehen etwa der ästhetische Reiz und die unendliche Verflechtung der sogenannten Mandelbrot-Menge – der „Apfelmännchen-Bilder“ auf Seite 6 und 24 – nach einem geradezu simplen mathematischen Bildungsgesetz.

Das Geheimnis der Vielfalt liegt in einer als „Nichtlinearität“ bezeichneten Eigenschaft komplexer Systeme verborgen. Die Wechselwirkungen zwischen den Teilen eines solchen Systems sind nichtlinear, wenn sie sich nicht einfach addieren, sondern das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile.

Die Nichtlinearität macht sich vor allem bei der Entstehung komplexer Systeme bemerkbar. Ein „nichtlinearer Aufbaumechanismus“ hat nämlich die Eigenschaft, über alle Grenzen zu wachsen: Er führt – mathematisch gesehen – in endlicher Zeit zu unendlichen Zustandsgrößen. So können sich bereits kleinste Schwankungen in den Anfangsbedingungen gravierend auf den Endzustand des betreffenden Systems auswirken.

Hieraus ergeben sich einschneidende Konsequenzen für die Berechenbarkeit solcher Systeme. Obgleich die Gesetze, die ein nichtlineares System beherrschen, streng deterministische Gesetze sind, ist eine präzise Vorhersage seines Endzustandes nicht möglich, weil die kleinste anfängliche Unbestimmtheit sich lawinenartig verstärkt. Schon der Flügelschlag eines Schmetterlings kann – zumindest theore-

tisch – die entscheidende Weichenstellung hin zu einem Wirbelsturm zwei Wochen später sein. Solche im Sinne traditioneller Physik unberechenbaren Wirkungszusammenhänge werden heute als „chaotische Systeme“ bezeichnet. Chaos ist also hier im Grunde genommen nur ein anderes Wort für das Unberechenbare.

Die nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen den Teilen einer komplexen Ganzheit können sich in einem höchst interessanten, geradezu kreativen Phänomen zeigen: starke dynamische Rückkopplungen. Rückkopplungen führen dazu, daß der „Endzustand“ eines Systems nicht ein für allemal fixiert ist, sondern zum Ausgangspunkt einer neuen Entwicklung wird.

So verändern sich unter dem Einfluß der Rückkopplung die Anfangsbedingungen fortwährend selbst. Treten natürliche Auslese- und Optimierungsprozesse hinzu, kann eine „Selbstorganisation“ der Materie in Gang kommen. Sie mag vor Milliarden von Jahren in der Frühzeit der Erde zum Entstehen von Leben geführt haben. Dieselben Wechselwirkungen, die ein System nichtberechenbar machen, sind also letztlich auch die Quelle für dessen Komplexität.

In einem sich selbst organisierenden Ganzen verliert sich der „Anfang“ des Systems in seiner Entwicklungsgeschichte. Deshalb haben die „Anfangsbedingungen“ hier den Charakter von „Randbedingungen“ – ein Begriff, der durchaus nicht suggerieren soll, daß die Anfangsbedingungen in einem sich selbst organisierenden System nebенächlich geworden

**Schon der
Flügelschlag eines
Schmetterlings kann die
Weiche zum Wirbel-
sturm stellen**

...als die Summe sei

sind. Das Gegenteil trifft zu: Randbedingungen „kanalisieren“ geradezu die Entwicklung eines Wirkungszusammenhangs.

Randbedingungen sind, genaugenommen, Auswahlkriterien: Durch sie wird die Vielzahl naturgesetzlich möglicher Prozesse auf die faktisch ablaufenden eingegrenzt. Bei sich selbst organisierenden Systemen werden die Randbeziehungsweise Anfangsbedingungen durch die Entwicklung selbst immer wieder verändert. In ihrem Wandel spiegelt sich daher die gesamte Geschichte und Komplexität eines Systems wider.

Abstrakte Begriffe wie „Randbedingungen“ und „sich selbst organisierende Systeme“ machen es Laien nicht gerade leicht, das Ausmaß der jüngsten wissenschaftlichen Revolution zu erfassen. Doch die Mühe lohnt sich: Mit der Erforschung des Komplexen rückt auch die kreative, bunte, vielgestaltige Welt, wie wir sie sinnlich erleben, wieder ins Zentrum akademischer Neugier.

Tatsächlich scheint hier eine neue Disziplin zu entstehen, eine „Strukturwissenschaft“, die sich nicht in die herkömmlichen Kästchen der Natur- und Geisteswissenschaften einordnen lässt: Ihr Studienobjekt ist die ganze materielle Welt. Sie sucht nach abstrakten Strukturen, und zwar unabhängig davon, ob sich diese in physikalischen, biologischen oder sozialen Systemen wiederfinden. Das Urbild einer solchen Strukturwissenschaft ist die Mathematik. Andere Beispiele sind Spiel- und Informationstheorie, Kybernetik und Systemtheorie.

Der neue Typ von Strukturwissenschaft, die Nichtlineare Dynamik,

umfasst auch eine „Theorie komplexer Systeme“. Im Gegensatz zur klassischen Physik stehen die Randbedingungen im Zentrum des Interesses dieser Wissenschaft. Als die wohl allgemeinste Theorie zeitlicher Vorgänge hat sie das Zeug zu einer umfassenden Lehre der geschichtlichen Prozesse.

Trotz ihrer enormen Bedeutung haben die Strukturwissenschaften in der öffentlichen Diskussion über lange Zeit ein Schattendasein geführt. Viel zu spektakulär sind die Erfolge der Realwissenschaften wie Physik, Chemie und Biologie. Dabei sind es gerade die Strukturwissenschaften, in denen sich die fast schon verloren geglaubte Einheit aller Wissenschaften – Natur- und Geisteswissenschaften – offenbart.

Der Nutzen der neuen Strukturwissenschaft lässt sich an einem von Menschenhand geschaffenen komplexen System erläutern. Um beispielsweise eine raffiniert konstruierte Maschine zu charakterisieren, würden wir wohl zuerst Kriterien wie ihren Zweck und ihre Funktionsweise angeben. Den Zweck, dem die Maschine dienen soll, bestimmt der Mensch. Die Funktionsweise hingegen unterliegt dem naturgesetzlichen Verhalten der Materie. Wir können keine Maschine konstruieren, die nicht den herrschenden Naturgesetzen gehorcht. Wohl aber lässt sich ein und derselbe Zweck durch unterschiedliche Funktionsweisen realisieren.

Die Funktion einer Maschine wiederum wird durch ihren Bauplan bestimmt. Er legt deren Antriebskraft – also die Energiequelle – sowie deren räumliche Struktur eindeutig fest. Die Form der einzelnen Bauteile und die

**Die kreative,
bunte, vielgestaltige
Welt rückt nun wieder ins
Zentrum akademischer
Neugier**

ner Teile

Art und Weise, wie sie zusammengefügt sind, stellen Randbedingungen dar, unter denen die Naturgesetze in der Maschine wirksam werden. Eine Maschine erfüllt also ihren Zweck, weil ihre Konstrukteure die herrschenden Naturgesetze unter spezifischen Randbedingungen ausnutzen.

Auch ein lebender Organismus verhält sich in vieler Hinsicht wie eine komplexe Maschine. Auch er gehorcht einem bestimmten Konstruktionsprinzip, das die funktionale Ordnung aller seiner Teile festlegt. Auch sein Konstruktionsprinzip ist eine Randbedingung, unter der die Naturgesetze in spezifischer Weise wirksam werden.

Randbedingungen bestimmen also die Konstruktion sowohl biologischer als auch technischer Wirkungszusammenhänge. Im Fall der Maschine stecken sie offenkundig im Bauplan und in der Bedienungsanleitung. In Lebewesen dagegen enthalten Erbmoleküle die Bau- und Betriebsanleitung. Sie sind – anders als bei Maschinen – ein innerer Bestandteil des Systems. Gelangt ein solches Erbmolekül in ein geeignetes physikalisch-chemisches Milieu, etwa das einer Eizelle, dann kommt es zur schrittweisen materiellen Entfaltung des in diesem Molekül verschlüsselten Bauplans. Alle im erwachsenen Organismus herrschenden Randbedingungen sind also ihrer Struktur nach schon im Erbmolekül angelegt.

Auch wenn Biologen nicht von Randbedingungen sprechen, sondern von genetischer Information, handelt es sich hier um ein und dasselbe Prinzip. Und dieses Prinzip gilt nicht nur für die Organisation des Lebendigen: Jede Form von Organisation ist letzten Endes informationsgesteuert. Das trifft besonders auf soziale Systeme zu. So gesehen erweisen sich die Struktu-

ren in Natur und Gesellschaft als eine Hierarchie immer komplexerer Randbedingungen. Deren Veränderung und Entwicklung gewähren uns einen tiefen Einblick in die Entstehung und Entwicklung organisierter Systeme.

Schon jetzt hat uns die Wissenschaft vom Komplexen völlig neue Einsichten in die Möglichkeiten und Grenzen sicherer Vorhersagen und objektiver Erkenntnisse geliefert. Dies wird Rückwirkungen auf unser wissenschaftliches Weltbild haben und damit auch auf das Selbstverständnis der Menschheit, denn wissenschaftliche Erkenntnisse haben seit eh und je Weltanschauungen beeinflußt. Die Wissenschaft ist dadurch vielen Menschen zur Ersatzreligion geworden, der die einen blind vertrauen, während andere sie in einer Art Glaubenskrieg bekämpfen.

Wer der modernen Wissenschaft kritisch gegenübersteht, mag eine gewisse Genugtuung darüber verspüren, daß in unserer komplexen Welt nicht alles berechenbar ist. Aber in der vermeintlichen Schwäche liegt zugleich auch eine große Stärke der Naturwissenschaft. Sie verdankt ihren enormen Erkenntnisfortschritt nicht nur dem Umstand, daß ihre Theorien unentwegt experimentell überprüft werden. Sie ist vielmehr zugleich in der Lage, ihre eigenen Grenzen zu formulieren und diese Einsicht wiederum erkenntnisbringend zu nutzen: Sie macht auch das Unberechenbare wieder „berechenbar“, indem sie uns die Augen öffnet für Chaos und für Nichtlinearität als Quelle der bunten Vielfalt unserer Welt. □

**Völlig
neue Einsichten in
die Möglichkeiten und
Grenzen objektiver
Erkenntnisse**



Ein ordentliches Chaos

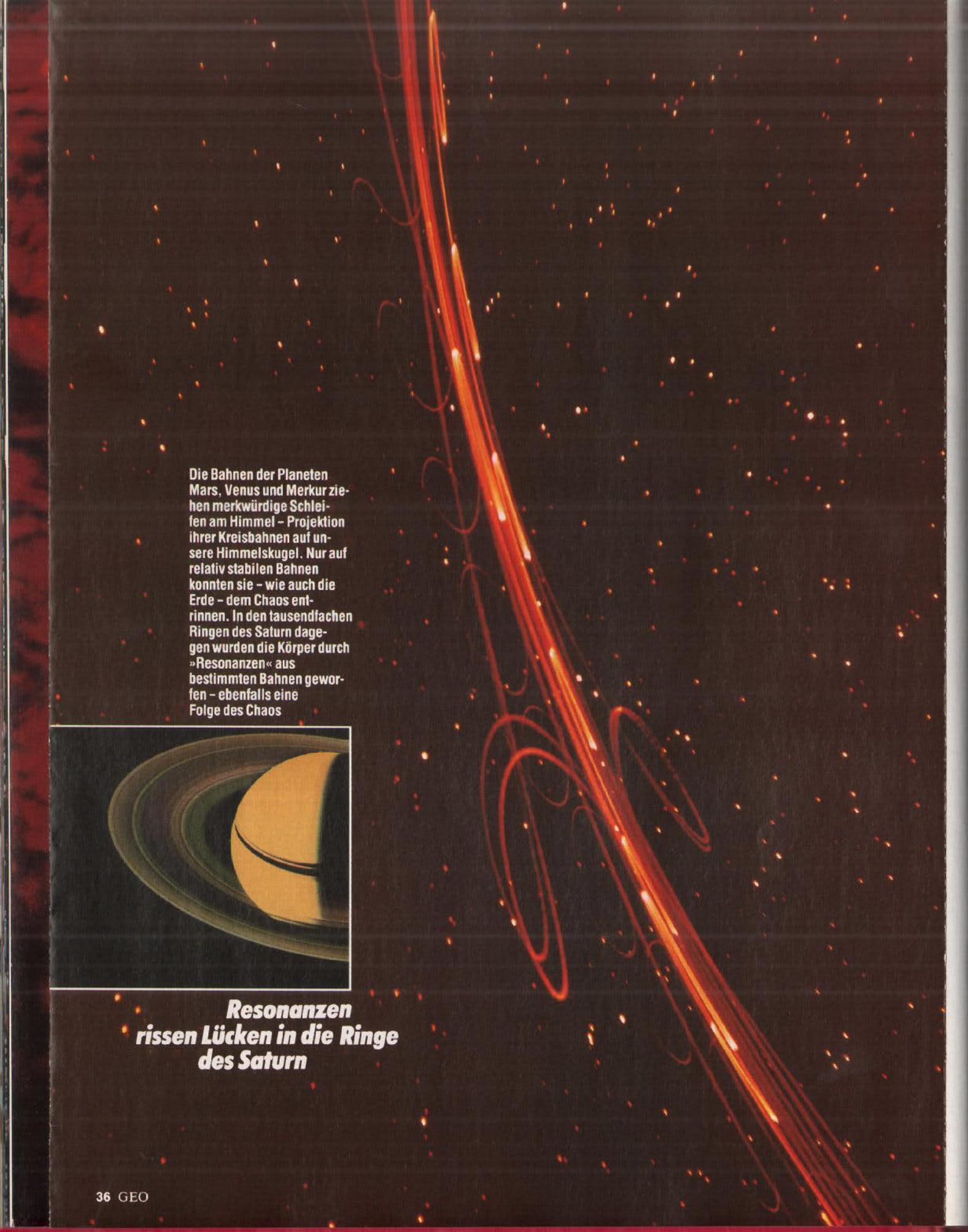
Scheinbar wahllos füllen die Sterne den Himmel. Doch tatsächlich ist alle Materie im Kosmos penibel in Hierarchien geordnet: Monde kreisen um Planeten, Planeten umrunden die Sterne, Sterne ballen sich zu Galaxien, und Galaxien bilden gigantische Haufen. Wie kam diese Ordnung in die Natur? Wie, andererseits, kommt dennoch immer wieder Neues in die Welt? Im Spiel der Kräfte wird aus Chaos Ordnung geboren



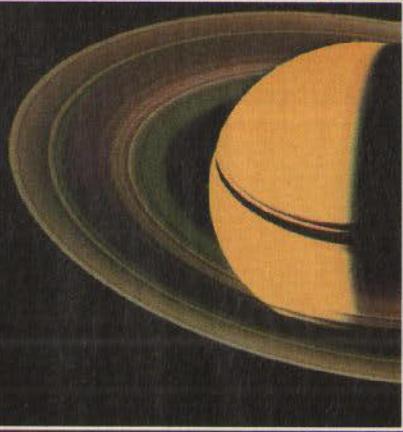


Unter Turbulenzen steigt die Energie der Sonne aus dem Kern zur Oberfläche. Von dort, aus der »Photosphäre«, kommt das Licht. Dort verdunkeln Magnetfelder die Sonnenscheibe mit Sonnenflecken. Das scheinbar regellose Brodeln kann chaotisch werden, bildet jedoch einen Ordnungszustand, bei dem sich die Sonne am effektivsten abkühlt - die »Konvektion«

***Gezähmt von
der Schwerkraft brodeln
die Gase***



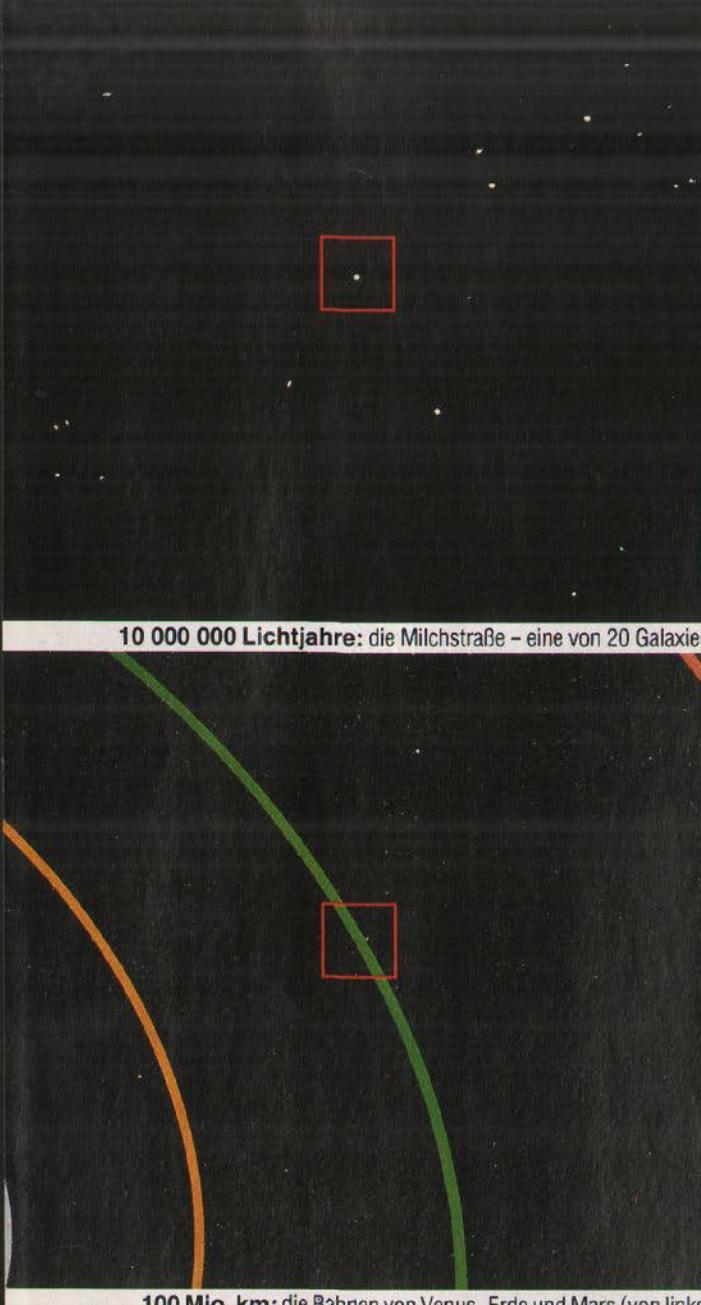
Die Bahnen der Planeten Mars, Venus und Merkur ziehen merkwürdige Schleifen am Himmel – Projektion ihrer Kreisbahnen auf unsere Himmelskugel. Nur auf relativ stabilen Bahnen konnten sie – wie auch die Erde – dem Chaos entrinnen. In den tausendfachen Ringen des Saturn dagegen wurden die Körper durch »Resonanzen« aus bestimmten Bahnen geworfen – ebenfalls eine Folge des Chaos



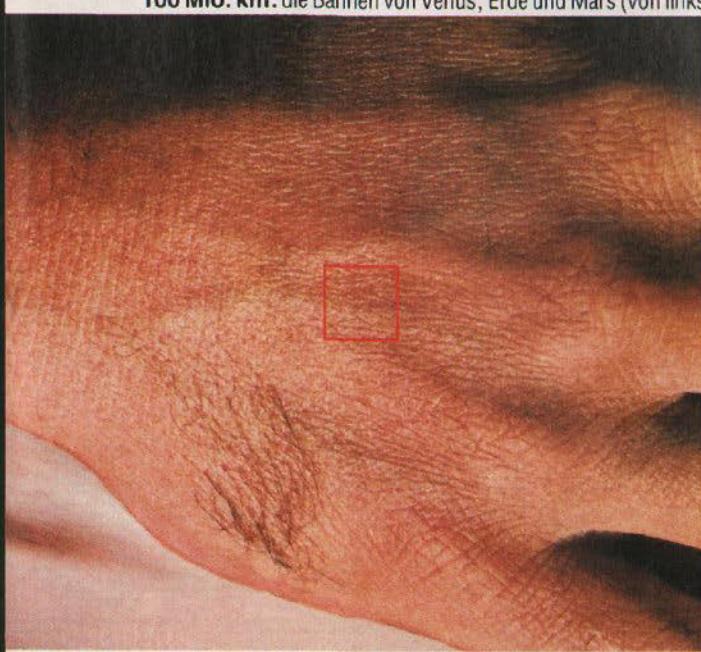
**Resonanzen
rissen Lücken in die Ringe
des Saturn**



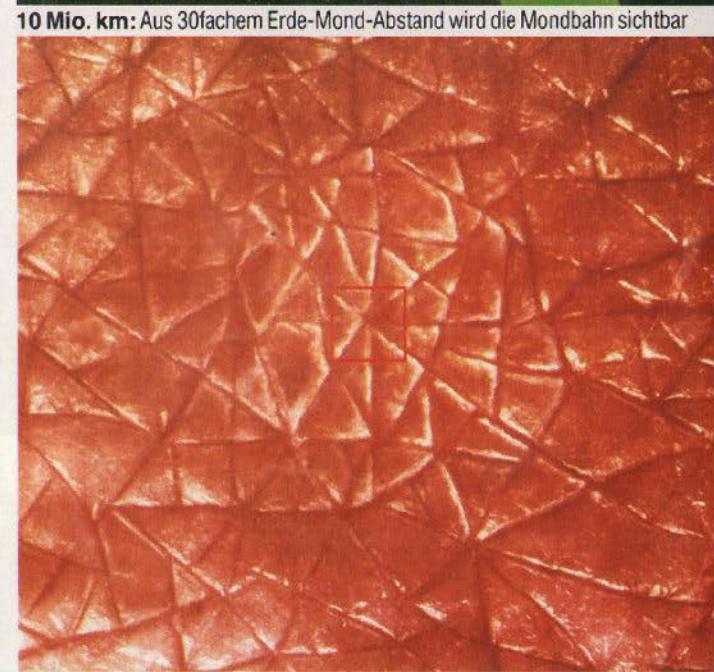
Bei jedem Raketenstart – hier die »Saturn-IB« des Fluges Apollo-7 am 11. Oktober 1968 – erhöhen turbulente Strömungen im Feuerstrahl der Triebwerke und in der vorbeirasenden Luft das Risiko. Besonders beim Absprengen einer Stufe kann die Lage des Vehikels instabil werden. Obwohl Turbulenzen nie exakt zu berechnen sind und die ihnen zugrundeliegenden Gesetze erst später von der Chaosforschung aufgedeckt wurden, brachten die Ingenieure Wernher von Brauns ihre Saturn-Raketen auf die gewünschten Bahnen

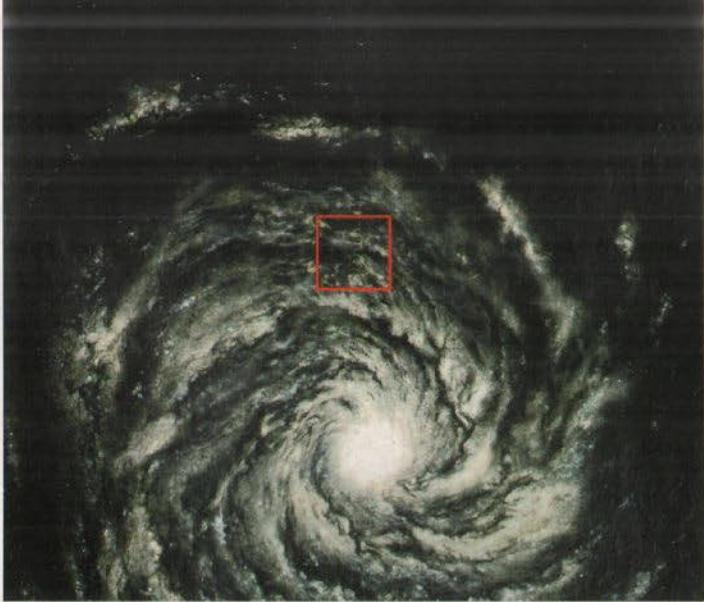


100 Mio. km: die Bahnen von Venus, Erde und Mars (von links)

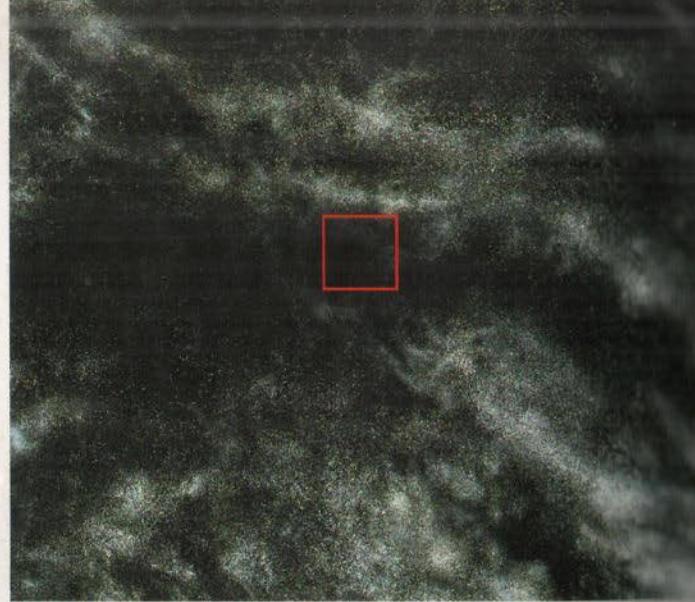


1 000 000 Lichtjahre: die Milchstraße mit den »Magellanschen Wolken«

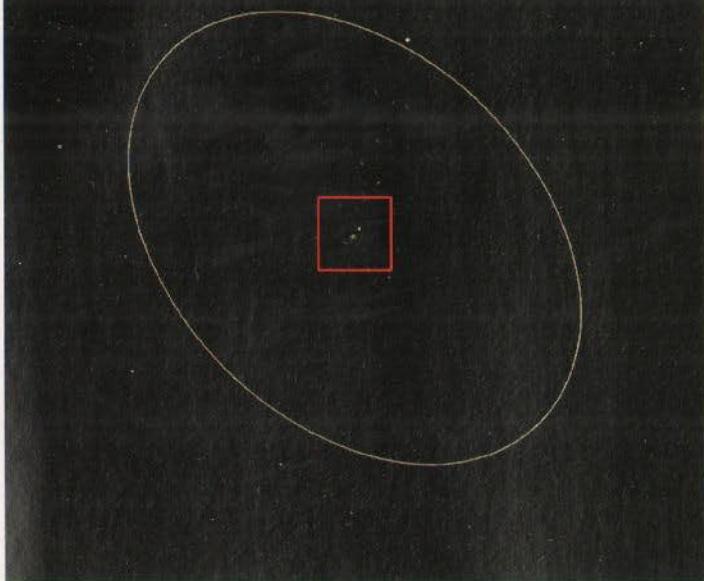




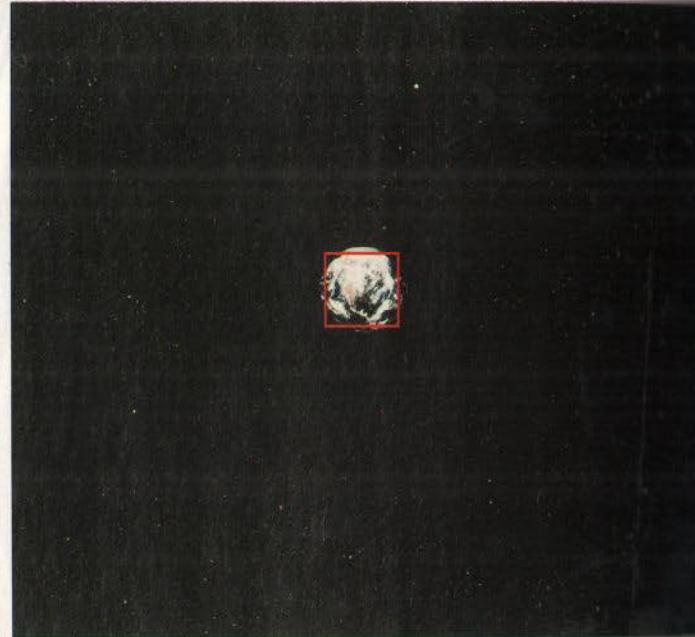
100 000 Lichtjahre: Rund 100 Milliarden Sterne hat die Milchstraße



10 000 Lichtjahre: Am Rand des Spiralarms »Orion« liegt die Sonne



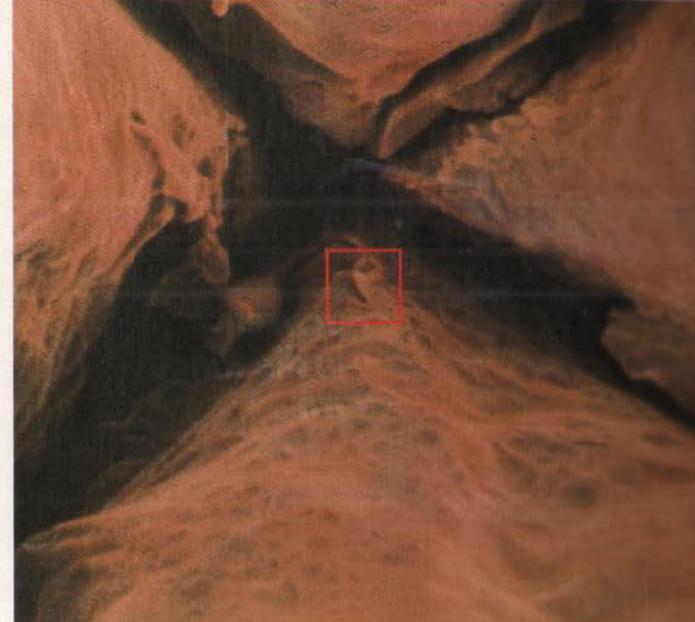
1 Mio. km: was Menschen bisher »erobert« haben – Erde und Mond



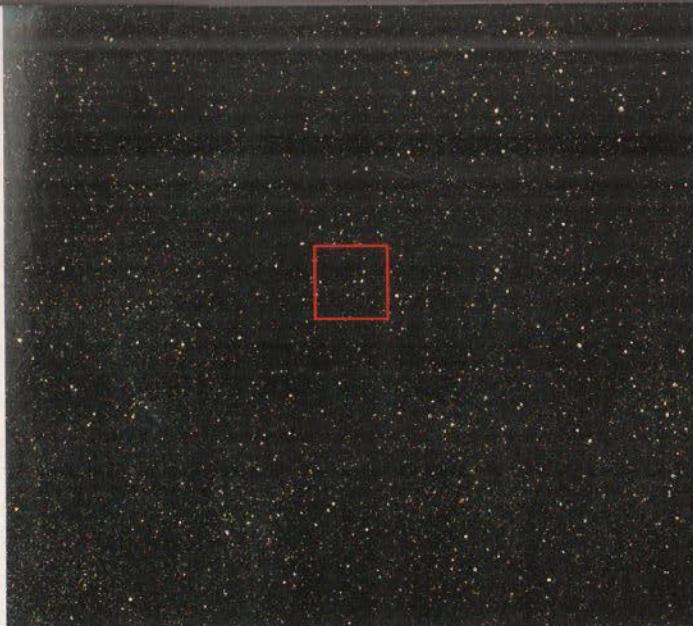
100 000 km: Der blaue Planet zeigt sein wolkenverwirbeltes Gesicht



1 mm: eine Hautfalte unter dem Mikroskop – das Tor zum Mikrokosmos



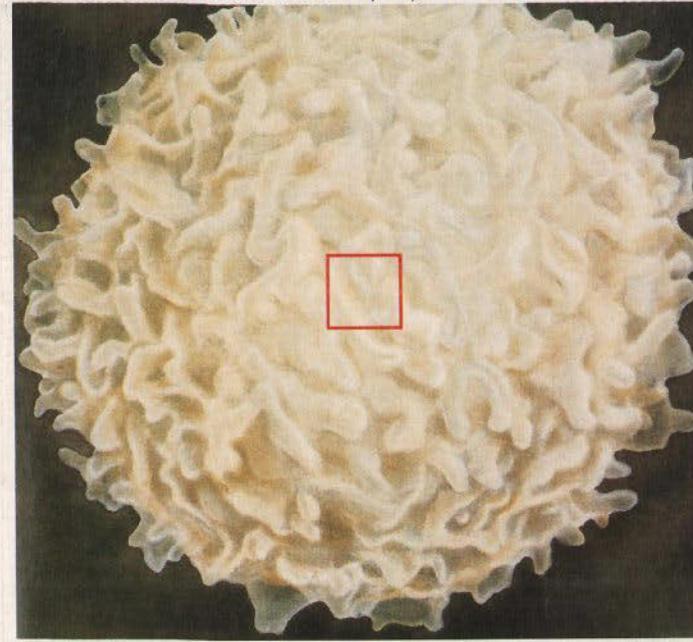
0,1 mm: unsere Körperhülle als transparentes, durchlässiges Geflecht



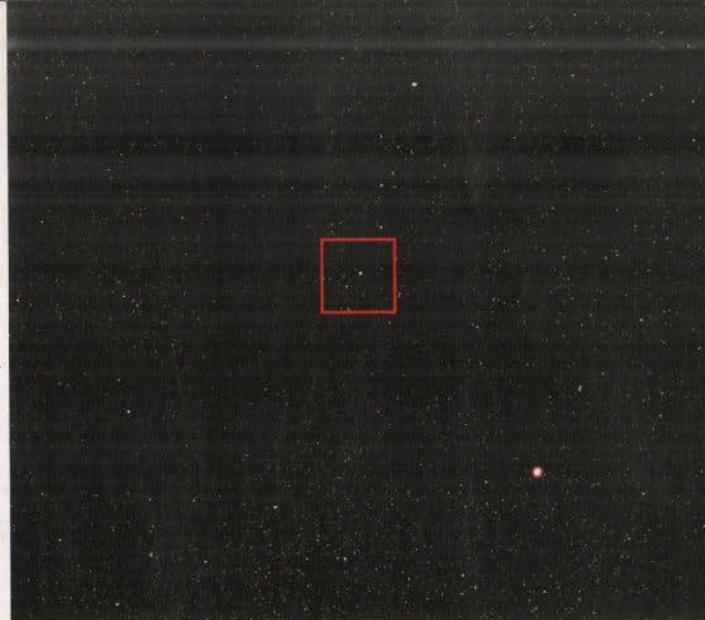
1000 Lichtjahre: ein Lichtermeer mit allen historischen Sternbildern



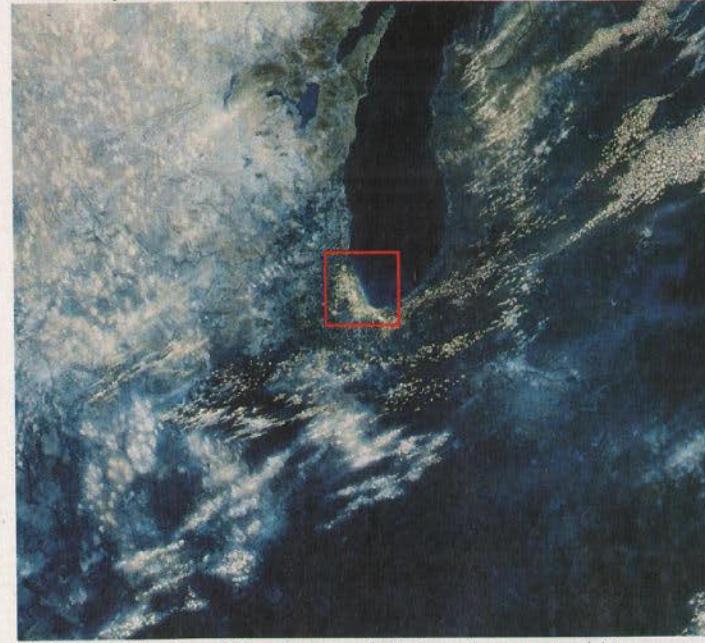
10 000 km: Die Satellitenperspektive enthüllt turbulentes Wetter



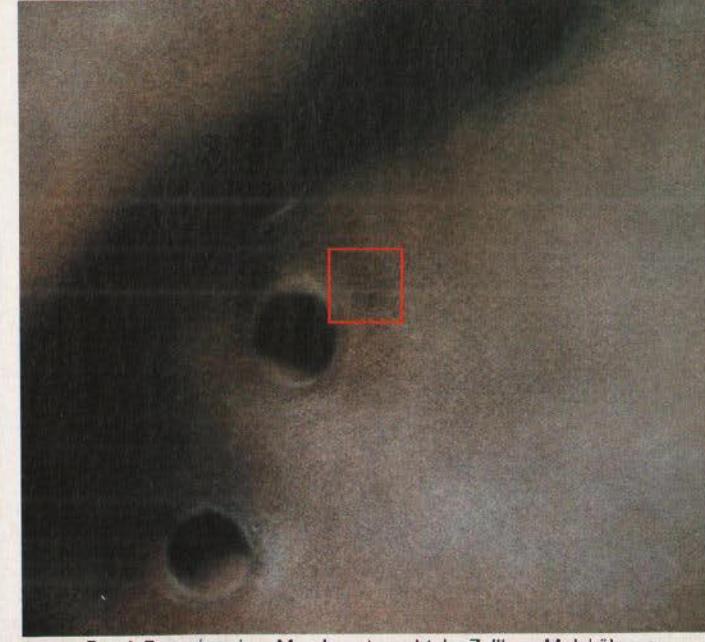
10 μm : im Reich der weißen Blutkörperchen (»Lymphozyten«)



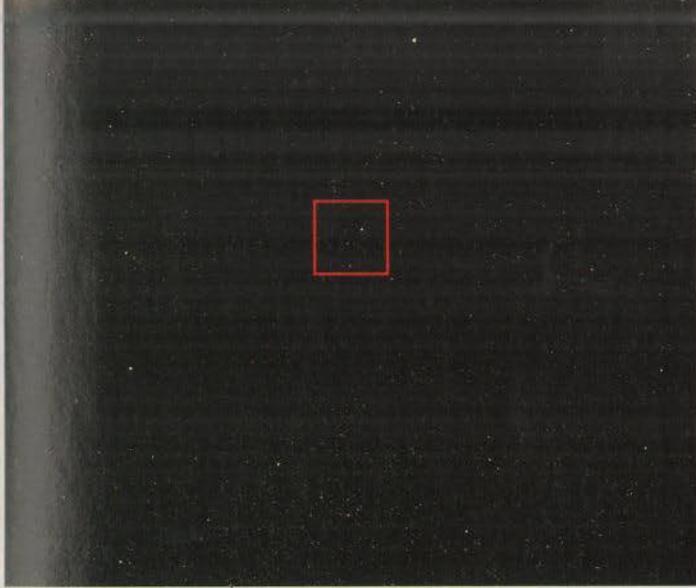
100 Lichtjahre: Arktur am Nordhimmel überstrahlt die anderen Sterne



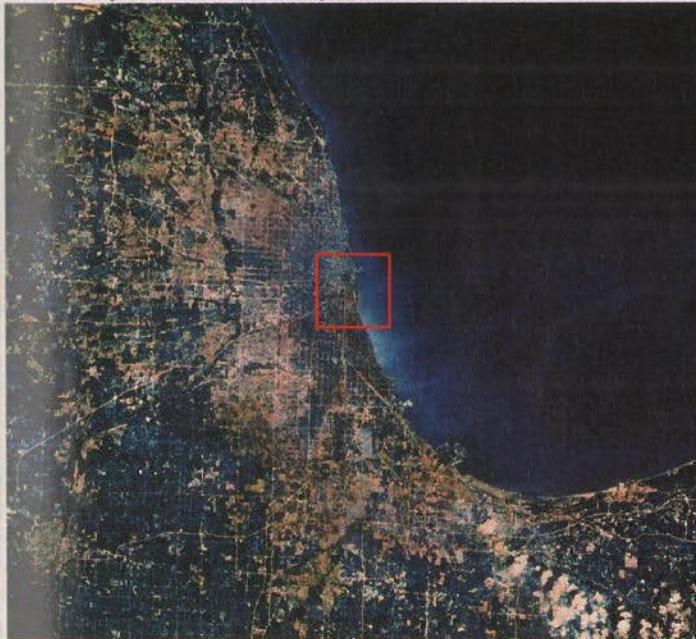
1000 km: Chicago und Umgebung, registriert aus Astronautensicht



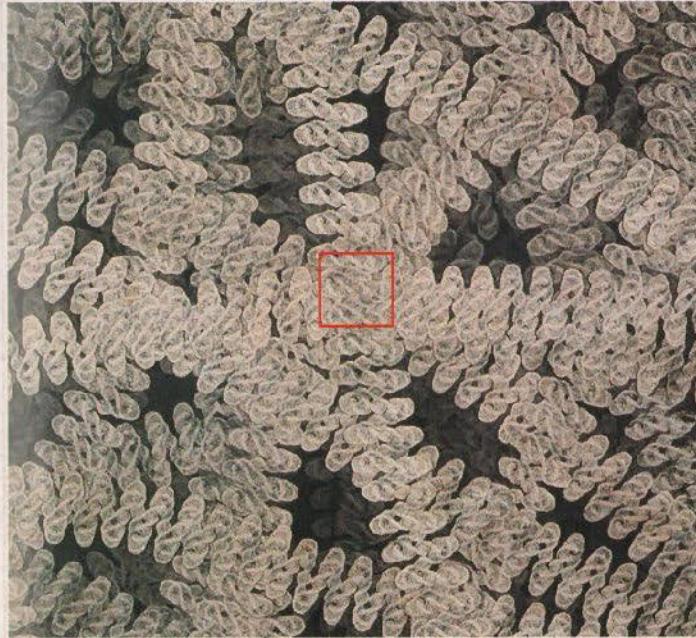
1 μm : Durch Poren in seiner Membran tauscht der Zellkern Moleküle aus



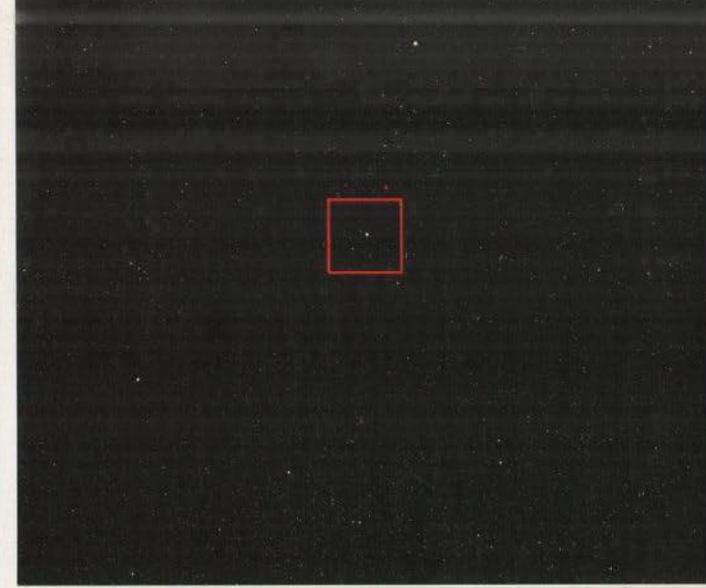
10 Lichtjahre: dasselbe homogene Muster wie auf den letzten drei Skalen



100 km: Details der Metropole am Michigan-See werden deutlich



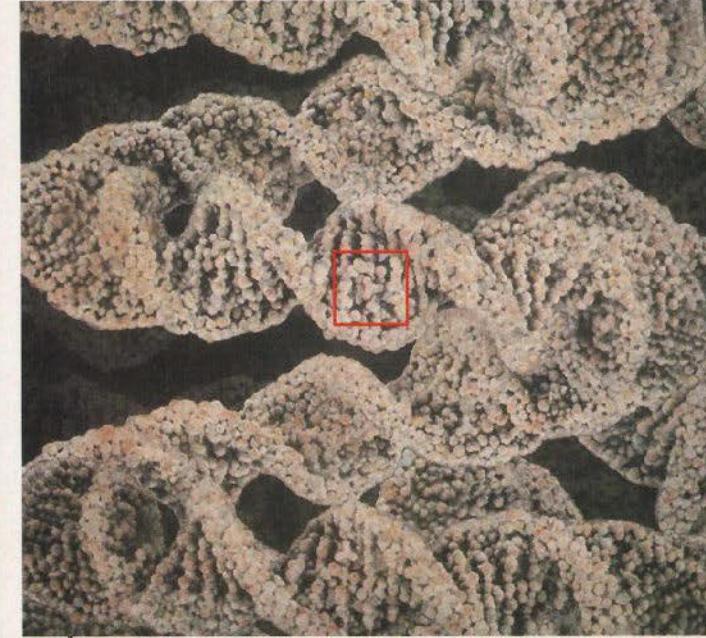
0,1 μ m (1000 \AA): die Doppel-Helix des Erbmolek\us DNA



1 Lichtjahr (etwa 10 Billionen km): Die Sonne erscheint als hellster Stern

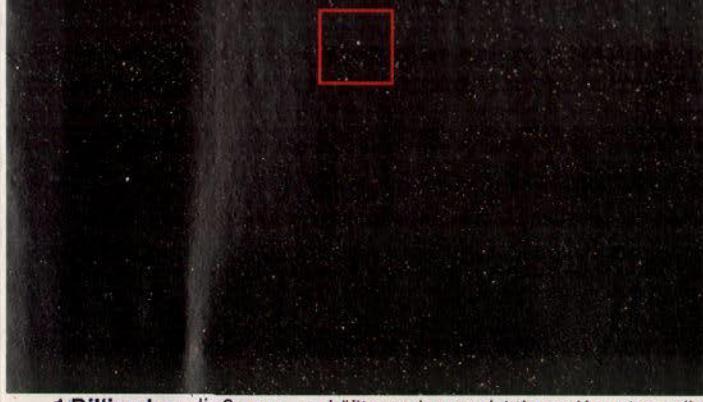


10 km: Das Zentrum der Stadt präsentiert sich Jet-Passagieren

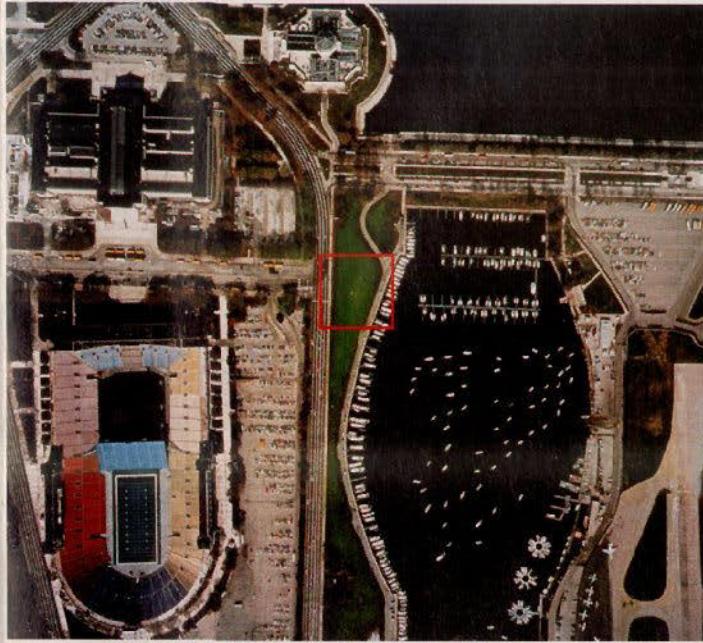


100 \AA : Jede »Sprosse« der DNA tr\agt ein »Buchstabenpaar« der Erbinformation

1



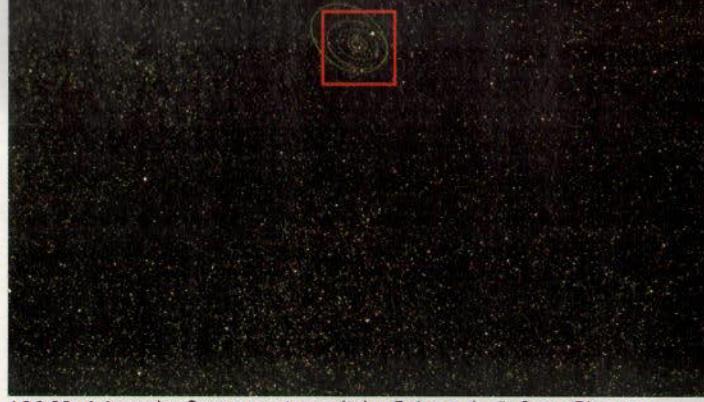
1 Billion km: die Sonne – umhüllt von einer unsichtbaren Kometenwolke



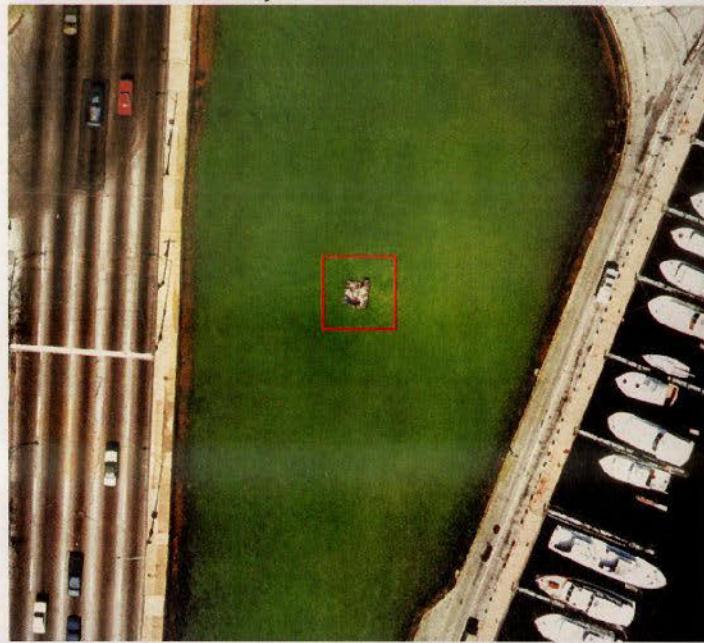
1 km: Weltausstellungs-Gelände, Football-Stadion und Bootshafen



10 Å: im Molekülverband der DNA – dem Territorium der Molekularbiologie



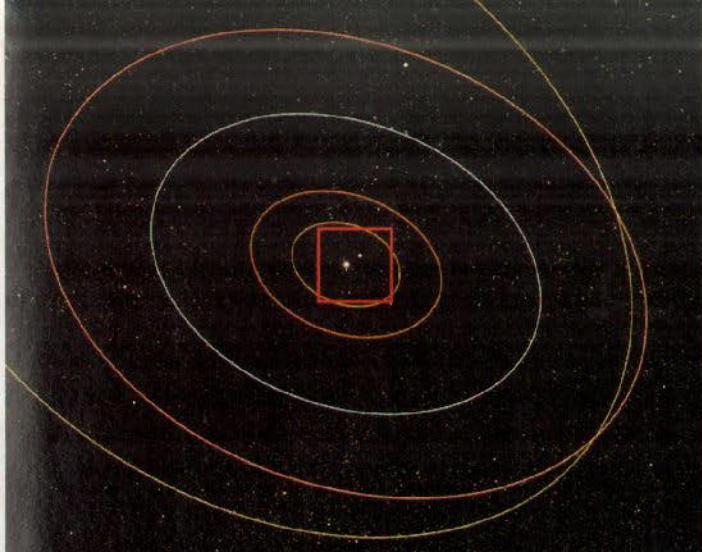
100 Mrd. km: das Sonnensystem mit den Bahnen der äußeren Planeten



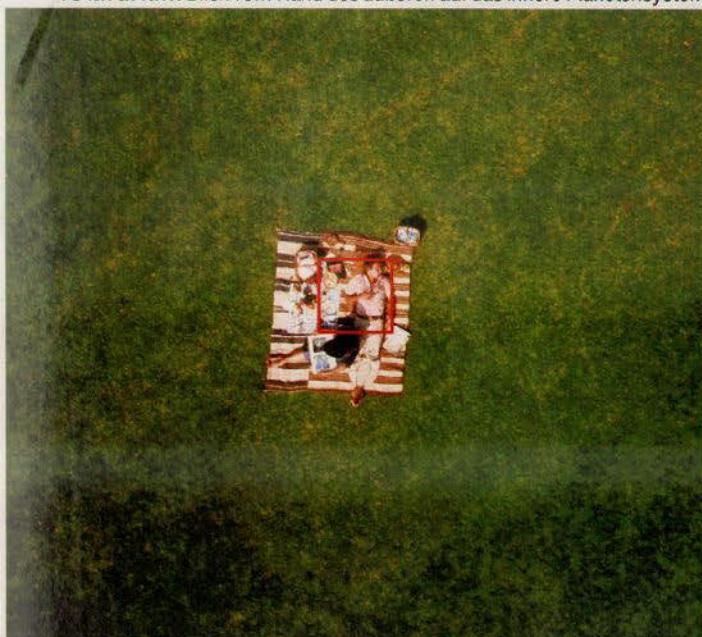
100 m: Picknick-Platz zwischen Bootsanleger und Schnellstraße



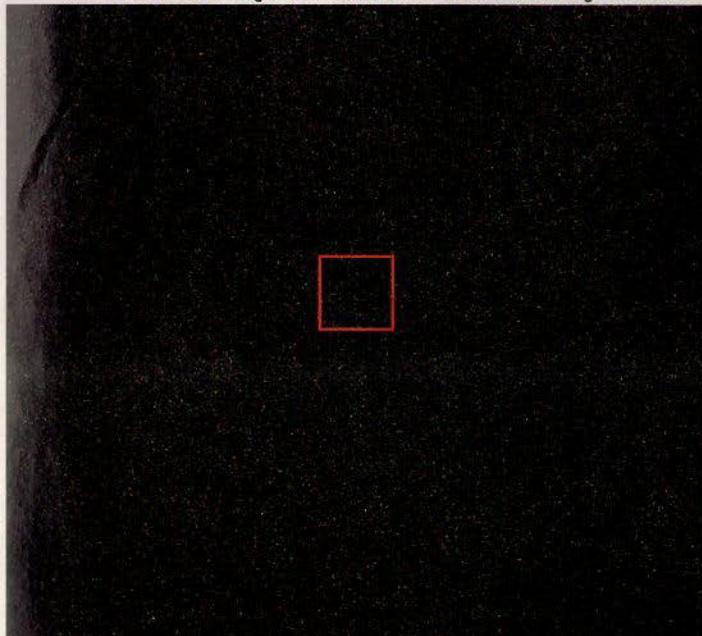
1 Å: ein Kohlenstoff-Atom, umhüllt von seiner Elektronenwolke



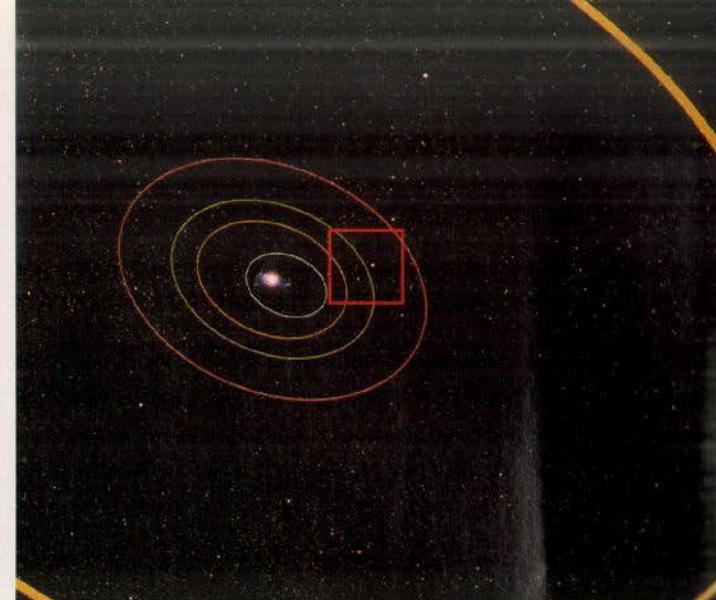
10 Mrd. km: Blick vom Rand des äußeren auf das innere Planetensystem



10 m: Auf halbem Weg der Reise durch die Dimensionen liegt der Mensch



0,1 Å (10 Pikometer): innerhalb der Elektronenwolke – fast nur Vakuum



1 Mrd. km: »terrestrische« Planeten und die Jupiter-Bahn (gelb)



1 m: Auf diesen alltäglichen Maßstab sind unsere Sinne geeicht



1 Pikometer: der Atomkern – drei Schritte vor den kleinsten Teilchen

**Eine Reise
durch alle Größen-
ordnungen des Alls enthüllt
ein selbstähnliches
Universum**

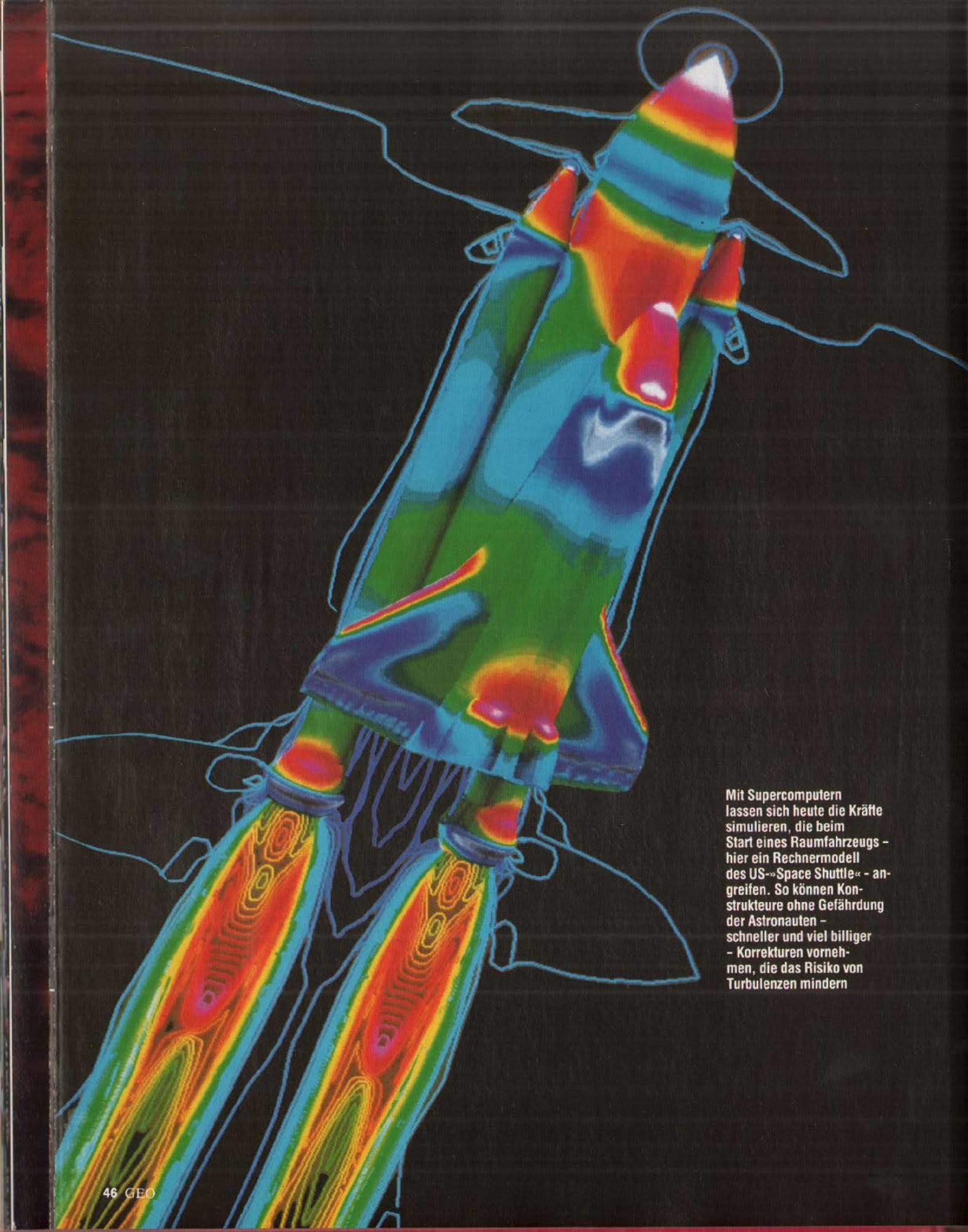


Selbstähnlich nennen Forscher Gebilde, die auch dann gleiche oder ähnliche Strukturen aufweisen, wenn sie in unterschiedlichen Größenordnungen - »Skalen« - betrachtet werden. Als »Fraktale« spielen sie in der Chaos-Theorie eine grundlegende Rolle. Ob auch die Natur mit ihren ausgeprägten Hierarchien in der Anordnung der Materie den Gesetzen der Selbstähnlichkeit genügt, wird derzeit heftig diskutiert. Zumindest auf Ebenen der kosmischen Skalen meinen Forcher ein fraktales Verhalten zu erkennen.

Aber sehen Sie selbst: Die folgende Bild-Serie führt Sie durch fast alle Dimensionen der bekannten Welt - vom intergalaktischen Makrokosmos (etwa einem Tausendstel des sichtbaren Alls) bis hin zum subatomaren Mikrokosmos (dem Tausendfachen eines Kernteilchens). In jedem Schritt (von links nach rechts) wird der jeweils eingezeichnete Ausschnitt um das Zehnfache vergrößert

Turbulenzen am Beispiel eines astrophysikalischen Phänomens simulierte der US-Forscher Michael Norman am Computerschirm: Solche „kosmischen Düsenstrahlen“ strömen in der wirklichen Welt aus galaktischen Zentren viele Millionen Lichtjahre weit ins All. Ihre Form entspringt denselben Gesetzen des „deterministischen Chaos“ wie die Turbulenz von Wasser- und Luftströmungen





Mit Supercomputern lassen sich heute die Kräfte simulieren, die beim Start eines Raumfahrzeugs - hier ein Rechnermodell des US-»Space Shuttle« - angreifen. So können Konstrukteure ohne Gefährdung der Astronauten - schneller und viel billiger - Korrekturen vornehmen, die das Risiko von Turbulenzen mindern

Es geschah einen winzigen Augenblick nach dem Anfang aller Dinge. Kaum hatte das unvorstellbar heiße und dichte All sich in einer gigantischen Explosion auszudehnen begonnen, da waren auch schon die wichtigsten Weichen in der Geschichte des Universums gestellt: Seitdem gibt es eine Zeit, die in die Zukunft gerichtet ist, und einen Raum, der die Gliederung der Dinge möglich macht.

Die Vorstellung einer Schöpfung aus dem Nichts hatten schon antike Philosophen. Geblieben sind die Rätsel: Welcher Art war der Stoff, dem das All entsprang? Wie kamen Struktur und Ordnung – griechisch: „Kosmos“ – in die Welt? Wie konnte die gestaltlose Urmasse – griechisch: „Chaos“ – so dauerhaft gezähmt werden? Und welche Rolle spielte dabei dieser kosmische Konflikt zwischen Chaos und Ordnung bei der Entstehung des Lebens?

Je mehr Details Naturwissenschaftler aus dem Mikro- und Makrokosmos zusammentrugen, je ausführlicher sie die Rahmenbedingungen für die Entstehung von Sternen und Planeten, Leben, Gehirnen und Gesellschaften beschrieben, um so faszinierender wurde das Bild einer unendlichen, andauernden Schöpfung.

Aus wenigen Zutaten – Raum, Zeit und Materie – entfaltete sich eine Welt zunehmender Komplexität. Alle Energie und alle Materie kam mit dem Urknall auf die Welt – allerdings zunächst amorph, ohne jede Struktur. Erst allmählich ordnete sich beides zu immer neuen, immer raffinierteren Systemen – obwohl die gleichen, einfachen Gesetze seit Anbeginn gelten: Spielregeln der Natur, die auf den ersten Blick dem Neuen und Komplexen keinen großen Spielraum einzuräumen scheinen. Im Gegenteil: Es ist erstaunlich, daß so höchst geordnete Systeme wie Galaxien oder Galápagos-Schildkröten überhaupt entstehen konnten. Denn eine Wachstumsgarantie hat im Universum – dem eheren „Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik“ zufolge – einzig die „Entropie“ genannte Unordnung. Es ist eine legitime Frage, was es all diesen Systemen ermöglicht, weiterzubestehen.

Eine entscheidende Antwort scheint im Phänomen „Zeit“ verborgen zu sein: Janusköpfig gehorchen mikrokosmische Prozesse zeitumkehrbaren Gesetzen, während makroskopische Vorgänge – also auch unser Leben – einzig dem in die Zukunft weisenden Zeitpfeil unterworfen sind (siehe Seite 62).

Eben dieser Zwang zur Geschichtlichkeit aber ist – wie Wissenschaftler erst in jüngster Zeit im Detail zu verstehen beginnen – untrennbar mit einer speziellen Form kreativer Unordnung verbunden, die von Mathematikern „Nichtlinearität“ genannt wird: Alle Systeme, die deren Gesetzen gehorchen, zeigen je nach den äußeren Bedingungen periodisches, quasi-periodisches oder chaotisches Verhalten.

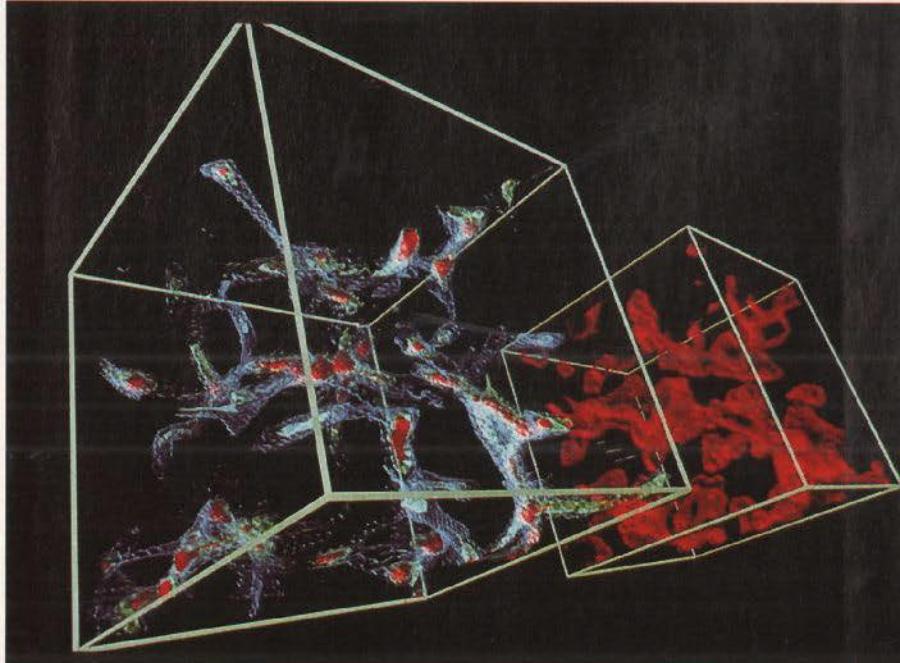
Nichtlineare Systeme – etwa ein durch die „logistische Gleichung“ beschriebener Wachstumsvorgang oder ein Pendel – können ein Chaos erzeugen, das einfachen Gesetzen gehorcht und dennoch nicht berechenbar ist. Und dieses „deterministische Chaos“ erweist sich zusehends als Quelle lokaler Muster, die zu globalen Strukturen führen können: Es scheint die entscheidende Quelle vieler mit „Selbstorganisation“ umschriebener Vorgänge zu sein – Vorgänge, die eine ausgeprägte Tendenz haben, spontan neue Ordnungen hervorzubringen, die Orkane und Organismen, Kristalle und vielleicht auch menschliche Kreativität möglich machen.

Lange haben sich die Naturwissenschaftler auf das Studieren „ungeschichtlicher“ Prozesse beschränkt, die sie unter Laborbedingungen reproduzieren konnten. Aber der Druck, die Einmaligkeit des Kosmos – ja jedes einzelnen Lebewesens – zu erklären, erzwang eine dynamische, historische Betrachtung: Die Forscher mußten verstehen lernen wie aus Gestaltlosigkeit und Chaos Komplexität und Ordnung hervorgeht. Einem plötzlich sichtbar werdenden Plan ähnlich verknüpfen die neuen Einsichten viele Erkenntnisse, die bislang ohne Zusammenhang schienen. Gleichzeitig fokussieren sie die Aufmerksamkeit aller Forscher auf die überragende Bedeutung der Anfangsbedingungen für jedes zur Selbstorganisation fähige System. Und damit fällt die Schlüsselrolle beim Versuch, den Werdegang der Welt wissenschaftlich zu erklären, abermals Physikern und Kosmologen zu.

Merkwürdig genug ist es ja, daß die Materie im Kosmos in extrem nichtzufälliger Weise – Sterne, Galaxien, Galaxienhaufen – angeordnet ist. Mit Planeten und Sonnen beginnt diese Hierarchie von „Klumpen“ und „Haufen“. Je tiefer die Astronomen allerdings mit ihren Teleskopen in den Raum blicken, desto weniger

Warum und wie sich Galaxien zu Haufen und Superhaufen formieren, illustriert eine Computer-Simulation der US-Forscher Joan Centrella und Adrian Melott: links die Dichte der Teilchen, rechts nur deren Position

Wie Ordnung in den Haufen der Galaxien kommt



auffällig wird diese Klumpung, desto „homogener“ erscheint das Reich der Himmelskörper.

Schon in den zwanziger Jahren hatte der amerikanische Himmelsforscher Edwin Hubble die erstaunliche Tatsache registriert, daß alle Galaxien scheinbar „fluchtartig“ in alle Himmelsrichtungen von uns fortstieben. Und im Jahr 1965 bestätigte eine Entdeckung der beiden US-Physiker und späteren Nobelpreisträger Arno Penzias und Robert Wilson eindrucksvoll diese verblüffende Ordnung im Kosmos: Eine Wärmestrahlung erfüllt das gesamte Universum in alle Richtungen gleichmäßig – „isotrop“ – mit einer Temperatur von knapp drei Grad über dem absoluten Nullpunkt. Zusammen mit der „Flucht“ der Galaxien ist diese „Hintergrundstrahlung“ das stärkste Indiz für das Standardmodell der Kosmologen, wonach das All anfangs heißer und dichter gewesen sein muß – daß es womöglich in einem „Urknall“ entstanden ist.

Per »Inflation« zu einem homogenen Universum?

Kosmologen faßten diesen Befund in ein „Weltpostulat“: Das All ist in jedem Punkt und in jeder Richtung gleichförmig; die Erde befindet sich in keinem besonderen Punkt und schon gar nicht im Mittelpunkt. Damit werden die Forscher zwar den astronomischen Beobachtungen gerecht. Auch ermöglicht das Postulat Modelle des Universums, die den Urknall als Anfang der Welt plausibel machen. Unbeantwortet aber blieb die fundamentale Frage: Warum begann das Universum so extrem homogen und isotrop?

Eine verblüffend aktuell wirkende Erklärung hat der griechische Naturphilosoph Heraklit schon vor zweieinhalb Jahrtausenden geliefert: Er vermutete eine verborgene Harmonie hinter den sichtbaren Veränderungen, ein dynamisches Gleichgewicht zwischen anziehenden und abstoßenden Kräften, die er „Liebe“ und „Haß“ nannte – eine Harmonie, die zerstört würde, käme es zur Vorherrschaft nur einer der beiden Kräfte.

In der Vorstellung heutiger Kosmologen ist es eine einzige Superkraft, die am Anfang der Welt „für Ordnung gesorgt hat“: Sie könnte, so hatte Alan Guth vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) im Jahr 1981 postuliert, im Bruchteil einer Milliardstelsekunde das eben entstandene, noch winzige Universum ruckartig aufgebläht haben. Bei dieser „Inflation“ sei – wie beim Aufblasen eines schlaffen Luftballons – jede vorhandene ungleichmäßige Verteilung des Urstoffs

ausgebügelt worden. Danach hätte die Energie des aufgeblähten Kosmos, der Spannung eines gestrafften Luftballons ähnlich, sich explosionsartig in Hitze umwandeln können – im Urknall, dem Beginn der bis heute anhaltenden Expansion des Universums.

Diese Theorie erklärt, wie das Universum auf einen Schlag in den Zustand des „thermodynamischen Gleichgewichts“ gelangte: Die „Inflation“ sorgte dafür, daß für einen Augenblick überall im Kosmos exakt die gleiche Temperatur herrschte. Deshalb konnte das All sich hernach an allen Orten so gleichmäßig – eben homogen und isotrop – abkühlen.

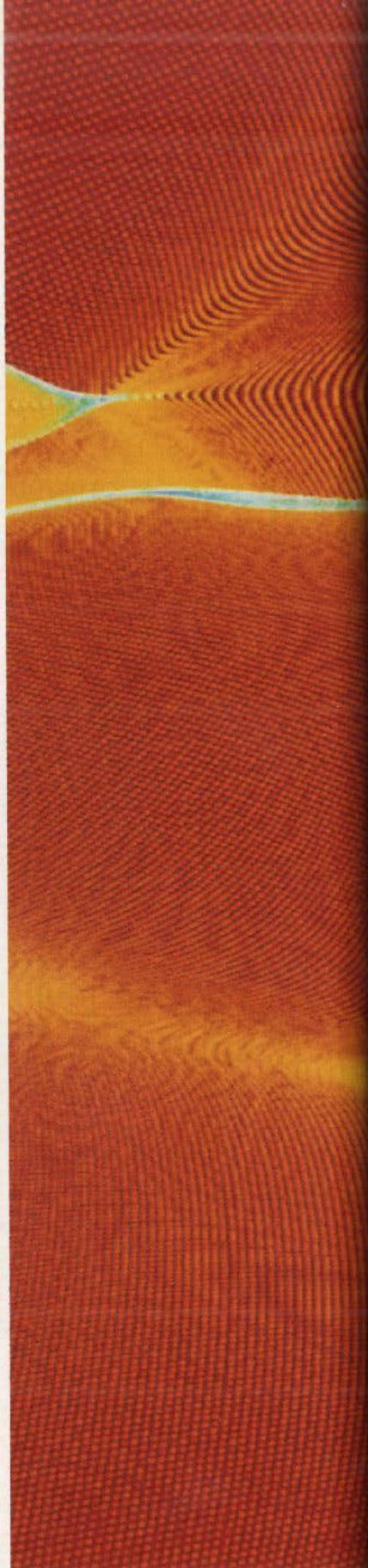
Alan Guths Weltsicht hat allerdings einen Haken: Auch sein Modell hängt von speziellen, bisher nicht belegten Annahmen über die zur „kosmischen Inflation“ führende Superkraft ab – eine wissenschaftlich nach wie vor unbefriedigende Situation.

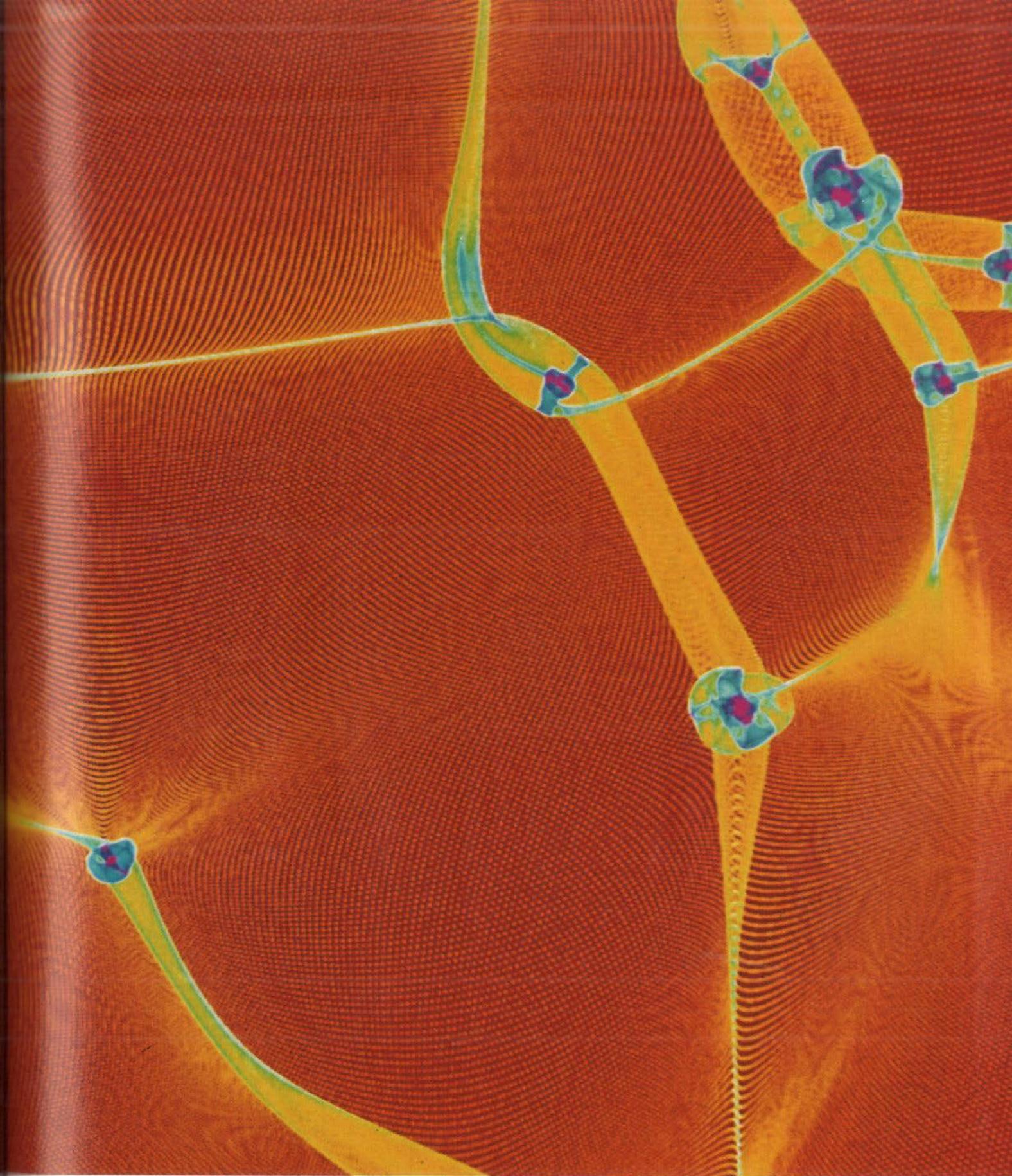
Hilfe erhoffen sich die Physiker von Experimenten, die erst mit den neuesten Teilchenbeschleunigern machbar werden – etwa dem 27-Kilometer-Ring „LEP“ des europäischen Forschungszentrums CERN bei Genf. In ihnen prallen elementare Partikel mit solcher Gewalt aufeinander, daß womöglich Effekte beobachtbar

Als der Kosmos noch Streifen und Knoten hatte



In der Wirklichkeit würde das Stück Weltall, das der Computer den Astrophysikern Adrian Melott und Sergej Schandarin errechnet hat, einige hundert Millionen Lichtjahre breit wie hoch sein (rechts). Die Simulation zeigt, wie sich Urmaterie in der Frühzeit des Universums geordnet haben könnte – zu »Knoten« – aus denen vielleicht Galaxien wie »M81« wurden





werden, die Hinweise auf Eigenschaften der gesuchten Superkraft geben und folgendes Szenario für das „Entstehung der Ordnung“ im Anfang des Alls er härten könnten:

- Zu Beginn der Urknall-Phase – bei höchster Energie – agierten die noch in der Superkraft vereinigten Fundamentalkräfte völlig undifferenziert.
- Auch die Materie – letztlich eine Art kondensierter Energie – existierte noch in Gestalt ihrer primitivsten Bestandteile: als ein Gemisch von Quarks, den späteren Bausteinen der Atomkern-Teilchen, und Leptonen, zu denen die Elektronen zählen. Sie verwandelten sich unablässig in Strahlung, und die Strahlung erzeugte ge naussooft Quarks und Leptonen.
- Überall geschah im Mittel das gleiche: Das Universum war im thermodynamischen Gleichgewicht. In einem Meer der Unterschiedslosigkeit herrschte für kurze Zeit größtmögliche Symmetrie – ein Zustand der „idealen Unordnung“, dem „Ur-Chaos“ der Bibel ähnlich.
- Die Unterschiede kamen mit der rapi den Ausdehnung und daraus folgenden Abkühlung des Kosmos. Nun lief das Wechselspiel zwischen Energie und Mate rie nicht mehr gleich häufig vorwärts und rückwärts. Reaktionen wurden „irreversibel“. Dinge entstanden – und blieben.
- In einer Reihe von „Symmetrie-Brü chen“ zerfiel die Superkraft in ihre bis heute wirksamen Teilkräfte – in Gravita tion, Elektromagnetismus sowie schwache und starke Kernkraft: Der kalte Kos mos war geboren.

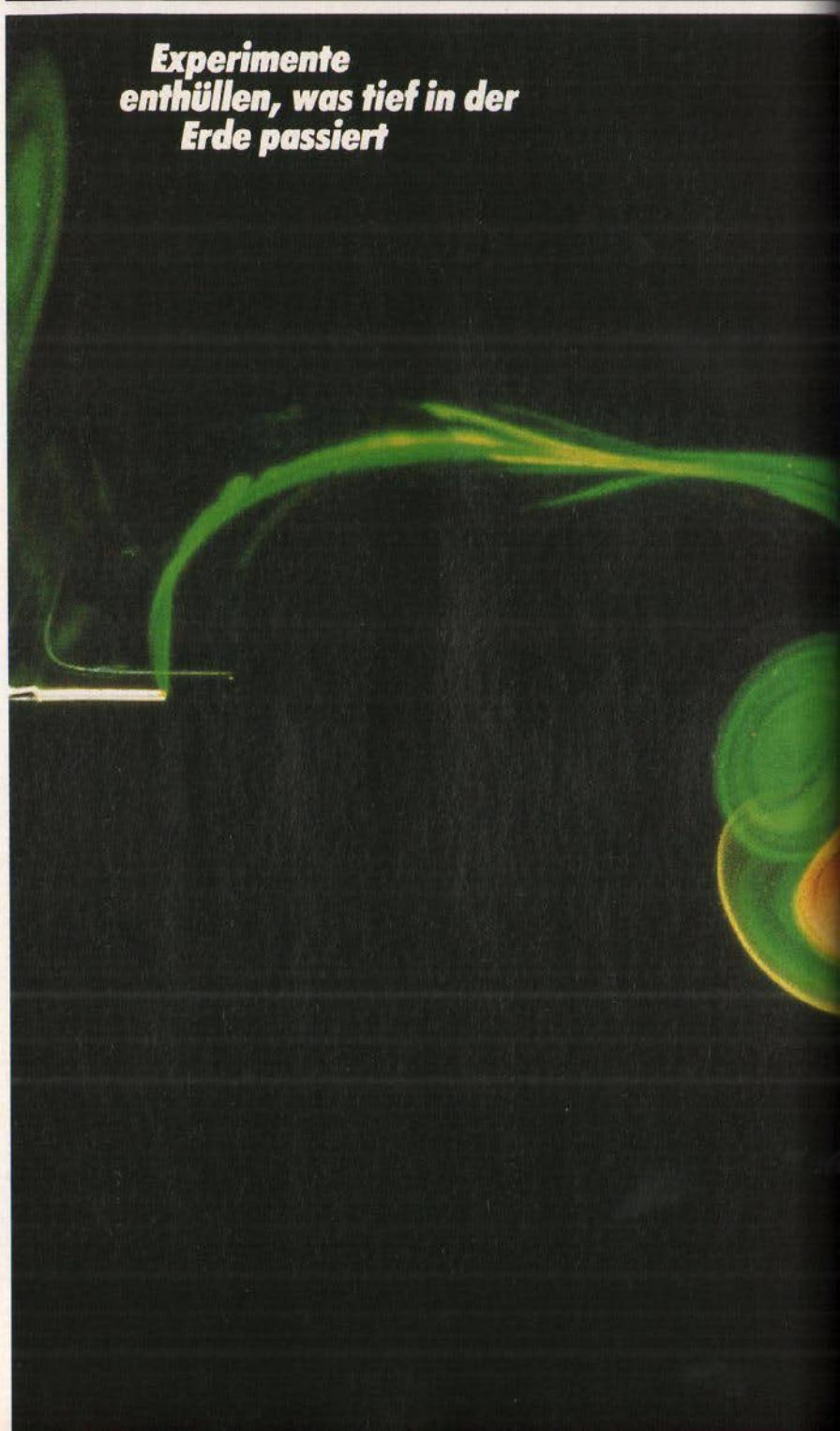
Der universale Abkühlungsprozeß äh nelite im Prinzip dem Einfrieren von Was ser: Im flüssigen Zustand können sich die Wassermoleküle in alle Richtungen frei bewegen – der Raum ist symmetrisch. Im Eiskristall hingegen sind mit den Kristall achsen nur einige wenige Raumrichtun gen ausgezeichnet – die Symmetrie ist ge brochen.

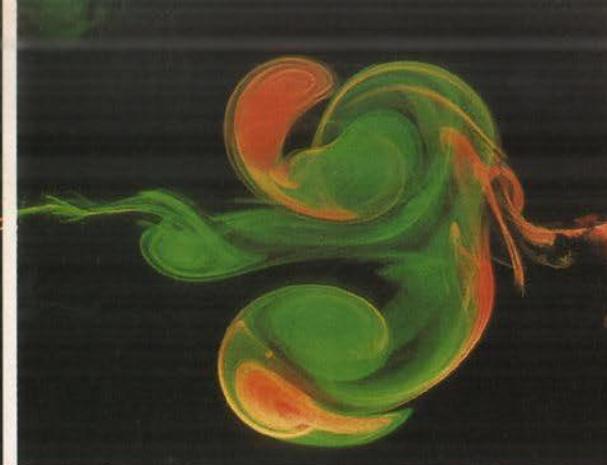
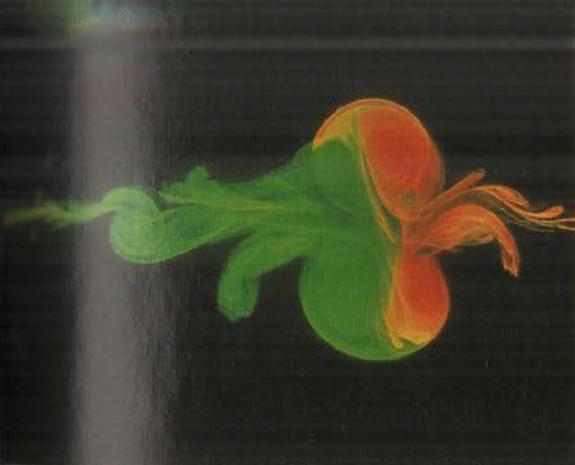
Aus dem noch kaum strukturierten Ge menge von Strahlung und elementaren Partikeln kondensierte ein Teil der kosmi schen Energie. So entstand die unterste Ebene einer materiellen Ordnung, die bis heute Bestand hat: Protonen, die Atom kerne des Wasserstoffs, und Neutronen. Sie alle, auch jene in unserem Körper, sind schon vor 15 bis 20 Milliarden Jahren kurz nach dem Urknall synthetisiert worden.

Schon nach den ersten drei Minuten war die – zumindest für Kosmologen – aufre gendste Zeit des Universums zu Ende. Im öden, sich weiter abkühlenden Weltall trieben Atomkerne des Wasserstoffs und des daraus fusionierten Heliums sowie Spuren von Lithium durch den Raum. Erst eine Milliarde Jahre später begann

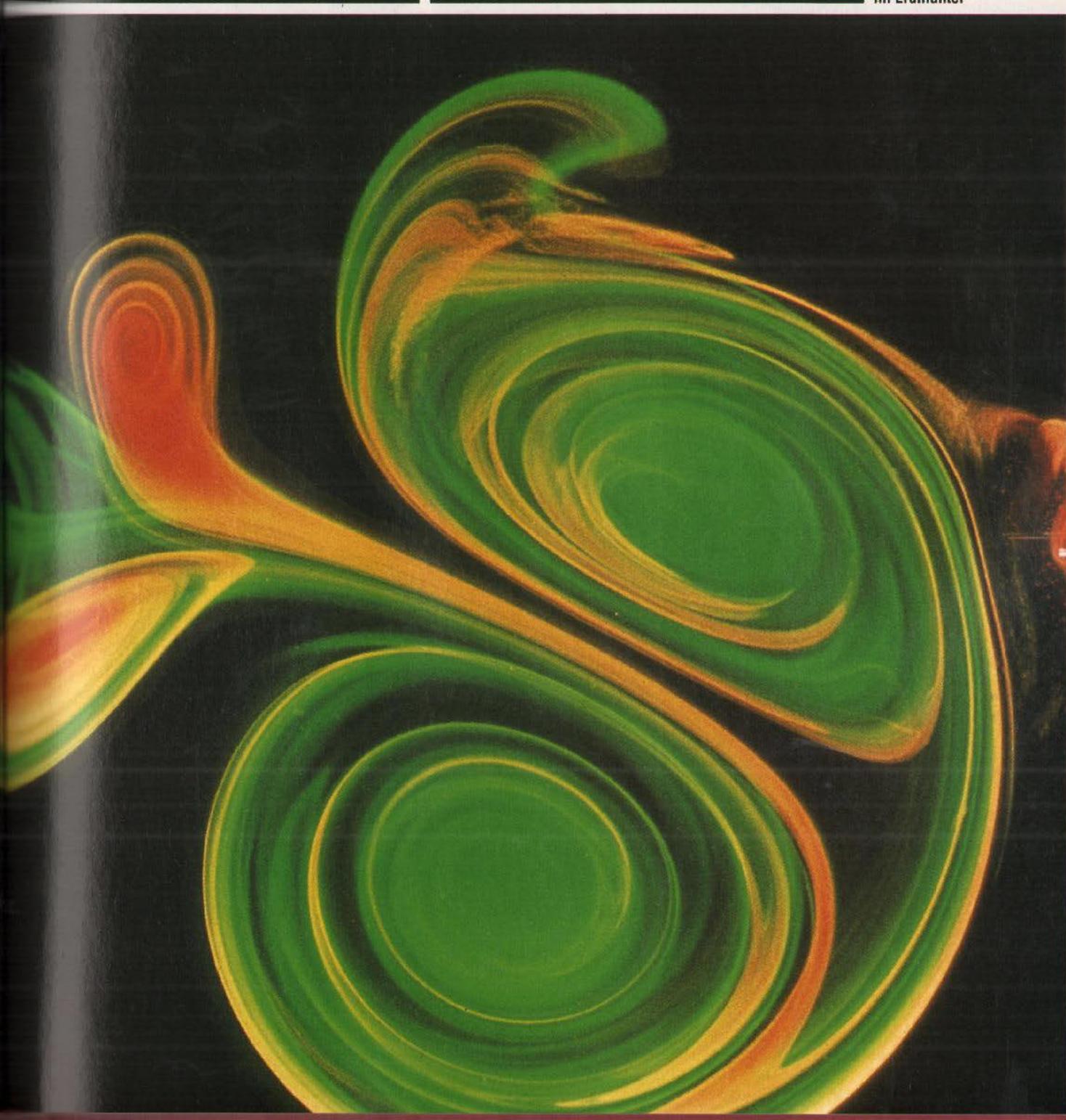


Experimente enthüllen, was tief in der Erde passiert





Forscher der Universität Utrecht ließen in Salzwasser gefärbte Strömungen aufeinanderprallen. Aus anfangs turbulenten Gebilden entwickelten sich wohlgeordnete Wirbelpaare. Die Versuche erlaubten Rückschlüsse auf das Verhalten zähflüssiger Gesteinsströme im Erdmantel



die Ära der Galaxien. Zuvor lose verteilte Materie verdichtete sich zu Gaswolken, innerhalb derer sich noch dichtere Klumpen formten: Die ersten Sterne leuchteten auf.

In ihrem Kern wurden – und werden bis heute – aus den leichten Atomkernen des Wasserstoffs schwerere Elemente wie Kohlenstoff und Sauerstoff durch Kernverschmelzung „erbrütet“. Haben massereiche Sonnen ihren Wasserstoff-Vorrat verbrannt, erleben sie ihr Ende in gewaltigen Explosionsn, wodurch noch energiemächtigere Fusionsprozesse in Gang kommen: Stirbt ein Stern in einer solchen Supernova, schleudert er einerseits die bis dahin erbrütete „Asche“ des Fusionsfeuers – leichtere Atomkerne von Helium bis Eisen – ins All; schwerere Elemente als Eisen fusionieren erst im Höllenfeuer der Supernova. So reichert sich in ungezählten Sternen-Zyklen Gas und Staubwolken mit knapp 100 chemischen Elementen an, darunter schließlich auch jene Wolke, aus der – vor rund 4,6 Milliarden Jahren – unser Sonnensystem entstand.

An den Grundzügen dieser naturwissenschaftlichen Schöpfungsgeschichte hängen nur wenige Forscher Zweifel. Und doch trüben rätselhafte Merkwürdigkeiten das schöne Bild. So fehlt bis heute eine überzeugende Erklärung für das wichtigste Ordnungselement des Kosmos, wie wir ihn kennen: Wie sind die Galaxien entstanden? Und warum haben sie sich zu Galaxienhaufen, ja zu galaktischen Superhaufen formiert?

Im Licht der Chaos-Forschung scheint der Mechanismus zwar prinzipiell klar zu sein: Kleine Schwankungen in der Materieverteilung verstärken sich im Lauf der Zeit immer mehr, so daß anfänglich uniforme kosmische Gaswolken aufbrechen, sich galaktische „Inseln“ bilden und schließlich – wie in unserem Milchstraßensystem – Milliarden von Einzelsternen entstehen.

Wo verbergen sich die „Urkeime“, aus denen die Galaxien entstanden?

„Wir wissen allerdings noch nicht einmal“, klagt Gerhard Börner vom Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik in München, „ob die Größe einzelner Galaxien durch kosmologische Effekte oder die lokale Physik“ bestimmt wird. Die Schwierigkeit ist im kosmischen Urbebi selbst begründet: Noch 300 000 Jahre nach dem Urknall war das Gas im All so hochgradig homogen verteilt, daß allenfalls winzigste Irregularitäten so etwas wie „Keime“ für spätere Galaxien gebildet haben könnten.

Auch Modellrechnungen haben hier bislang nicht weitergeholfen: Alle Computer-Simulationen zeigen, daß die „Keime“ viel zu langsam anwachsen, um zu der heute beobachteten Verteilung der Galaxien im Universum führen zu können. „Es gibt also“, so Börner, „noch kein ‚Standardmodell‘ der Galaxienentstehung.“

Merkwürdig ist auch, wie schwerere chemische Elemente – vor allem der Kohlenstoff – im Zentrum heißer Sterne entstehen. Die Erzeugung des wichtigsten Elements irdischen Lebens ist das eigentliche Nadelöhr bei der Synthese der schwereren Elemente, denn sie erfordert höchst unwahrscheinliche Bedingungen. Und über diese seltsame „Koinzidenz“ wundern sich Physiker, seit sie sich ihrer bewußt sind.

Um einen Atomkern des Kohlenstoffs – kurz C-12 – zu erzeugen, müssen drei „Alpha-Teilchen“ miteinander verschmelzen, also Kerne des Heliums mit je vier Kernteilchen: Zunächst fusionieren zwei Alpha-Teilchen zu einem Beryllium-8-Kern, der sich dann – im zweiten Schritt – mit einem weiteren Alpha-Teilchen verbindet. Diese „Tripel-Alpha-Reaktion“ kann allerdings nur deshalb ablaufen, weil das entstehende C-12 einen bestimmten – „angeregten“ – Energiezustand einnimmt, der zur Energiesumme der Ausgangsteilchen paßt. Ohne diese Energiepassung könnte im Zentrum der Sterne kein Kohlenstoff erbrütet werden.

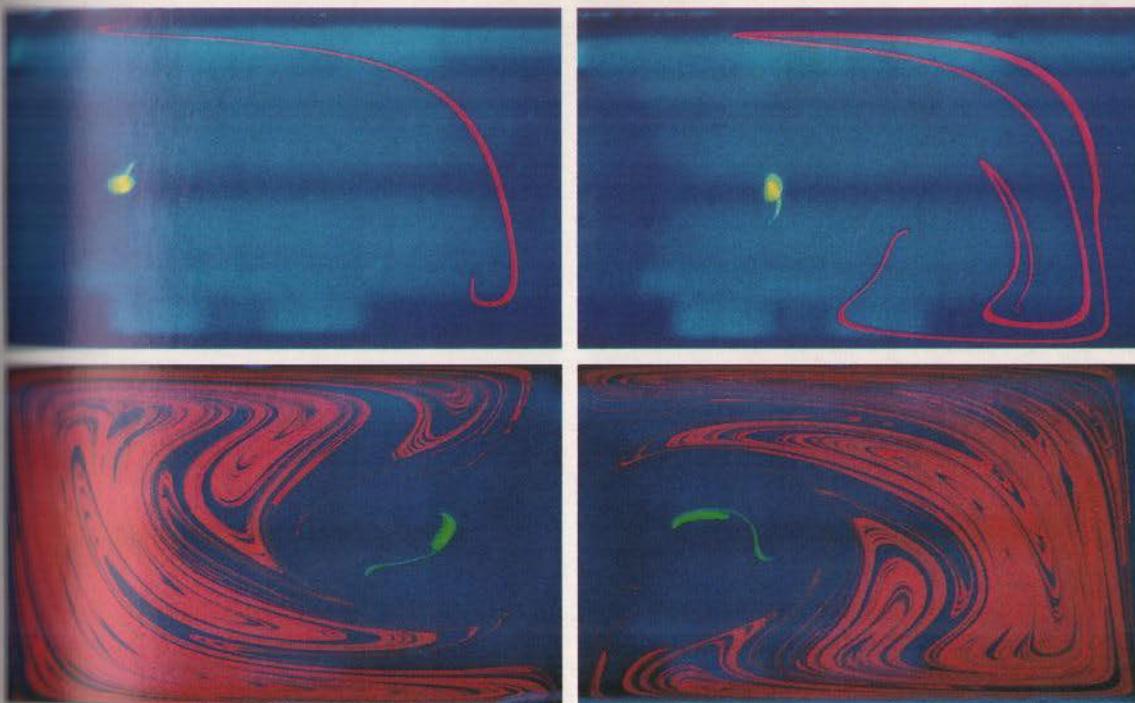
Dieser auffällige Engpaß riß ihren Entdecker, den britischen Astrophysiker Fred Hoyle, zu der Bemerkung hin, das Universum scheine geradezu dafür entworfen zu sein, Leben auf Kohlenstoffbasis hervorzubringen – ein extremer Ausdruck jener später „anthropisches Prinzip“ genannten Denkrichtung, deren Anhänger seit einigen Jahren eigentlich Selbstverständliches fordern: Die kosmischen Umweltbedingungen – vielleicht aber auch die Naturgesetze – müssen mit der Existenz des Lebens – also auch des Menschen (griechisch: „anthropos“) – verträglich sein.

Da sich im Labor kein alternatives Universum erzeugen läßt, testen Forscher das anthropische Prinzip im Gedankenexperiment: Sie klopfen Naturgesetze darauf ab, welche ihrer Eigenschaften für das Leben besonders bedeutsam sind und wie groß der Spielraum für dessen Entstehung ist. Und dabei spielen Koinzidenzen wie das Nadelöhr der Kohlenstoff-Synthese eine zentrale Rolle. Auch daß Atomkerne sich überhaupt gebildet haben, ist Ausdruck „unwahrscheinlicher“ Beziehungen unter den Naturkonstanten.

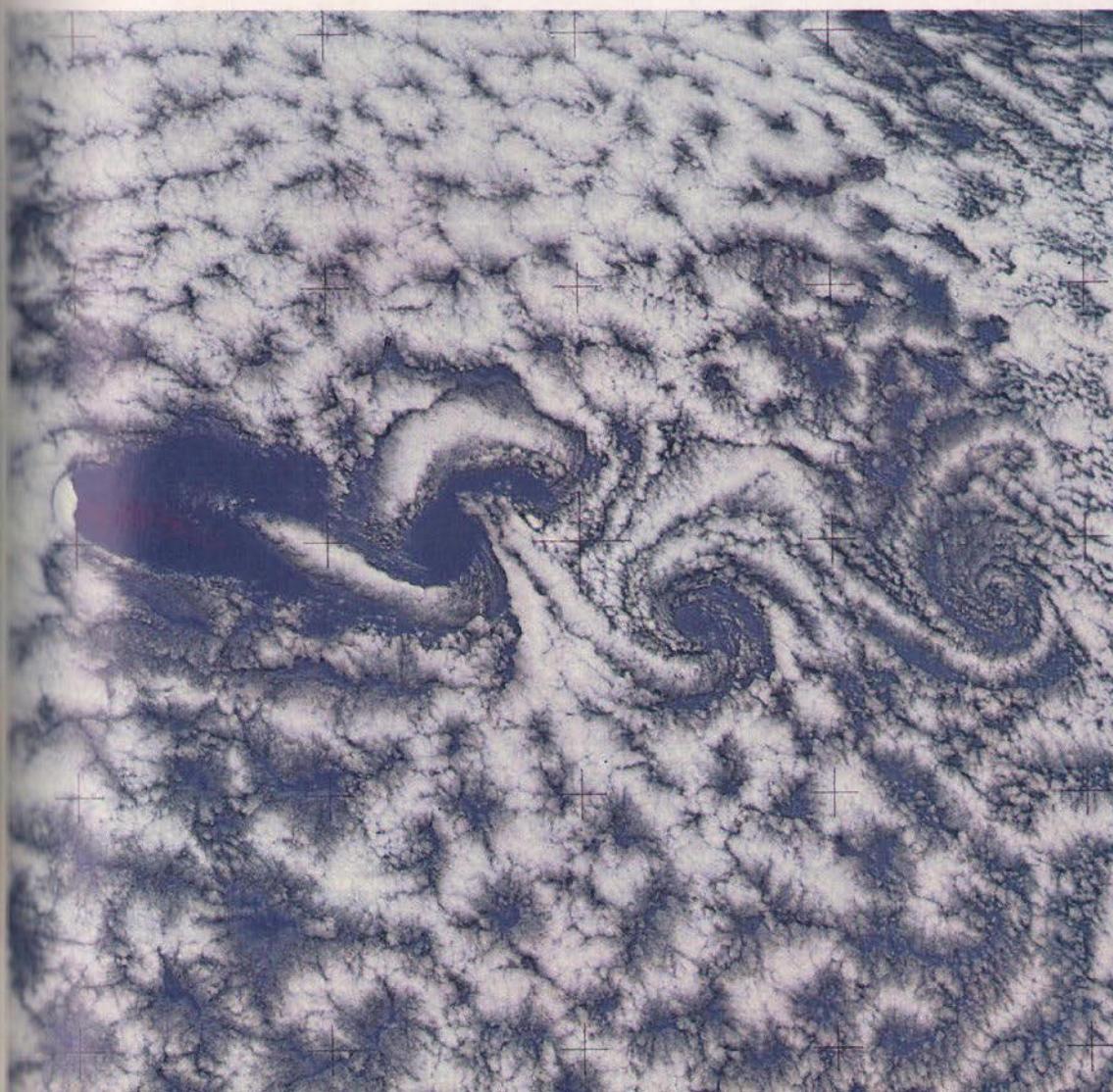
Das anthropische Prinzip zeigt, daß wir sozusagen „Glück gehabt“ haben. Das gilt



Inseln der Stabilität im Meer der Turbulenz



Ans Verröhren von Farben im Topf erinnert ein Experiment an der University of Massachusetts: Wenn zwei Farbkleckse in einer rotierenden Flüssigkeit vermengt werden, erhalten sich in einem »See« des Chaos häufig »Inseln« der Ordnung



»Wirbelstraßen« in dichten Wolkenfeldern sind – nicht zuletzt auf Satellitenbildern – zwar schon lange bekannt. Bisher aber ließen sich Wirbel schwer simulieren. Das gelingt inzwischen ganz gut bei Gasen, die auf kompakte Sterne einstürzen (links außen). Die kleinen Pfeile auf den drei Bildern, welche die US-amerikanischen Physiker Ronald Taam und Bruce Fryxell errechnen ließen, zeigen Richtung und Größe der Gasgeschwindigkeit; die Farben deuten die kalkulierten Werte von Dichte und Druck an. Zur Verblüffung der Forscher bilden sich im »Windschatten« der Sterne oft schlängelnde Mäander wechselnder Stromrichtung

auch für die „richtigen“ Anfangsbedingungen bei der Entstehung unserer Heimat im All: Die Sonne mußte Milliarden Jahre gutartig-gleichmäßig vor sich hinscheinen, damit auf der Erde – einem Planeten in der „richtigen“ Entfernung mit der „richtigen“ stofflichen Zusammensetzung – das Selbstorganisations-Experiment Leben starten und bis heute laufen konnte.

Von all den nötigen Bedingungen für unsere Existenz scheint zumindest der stramme Kurs der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne ein Produkt verlässlicher Ordnung zu sein. Und doch ist auch hierbei Chaos im Spiel.

Was den Menschen von Anbeginn als Gipfel göttlicher Ordnung galt, hatten Kepler, der die Ellipsennatur der Planetenbahnen erkannte, und Newton, der sie mit seinem Gravitationsgesetz erklärte, in die Sprache der Wissenschaft gekleidet. Ihr Triumph war es, das Verhalten der Himmelskörper, deren zukünftige Lage und Geschwindigkeit, bestimmen zu können.

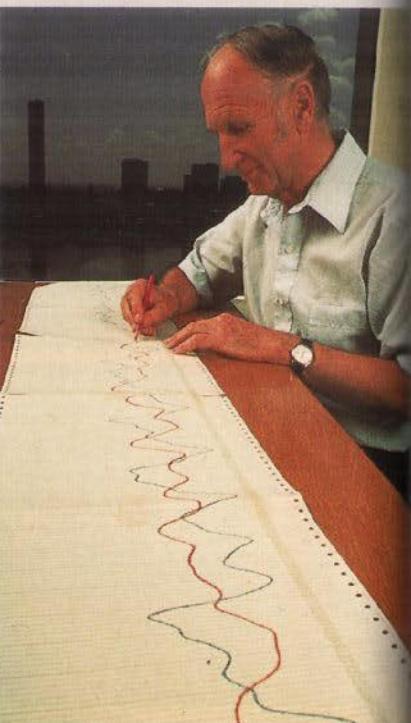
Dieses mechanistische Weltbild wurde schon im Jahr 1776 konsequent zu Ende gedacht: Einer „Intelligenz“, so argumentierte damals der französische Mathematiker Pierre Simon de Laplace, „welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennen würde“ – einer solchen Intelligenz wäre „nichts ungewiß“. Diesem später so genannten „Laplaceschen Dämon“ würden Zukunft wie Vergangenheit „offen vor Augen liegen“ (siehe Kasten Seite 54).

Erst Anfang dieses Jahrhunderts wagte ein Landsmann und Kollege Laplaces, an dieser Welt eines unerbittlichen Schicksals zu kratzen. „Es kann der Fall eintreten“, schrieb Henri Poincaré im Jahr 1903, „daß kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen; ein kleiner Irrtum in den ersten kann einen außerordentlich großen Irrtum für die letzteren nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich, und wir haben eine „zufällige Erscheinung“.“

Poincaré war auf die Spur des Chaos geraten, nachdem er 1889 die Stabilität der Planetenbahnen untersucht hatte und dabei zu einem ganz anderen Ergebnis kam als ein Jahrhundert zuvor Laplace und dessen Kollege Joseph Louis Lagrange. Die beiden Gelehrten hatten angenommen, die winzigen gegenseitigen Störungen der Himmelskörper untereinander wären vernachlässigbar. Solche Störungen, hielt Poincaré dagegen, könnten sich gelegentlich rezonanzartig aufzuspielen

Auf dem Weg zum deterministischen Chaos ging der Laplacesche Dämon verloren

Er hätte gewußt, wohin die Kaffeetropfen aus der gerade umgestoßenen Tasse spritzen würden. Er hätte gewußt, daß die schwarze Flüssigkeit ausgerechnet die ungünstigste Stelle meines Adreßbüchleins durchfeuchtet und die eine unersetzbare Telefonnummer unleserlich machen würde. Ja, er hätte dies alles schon am Beginn des Universums vorhersehen können. Dieses Wesen mit allumfassendem Wissen heißt nach seinem Schöpfer „Laplacescher Dämon“. Es entsprang im Jahr 1776 der Phantasie des französischen Mathematikers Pierre Simon de Laplace, als dieser die Lehre der klassischen Mechanik konsequent weiterdachte. Isaac Newtons Gesetze aus dem 17. Jahrhundert sagen voraus, nach welcher Zeit ein vom Stamm fallender Apfel den Boden erreicht, wo hin die Billardkugel nach der Karambolage rollt und wie die Planeten um die Sonne kreisen. Nach diesen universellen Prinzipien der Bewegung läßt sich, so formulierte Laplace das Credo des mechanistischen Weltbildes,



Edward Lorenz

auch die Bewegung jedes Moleküls und Atoms vorherberechnen. Sein fiktiver Dämon müsse nur einmal die genauen Positionen und Geschwindigkeiten aller Materieteilchen des Universums kennen, so könnte er auch jede zukünftige Entwicklung unfehlbar prophezeien.

Über ein Jahrhundert blieb die Laplacesche Idee unangefochten. Richtschnur physikalischer Erkenntnissuche: Abweichungen des Versuchsergebnisses von der Vorhersage gibt es nur deshalb, weil die Experimentatoren (noch) nicht fähig sind, den Ausgangszustand ihres Systems genau und vollständig genug auszumessen.

Erst zu Beginn unseres Jahrhunderts erkannte ein anderer französischer Mathematiker, Henri Poincaré, daß es „dynamische Systeme“ gibt, in denen sich winzige Störungen im Laufe der Zeit dramatisch vergrößern. Doch kaum ein Wissenschaftler ahnte die Tragweite dieser Entdeckung. Ein weiteres halbes Jahrhundert verging, bevor der Meteorologe Edward Lorenz am Massachusetts Institute of Technology 1963 erstmals auf praktische Konsequenzen von Poincarés Erkenntnis stieß. Lorenz hatte sich mit mathematischen Modellen zur Wettervorhersage beschäftigt



Henri Poincaré (1854–1912)

und zwölf Gleichungen formuliert – ein primitives Modell für das Wechselspiel in der Atmosphäre zwischen Größen wie Temperatur und Windgeschwindigkeit. Nachdem er damit seinen Computer programmiert und mit Startwerten gefüttert hatte, spuckte der Rechner im Minutenrhythmus die weitere Entwicklung aus. Einmal wollte Lorenz die unangenehme lange Rechenzeit verkürzen, indem er die Zwischenergebnisse eines früheren Ausdrucks erneut eingab und das Programm wieder startete. Zunächst stimmten die erneut errechneten Werte mit denen des alten Experiments überein, doch schon bald war jede Ähnlichkeit verschwunden: Das Modellwetter war völlig umgeschlagen.

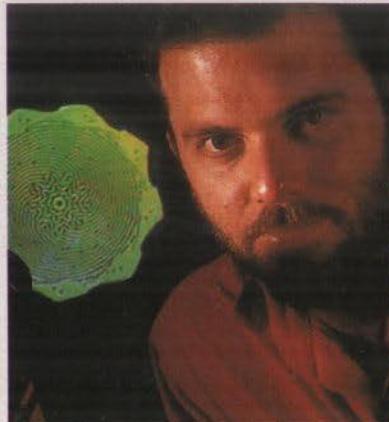
Die Fehlerquelle war bald gefunden: Die Computerausdrucke zeigten nur drei Stellen hinter dem Komma. Als Lorenz die Werte vom Blatt neu eintippte, hatte er also pro Wert einen „Fehler“ von einigen Zehntausendsteln gemacht – nur eine winzige Abweichung, doch das Klimamodell hatte sie nicht verziehen. Damit



Benoit Mandelbrot

waren alle Hoffnungen auf eine exakte Wettervorhersage geplatzt, denn meteorologische Meßdaten sind zwangsläufig ungenau, und auf dieser Basis muß jede Prognose einem Lotteriespiel gleichen.

Nun war auch der Laplacesche Dämon endgültig begraben.



James Crutchfield



Norman Packard

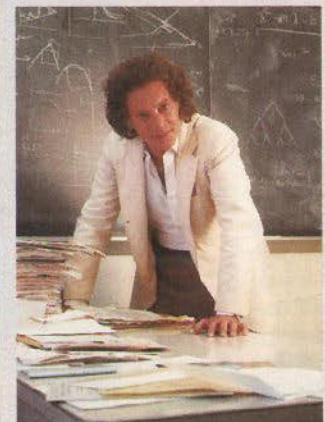
Schon in den zwanziger Jahren hatte die Quantentheorie – und vor allem Werner Heisenbergs „Unschärferelation“ – gezeigt, daß physikalische Messungen auch mit perfekten Meßgeräten prinzipiell nicht absolut genau sein können: Dynamische Systeme sind so zwar von exakten Regeln bestimmt, aber dennoch nicht vorherzusagen. Mitte der siebziger Jahre prägte der US-Mathematiker James Yorke für diesen Sachverhalt den Begriff „deterministisches Chaos“.

Etwa zur gleichen Zeit wurde ein zweiter zentraler Begriff des neuen Denkens geboren: der vom „Fraktal“. Sein Vater, der gebürtige Pole Benoit Mandelbrot, hatte damals in einem Forschungslabor des Computerkonzerns IBM in der Nähe von New York Fehler bei der Datenübertragung auf Telefonleitungen untersucht. Diese Übertragungsfehler haben vertrackte Eigenschaften: Sie treten stets gehäuft auf, unterbrochen von langen fehlerfreien Perioden. Aber auch in jeder Fehlerhäufung sind wiederum Perioden ungestörter Übertragung verborgen. Hinter dieser „Selbstähnlichkeit“ der Kurven könnte, so vermutete Mandelbrot, mehr stecken.

„Wie lang“, so lautete der skurrile Titel einer Arbeit, die Mandelbrot 1967 veröffentlichte, „ist die Küste Großbritanniens?“ Die Antwort: Das hängt von der Länge des Zollstocks ab. Tatsächlich ist es recht einfach, auf einer Weltkarte die Küstenlänge grob abzumessen. Aber selbst wenn jemand mit dem Maßband am Strand entlangkriechen würde, könnte er nicht jede Spalte zwischen den Felsen berücksichtigen: Je feiner der Maßstab wird, desto mehr nähert sich die Länge der Unendlichkeit – obwohl die

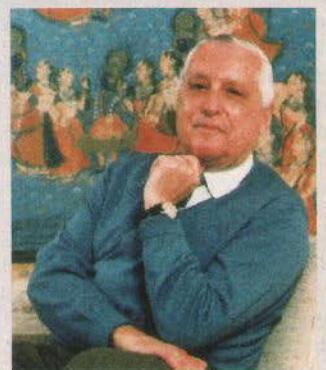
Fläche Großbritanniens keineswegs unendlich groß ist. Wie stark eine solche Länge mit immer kleinerem Maßstab wächst, drückt die „Dimensionszahl“ aus. Anders als geometrische Grundelemente wie Linie, Fläche oder Würfel haben natürliche Objekte keine ganzzahlige Dimension, also nicht eins, zwei oder drei, sondern einen Wert dazwischen – im Fall der Küstenlinie etwa 1,5. Mandelbrot gab im Jahr 1975 solchen Objekten den Namen Fraktal (vom lateinischen „fractus“: „in Stücke gebrochen“).

Die Begriffe Fraktal und Chaos prägen seitdem den neuen Forschungszweig. Entscheidend ist die Erkenntnis, daß ein System – egal ob mathematisch, physikalisch oder biologisch – im allgemeinen nicht rein zufällig ins „Chaos“ abrutscht. Das mathematische Prinzip dafür entdeckten der Marburger Physikprofessor Siegfried Großmann und sein Mitarbeiter Stefan Thomae; sie veröffentlichten 1977 das Gesetz



Mitchell Feigenbaum

von der „Periodenverdopplung“: Am Rande des Chaos kann ein System erst zwischen zwei, dann vier, acht und 16 möglichen Zuständen schwingen. Von Mitchell Feigenbaum, einem jungen Physiker am Los Alamos National Laboratory in New Mexico, hat die magische „Feigenbaumzahl“ ihren Namen: Sie gibt an, wie bald die Änderung eines Parameters zur nächsten Periodenverdopplung führt (siehe Seiten 184/185). Gründerzeitstimmung herrschte in den siebziger Jahren auch an der University of California in Santa Cruz: Um Robert Shaw hatten sich drei weitere Physikstudenten zum „Dynamische-Systeme-Kollektiv“ formiert. Mit Shaw gerieten James Crutchfield, Doyne Farmer und Norman Packard in den Bann des „Analog-Computers“. Auf diesem Gerät konnten sie physikalische Sy-



Ilya Prigogine

steme, etwa ein Federpendel, durch entsprechend verschaltete elektronische Bauelemente simulieren. Als flimmernde Kurven machten sie auf den Computermonitoren den „Lorenz-Attraktor“ (siehe Seite 178) sichtbar und suchten nach dem Chaos im Rhythmus tropfender Wasserhähne. Ihre Videobänder mit den sich windenden Kurven der Attraktoren machten allenthalben auf Konferenzen Furore.

Seit Beginn der achtziger Jahre wird die Chaos-Forschung von der „wissenschaftlichen Gemeinde“ ernst genommen. Seitdem haben viele Forscher begonnen, bewährte Erkenntnis neu zu durchdenken. So untersucht die „Brüsseler Schule“ um den Chemie-Nobelpreisträger Ilya Prigogine neben „chemischen Uhren“ auch in den Sozialwissenschaften „Systeme fernab vom Gleichgewicht“, etwa bei Revolutionen.

Jürgen Scriba

und dadurch die Ellipsenbahnen der Planeten drastisch verändern. An diesem Punkt jedoch resignierte der Mathematiker ob seiner Entdeckung, die den unaufhaltsamen Zerfall des Sonnensystems nahelegte: „Diese Dinge sind so bizarr, daß ich es nicht aushalte, weiter darüber nachzudenken.“

Erst Anfang der sechziger Jahre griffen Forscher Poincarés Stabilitätsproblem wieder auf – ein heute „konservatives Chaos“ genanntes Phänomen, wobei die Bewegungsenergie der Körper konserveriert und nicht durch Reibungsverluste gebremst wird. Gestützt auf Vorarbeiten des Amerikaners George Birkhoff und des Russen Andrej Kolmogoroff, formulierte der Mathematiker Jürgen Moser in Göttingen und sein Moskauer Kollege Wladimir Arnold einen heute als „KAM-Theorem“ berühmten Lehrsatz. Er besagt, daß zum Beispiel im Planetensystem Chaos zwar auftreten kann, aber nur „gebändigt“, solange die gegenseitigen Störungen klein bleiben. Dies bedeutet, kommentiert Jürgen Moser, daß beispielsweise in den luftleer gepumpten Speicherringen der Teilchenphysiker „die meisten beschleunigten Teilchen in ihrer Ringbahn stabil kreisen“; nur auf „wenigen seltenen Bahnen“ stoßen sie an die Wand.

„Es wurde aber nie gezeigt“, kritisierte 1989 Jacques Laskar vom Bureau des Longitudes in Paris, „ob das Sonnensystem die Anforderungen des KAM-Theorems auch erfüllt.“ Der Astrophysiker räumte jedoch ein, daß „das Sonnensystem viel zu kompliziert“ ist; seine Stabilität könne noch nicht mathematisch exakt untersucht werden – da „helfen nur Störungstheorien und Computer“.

Warum taumelt Hyperion auf chaotischer Bahn um den Planeten Saturn?

In der Tat haben erst die Supercomputer der letzten Jahre die Qualität von Bahnberechnungen entscheidend verbessern können. Besonders auffällig tritt das Chaos etwa beim Saturnmond Hyperion in Erscheinung: Dieser kleine Trabant, der einer krummen Bohne von 200 Kilometern Durchmesser ähnelt, taumelt wild schlingernd auf einer stark elliptischen Bahn in 21 Tagen einmal um den beringten Riesenplaneten.

Hauptgrund für das Taumeln des Mondes ist dessen Form. „Selbst wenn es möglich gewesen wäre“, erklärt der US-Astronom Jack Wisdom vom MIT, „Neigung der Drehachse und Drehbewegung des Hyperion zur Zeit des Vorbeiflugs der Raumsonde Voyager-1 im November

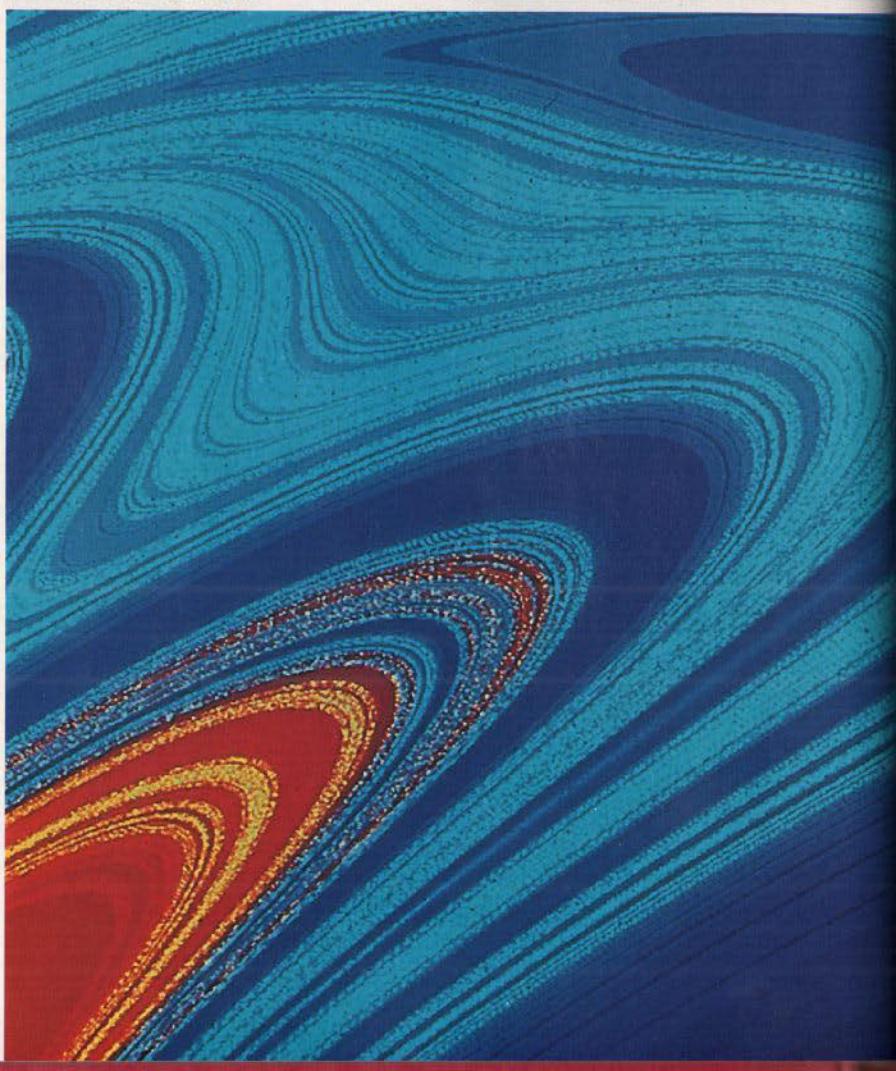
1980 auf zehn Stellen hinter dem Komma genau zu bestimmen, hätte dessen Bewegungszustand knapp ein Jahr später, als Voyager-2 ankam, nicht vorhergesagt werden können.“

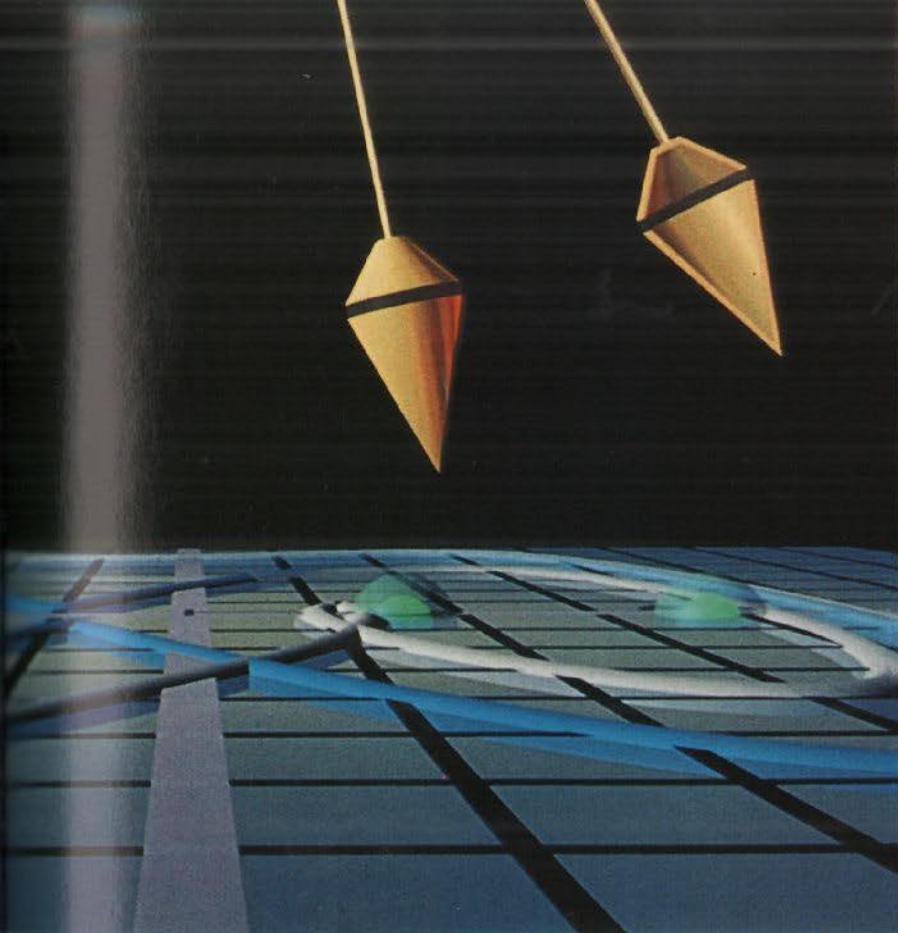
Ein weiteres Paradebeispiel für Chaos im Sonnensystem ist der Asteroiden-Gürtel. Zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter bewegen sich in einem relativ engen Band Tausende von Mini-Planeten um die Sonne. Schon im Jahr 1866 hatte der amerikanische Himmelsforscher Daniel Kirkwood eine Lücke im Gürtel entdeckt: Dort würde ein Asteroid, so es ihm gäbe, während eines Jupiter-Jahres exakt dreimal um die Sonne laufen. Diese und weitere „Kirkwood-Lücken“ – auch Resonanzen genannt – treten immer dann auf, wenn sich ihre Umlaufperioden zu Jupiter-Jahren wie ganze Zahlen verhalten. Mit ihnen allein ließen sich die Lücken allerdings noch nicht erklären: Andere Effekte mußten am Werk sein.

Schon das Hin- und Herschwingen eines periodisch angetriebenen Pendels kann eine chaotische Bewegung sein. Nur bei Auslenkungen ohne Einfluß störender Kräfte schwingt es »ordentlich«. Kommt ein noch so geringer wiederkehrender Einfluß hinzu, bewegt sich ein frei schwingendes Pendel auf unberechenbaren Bahnen



Geringste Störungen machen die Bahn des Pendels unberechenbar





Jede Stelle des Bildes steht für einen Bewegungszustand des angetriebenen Pendels, der – oft unvorhersagbar – in einer von zwei möglichen Schwingungen (rot oder blau) endet



Jack Wisdom sah sich genötigt, bei seinen Simulationen die Umlaufberechnungen für die Asteroiden auf 300 000 Jahre auszudehnen, bis plötzlich interessante Effekte auftauchten: Körper, die 100 000 Jahre lang gleichmäßig die Sonne umkreist hatten, wechselten mit einemmal auf eine chaotische Bahn über. Mehr noch: „Wir fanden“, erzählt Wisdom, „daß alle chaotischen Asteroiden die Marsbahn überquerten.“

Als der Astrophysiker seine Simulationen weiter verfeinerte, gerieten einige der Asteroiden sogar bis in die Nähe der Erdbahn. Und hier können, wie riesige Einschlagskrater aus der Erdgeschichte mahnen, solche Himmelskörper als Meteoriten herabstürzen.

Wie die vermeintlich exakt berechenbare Bewegung eines Himmelskörpers unvorhersagbar werden kann, hat der Physiker Tomio Petrosky von der University of Texas am Beispiel eines Kometen demonstriert. Nur unter dem Einfluß der Sonne könnte ein Schweifstern, der aus der Tiefe des Raums kommt, einer schlüchten Parabelbahn folgen und wieder im All verschwinden. Aber schon eine einzige Störung – etwa die Anziehung des Jupiters –

ändert die Sachlage drastisch: Sie vermag den Kometen in wiederholte geschlossene Bahnen um die Sonne zu zwingen.

Merkwürdigerweise ist die Zahl der so erzwungenen Umläufe in einer Computer-Simulation davon abhängig, wie genau die Bahn jeweils berechnet wird. Mit einer Genauigkeit von beispielsweise sechs Stellen umrundet der von Petrosky gewählte Komet die Sonne 757 mal, mit sieben Stellen nur noch 38 mal, aber bei acht Stellen wieder 236 mal. Obwohl die Kometenbahn zu Beginn der Simulation mathematisch immer dieselbe ist, ändert sie sich – je nach Präzision des Verfahrens – radikal. Denn jeder noch so kleine Fehler wächst nichtlinear an: Ein Himmelskörper kann sich von der „exakten“ Anfangsbahn beliebig weit entfernen – und zwar je nach Fehlergröße an einem anderen Punkt seiner Bahn.

Welche Rolle spielt das »konservative Chaos« für die Stabilität des Sonnensystems?

Auch Poincarés Befürchtung, die Planetenbahnen könnten chaotisch sein, bekam neue Nahrung. Mit einem aufwendigen Rechenmodell, das neben allen großen Planeten auch die Langzeitwirkung des Erdmonds und Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie berücksichtigt, hat Jacques Laskar das Schicksal des Sonnensystems über einen riesigen Zeitraum simuliert. Die Zuverlässigkeit seines Computermodells hatte der französische Astrophysiker überprüft, indem er die Ergebnisse eines Probelaufs mit den bekannten Planetenpositionen der letzten 44 Jahrhunderte verglich. Dann ließ er sein rechnerisches Sonnensystem auf einem Supercomputer 200 Millionen Jahre laufen. Resultat: „Das Sonnensystem ist chaotisch, nicht quasiperiodisch. Vor allem bei den inneren Planeten wie der Erde geht die Vorhersagbarkeit nach zirka Jahrtausenden verloren.“

„Zwei Jahrhunderte lang“, kommentieren die Astronomen Anna Nobili und Joseph Burns von der amerikanischen Cornell University den beunruhigenden Fund, „haben Himmelsmechaniker versucht, das Gegenteil zu beweisen, nämlich, daß das Sonnensystem stabil ist – vermutlich motiviert durch die simple Tatsache, daß wir hier sind.“ Die wahre Bedeutung des von Laskar aufgedeckten konservativen Chaos für die Stabilität des Sonnensystems sei daher „noch nicht verstanden“.

Beim „dissipativen Chaos“ hingegen, bei dem Reibungsverluste eine Rolle spielen, glauben Wissenschaftler, etwas weiter zu sein – obwohl auch hier ein System

auf kleinste Störungen reagiert und deshalb schnell unvorhersagbar wird. Solches Chaos tritt bei „offenen Systemen“ auf, in die Energie von außen zugeführt wird und die sich damit im „Fließgleichgewicht“ befinden – also fern des thermodynamischen Gleichgewichts. Zu den offenen oder „dissipativen“ Systemen zählen fast alle Prozesse auf der Erde: Klima und Wetter, Leben und Mensch. Denn die Sonne schickt Energie – ihr „Erbe“ des Urknalls – als Licht zu uns und hält damit das chaotische Geschehen auf der Erde in Gang.

Als erster Forscher war der US-Meteorologe Edward Lorenz vom MIT im Jahr 1963 zufällig auf das dissipative Chaos gestoßen. Er hatte damals versucht, ein bestimmtes Wettermodell mit einem – aus heutiger Sicht primitiven – Computer zu simulieren. Eines Tages wollte er die Rechenprozedur abkürzen und gab die Zwischenergebnisse eines früheren Ausdrucks erneut ein. Zwar stimmten die ersten Werte, die der Computer danach auswarf, wie erwartet mit den alten Ergebnissen überein. Aber wenig später schon konnte Lorenz keine Ähnlichkeit mit den früheren Ergebnissen mehr finden.

Die erstaunliche Erkenntnis, daß aus simplen, deterministischen Gleichungen etwas Chaotisch-Unvorhersagbares erwachsen kann, hat Lorenz mit dem „Schmetterlingseffekt“ illustriert: Da jede noch so kleine Störung unvorhersehbare Folgen haben kann, wäre es zumindest theoretisch denkbar, daß der Flügelschlag eines Insekts in China zwei Wochen später einen Wirbelsturm in Amerika auslöst.

Wieso führen »nicht-lineare Gleichungen« so schnell ins Unvorhersagbare?

Vorbei war damit die Hoffnung auf langfristige Wettervoraussagen, begraben werden mußte der „Laplacesche Dämon“ und mit ihm das mechanistische Weltbild. Seitdem fanden Forscher deterministisch-chaotisches Verhalten in ungezählten Naturphänomenen: in turbulenten Luft- und Flüssigkeitsströmungen, bei der Entstehung von Gebirgszügen und der Ablagerung metallischer Teilchen in Lösungen, bei Wachstumsprozessen in der unbelebten und belebten Natur.

Lorenz' geniale Einsicht war es, das erratische Verhalten seines Klimamodells nicht für eine „Macke“ des Computers zu halten. Er erkannte darin einen fundamentalen Effekt: die empfindliche Abhängigkeit dynamischer, rückgekoppelter Systeme von den Anfangsbedingungen – eine Empfindlichkeit, die wiederum eine Eigenschaft nichtlinearer Gleichungen ist (siehe „Mathematik“, Seite 184).

Nichtlineare Gleichungen können schnell zu unvorhersagbarer Komplexität führen, aber nicht unbedingt in das, was landläufig „Chaos“ – reine Zufälligkeit – genannt wird. Im Gegenteil: Prozesse, die nichtlinearen Gesetzen gehorchen, sind die eigentliche Quelle der Kreativität in der Natur. Siegfried Großmann, Physik-Professor an der Universität Marburg und einer der Pioniere der Chaos-Forschung, faßt die drei „charakteristischen Konsequenzen“ der Nichtlinearität so zusammen:

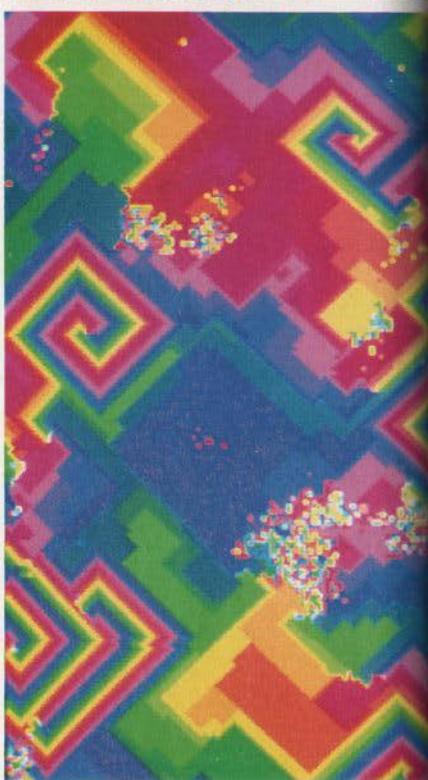
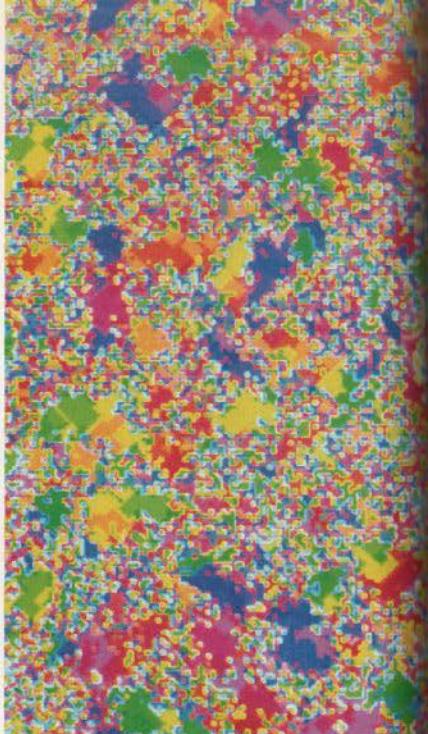
1. Chaos: Unregelmäßiges und unvorhersagbares Verhalten tritt trotz deterministischer Naturgesetze ein.
2. Ordnung und Struktur: Sie entstehen in offenen Systemen fern vom thermodynamischen Gleichgewicht.
3. Selbstähnlichkeit: Dieses „Strukturgesetz im und vor dem Chaos“ bewirkt, daß sich „gleichartige Muster“ bilden, die „in den verschiedenen Größen ineinander verschachtelt“ vorkommen.

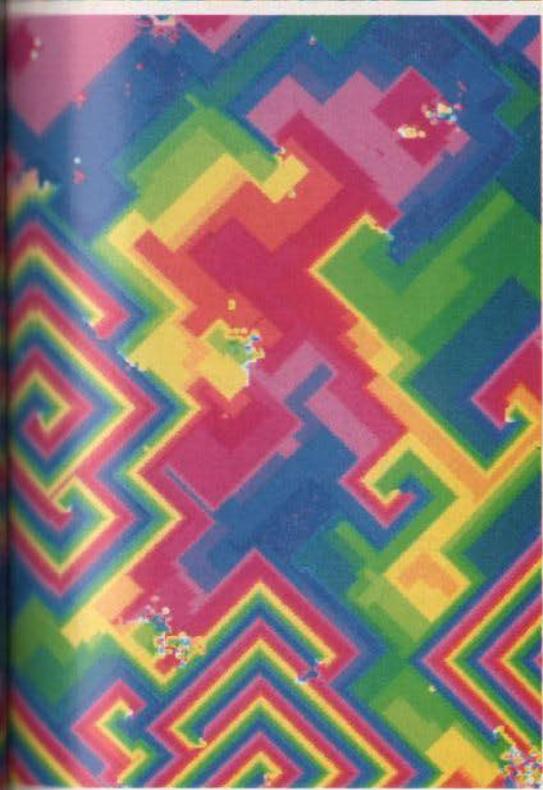
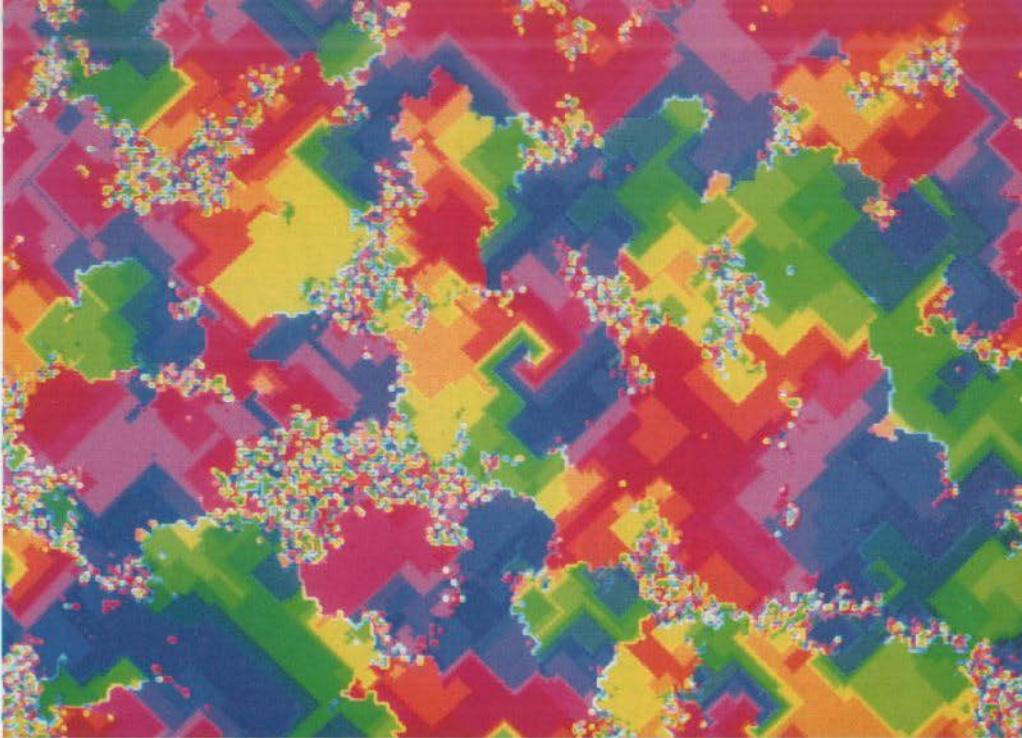
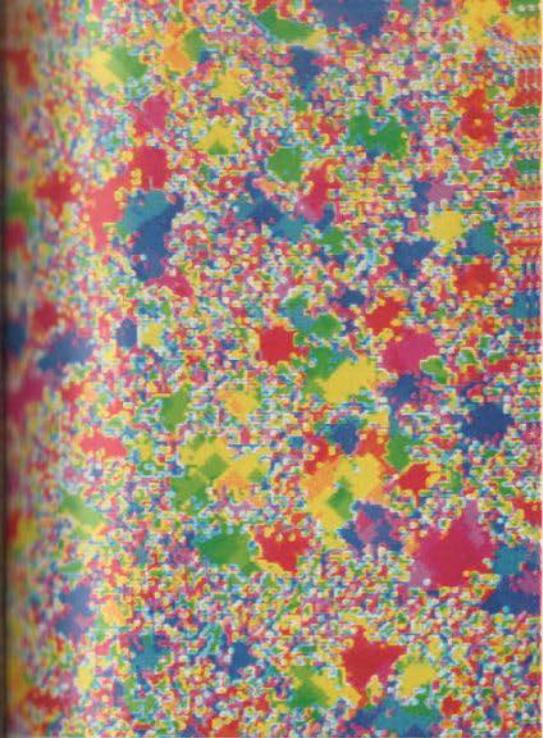
Weshalb lassen sich fraktale Muster in der Realität nicht beliebig verkleinern?

Auf die Spur der Selbstähnlichkeit war Benoit Mandelbrot vom Thomas Watson Research Center des US-Computerkonzerns IBM Mitte der sechziger Jahre zufällig gestoßen, als er die merkwürdige zeitliche Verteilung von Übertragungsfehlern in Telefonleitungen analysierte. Neugierig geworden, suchte – und fand – er das gleiche Phänomen in vielen anderen natürlichen und technischen Systemen: Stets wiederholt sich ein bestimmtes, oft „chaotisches“ Muster in unterschiedlichen räumlichen oder zeitlichen Maßstäben – es ist sich in allen Größenordnungen selbstähnlich. Solche Muster oder geometrischen Gebilde nannte Mandelbrot selbstähnliche „Fraktale“ – „gebrochene“ Einheiten.

Aufmerksam geworden, erkannten Wissenschaftler fraktale Muster in allen möglichen Systemen wieder: in den Küstenlinien und in der Gestalt von Pflanzen, in Wolkenformen und in den Ergebnissen immer wieder neu berechneter – „iterierter“ – nichtlinearer Gleichungen: Per Computerbildschirm sichtbar gemacht, faszinieren sie Forscher wie Laien auf den ersten Blick. Denn diese ästhetisch reizvollen Bilder verdeutlichen unmittelbar, wie ein deterministisches Chaos fraktale Muster entstehen läßt: Muster, die nicht glatt, sondern „rau“ sind und uns spontan „vertraut“ sind, weil sie uns irgendwie an das erinnern, was wir aus der Natur kennen.

Allerdings existiert ein entscheidender Unterschied zwischen der fraktalen Welt





Zelluläre Automaten bringen wuchernde »Wesen« hervor

Sind Computer als »Zelluläre Automaten« programmiert, erzeugen sie Phänomene mit Eigenschaften, die an primitive Organismen erinnern. Heimat der künstlichen Wesen ist ein fiktives Universum: In ihm sind einzelne Punkte – »Zellen« – zu dem Bild versammelt, das auf einem Monitor sichtbar gemacht werden kann. In den speziellen

Automaten des Amerikaners David Griffeath entwickeln sich merkwürdige Kristallwelten aus einer zufälligen Anfangsverteilung (links oben). Je nach Programm und Startverteilung wuchern die Schöpfungen sogenannter nichtlinearer Gleichungen wild und chaotisch, fressen einander – und enden doch alle in ähnlich mäanderförmigen Inseln

der Mathematik und jener der Natur: Während die berechneten Fraktale bis ins unendlich Kleine neue Struktur offenbaren, stößt die selbstähnliche Verästelung im Mikroskosmos der materiellen Welt auf die Grenze der Moleküle. Dort kommt wieder der lineare – also nicht-chaotische – Aspekt der Naturgesetze zum Vorschein.

„Turbulente Strömung kann nur aufrechterhalten werden“, erklärt Siegfried Großmann, „wenn man ständig röhrt, schert, für Druckgefälle sorgt“, denn es handelt sich um „ein offenes System, durch das ununterbrochen Energie hindurchgeht“.

Als physikalische Ursache für das irreguläre, chaotische, turbulente Strömen nennt der Marburger Physiker den „Sieg der trennenden Scherung über die glättende Zähigkeit“. Und ausgerechnet dieses verwickelte Geschehen ist „eines der (wenigen) Beispiele, wo sich nach langer Forschung allmählich klärt, wie die Bewegungsgleichungen solche Selbstähnlichkeit bewirken“, und ebenfalls, warum in der Welt des realen Chaos die Selbstähnlichkeit begrenzt ist.

Wie die Turbulenz mathematisch exakt erklärt werden könnte, skizziert Großmann in den „Physikalischen Blättern“ vom Januar 1990 in einer wissenschaftlichen Tour de force: Die seit langem bekannten rechnerischen Hilfsmittel der Aero- und Hydrodynamiker – die „Navier-Stokes-Gleichungen“ – lassen sich im umfassenderen Konzept der Selbstähnlichkeit einbetten, wenn etwa „das Wessenselement von turbulenter Strömung, nämlich ein verwinkeltes, chaotisches Knäuel von Bahnen der einzelnen Flüssigkeitselemente zu sein.“ berücksichtigt wird. Und eben dieses Knäuel lasse sich mit Hilfe einer „Zeitskalenhierarchie der Wirbel“ allein aus den nichtlinearen Strömungsgleichungen heraus aufdröseln.

Die absehbare saubere Lösung des Turbulenz-Problems wird die Chaos-Forschung abermals beschleunigen. Schon heute deuten, wie es Leonhard Sander

von der University of Michigan formuliert, „immer mehr Belege darauf hin, daß die Natur eine große Vorliebe für fraktale Formen hat“ – trotz der Begrenzung der Selbstähnlichkeit im Mikroskosmos. „Beispielsweise wächst ein perfekter Kristall nahezu im Gleichgewicht: Er probiert gleichsam mehrere Konfigurationen, bis er die mit der stabilsten Struktur findet.“

Reales Wachstum hat jedoch meist nicht genügend Zeit, eine ideale Konfiguration zu finden. Teilchen bleiben dauerhaft aneinander hängen, sobald sie sich nur einmal berühren – ein extremer Nichtgleichgewichtsprozeß. Für solche Vorgänge hat Sander im Jahr 1981 zusammen mit Thomas Witten den Begriff „diffusionsbegrenztes Wachstum“ geprägt: Bei ihnen ist das Tempo der Anlagerung neuer Teilchen an einen Haufen nur durch die Eigenbewegung – die „Diffusion“ – begrenzt. Dennoch entstehen dabei fraktale Muster. Auf einer glatten Oberfläche bleiben Teilchen zunächst zufällig hängen, sie bilden kleine Hügel und Mulden. „Ein sich zufällig bewegendes Teilchen“, erklärt Sander, „das sich von außen her einschlängelt, bleibt sehr wahrscheinlich an der Spitze des Hügels hängen.“ Und „weil die Teilchen nahe der Spitze kleben bleiben, wird der Hügel immer höher und das Füllen des Loches immer unwahrscheinlicher“ – eine Wachstums-Instabilität. Deswegen wachsen aus kleinen Hügeln und Mulden an den Spitzen Aufspaltungen der Spitzen: Fraktale entstehen.

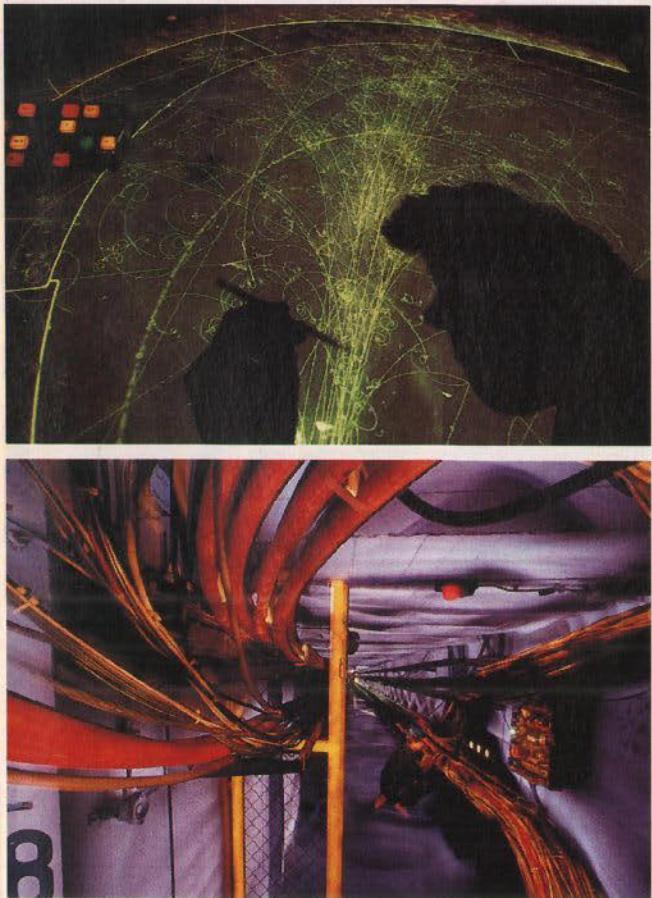
Sanders Anlagerungsmodell erwies schon seine Nützlichkeit bei der Analyse vieler natürlicher Prozesse. Ähnliches gilt für Simulationen mit „zellulären Automaten“. Diese Computerprogramme schaffen fiktive elektronische Welten, innerhalb derer sich Rechenvorgänge mittels nichtlinearer Gleichungen chaotisch drauflosentwickeln können. Auf einem Monitor sichtbar gemacht, verdeutlichen die Prozesse, wie lokale Regeln für die Wechselwirkung zwischen „Zellen“ zu globalen Strukturen führen können: Sie sind ein Musterbeispiel dafür, daß die Selbstorganisation komplexer Systeme ein Grundprinzip unserer Welt ist.

Auch die Fähigkeit des Lebens – unsere Fähigkeit –, neue Lösungen für neue Probleme zu finden, scheint auf diesem universalen Prinzip zu beruhen: Wir gehen in eine Zukunft, die – wie wir nun wissen – unvorhersagbar ist, aber keineswegs unlösbar. Und auf keinen Fall langweilig. □

Auch kleinste Teilchen geraten auf die schiefe Bahn



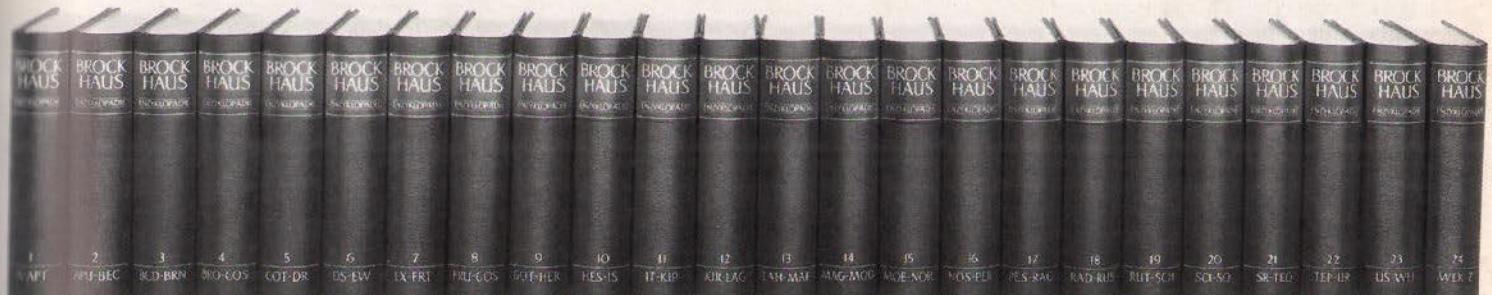
Elementarteilchen sind nur dann auf höchste Energie zu beschleunigen, wenn sie milliardenmal auf annähernd stabilen Bahnen in „Spiralringen“ wie bei DESY in Hamburg umlaufen. Sobald die Bahn der Partikel instabil wird, zerstieben sie in der Wand, statt Zerfallspuren in Meßkammern zu hinterlassen



Der Astrophysiker und GEO-Redakteur Dr. habil. Reinhard Breuer, 43, hat im Juli 1985 den ersten großen Bericht über „Das Chaos“ in GEO veröffentlicht. Er ist Autor des im Herbst 1990 in der GEO-Bibliothek erscheinenden Buches „Mensch + Kosmos – Expedition an die Grenzen von Raum und Zeit“.

„Liebe Brockhaus-Redaktion, wie halten Sie es mit dem Zeitgeist?“ „Ganz objektiv – wir machen daraus

10 Bände sind bereits erschienen. Alle 4 Monate wächst unsere neue Enzyklopädie, Band für Band, auf insgesamt 1,35 m Länge, 17 000 kostbare Seiten und 260 000 Stichwörter. Jeder 6. Band erhält einen Ergänzungsbogen. Erhält Sie auf dem aktuellen Stand. 240 Schlüsselbegriffe befassen sich mit Reizthemen unserer Zeit und bieten Orientierung.



Geschichte! Von Aktionskunst bis Zivildienst, in der neuen Enzyklopädie sind Informationen für Generationen.“

Ob Kunst oder Politik, die neue Brockhaus Enzyklopädie ist auf dem aktuellen Stand der Zeit – nur äußerlich kleiden wir uns konservativ: Leder, Leder und Gold – seit 1805.

C o u p o n

Schicken Sie mir die Brockhaus-Informationsmappe schnell und unverbindlich.

Name: _____

Adresse: _____

WAG M

Bitte einsenden an: F.A. Brockhaus, Postfach 100311, 6800 Mannheim.

D

VON REINHARD BREUER

ie Zeit fließt – den einen zu schnell, den anderen viel zu langsam, je nach Termindruck oder Langeweile.

Alles gelogen. Oder bestenfalls mißverständlich ausgedrückt: Die Zeit fließt nicht, sie hat keine Geschwindigkeit, kann also weder „rasen“ noch „kriechen“. Das war schon Aristoteles klar. Es vollzieht sich, so schrieb er, „eine Veränderung schneller und langsamer, doch von der Zeit gilt das nicht. Schnell und langsam werden vielmehr an der Zeit gemessen.“ Und ergo sei „die Zeit keine Bewegung“: Wenn Tempo nur durch Zeit beurteilt wird, kann Zeit selbst kein Tempo haben.

Trotz der Einsicht des antiken Denkers hielt die Konfusion über das alltägliche Zeitempfinden an. Nur eines schien immer sicher zu sein: Zeit verstreicht und kehrt nicht wieder. Wie beim Begriff „Raum“ mischt sich die vertraute Nähe des Phänomens mit Unerklärlichem.

„Wenn niemand mich danach fragt, weiß ich's“, schrieb um das Jahr 400 der Kirchenlehrer Aurelius Augustinus. „Will ich's aber einem Frageren erklären, weiß ich's nicht.“ So tröstete er sich mit der Erkenntnis: „Wenn nichts verginge, gäbe es keine vergangene Zeit, und wenn nichts käme, keine zukünftige, und wenn nichts wäre, keine gegenwärtige Zeit.“

Auch heute, mehr als anderthalb Jahrtausende später, ist das alltägliche Phänomen nicht befriedigend erklärt. Mehr noch: Im Rahmen der Chaos-Forschung kommen neue Qualitäten hinzu – die Zeit als die entscheidende Voraussetzung für nichtumkehrbare Prozesse, für die Entwicklung von „Nichtlinearitäten“, also für Chaos und Ordnung und natürlich für die

Der kreative Pfeil

Entstehung von Neuem im Universum.

An Versuchen, die Zeit wissenschaftlich zu erklären, hat es nicht gefehlt. Isaac Newton wollte im Jahr 1687 Klarheit bar jeder subjektiven Eindrücke haben: „Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge der Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand.“ Dieses Diktum des Begründers der klassischen Mechanik galt zwar zwei Jahrhunderte lang, war aber trotzdem nicht richtig.

Im Jahr 1883 hat der Physiker und Philosoph Ernst Mach gezeigt, daß Newtons „absolute Zeit“ leider nicht beobachtbar ist: Die Frage, ob eine Bewegung an sich gleichförmig verlaufe, habe gar keinen Sinn. Newtons „absolute Zeit“, kritisierte Mach, sei ein „absolut müßiger metaphysischer Begriff“ – ohne jeden Wert, jedenfalls für den Aufbau der Mechanik.

Aber auch das stimmte wieder nicht so ganz. Mach bestreit zwar zu Recht, daß die

„absolute Zeit“ sich für die Messung der Dauer eignet. Doch immerhin befriedigt Newtons Erklärungsversuch ein anderes Bedürfnis, das jede Definition der Zeit leisten muß: die Fülle der Ereignisse in einer zeitlichen Abfolge anzugeben. Schon bei zwei Ereignissen muß sich entscheiden lassen, welches früher war.

Newton hatte damit kein Problem: An jedem Punkt der absoluten Zeit hingen „gleichzeitig“ alle Raumpunkte des Universums; vor einem solchen, beliebig wählbaren Zeitpunkt lag jeweils die Vergangenheit, dahinter die Zukunft. An der Nahtstelle zwischen beiden – der „Gegenwart“ – wird Zukunft in Vergangenheit verwandelt. Auch die Kausalität war damit eindeutig geregelt: Jedes Ereignis der Vergangenheit konnte im Prinzip jedes Ereignis in der Zukunft beeinflussen.

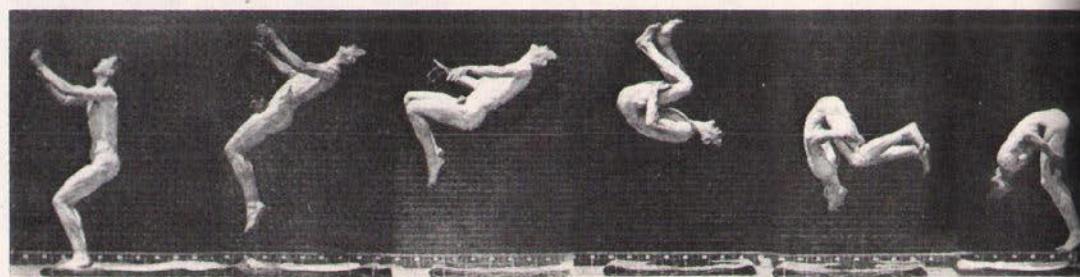
Dieses noch intuitiv einleuchtende Bild stieß erst Albert Einstein im Jahr 1905 um. Die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit erzwang eine

Revision des Newtonschen Kausalitätsbegriffs. Denn ein Ereignis kann ein anderes nicht kausal beeinflussen, wenn es sich dafür mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen muß. Daraus vermochte Einstein zu folgern: Niemand kann für zwei solche Ereignisse absolut entscheiden, welches früher und welches später war. Der Absolutheitsanspruch der Zeit war dahin.

Die moderne Physik hat sich damit einen Zeitbegriff geschaffen, mit dem sie bis heute erfolgreich arbeitet – in der Kosmologie ebenso wie in der Elementarteilchen-Physik.

Ungelöst bleibt nach wie vor ein wichtiger Aspekt: der Unterschied zwischen vergangener und zukünftiger Zeit. Hier macht unser Alltagsempfinden abermals zwingend glauben, daß Zukunft und Vergangenheit verschiedene Angelegenheiten seien. Jeder würde Carl Friedrich von Weizsäcker zustimmen, wonach „das Vergangene unabänderlich geschehen ist, das Zukünftige hingegen noch unbestimmt und durch unseren Willen beeinflußbar“.

Gegen solche Gewißheit, so scheint es, kann niemand angehen. Physiker tun es dennoch. Denn auf der Ebene der Naturgesetze gibt es zwischen Zukunft und Vergangenheit keinerlei Unterschied: Demnach könnte, was „vorwärts“ passiert, genausogut „rückwärts“ ablaufen. Die Molekülbewegung im Mikrokosmos etwa gehorcht exakt zeitumkehrbaren Gesetzen.



Salto rückwärts: Wenn Tempo nur durch Zeit beurteilt wird, kann Zeit selbst kein Tempo haben



»Wenn niemand
mich danach fragt, weiß
ich's. Will ich's aber einem
Fremden erklären,
weiß ich's
nicht«

Augustinus über die Zeit

Die Erfahrung, daß makroskopisch nicht geht, was mikroskopisch möglich ist, beschreiben Physiker im „Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik“: Die Unordnung – „Entropie“ – nimmt in einem abgeschlossenen System wie dem Universum zu. Die intakte Tasse auf dem Tisch, ein Zustand hoher Ordnung, kann am Boden zerbrechen und in einen Zustand niedriger Ordnung übergehen – aber nicht umgekehrt. Dieser eherne Erfahrungssatz beruht auf der Tatsache, daß es viel mehr unordentliche Zustände gibt als ordentliche. Nur ein Zustand läßt die Tasse ganz erscheinen, aber zerbrochen daliegen kann sie auf tausendfach unterschiedliche Weisen. So werden irreversible – nicht umkehrbare – Prozesse zur Erfahrungstatsache.

Wenn die Naturgesetze selbst die Richtung der Zeit nicht enthalten, muß deren Ursprung auf einer anderen Ebene liegen: in den Anfangszuständen. Wenn die Natur uns am Anfang der kosmischen Entwicklung eine – wie auch immer entstandene – globale Ordnung serviert, so ist es für Physiker nicht weiter verwunderlich, wenn danach die Entropie anwächst und uns damit die Vorstellung eines „Zeitpfeils“ beschert. Örtliche Ab-

weichungen vom Trend zur Unordnung sind allerdings in sogenannten „offenen Systemen“ fernab des thermodynamischen Gleichgewichts erlaubt: Wenn, wie etwa bei Lebewesen, die ständige Zufuhr von Energie das System im „Fließgleichgewicht“ hält.

Das Anwachsen der Entropie können Physiker schon am Beispiel des Verhaltens von drei Billardkugeln oder der Bahn eines Kometen um die Sonne demonstrieren: Hier kann eine strikt zeitumkehrbare Bewegung irreversibel und unvorhersagbar werden – die Welt der Naturwissenschaften gerät ins Chaos. Denn jeder noch so kleine „störende Einfluß“ – etwa die Anziehung des Jupiter auf den Kometen – wächst „nichtlinear“ an, so daß die berechnete Bahn sich von

der „exakten“ Anfangsbahn beliebig weit entfernen kann.

„Deshalb ist es für manche Systeme sinnlos, über ihre Newtonschen Bahnen zu sprechen“, sagt der russisch-belgische Chemie-Nobelpreisträger Ilya Prigogine. „Das sind Idealisierungen, die es in der wirklichen Welt nicht gibt.“ Der Komet „vergißt“ seine Vergangenheit, seine Zukunft wird unvorhersagbar.

Doch auch in einer chaotischen Welt ist nicht alles verloren. Zwar wird die Zukunft einzelner Kometen unberechenbar, wird die Zeit unumkehrbar. Aber das „mittlere Verhalten“ vieler Kometen läßt sich dennoch vorhersagen. So bleibt das Chaos gezähmt, während die Entropie wächst und die Zukunft weiterhin offen ist. □

Das schöpferische

von VOLKER SOMMER

Vishnu schläft. Ausgestreckt auf den Windungen der Riesenschlange Ananta – „Endlos“ – genießt er seinen Schlummer, halb untergetaucht auf den Wogen schaukeln. Im Ozean seiner eigenen unsterblichen Substanz verbringt der Herr der Zeiten die Nacht des Alls.

Vishnu träumt, während der Kosmos in ihm wächst wie ein ungeborenes Kind inmitten seiner Mutter. Nur dem heiligen Mann Markandeya ist es einmal vergönnt, das Schöpfungswerk des Gottes zu betrachten: Er erblickt Vishnu als strahlendes Kind; dann, auf dem Zweig eines Banyan-Baumes, als kleinen Jungen, der selbstvergessen und ohne alle Scheu inmitten endloser Weite spielt. Eine Weile geht dies Spiel, bis dem Nabel des unfehlbaren Schöpfers aller Welten eine wundervolle Lotosblume entspricht, deren tausend Blütenblätter leuchten wie die Sonne.

So erklären die Matsya-Purana, heilige Schriften des Hinduismus, die Er-schaffung der Welt. Viele Religionen kennen das Gleichnis vom Schöpfer als einem spielenden Kind – auch die jüdisch-christliche Tradition, obgleich dies mit dem Aufkommen des mechanistischen Weltbilds in Vergessenheit geriet. Doch nun, im ausge-

henden zwanzigsten Jahrhundert, erfährt das Spiel als schöpferischer Vorgang eine aufregende Rehabilitierung, hat doch auch die moderne Naturwissenschaft in ihm eine zentrale Metapher gefunden – und damit erneut in Frage gestellt, was Albert Einstein gegen den Zufall als wissenschaftliches Konzept einwandte: „Gott würfelt nicht!“

Leben – nichts als ein Zufallstreffer des kosmischen Spiels?

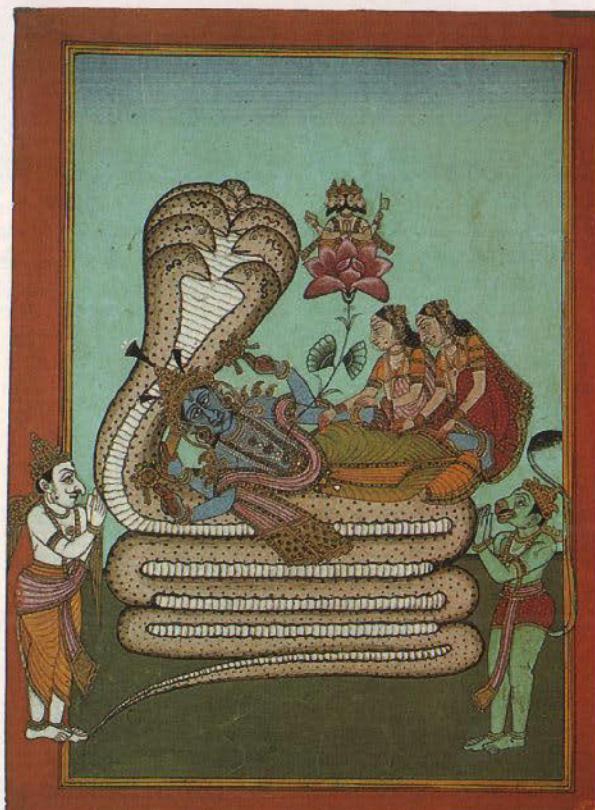
Schöpfung als Spiel: Ist die Welt nur das Ergebnis einer Kette von Zufällen und eines Satzes von Regeln? Der französische Biochemiker und Nobelpreisträger Jacques Monod hat in seinem 1970 erschienenen Bestseller „Zufall und Notwendigkeit“ die Lebensformen dieses Planeten als Gewinn-Nummern einer gigantischen Lotterie der Natur gedeutet. Ein gutes Jahrhundert nach Charles Darwin, dessen Evolutionstheorie auf dem Angebot von Vielfalt und der natürlichen Auslese der – zufällig – am besten angepaßten Organismen beruht, erklärte Monod das Leben selbst zu einem höchst unwahrscheinlichen und damit einmaligen Treffer des kosmischen Spiels.

Nichts, so grenzte sich Monod scharf gegen religiöse und manche philoso-

phischen Auffassungen ab, sei auf ein Ziel hin gerichtet. Nichtig sei der Glaube jener Menschen, die „in der Evolution den majestatischen Ablauf eines Programms entdeckten, das im Grundmuster der Welt vorgezeichnet war. Für sie ist deshalb die Evolution nicht wirklich Schöpfung, sondern lediglich ‚Offenbarung‘ der bisher ausgesprochenen Absichten der Natur.“ Vielmehr nehme die Evolution ihren Ursprung im „Unvorhersehbaren“ und stelle „gerade deshalb etwas

uneingeschränkt Neues dar“.

Fünf Jahre nach Monod präzisierten der Göttinger Nobelpreisträger Manfred Eigen und seine Kollegin Ruthild Winkler in ihrem Buch „Das Spiel“ das Postulat von der uneingeschränkten Zufälligkeit in einem entscheidenden Punkt: „Die durch selektive Bewertung erzwungene Vorzugsrichtung“ der Evolution bedeute „Lenkung, wenn nicht gar Zähmung des Zufalls“ (siehe Seite 72). Und heute legen auch eine Fülle von wis-



Vishnu auf der Ewigkeitsschlange Ananta: Indische Miniatur, 1790

Spiel

Im Tanz und im Spiel finden viele Religionen Gleichnisse für die Erschaffung der Welt – auch in der jüdisch-christlichen Tradition. Die Kreativität des Ungeplanten geriet zwar im Abendland mit dem Aufkommen des

naturwissenschaftlichen Weltbildes – »Gott würfelt nicht!«, sagte noch Einstein – in den Geruch der Unvernunft. Nun aber rehabilitiert die Forschung des Chaos das Spielerische als zentrales Element des Werdens

MYTHEN



Ein prächtig gekleideter Tänzer verkörpert den hinduistischen Schöpfergott Vishnu im südindischen Theyyam-Tanzdrama

senschaftlichen Arbeiten über das „deterministische Chaos“ und die „Selbstorganisation“ komplexer Systeme den Verdacht nahe, daß die Lotterie der Natur zwar – wie jedes Glücksspiel – Nieten und Treffer produziert, aber Gewinner auf Dauer bevorzugt.

Der Glaube an einen planenden Schöpfergott ist weitaus populärer als jene Tradition, die Gott kein zielgerichtetes Handeln zuspricht, sondern auch ihn eingebettet sieht in ein Wechselspiel von Zufall und Regelmäßigkeit. Faszinierend sind die Ähnlichkeiten zwischen diesem Stiefkind der Religion und dem deterministischen Chaos, dem neuen Hätschelkind der Naturwissenschaft, allemal. Und vielleicht helfen sie, einen gestörten Dialog wieder in Gang zu bringen.

Das biblische Buch der Genesis spricht zu Beginn von „Tohu-wa-bohu“, „Öde und Leere“. Aus solch bodenlos-dunklem, feuchtem Abgrund lassen die Schöpfergottheiten vieler Religionen die Welt entstehen: der jüdische „Elohim“ ebenso wie der Gott „Alatangana“ der Kono in Guinea, der russisch-altaische „Ulgan“ ebenso wie „Phan Ku“ im alten China, der – so geht die fernöstliche Genesis – aus der ungestalteten Masse eines kosmischen Eies erbrütet wird.

In der Familiengeschichte der griechischen Götter, wie sie Hesiod um 700 v. Chr. aufzeichnete, begann alles mit der gähnenden, ungeordneten Leere: Im Anfang war das Chaos. Dem Arzt Paracelsus im 16. Jahrhundert galt es als „materia prima“, als Urstoff der Schöpfung, während die Alchimisten es als „massa confusa“ umschrieben.

Christlichen Theologen bereiteten solche Vorstellungen erhebliche Kopf-

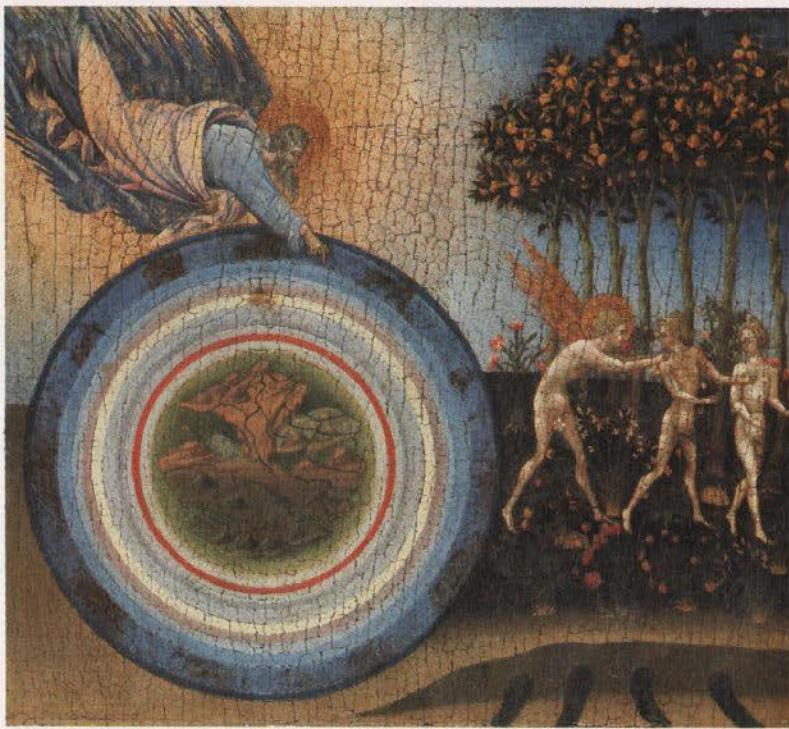
schmerzen. Sie fragten sich, ob Gott die Welt aus dem Nichts erschaffen – „creatio ex nihilo“ – oder aber das chaotische Tohu-wa-bohu bereits vorgefunden habe. Beide Möglichkeiten ließen Zweifel an seiner Allmacht aufkommen: Schuf er aus dem Chaos – wer hatte dann das Chaos geschaffen? Schuf er aus dem Nichts – was hatte ihn dazu bewogen? Wäre nämlich die Schöpfung notwendig gewesen, wäre Gott nicht ihr „freier Schöpfer“.

auch nicht in sich selbst, sondern im Wohlgefallen Gottes. Darum ist die Schöpfung ein Spiel Gottes, ein Spiel seiner grundlosen und unergründlichen Weisheit. Sie ist selbst der Spielraum für Gottes Prachtentfaltung.“

Das Alte Testament kennt sogar ein eigenes hebräisches Verb, um anzudeuten, daß der Schöpfergott mit seinen Möglichkeiten spielt: „Barah“ steht für das göttliche Her vorbringen, niemals aber für menschliches Schaffen.

Die Vorstellung von der nicht notwendigen Schöpfung deckt sich mit einer Definition des niederländischen Kulturhistorikers Johan Huizinga. „Alles Spiel ist zunächst und vor allem ein freies Handeln“, schrieb er in seinem 1938 erschienenen Werk „Homo ludens“ („Der spielende Mensch“). „Es wird nicht durch physische Notwendigkeit auferlegt und noch viel weniger durch sittliche Pflicht.“ Ähnlich hatte sich bereits Friedrich Schiller in seinen Briefen

Während der Erzengel Michael Adam und Eva aus dem Garten Eden weist, scheint der schwelende Gottvater die Welt wie im Spiel vor sich herzurollen: So sah der italienische Maler Giovanni di Paolo im 15. Jahrhundert »Die Erschaffung der Welt und Vertreibung aus dem Paradies«



Raum für die Entfaltung Gottes

„Gott ist frei“, erläutert Jürgen Moltmann, Professor für evangelische Theologie an der Universität Tübingen, die Überlegung, mit der sich christliche Denker aus dieser Zwickmühle zogen. „Aber er handelt nicht willkürlich. Wenn er etwas schafft, was nicht Gott ist, aber auch nicht nichts ist, so hat es seinen Grund

„Über die ästhetische Erziehung des Menschen“ geäußert: „Mitten in dem furchtbaren Reich der Kräfte und mitten in dem heiligen Reich der Gesetze baut der ästhetische Bildungstrieb unvermerkt an einem dritten, fröhlichen Reiche des Spiels und des Scheins, worin er dem Menschen die Fesseln aller Verhältnisse abnimmt und

ihn von allem, was Zwang heißt, sowohl im Physischen als im Moralischen entbindet.“

Biologische Definitionsversuche nehmen sich zwar nüchterner aus, laufen aber auf das gleiche hinaus: Als Spielverhalten – ob bei balgenden Hunden oder herumtollenden Katzen – gelten Verhaltensforschern „alle motorischen Aktivitäten, die keinen Zweck zu haben scheinen“, oder auch „diejenigen Verhaltensweisen..., die keinen unmittelbaren

Aus dem Ungeordneten entsteht die Welt. So glauben die Anhänger vieler Religionen. Aus dem Sumpf steigen zwei Brüder, die Sonne und der Mond: Papua-Tänzer auf Neuguinea verkörpern den Schöpfungsmythos ihres Volkes

**Der Himmel
hebt sich tanzend
aus dem Sumpf**

„Ernstbezug' ... besitzen“.

Wagnis gehört zum Spiel und Risiko – eben das Zufallselement. Sein vielleicht treffendster Gegenbegriff ist „Sorge“: Spiel erlischt augenblicklich, sobald Angst aufkommt. Huizingas Landsmann und Zeitgenosse, der Physiologe Frederik Jacobus Buytendijk, hielt denn auch das Glücksspiel für die Seele aller Spiele.

„Der Aion“ – Weltenlauf – „ist ein spielendes Kind“, postuliert der gri-

chische Philosoph Heraklit aus dem 6. Jahrhundert v. Chr. Der Aion, erläutert der Jesuit Hugo Rahner, ist König und Kind zugleich, sein Werk sinnvoll (also königlich), aber nicht notwendig (also kindlich).

Überall atmet in den Mythen vom göttlichen Spiel die Ahnung, daß die Welt nicht aus Zwang hervorgegangen ist, sondern aus einer weisen Freiheit. Nicht selten erscheint in alten Überlieferungen oder Kunstwerken ein kindlicher Schöpfergott,



dessen Spielzeug die Schöpfung ist: In der Grotte am Ida verfertigte die Amme Adrastea die „Sphaira“, den Weltball, um ihn dem heranwachsenden Zeus als Symbol seiner künftigen Macht zu überlassen; das Dionysos-kind ergötzte sich an den goldenen Äpfeln der Hesperiden als bunten Weltsymbolen; das Jesus-kind der mittelalterlichen Kunst trägt eine goldene Weltkugel spielend in der Hand.

„... und hatte mein Ergötzen an den Menschenkindern.“

Noch als Scheibe malt im 15. Jahrhundert der Italiener Giovanni di Paolo die Erde. Auf seinem Bild „Vertreibung aus dem Paradies“ schwebt Gott über dem Weltkreis – fast so, als rolle er ihn vor sich her.

An den Bewegungen eines unbekümmerten Kindes erschaut der Weltbetrüger, so interpretiert Hugo Rahner die alttestamentlichen Sprüche Salomos, die zu formende Schönheit des Kosmos. Dieses „Schoß-kind“, wie es in manchen Übersetzungen genannt wurde, ist die göttliche Weisheit, die vor allen Zeiten des Schöpfers Möglichkeiten auslotete: „Ich war dabei, als er den Himmel erstellte . . . , als er die Feste der Erde umriß. Da war ich der Liebling an seiner Seite, war Tag für Tag sein Ergötzen, indem ich die ganze Zeit vor ihm spielte. Da spielte ich auf dem weiten Rund der Erde und hatte mein Ergötzen an den Menschenkindern.“

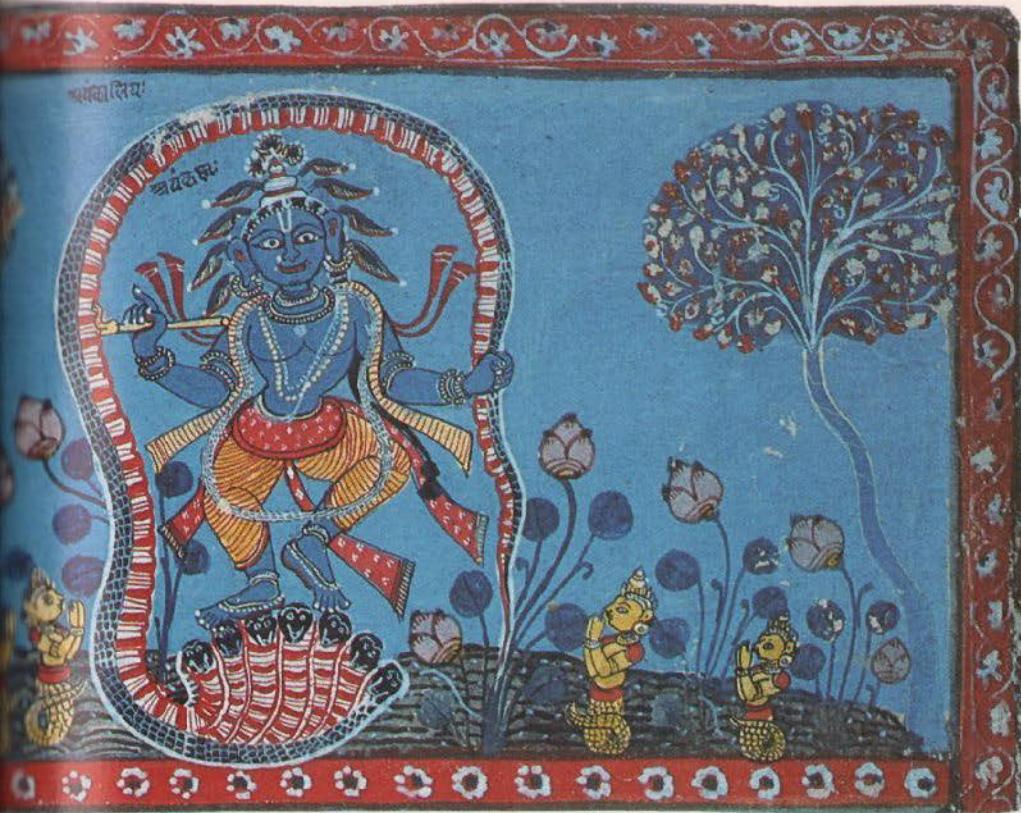
Auch der katholische Kirchenlehrer Thomas von Aquin verglich die „Pflege der Weisheit“ mit dem Spiel, weil sie ebenso wie „das spielende Tun nicht auf ein anderes zielt, sondern um seiner selbst willen gesucht wird“.



Der Weltenlauf ist König und Kind zugleich

Krishna mit seiner Flöte verkörpert den spielenden Gott wie kaum ein anderer in der hinduistischen Mythologie. Doch im Epos »Mahabharata«, das Kathakali-Tänzer in einem südindischen

Tempel aufführen, verlieren die mythischen Pandava-Brüder in einem Würfelspiel ihr Reich an ihre Rivalen, die Kauravas



Die spielende Weisheit übersetzte der Kirchenvater Tertullian auch als „modulans cum ipso“ (das „Mitmodelnde“) oder „componens cum ipso“ (das „Mitmalende“) der Schöpfung. Die göttliche Weisheit wurde als der „Logos“ gedeutet, das ewig bei Gott wohnende Wort. Denn dessen Zaubermacht steigert sich beim Schöpfer zur höchsten Vollkommenheit: „Da sprach Gott: Es werde Licht! Und es ward Licht.“ Der „erhabene Logos“, befand der frühchristliche Theologe Gregor von Nazianz, „er spielt. Mit buntesten Bildern schmückt er, wie's ihm gefällt, auf jegliche Weise den Kosmos.“

Die Erschaffung der Welt durch das Wort – griechisch: „Mythos“ – ist Thema vieler Schöpfungsepen. In der babylonischen Schöpfungsgeschichte beweist Marduk seine göttli-

che Macht, indem er Dinge durch befehlendes Wort ins Dasein ruft; im „Popol Vuh“ der Quiché-Maya Guatemalas heißt es von den Gottheiten: „Sie brachten ihre Worte zusammen und vereinigten sie mit ihren Gedanken... Sie schufen die Erde, indem sie sagten ‚Erde!‘“

Die Reflexion der Glasperlen symbolisiert ständigen Wandel

Das aus der Tiefe der Zeiten überkommene Wechselspiel von Zufall und Gesetz vollendet sich nun auch für den Menschen in neuen – geistigen – Spielmöglichkeiten. Manfred Eigen und Ruthe Winkler erblicken es „in der Unerschöpflichkeit unserer Ideen“.

Hermann Hesse hat in seinem „Glasperlenspiel“ die bunte Vielfalt des Logos auf alle Aspekte unse-

rer Kultur erweitert: „Theoretisch ließe mit diesem Instrument“ – den Glasperlen – „der ganze geistige Weltinhalt sich im Spiel reproduzieren.“ Die Reflexion der Glasperlen symbolisiert ständigen Wandel, ständige Metamorphosen. „Der Mensch“, resümieren Eigen und Winkler, „ist Teilnehmer an einem großen Spiel, dessen Ausgang für ihn offen ist. Er muß seine Fähigkeiten voll entfalten, um sich als Spieler zu behaupten und nicht Spielball des Zufalls zu werden.“

Viele Kulturen verglichen die ungebundene Freiheit des Menschen im Spiel mit der Freiheit der Götter. Der Mensch, argumentierte Plato, sei „nur ein Spielzeug in der Hand Gottes, und eben das ist in Wahrheit gerade das Beste an ihm. Jedermann also, Mann wie Frau, muß diesem Ziele nachstreben und die schönsten Spiele zum

eigentlichen Inhalt seines Lebens machen.“ Wenn der griechische Philosoph demgegenüber betont, Gott sei „allen seligen Ernsten wert“, meint er, so Hugo Rahner, das Menschen Geschlecht dürfe nicht so ernst genommen werden, als sei in ihm aller Sinn der Dinge beschlossen.

„Die Berge hüpfen wie die Lämmer, die Hügel wie die jungen Schafe“

Der alt und weise gewordene Plato, interpretiert Rahner dessen Worte, wisse „um die Mitte zwischen Ernst und Scherz, zwischen Tragik des Daseins und der heiter vertrauensvollen Hingabe an das Spiel des Lebens“. Gelassene Heiterkeit ist freilich nicht jedermanns Sache angesichts der Vorstellung, der Mensch sei ein Spielzeug der Götter. Diese Preisgegebenheit erzeugt Ängste, die häufig in Kulthandlungen sichtbar werden, wenn Menschen ihre eigene „Gespieltheit“ spielen. So soll durch Opfer, Gesang und Ritual der Gottheit Huld gewonnen werden.

Besonders der Tanz verheißt die Befreiung vom einengenden irdischen Dasein: die Verwandlung in einen ekstatischen Zustand, frei von den Bindungen des körperlichen Ich. Die Anhänger vieler Religionen stellen sich deshalb das selige Leben im Jenseits als wundervoll gelösten, glückseligen Tanzreigen vor. Sogar das Spiel der göttlichen Weisheit vor Gott wird gelegentlich als „Tanz“ übersetzt. „Das ganze Spiel“, schreibt Hugo Rahner, „das der Logos zum Entzücken des Vaters auf dem Erdkreis aufführt, sein kosmischer Tanz auf dem Weltenrund, ist nur wie eine spielende Andeutung dessen, was seit Urzeiten

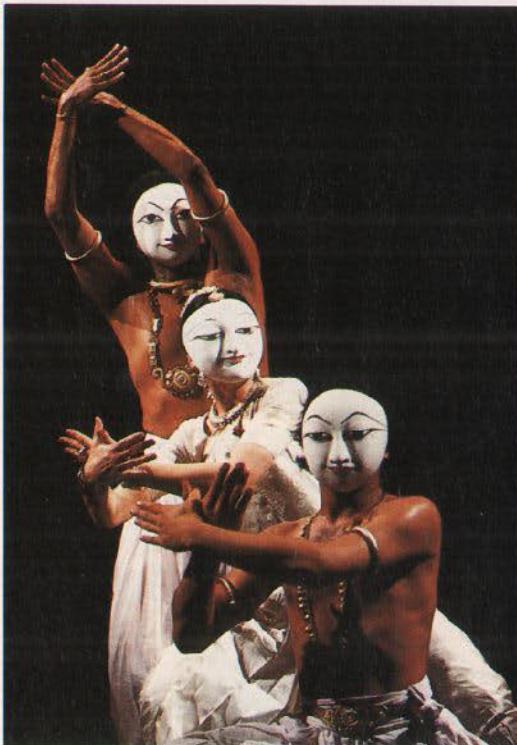
in den göttlichen Archetypen der Ewigen Weisheit ruhte und was sich enthüllen soll, wenn der Tanz der Erde zu Ende geht.“ Vom Tanz einer erlösten Schöpfung singt der Psalm 114: „Die Berge hüpfen wie die Lämmer, die Hügel wie die jungen Schafe.“

Einen Reigen Christi, den er nach dem letzten Abendmahl im Saale mit seinen Jüngern tanzte, beschreiben die im 2. Jahrhundert in der frühen Kirche weitverbreiteten Johannesakten. Diese letzte Szene vor dem Weg zur Gefangennahme in Gethsemane spiegelt ein Gelöstsein, eine Gelassenheit Jesu Christi angesichts seiner Passion wider. Auf der Überlieferung dieses Reigen basiert John Neumeiers vielbeachtete Hamburger Ballettinszenierung von Bachs „Matthäus-Passion“.

Der kosmische Tanz spielt im Hinduismus eine zentrale Rolle: Da macht der ekstatische Reigen der Kuhirtinnen mit dem flötenspielenden Gott Krishna durch die liebende Verschmelzung vergänglicher



Der Tanz, das Leben und der Tod



Der Tanz als Urbild des Werdens und Vergehens: Mit Szenen aus dem altindischen »Ramayana«-Epos verbindet eine maskierte französische Tanzgruppe östliche Mystik und westliche Choreographie. Und Shiva, der zerstörende Gott der Hindus, hält die Welt im Rhythmus seiner Glieder in Bewegung – bis er sie derinst in einem Flammenkreis zertanzt

und göttlicher Leiber die Unterschiede zwischen irdischer und himmlischer Sphäre vergessen; unter 25 „spielenden Offenbarungen“ des Gottes Shiva ragt prominent das grandiose Bild vom wilden Tanz heraus, der das Ende eines kosmischen Schöpfungszyklus markiert.

Wenn Shiva die Welt zertanzt, hat Vishnu Zeit für ein neues Spiel

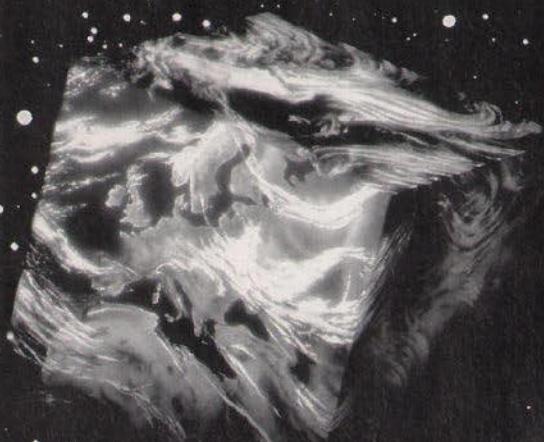
Indische Bronzestatuen des 10. und 12. Jahrhunderts bilden Shiva als vierarmigen „König der Tänzer“ ab. Die beiden oberen Hände repräsentieren das dynamische Gleichgewicht zwischen Weltentstehung und -zerstörung: Sie halten eine Trommel als Symbol des Tones, des Vermittlers göttlicher Wahrheit, und eine Flamme, das Element der Vernichtung. Die zweite rechte Hand ist zum Zeichen „Fürchte-dich-nicht“ erhoben, die zweite linke Hand verweist auf den erhobenen linken Fuß, der für die Gläubigen Zuflucht und Erlösung bedeutet.

Wenn der Zerstörer Shiva, so geht die Legende, dereinst die Welt in einem Flammenmeer zertanzt hat, wird sich erneut Stille ausbreiten. Dann gibt sich der Schöpfergott Vishnu erneut seinem visionären Schlummer hin: Zeit für ein neues Spiel, ein neues Glück.

Spiel ist jenseits von Vernunft. Es hat seinen Sinn in sich. „Da es so gespielt wird“, sagt die Hauptfigur in Samuel Becketts absurdem Theaterstück „Endspiel“, „spielen wir es eben so.“ □

Der Göttinger Anthropologe und Theologe Dr. Volker Sommer, 35, hatte während seiner Forschungsaufenthalte in Indien nicht nur Tempelaffen beobachtet, sondern sich auch in die hinduistische Mythologie vertieft. Er hat das Buch über „Die Affen“ in der GEO-Bibliothek und Beiträge in GEO-Wissen Nr. 1 und 2/1989 verfaßt.

Wäre doch gelacht, wenn wir die Erde nicht in den Griff bekämen. Oder?



©WWF 569

Womit sollen wir beginnen: Daß in Afrika, Südamerika und Südostasien kerzengerade Schneisen in den Urwald führen, damit der tropische Regenwald besser ausgebautet werden kann? Daß man in Frankreich versucht, die Loire, den letzten unregulierten Strom Mitteleuropas, aus Profitinteresse zu begradigen? Oder daß z.B. auch bei uns die natürlichen Windungen der Flüsse und Bäche allzuoft wirtschaftlichen Nutzräumen weichen mußten. Nein. Reden wir lieber über die mehr als

drei Millionen WWF-Mitglieder, die begriffen haben, daß man die Natur vor menschlichem Raubbau schützen muß, wenn man der Erde helfen will. Und die Sie bitten, sich ihnen anzuschließen.



Mensch, die Zeit drängt.

Informieren Sie mich bitte ausführlicher über die Erfolge und Ziele des WWF.

Ich habe mich zu einer ständigen Unterstützung entschlossen und möchte Mitglied werden.

Name: _____

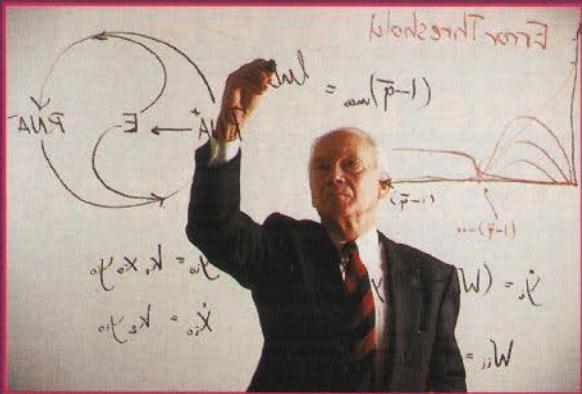
Straße: _____

PLZ/Wohnort: _____

Umweltstiftung WWF-Deutschland
z. H. Herrn Dr. Dietrich W. Haag
Postfach 70 11 27, 6000 Frankfurt/M. 70.

5420

Das Leben, so vermutet der Göttinger Nobelpreisträger Manfred Eigen, ist





durch Selbstorganisation

von Molekülen entstanden

EVOLUTION

Als wär's ein Finger von oben, berührt ein Laserstrahl das Reaktionsgefäß einer »Evolutionsmaschine« im Göttinger Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie. Fluoreszenzlicht verrät die Konzentration der Nukleinsäuren, die bei Evolutionsexperimenten entstehen. Den geistigen Hintergrund dieser Versuche bildet Manfred Eigens Theorie der molekularen Evolution. Diese soll die Prinzipien erhellen, nach denen vor Urzeiten auf der wüsten und leeren Erde Leben entstanden ist

Im Anfang warder Hyper- zyklus

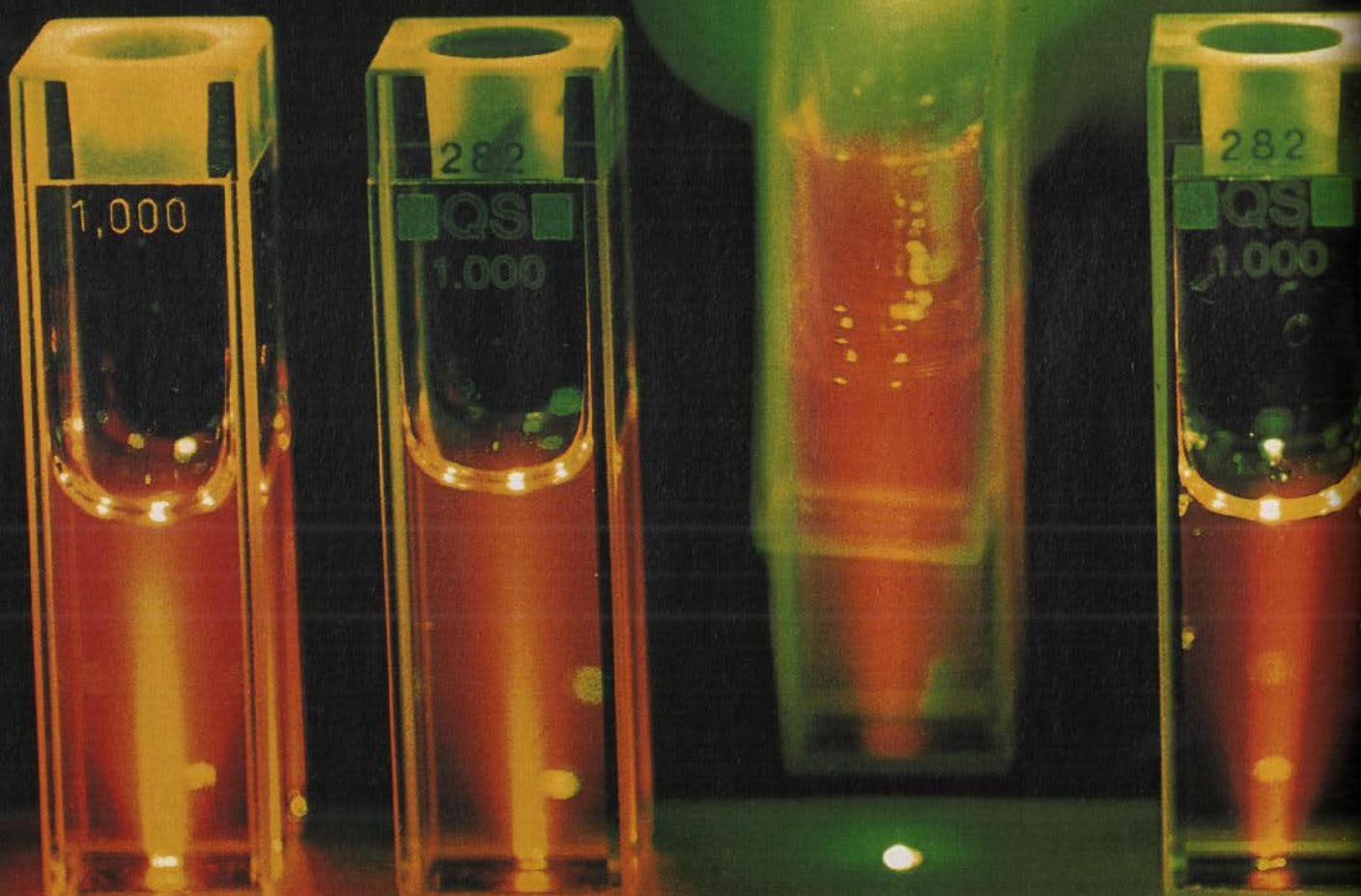


Warten, was die Moleküle machen



Geduld gehört zum experimentellen Spiel mit den molekularen Bausteinen des Lebens. Vor einer »Evolutionsmaschine« prüft Manfred Eigens Mitarbeiter Andreas Schwienhorst, wie weit sich ein Virus-Stamm im angeleuchteten Reaktionsgefäß entwickelt hat. Sein amerikanisch-chinesischer Kollege John Yin nutzt eine Meßpause für ein Spiel auf dem Cello







**Wo Licht
auf die Anfänge des
Lebens fällt**

Je stärker die Reaktionslösung in den Küvetten im von unten eindringenden Laserstrahl leuchtet, desto mehr RNA-Moleküle enthält sie. Spezielle RNA-Mutanten macht Björn Lindemann unter der UV-Lampe sichtbar. Evolutionsexperimente mit diesen Molekülen sind für die Göttinger Forscher besonders interessant, weil RNA als frühestes Erbmaterial gilt und damit als Schlüsselsubstanz der Lebensentstehung

ine labyrinthische Betonburg ist das Göttinger Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie: Schon wieder weist mich eine ausgestreckte Hand zurück in den abendlich erleuchteten Laborflur, aus dem ich gerade gekommen bin. „Abteilung Eigen? Turm vier, erster Stock!“ Diesmal gehört die Hand einem weißbikittelten jungen Japaner. Ist „Schloß Eigenstein“, wie manche den Modern-Times-Bunker auf dem Nikolausberg nennen, so verwirrend gebaut, damit nur ausreichend intelligente Besucher den Weg ins Allerheiligste finden?

Manfred Eigen erhielt 1967 den Nobelpreis für seine Untersuchungen extrem schneller chemischer Reaktionen. Doch die Faszination, die er heute ausstrahlt, verdankt er weniger diesen Erkenntnissen. Weit über die Wissenschaft hinaus wirken vor allem seine jüngeren Ideen, die an die Grundlagen unseres Selbstverständnisses als Lebewesen röhren: Eigens Abteilung versucht heute nichts Geringeres, als das erste Kapitel der Genesis neu zu schreiben. Theoretisch und experimentell erforschen die Wissenschaftler, wie vor Milliarden von Jahren auf der wüsten und leeren Erde naturgesetzlich die ersten lebendigen Gebilde entstehen konnten.

Chemie bedeutet hier im Institut auch Philosophie. Den Aufbruch zu diesem geistigen Abenteuer hatte Eigen zu Beginn der siebziger Jahre mit einem theoretischen Bravourstück ermöglicht: Er zeigte, daß aus lebloser Materie unter bestimmten Bedingungen zwangsläufig „Molekülgesellschaften“ entstehen, die zur Evolution befähigt sind – durch die „Selbstorganisation“ von Makromolekülen.

Manfred Eigen an der Tafel seines großen, neonleuchteten Arbeitszimmers: Fast unaufhörlich lächelt er, ein 62jähriges Wunderkind. Stolz zeigt er einen Brief des amerikanischen „Science Citation Index“, der ihm bescheinigt, zu den meistzitierten Autoren seines Fachgebiets zu gehören.

Ob er schon als Dreizehnjähriger bei seinem ersten öffentlichen Klavierkonzert dieses olympische Lächeln auf dem Gesicht gehabt hat? Ich kann es mir gut vorstellen.

Nichts in diesem Zimmer verrät dem Unbefangenen, daß Eigen hier über das „Geheimnis aller Geheimnisse“, wie Charles Darwin die Entstehung des Lebens genannt hat, nachdenkt. Zwar liegen ein paar Fossilien auf dem Fenster-

brett, doch sie sind Dekoration. Darwin war um die Welt gefahren, hatte Unmenige an Tier- und Pflanzenproben gesammelt, bevor er 1859 seine epochale Theorie von der „Entstehung der Arten“ veröffentlichte. Eigen hätte seine Evolutionstheorie – nur mit Papier und Kugelschreiber ausgerüstet – in einer Klosterzelle entwerfen können.

„Ich bin Physiker“, betont Manfred Eigen immer wieder, und so sieht die Tafel auch aus. Gleichung auf Gleichung entwickelt er, Formeln, die zeigen sollen, daß schon bei der Betrachtung der chemischen Reaktionen in der „Ursuppe“ – dem theoretisch postulierten Gebräu aus Wasser und organischen Molekülen auf der noch unbelebten Erde – „so etwas wie Darwin herauskommt“: eine von Mutation und Selektion gesteuerte, gesetzmäßige Evolution von Makromolekülen. Eine Entwicklung, in deren Verlauf sich die Materie in immer komplexerer Weise selbst organisiert: Evolution ist, sagt der Physiker, „ein Spiel mit wenigen festen Regeln und offenem Ausgang“, das Gras und Kraut, Fische, Vögel und schließlich den von Eigen so geliebten Mozart hervorgebracht hat.

Doch käme Charles Darwin jetzt herein, für einen Abend mit dem Göttinger Nobelpreisträger aus dem Himmel beurlaubt, wäre er wohl erst einmal recht befreit über das abstrakte Treiben, mit

dem hier angeblich seine Evolutionsregeln aus Gesetzmäßigkeiten der unbelebten Materie hergeleitet werden. Wahrscheinlich versteünde der Entdecker des Prinzips der natürlichen Zuchtwahl zunächst kein Wort vom Vortrag des Max-Planck-Direktors über die „Differentialgleichung der Evolution“, über „Wertfunktionen“ und „katalytische Kopplungen“, über „Hyperzyklen“ und „Quasi-Spezies“. Was hat das alles mit dem „Geheimnis aller Geheimnisse“ zu tun?

Schon seine Fragestellung müßte Eigen dem Gast aus dem Himmel erklären: Darwin hatte angenommen, daß alle Organismen von wenigen Lebewesen abstammen, vielleicht einem einzigen. Doch woher diese Urlebewesen gekommen sein sollten, war ein Rätsel geblieben.

Die materiellen Grundlagen der Vererbung sind erst seit Mitte dieses Jahrhunderts bekannt: Die genetische Information ist auf fadenförmigen Nukleinsäuren gespeichert. Deren Bausteine, die Nukleotide, sind zu langen Ketten aneinander gereiht und bilden die „Buchstaben“ eines „Textes“: der Erbinformation. Eine molekulare Maschinerie in den Zellen „liest“ diese Information und übersetzt sie nach den Regeln des genetischen Codes in eine andere molekulare Sprache: in Ketten aus Aminosäuren, die sich zu Eiweißmolekülen falten, den Bau- und Steuerstoffen aller Organismen.

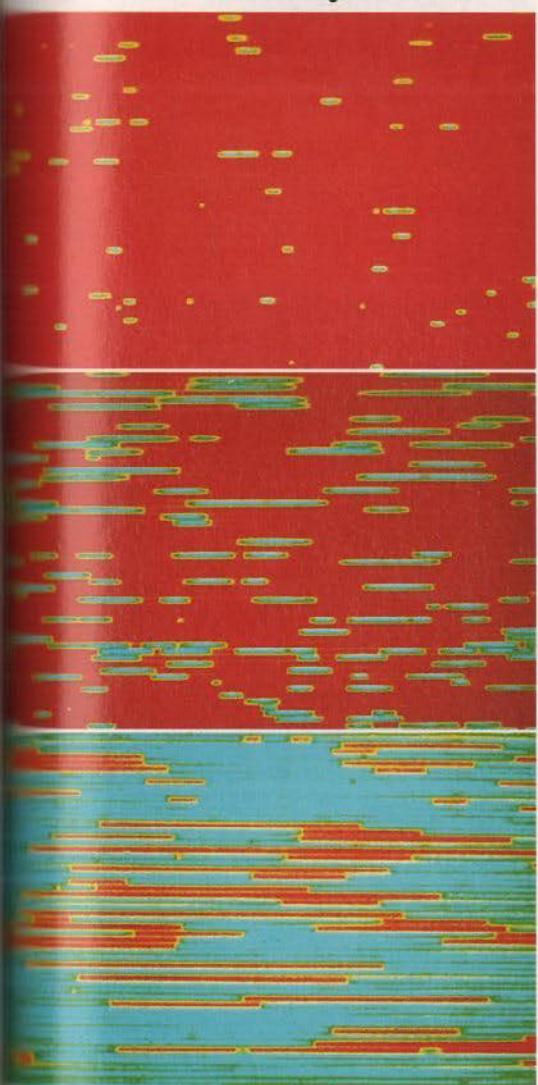
Nun erst konnte die Frage nach dem Ursprung des Lebens präzise gestellt werden: Können die Nukleinsäuren und Eiweiße (Proteine), ohne die es nicht einmal simple Zellen gäbe, allein auf Grund

Erfolgreiche Mutanten ziehen die längsten Spuren



Am Monitor verfolgen Mitarbeiter Manfred Eigens die Evolution von RNA-Molekülen

Diese Sequenz von Monitor-Bildern illustriert, wie sich unterschiedliche RNA-Moleküle in einem »Kapillar-Reaktor« entwickeln. In dieser von John McCaskill und Günter Bauer entwickelten Evolutionsmaschine sind untereinanderliegende Glasröhrenchen – »Kapillaren« – mit einer Lösung (rot) gefüllt, die auch RNA-Moleküle (blau) enthält. Wenn sich diese Makromoleküle vervielfältigen, werden die blauen Streifen länger. Fehler beim Kopieren lassen auch Mutationen entstehen, die sich schneller vermehren als andere: Diese »filtern« Moleküle erzeugen in der gleichen Zeit längere Streifen



von Naturgesetzen entstehen? Pointierter ausgedrückt: Kann „Information“ – also etwas Nichtstoffliches und damit „Geistes“ – sich streng nach den Gesetzen der Physik und Chemie entwickeln?

In den fünfziger Jahren begannen Wissenschaftler in Laborgläsern chemische Vorgänge in der Uratmosphäre zu simulieren. Diese konnte noch keinen freien Sauerstoff enthalten haben und war wahrscheinlich ein Gemisch aus Ammoniak, Methan, Wasserdampf und anderen Gasen. Die Experimente suggerierten, daß die Kluft zwischen unbelebter und belebter Natur vielleicht gar nicht so tief sei: Die Umweltbedingungen auf der jungen Erde – etwa Blitze oder die ultraviolette Strahlung der Sonne – scheinen die Bildung einfacher organischer Moleküle ermöglicht zu haben, darunter sowohl Nukleotide als auch Aminosäuren.

Hätten sich diese biochemischen Bausteine, so spekulierten Forscher, nicht auch in weiteren natürlichen Reaktionsschritten in der Ursuppe anreichern, zu Nukleinsäurefäden und Proteinen verbinden und schließlich eine primitive „Urzelle“ bilden können? Das „Geheimnis aller Geheimnisse“ schien so gut wie enträtselt zu sein: als „Münchhausen-Trick“ der Materie, bei dem sich das Leben selbst aus dem Sumpf des Unbelebten zog.

Doch die Wahrscheinlichkeit, daß auch nur die molekulare Maschinerie einer noch so primitiven Zelle rein zufällig entsteht, ist fast Null: Schon das Erbmolekül eines Bakteriums besteht aus etwa einer Million Nukleotiden – undenkbar, daß solch ein sinnvoller „Text“ von der Länge des Neuen Testaments sich zufällig aus herumschwimmenden „Buchstaben“ von selbst zusammensetzt.

»Unmöglich« – das ist das rechte Wort, den Ehrgeiz Manfred Eigens zu stimulieren

Aus der erdrückenden Unwahrscheinlichkeit zog der französische Molekularbiologe und Nobelpreisträger Jacques Monod in den sechziger Jahren eine konsequente Schlußfolgerung: Die Suche nach Gesetzen der Lebensentstehung sei hoffnungslos, da das Erscheinen der ersten Zelle ein grandioser Zufall gewesen sei, ein praktisch unmöglich wiederholbarer, einmaliger Betriebsunfall der Natur. Deshalb sei die Erde mit Sicherheit der einzige belebte Planet im All.

Gegen eine Theorie der Entstehung des Lebens gemäß physikalisch-chemischen Gesetzen sprach zudem der „zweite Hauptsatz der Thermodynamik“. Dieser auch „Entropie-Satz“ genannten kosmischen Grundregel zufolge kann – grob ge-

sprochen – nur die „Unordnung“ des Universums, nicht aber die „Ordnung“ wachsen. Eine „Selbstorganisation“ der Materie zu höchst geordneten Organismen schien deshalb physikalisch unmöglich zu sein – ein Stachel im Selbstverständnis der Naturwissenschaftler: Sollte Leben für alle Zeiten nur als „Wunder“ eines Schöpfergottes erklärt werden können?

„Unmöglich“ – das ist das rechte Wort, den wissenschaftlichen Ehrgeiz Manfred Eigens zu stimulieren. Den Nobelpreis hatte er für die Messung der Geschwindigkeit angeblich „unmeßbar“ schneller chemischer Reaktionen erhalten. Und auch für die „unmögliche“, rein physikalisch-chemische Entstehung des Lebens aus der Ursuppe zeigte er einen Weg.

Im »Fließgleichgewicht« kann der Trend zur Unordnung umgekehrt werden

Zentrale Voraussetzung für die Entstehung von Leben aus toter Materie ist ein einschränkender Nebensatz im Entropie-Gesetz. Die „Unordnung“ muß nur in sogenannten abgeschlossenen Systemen wachsen, die keinen Austausch mit ihrer Umgebung haben – also zum Beispiel im gesamten Universum. In „offenen Systemen“ sind dagegen, wie Theoretiker der „irreversiblen Thermodynamik“ im Laufe unseres Jahrhunderts begründen konnten, „Fließgleichgewichte“ möglich: In ihnen kann der universale Trend zur Unordnung umgekehrt werden, solange von außen Energie zufließt – hier können geordnete Strukturen entstehen.

Ein einfaches Beispiel für ein offenes System im Fließgleichgewicht, dessen Struktur erhalten bleibt, während Energie und Materie durch es hindurchströmt, ist die Flamme einer Kerze. Höchst komplexe offene Systeme sind alle Lebewesen – von der Mikrobe bis zum Menschen.

Damit war eine wichtige Voraussetzung für Eigens Theorie geschaffen. Der Aufstieg aus der Ursuppe zu Mozart begann, so postulierte der Göttinger Physiker, als sich herumschwimmende Nukleotide zu kurzen Nukleinsäureketten zusammenlagerten. Diese Ketten vervielfältigten sich, manche effektiver als andere. Ein „Wettbewerb“ entstand unter den Molekülen: Die Kopien der effektiveren Nukleinsäuren verdrängten allmählich die ihrer Konkurrenten. Durch „Fehler“ beim Kopieren entstanden immer wieder neue Nukleinsäure-Varianten, darunter noch effektivere als die bis dahin effektivsten. Mutation und Selektion verbesserten die Reproduktion so lange, bis nur Moleküle übriggeblieben waren, die von

keiner Konkurrenz mehr verdrängt werden konnten. Auf diese Weise entstand schon in der Ursuppe gesetzmäßig Information – gemäß Darwins Prinzip vom „Überleben des Tauglichsten“.

Doch damit war die Evolution des Lebens, bevor sie recht begonnen hatte, in einer Sackgasse gelandet. Denn die molekularen Gewinner konnten kaum mehr als hundert Nukleotide lang gewesen sein, wie Manfred Eigen erklärt: „Die hohe Fehlerrate beim Kopieren erlaubte einfach keine längeren Nukleinsäuren – die Information größerer Moleküle würde nach wenigen Vervielfältigungen unweigerlich zerfließen.“

War die erste Evolution der Nukleinsäuren also nur ein bedeutungsloses Kurosum? „Das Leben“, spinnt Eigen den Faden weiter, „startete sicher mit mehr Erbinformation, als die durch Selektion optimierten Nukleinsäure-Moleküle bieten konnten. Es ist nur eine einzige Möglichkeit denkbar, wie sich in der Ursuppe größere Informationsmengen verkoppeln konnten: Es muß Nukleinsäuren gegeben haben, die nicht konkurrierten, sondern kooperierten, Nukleinsäuren, die sich gegenseitig sehr wirksam bei der Vermehrung halfen.“

Zusammenarbeit statt Wettbewerb ließ demnach die Moleküle die nächste Stufe auf dem Weg zum Leben erklimmen. Aber welche konkreten Moleküle kooperierten?

„Fragen Sie mich nicht nach der Realität“, antwortet Eigen. „Ich bin Physiker und versuche nur, die allgemeinen Gesetze der Lebensentwicklung zu verstehen. Über den tatsächlichen Verlauf der molekularen Evolution werden wir wohl nie mals genau Bescheid wissen.“

Die allgemeinen Gesetze: Wieder kommt die Mathematik ins Spiel. Und die zeigt, so Eigen, daß die wohl einfachste Form der Kooperation mehrerer Nukleinsäuren ein „katalytischer Kreis“ ist: Nukleinsäure A unterstützt – „katalysiert“ – die Vervielfältigung von Nukleinsäure B, ohne sich dabei selbst zu verändern; Molekül B hilft Molekül C, C hilft D und so weiter, bis irgendwann eine Nukleinsäure die Vermehrung von Molekül A fördert und so den Kreis schließt. Ein solcher „Hyperzyklus“ kann aus zwei kooperierenden Nukleinsäuren, aber auch aus vielen Tausenden bestehen (siehe Kasten S. 83).

Die Kopplungen zwischen den Erbmo lekülen machen den katalytischen Kreis, mathematisch gesehen, zu einem „nichtlinearen System“ – zu einem Ganzen, das mehr als nur die Summe seiner Teile ist. Die Mathematik zeigt darüber hinaus, daß ein Hyperzyklus die Tendenz besitzt, sich

durchzusetzen: Die in ihm verbundenen Nukleinsäuren dominieren nicht nur sehr schnell alle Moleküle außerhalb des Hyperzyklus, sie lassen auch keinen zweiten katalytischen Kreis hochkommen. Vielleicht sind an verschiedenen Orten unterschiedliche Hyperzyklen entstanden, doch haben sich – wie Eigen aus biochemischen Ähnlichkeiten der heute lebenden Organismen schließt – nur die Nachkommen eines einzigen durchgesetzt.

Eigens Gedanke, daß unsere Existenz auf einen einzigen Hyperzyklus zurückgeht, faszinierte Fachleute und Laien. Doch detaillierte Vorstellungen, wie dieser katalytische Kreis entstanden sein könnte, sind nur schwer zu gewinnen. Denn in heutigen Lebewesen übernehmen Proteine – genauer: Enzyme – katalytische Funktionen.

Abermals baut sich eine schwierig zu überwindende Erklärungshürde auf. Falls Nukleinsäuren als Katalysatoren selbst nichts taugen, dann sind nur solche Erbmoleküle als Bestandteile eines Hyperzyklus denkbar, die ihre Information

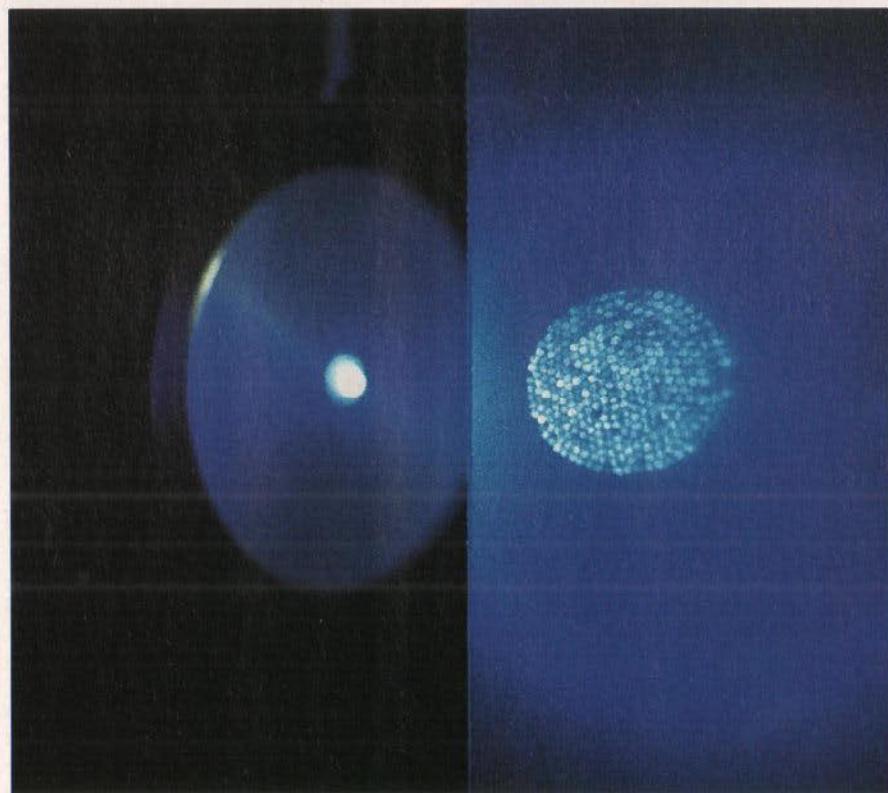
in Proteine „übersetzen“ können: Nukleinsäure A erzeugt Protein A, das die Vervielfältigung von Nukleinsäure B unterstützt; Nukleinsäure B erzeugt Protein B, das die Vermehrung von Nukleinsäure C fördert und so weiter – bis schließlich ein Protein mit Nukleinsäure A kooperiert und den Kreis schließt.

War die Entstehung des Hyperzyklus ein praktisch unwiederholbarer Zufall?

Der Haken eines solchen Verbunds aus Nukleinsäuren und Proteinen: Er funktioniert nur, wenn eine aufwendige molekulare Maschinerie die Information der Nukleinsäuren nach den Regeln des genetischen Codes in Proteine übersetzt. Wenn also der Hyperzyklus, der das Leben auf der Erde hervorbrachte, aus Nukleinsäuren und Proteinen bestand, muß gleichzeitig mit ihm der genetische Code entstanden sein, der die Übersetzung von Nukleinsäuren in Proteine regelt. Das aber bedingt von Anfang an ein recht komplexes – will sagen: fast schon lebendes – Gebilde, dessen Entstehung wiederum höchst unwahrscheinlich erscheint.

· Sollte Monod – wenn auch mit verändertem Argument – doch recht behalten?

Gebündelte Laserstrahlen durchleuchten die Ursuppe





Roderich Weise, der Elektroniker in Manfred Eigens Forschungsgruppe, arbeitet am Prototyp einer neuartigen Versuchsapparatur. Um Evolutionsprozesse anzuregen, fährt ein mechanischer Arm mehrere RNA-Proben sehr schnell von kalten in heiße Zonen und umgekehrt. Ein Bündel von Laserlicht führenden Glasfasern (Bild links) erlaubt, die RNA-Konzentration in sehr vielen Gefäßen gleichzeitig zu bestimmen

War die Entstehung des Hyperzyklus ein praktisch unwiederholbarer Zufall?

So sehr Eigen und seine Mitarbeiter auch rechneten – Monod Stachel blieb. Doch vor wenigen Jahren gewann ihr beharrlicher Glaube an den Hyperzyklus als notwendige Stufe auf dem Weg zum Leben an Plausibilität: Eine Entdeckung der amerikanischen Biochemiker Sidney Altman und Thomas Cech – 1989 mit dem Nobelpreis geehrt – machte simplere Hyperzyklen denkbar, die nicht mehr notwendigerweise aus Nukleinsäuren und Proteinen bestehen müssten. Denn auch Moleküle aus Ribonukleinsäure (RNA) können, wenn sie zu komplizierten Knäueln – „Ribozymen“ – gefaltet werden, ähnlich wie Enzyme als Bio-Katalysatoren wirken.

Die Erbsubstanz der heutigen Organismen besteht zwar aus Desoxyribonukleinsäure (DNA). Aber es gibt gute Gründe für die Annahme, daß die frühesten Schritte auf dem Weg zum Leben mit RNA- und nicht mit DNA-Molekülen zurückgelegt worden sind: Bestand der Hyperzyklus, aus dem sich das Leben entwickelte, aus RNA-Molekülen als Informationsträgern, die sich selbst zu katalytischen Ribozymen falteten?

Ein gewichtiger Einwand bleibt: Der katalytische Kreis wäre, kaum entstanden, schon von Vernichtung bedroht gewesen. Denn Hyperzyklen können frei im Wasser nicht lange existieren, da „parasitische“ Moleküle sie zerstören. Eigens Ausweg: „Ein Hyperzyklus kann ausschließlich dann überleben, wenn er bald von einer Hülle umschlossen wird.“ Dabei ist es dem Wissenschaftler gleichgültig, ob eine Membran Schutz bot oder eine Pore im Gestein: Nur abgegrenzt von der Umwelt konnte der gefährdete Lebenskeim überdauern.

Auch wenn das winzige umhüllte Gebilde schon fast lebte: Es war noch ein weiter Weg bis zur ersten Zelle. Und Eigen hat noch viele Erklärungen vor sich. „Ein geschützter Hyperzyklus“, so stellt er sich die nächsten Schritte des werden Lebens vor, „konnte sich intern verbessern. Ein neuer Wettbewerb auf höherer Ebene mit neuen Möglichkeiten zur Auslese entstand aber erst, als die Hülle mit dem eingeschlossenen Hyperzyklus sich teilte und wieder teilte.“ Von da an konkurrierten umhüllte Abkömmlinge des ersten Hyperzyklus – Lebewesen ähnlich – um die spärliche „Nahrung“: Das Spiel des Lebens hatte begonnen.

Wie eines so logisch sich zum andern fügt: Es ist schwierig, von Manfred Eigen nicht gebannt, ja verhext zu werden. Mit musikalischer Freude und einem ausgeprägten Sinn für Wirkung auf den Zuhörer.

Der Hyperzyklus: Moleküle, die sich gegenseitig helfen

Alle Lebewesen stammen, wie Manfred Eigens Theorie postuliert, von einem Hyperzyklus ab: einer Gemeinschaft von Makromolekülen, die miteinander kooperieren

Manfred Eigens Theorie der molekularen Evolution zufolge müssen schon vor etwa vier Milliarden Jahren in einem Gebräu aus Wasser und organischen Molekülen – der „Ursuppe“ – informationstragende Moleküle entstanden sein, die sich gesetzmäßig vervielfältigen konnten. Schon früh handelte es sich um jene Makromoleküle, die heute im Kern – dem „Nukleus“ – jeder lebenden Zelle die Erbinformation tragen: um Nukleinsäuren. Schon deren früheste Vorfäder konkurrierten wohl um ihre Bausteine – „Nahrung“ – und verbesserten durch Evolution ihre Überlebensfähigkeit.

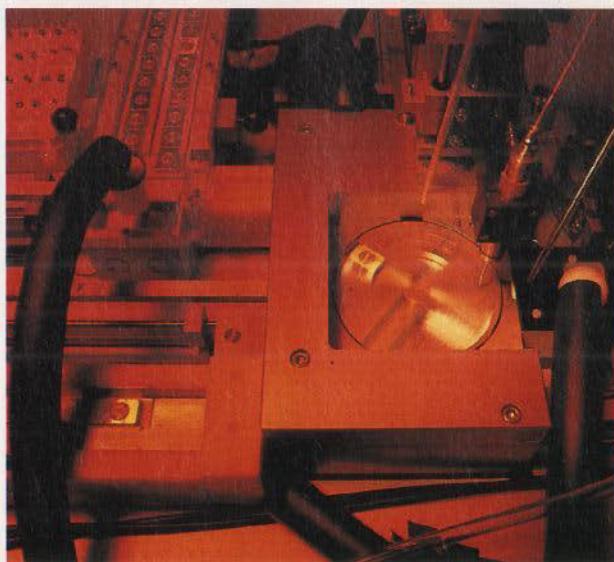
Die ersten dieser Info-Moleküle waren allerdings mit Sicherheit zu klein, um auch nur primitivste Vorformen des Lebens entwickeln zu können. Denn dazu sind größere Mengen Information nötig. Diese konnten nur zusammengefaßt werden, indem unterschiedliche Info-Moleküle nicht konkurrierten, sondern kooperierten. Einen solchen Verbund kooperierender Moleküle nennt Eigen „Hyperzyklus“. Er soll die erste „Informationskrise“ der Evolution gelöst haben.

Der Hyperzyklus ist ein „katalytischer Kreis“ aus informationstragenden, sich selbst vervielfältigenden-

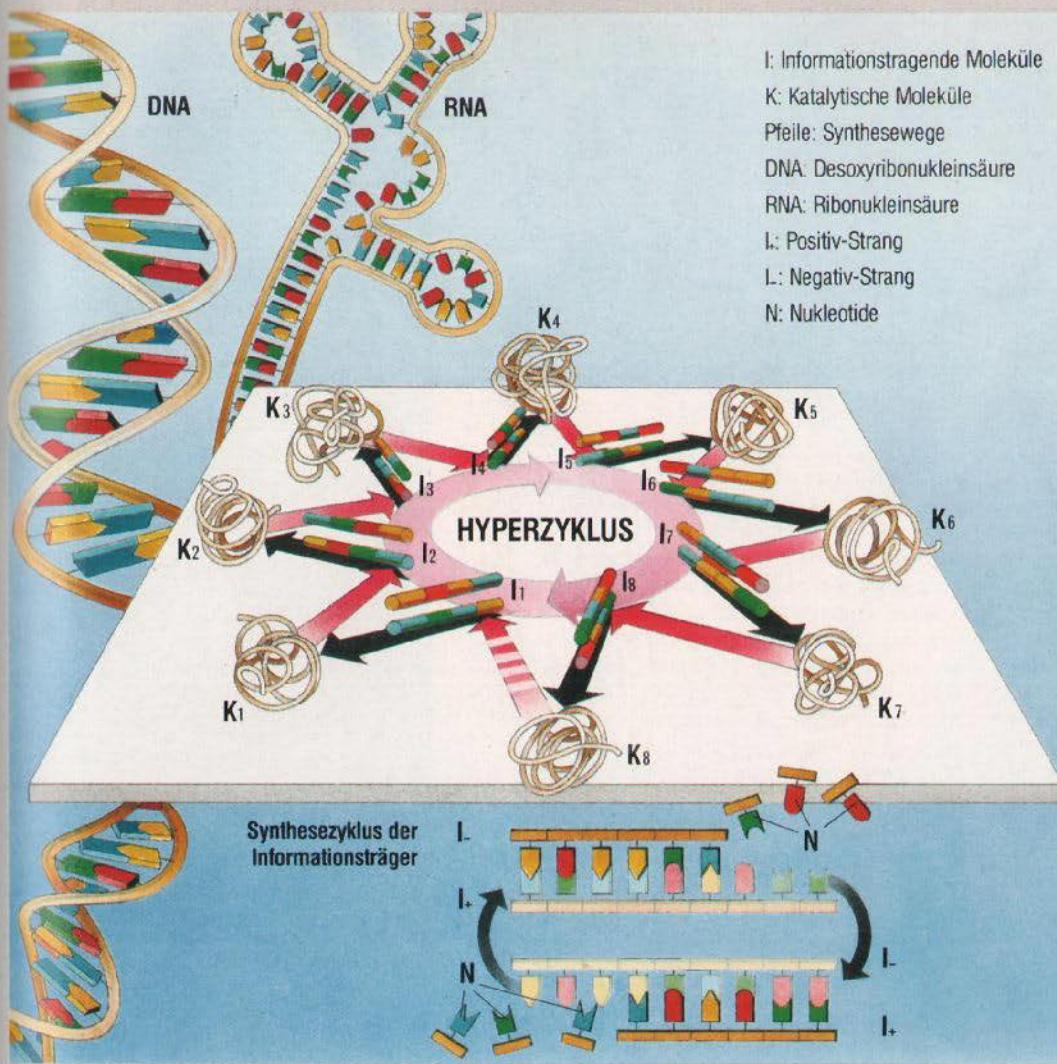
Molekülen. Jeder dieser Informationsträger fördert oder „katalysiert“ auch die Vervielfältigung anderer Info-Moleküle: Der Informationsträger I_1 erzeugt ein katalytisches Molekül K_1 , das die Vermehrung des Informationsträgers I_2 fördert; Informationsträger I_2 erzeugt seinerseits das katalytische Molekül K_2 , das einem dritten Informationsträger I_3 eine effektivere Vermehrung ermöglicht, und so fort. Eine solche Kette kann sich zum Kreis schließen, wenn ein Info-Molekül schließlich einen Katalysator erzeugt, der die Vermehrung des ersten Informationsträgers I_1 unterstützt. Ein solcher Kreis kann beliebig viele Informationsträger enthalten.

Wie der Hyperzyklus funktioniert, illustriert die Grafik:

1. Die **Informationsträger „I“** im Hyperzyklus sind Paare kurzer Nukleinsäure-Ketten, die einander wechselseitig erzeugen. Sie bestehen aus vier verschiedenen, im Bild unterschiedlich gefärbten Nukleotiden, den „Buchstaben“ der Erbinformation. Die Nukleotide können sich paarweise „erkennen“ und zusammenlagern. So werden Nukleinsäuren kopiert: Ein Nukleinsäure-Strang I_+ vervielfältigt sich, indem herumschwimmende Nukleotide (N) sich an komplementäre Nukleotide des Nukleinsäure-Strangs I_- anlagern. So entsteht ein „Negativ“-Strang I_- , der als Matrize für die Bildung eines weiteren Stranges I_+ dient. Zwei Arten von Nukleinsäuren sind für Lebewesen unentbehrlich:



Automatisiert und wesentlich schneller als auf der frühzeitlichen Erde verläuft die molekulare Evolution in den Göttinger „Evolutionsmaschinen“. Eine rechnergesteuerte Drehscheibe bringt die Reaktionsgefäße jeweils in die richtige Position



I: Informationstragende Moleküle
 K: Katalytische Moleküle
 Pfeile: Synthesewege
 DNA: Desoxyribonukleinsäure
 RNA: Ribonukleinsäure
 I: Positiv-Strang
 I: Negativ-Strang
 N: Nukleotide

Ribonukleinsäure-(RNA-)Moleküle kommen als Einzelstränge vor, die sich aufgrund innerer Kräfte zu komplizierten Knäueln falten. Desoxyribonukleinsäure-(DNA-)Moleküle bilden – meist extrem lange – wendeltreppenartig verdrillte Doppelstränge.

2. Rote Pfeile: Katalysatoren „K“ unterstützen die Vervielfältigung der Informationsträger „I“. Zwei Sorten von Molekülen sind als Katalysatoren in Hyperzyklus denkbar: RNA-Knäuel („Ribozyme“) und Proteine („Enzyme“). Beide kommen als vielgestaltige Ketten vor; sie falten sich je nach Anordnung ihrer Bausteine zu Gebilden mit komplizierten Oberflächen. Nur solche katalytischen Moleküle können die Vervielfältigung von Nukleinsäuren unterstützen, deren Oberfläche genau ihrer jeweiligen Aufgabe angepaßt ist.

3. Schwarze Pfeile: Informationsträger „I“ erzeugen Katalysatoren „K“. Auf zwei Wegen kann die Information von Nukleinsäuren die Entstehung katalytischer Moleküle ermöglichen:

- RNA-Moleküle können sich ohne weitere äußere Einflüsse zu Ribozymen – und damit zu Katalysatoren – falten.
- Eine molekulare Maschinerie „übersetzt“ die in der Reihenfolge („Sequenz“) der Nukleotide gespeicherte Information nach den Regeln eines „genetischen Codes“ in eine Kette von Aminosäuren, die sich anschließend zu einem Protein-Enzym faltet.

er führt er seine Gedankengänge als Kunstwerk vor – eine Kathedrale, keine Baustelle. Alle Einwände hat er, so legen seine Worte nahe, schon durchdacht. Hier spricht nicht der zum Nachdenken einladende Zweifler, hier präsentiert sich ein souveräner Geistesfürst.

Seit fast zwei Jahrzehnten bildet Eigens Theorie der Entstehung des Lebens den Rahmen, in dem sich Denken und experimentelles Tüfteln seiner Arbeitsgruppe bewegt. Auch wenn aus einem vermeintlich gelösten Problem, der mythischen Hydra gleich, neue erwachsen: Die Forscher konnten ihre Vorstellungen zum Ablauf der frühen Evolution verfeinern, ja sogar Teile der Theorie im Experiment bestätigen. Und darauf wiederum bauen neue Modelle, die zum Beispiel erlauben, die Geschwindigkeit der molekularen Evolution abzuschätzen sowie Hypothe-

sen über Ursprung und Alter des genetischen Codes zu präzisieren.

Manfred Eigen ist mehr als nur ein Theoretiker. Technikverliebt, mit fast kindlicher Begeisterung zeigt er mir seine neuesten „Evolutionsmaschinen“. Mit ihrer Hilfe untersuchen die Göttinger Forscher, wie konkurrierende Nukleinsäuren selektiert werden.

»Wir müssen schließlich die Evolution im Zeitraum einer Doktorarbeit durchziehen«

Das Prinzip eines solchen Geräts – von dem Amerikaner Sol Spiegelman entwickelt – ist einfach:

1. Simple RNA-Moleküle dürfen sich in einem Töpfchen in einer Art künstlicher Ursuppe vermehren, die Nukleotide sowie ein Enzym enthält, das die Verdopp-

lung der RNA-Stränge ermöglicht. Sie vervielfältigen sich, wobei – durch fehlerhaftes Kopieren – auch Mutanten entstehen. Jene, die besser den Bedingungen im Reaktionsgefäß angepaßt sind als andere, vermehren sich effektiver, so daß die in ihnen verschlüsselte Information mit höherer Wahrscheinlichkeit „überlebt“.

2. Bevor die RNA-Konzentration im Reaktionsgefäß einen bestimmten Wert überschreitet, nimmt die Maschine automatisch eine Probe heraus und impft damit ein neues Gefäß. Abermals vermehren sich die Moleküle, werden durch Mutation und Selektion verbessert.

3. Erreicht die RNA-Konzentration erneut – vielleicht schneller – den Schwellenwert, wird ein neues Gefäß geimpft.

Dank der Maschine kann das, was in der Natur sehr lange dauerte, in relativ kurzer Zeit simuliert werden. „Wir müs-

sen hier", bemerkt Eigen verschmitzt, „schließlich die Evolution im Zeitraum einer Doktorarbeit durchziehen.“

In der Tat ist es nicht der Nobelpreisträger allein, der hier „die Evolution durchzieht“. Die Chemiker Günter Bauer und Andreas Schwienhorst etwa tüfteln immer komplexere Apparaturen und Experimente aus, wobei sie von einem Almosen namens „Doktoranden-Stipendium“ leben müssen.

Zu den weniger sichtbaren, aber unentbehrlichen Mitarbeitern des Berühmten gehören auch die Angestellten der Werkstatt im untersten Flur von „Schloß Einstein“. Ihr Chef Wolfgang Simm war schon in den fünfziger Jahren dabei. Wenn nichts mehr geht, dann ist er zuständig: „Die Doktoranden kommen halt an, ‚ich brauch 'nen Apparat, so und so, nu machense mal‘.“

Hier unten, wo die Maschinen surren und es nach Öl riecht, hat Simm so manche Tricks erfunden, mit deren Hilfe Geräte, die nicht taten, was sie sollten, schließlich doch noch funktionierten. Nicht nur bei der Evolution des Lebens, auch bei ihrer Erforschung entsteht manchmal Untaugliches. „Es geht so viel den Bach runter“, sagt Wolfgang Simm, „da möchte man nach Sibirien reisen – aber das ist Wissenschaft.“

Sofern aber alles klappt, entwickeln sich in den Evolutionsmaschinen recht schnell jene RNA-Moleküle, die bei den jeweiligen Versuchsbedingungen optimal „überleben“ und sich vermehren können.

»Das Erscheinen optimaler Moleküle nach wenigen Kopierschritten ist programmiert«

Die „Evolution im Reagenzglas“ funktioniert also – und wie: Theoretiker haben große Schwierigkeiten, deren ungeheure Geschwindigkeit zu erklären. Eigentlich sollte das Alter des Universums nicht ausreichen, wenn es darum geht, auch nur ein kurzes Erbmolekül durch eine Folge zufälliger Mutationen zu optimieren. Wäre dies der einzige Weg zur Selbstorganisation, „hätte die Evolution nicht stattgefunden“. Doch wir existieren, und so muß Manfred Eigen wieder gegen den Monod-schen Stachel locken: „Der molekularen Evolution liegt keineswegs blindes Probieren zugrunde, sondern ein sehr effektiver Optimierungsmechanismus.“

Ein Optimierungsmechanismus? Soll das heißen, daß – ein ketzerischer Gedanke für Biologen – die Evolution quasi zielgerichtet voranschreitet?

„Ja. Das Erscheinen optimaler Moleküle nach wenigen Kopierschritten ist programmiert.“

Denn, so erklärt Eigen, die Selektion beim Wettbewerb evolvierender Nukleinsäuren begünstigt nicht nur die „Stammsequenz“, also den am besten angepaßten Typ, sondern auch verwandte, fast genauso effektive Mutanten. Deren Zahl ist meist ungleich höher als die der Stammsequenz-Mitglieder. Alle zusammen bilden eine oft Trilliarden Moleküle umfassende vielfältige Mutantengesellschaft, eine „Quasi-Spezies“.

»Wo wir genauer überlegen, da landen wir dauernd in Sackgassen«

Gut angepaßte Mutanten bringen mit großer Wahrscheinlichkeit noch mehr gut angepaßte Mutanten hervor. Dagegen ist die Zahl der Nachfolger weniger effektiver Konkurrenten vernachlässigbar klein. Fast mit Sicherheit erscheint in der Quasi-Spezies irgendwann eine Mutante, die den herrschenden Umständen noch besser angepaßt ist als die Stammsequenz: Dann kann die Evolution – bildlich gesprochen – weiter „bergauf wandern“, hin zu besserer Anpassung an die Umweltbedingungen. So zeichnet Eigens Theorie der Quasi-Spezies das Bild einer unglaublich effektiven, auf optimale Anpassung ausgerichteten molekularen Evolution.

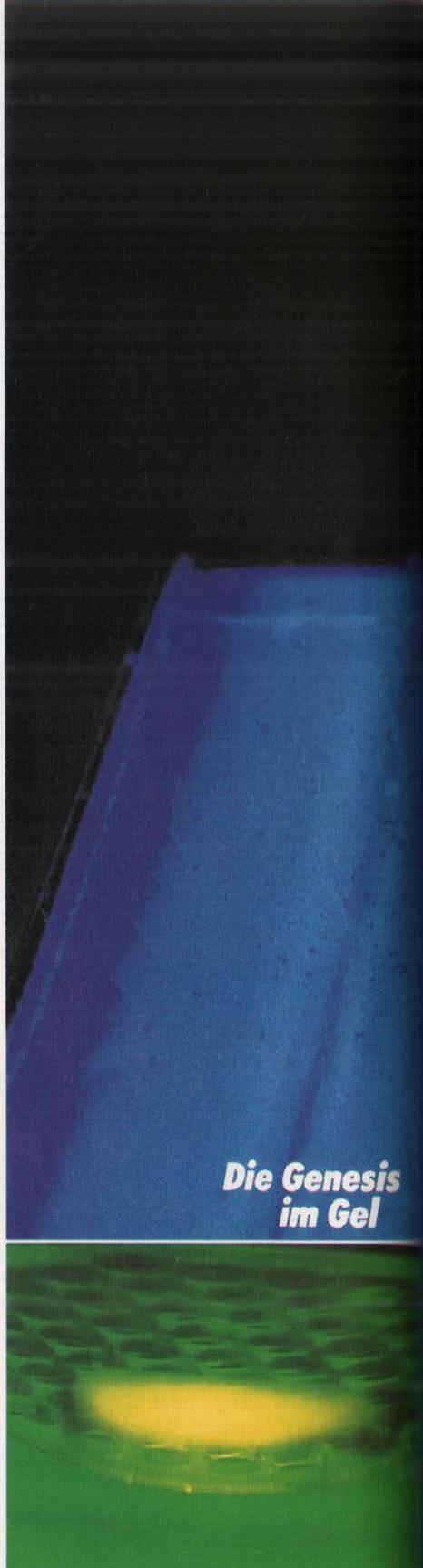
Auch manche heutige Viren wie etwa das Aids-Virus existieren als Quasi-Spezies. Deshalb – nicht nur wegen ihrer hohen Mutationsrate – können sie sich sehr schnell neuen Bedingungen anpassen.

Eines jedoch können die Theorien, Computersimulationen und Experimente des Max-Planck-Direktors und seiner Mitarbeiter – wie er selbst betont – nie-mals liefern: eine historische Rekonstruktion dessen, was bei der frühen Evolution des Lebens wirklich geschah. Das liegt nicht nur daran, daß die Evolution ein offenes Spiel ist. Auch die Anfangsbedingungen, die entscheidenden Weichenstellungen auf dem Weg zum Leben, werden im Detail immer unbekannt bleiben.

„Niemand hat bisher“, bemerkt Eigens Mitarbeiter Christoph Biebricher, „einen Schritt für Schritt nachvollziehbaren möglichen Weg der molekularen Evolution gezeigt.“ Biebricher studiert seit Jahren die Evolution von RNA-Molekülen bei unterschiedlichsten experimentell erzeugten Selektionsdrücken. „Im Gegen- teil: Wo wir genauer überlegen, da landen wir dauernd in Sackgassen.“

Ein Beispiel: Die Max-Planck-Forscher helfen ihrer Schöpfung im Labor nach, indem sie die Vervielfältigung der Nukleinsäuren in den Evolutionsmaschinen mit einem speziellen Enzym unterstützen, das es natürlich zu Beginn der

Die Genesis im Gel





Beim »Wettkauf« über eine Gel-Schicht scheiden sich unterschiedliche, bei einem Evolutionsexperiment entstandene RNA-Moleküle. Streifen mit diesen Varianten werden einzeln aus dem Gel geschnitten. Besonders markierte Mutanten – Kandidaten für eine genauere Analyse – leuchten im ultravioletten Licht



Kleine Fehler erhalten das Leben

Was Sache ist, demonstrieren Eigens Mitarbeiter »C«: Günter Bauer, »K«: John McCaskill, »H«: Michael Gebinoga, »A«: Martina Werner, »O«: Peter Wills, »S«: Katja Nieselt. Die durchgeschüttelten Buchstaben illustrieren, wie Variation Vielfalt erzeugen kann – auch in der »Max-Planck-Gesellschaft«

molekularen Evolution noch nicht hat geboren können. Und niemand kann sich vorstellen, wie sich in der Ursuppe Original und Kopie ohne ein solches Enzym getrennt haben könnten: „Da liegt Negativ auf Positiv, und nichts passiert!“ Bieblicher hat ohnehin seine Probleme mit der „Ursuppe“: „Wie und wo sich organische Moleküle so stark angereichert haben, daß eine molekulare Evolution in Gang kommen konnte, ist ein großes Rätsel.“ Förderte die Verdunstung von Seen zu konzentrierten Pfützen den Beginn des Lebens? Waren es Ton und Schlamm? Alle diese Vorstellungen erweisen sich bei näherer Betrachtung als sehr problematisch.

Das „Geheimnis aller Geheimnisse“ liegt also keineswegs entschleiert vor uns. Und selbst wenn die Erzeugung der ersten genetisch übertragbaren Information bereits lückenlos dargelegt werden könnte: Zu erklären bliebe, wie die Evolution weitere schwere „Informationskrisen“ überwand. „Es gibt deutliche Stufen auf

PAX SLOKK GESELLE HOFFT
MASTPLAN K. G. SOLL CHART!
MYXOPLASMA GEMEINSCHAFT
TAX PANICK GESTE U HAFT
MAL PLAITE GEHE IS HART
MIX FLINCK KESE LEBHAFT
FAXE LASCHE ESEL SCHAFÉ.
MIT PLAN KLAU ELLIS AXT
SEX PRUNCK GERÖLLSCHIFF
MAO BRANCHE EDEL SCHUFTE

dem Weg zu höher organisiertem Leben“, erläutert Eigen, „Stufen, die jeweils durch einen Trick der Natur zur Vergrößerung der übertragbaren Information gekennzeichnet sind.“

Größere Informationsmengen haben allerdings ihre Tücken. Sie müssen möglichst fehlerfrei auf die nächste Generation übertragen werden. Je länger ein Nukleinsäure-Molekül ist, desto fehlerärmer muß es vervielfältigt werden. Erst Enzyme oder Ribozyme erlauben es, Nukleinsäuren von mehr als hundert Nukleotiden Länge hinreichend genau zu kopieren. Eigen stellt sich vor, daß solche katalytischen Moleküle als Bestandteile des Hyperzyklus verbessert worden sind und allmählich eine Verlängerung der Nukleinsäuren ermöglicht haben.

Doch länger als etwa 10 000 Nukleotide – so groß ist das Erbgut („Genom“) der größten RNA-Viren – konnte die vererbbare Information erst werden, nachdem die DNA die RNA abgelöst hatte: Die doppelsträngige DNA erlaubt im Gegen-

satz zur einsträngigen RNA das „Korrekturlesen“ und nachträgliche Verbessern der Kopie. So wurde das etwa eine Million Nukleotide lange Genom von Bakterien möglich. In Lebewesen mit Zellkern – Moosen, Mäusen, Menschen – wird noch viel mehr Information auf sehr viel längeren DNA-Ketten gespeichert und vererbt, weil hier sogar die korrigierte Kopie noch einmal „gegengelernt“ wird.

Perfekt kopierte Nukleinsäuren wären jedoch das Ende aller Evolution: Organismen könnten sich verändernden Umweltbedingungen nicht mehr anpassen und müßten aussterben. Aber die Natur hat einen anderen Weg gefunden, jenes Angebot genetischer Vielfalt zu sichern, das im Wechselspiel mit der Selektion die Evolution erst ermöglicht: Sex. Denn bei der sexuellen Vermehrung werden die erblichen Eigenschaften zweier Individuen jeweils neu gemischt.

Schließlich hat das Leben jenseits der Erbmoleküle noch größere und flexiblere Informationsspeicher entwickelt: Tiere mit Gehirnen können aus täglicher Erfahrung mit ihrer Umwelt lernen. Menschen verfügen nicht nur in ihrem Kopf über höchst leistungsfähige, nichtgenetische Datenspeicher: Wir haben per Sprache und Schrift gigantische Informationsmengen völlig aus dem Körper ausgelagert.

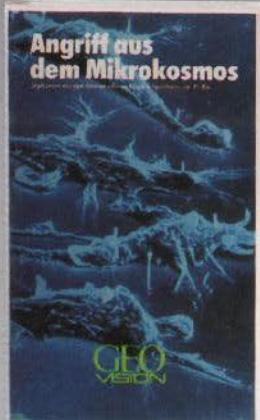
Manfred Eigen kann nur die Regeln des grandiosen kreativen Spiels nachzeichnen, das die Materie mit sich selbst spielt, nicht aber, was im einzelnen dabei entsteht. Da ist er ebenso hilflos wie ein Meteorologe, der die Gesetzmäßigkeiten der Atmosphäre kennt und dennoch keine sichere Vorhersage machen kann. So kommt es, daß er, der mit Vorliebe das Unerforschliche erforscht, von Mozart schlicht als einem „Wunder“ spricht.

Darwin hat die Regeln beschrieben, nach denen das Spiel des Lebens verläuft – von der Selbstorganisation der Moleküle bis zur Selbstorganisation der Gehirne. Eigen leitete diese Prinzipien aus Gesetzmäßigkeiten der Physik und Chemie her. Wen es grämt, daß vielleicht nicht der Geist die Materie, sondern die Materie den Geist hervorgebracht hat, der mag sich trösten: Schließlich ist es der Geist, der dieses Bild der Materie geschaffen hat. □



Gegen UV-Licht mußte Wolfgang Volz, 42, beim Fotografieren mancher Experimente seine Augen schützen. Um die „immer gleichen Labors“ mit Gespür für das Wesentliche aufnehmen zu können, bemüht er sich stets, die Arbeit der Forscher möglichst gut zu verstehen. Desmal war das „eine harte Nuß“. Franz Mechsner, 36, ist Redakteur bei GEO-Wissen.

GEO sehen und hören



Angriff aus dem Mikrokosmos Jagdszenen aus dem

Inneren unseres Körpers Weiße Blutkörperchen liefern sich erbitterte Abwehrschlachten mit Bakterien und Viren. Dieses GEO-Video zeigt das raffinierte Verteidigungssystem des Körpers und das phantastische Gedächtnis des Immunsystems. Volker Arzt stellt schwierige, aber hochinteressante Sachverhalte anschaulich und verständlich dar. Dabei entlarvt er die hinterhältigen Tricks der Krankheitserreger. Spieldauer: ca. 45 Min.

Ein Film von Volker Arzt, DM 49,80

Die Geburt der Materie Auf der Suche nach dem Urknall

In unterirdischen Großexperimenten versuchen Physiker, den Urknall und das Schicksal des Universums zu ergründen.

Mit aufwendigem Instrumentarium wollen sie den Zerfall eines Protons, den „kleinsten Knall“, erspähen – feststellen, ob Materie eine begrenzte „Lebensdauer“ hat, also schließlich zerfällt, oder aber, ob sie ewig ist.

Vom Ergebnis dieser abenteuerlichen Experimente hängt die Gültigkeit unseres physikalischen Weltbildes ab.

Spieldauer: ca. 40 Min. Ein Film von Volker Arzt, DM 49,80

Die Geburt der Materie



GEO
VISION

Rückkehr der Seuchen? Invasion der

unheimlichen Art Große Geißeln der Menschheit, wie Pocken, Pest und Cholera gelten als besiegt. Doch schon holen Aids und jüngst auch wieder Malaria zum Gegenschlag aus. In diesem Video setzt Volker Arzt das spannende Thema „Immunsystem“ fort. Durch die zunehmende Resistenz der Erreger wird die Suche nach neuen, wirksamen Medikamenten immer dringlicher. Spieldauer: ca. 45 Min.

Ein Film von Volker Arzt, DM 49,80

Rückkehr der Seuchen?



GEO
VISION

Abrufkarte auf Seite 143

D

VON KLAUS BACHMANN

Das Kommando kommt von oben: Wenn die Tage wieder länger werden und die Sonne dem kühlen Boden einheizt, heißt es für Flora und Fauna „Wärme, Licht und los!“ Bald sammeln Bienen auf weiß überblühten Schlehenbüschchen ihr frühes Futter. Blattläuse saugen zuckrigen Saft aus dem frischen Grün und scheiden feine Tröpfchen Honigtau aus. Das süße Sekret nährt wiederum Ameisen, Bienen oder Fliegen. Aber auch die Läuse selbst sind begehrte Leckerbissen: Marienkäfer und „Blattlauslöwen“ – mit Saugzangen ausgerüstete Florfliegen-Larven – stürzen sich auf die winzigen Sauger.

In dem – ganz und gar nicht exotischen – „Ökosystem Hecke“ haben Biologen neben Marienkäfer und Blattlaus, Maus und Igel mehrere tausend Tierarten gezählt. Die Aufgabe, völlig exakt nachzuzeichnen, wer da wen frisst und wer mit wem um Raum und Futter konkurriert, wäre eine Sisyphusarbeit. Und dann hätten die Forscher nur eines von ungezählten Nahrungs-Netzwerken auf der Erde beschrieben, die sich wie Fingerabdrücke alle voneinander unterscheiden.

Um Ordnung in dem krabbelnden, fliegenden, schwimmenden, sich gegenseitig verschlingenden, wuchernden und welkenden Durcheinander zu erkennen, kamen den Biologen auch Mathematiker und Physiker zu Hilfe. Ohne Furcht vor Formeln tüfteln sie an raffinierten Modellen für Feld-, Wald- und Wiesensysteme. Mit dem notwendigen Mut zur Vereinfachung versuchen sie, aus dem lebensprallen Fressen und Gefressen werden dürre mathematische

Extrakte zu gewinnen: Formeln, die beschreiben sollen, wie Pflanze und Tier, Räuber und Beute, Parasit und Wirt von- und miteinander leben. Und dabei geht es, wie neuere Erkenntnisse nahelegen, durchaus chaotisch zu.

Als „verwickeltes Knäuel“ von Räubern und ihrer Beute erschien schon Charles Darwin die natürliche Welt. Diesen Knoten zu entwirren bemühten sich in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts unabhängig voneinander der amerikanische Chemiker Alfred Lotka und der italienische Mathematiker Vito Volterra. Ihr „Räuber-Beute-Modell“ beschreibt mit Hilfe zweier einfacher Differentialgleichungen die Entwicklung eines imaginären Ökosystems, in dem zwei Tierarten leben: Unerlässliche „Räuber“ schlagen die reichlich vorhandene „Beute“ und dezimieren deren Bestand. Ihrer Existenzgrundlage beraubt, verhungern viele Jäger. Das gewährt den Gejagten eine Pause, die sie nutzen, um sich fleißig zu vermehren. Nun steigt die Kopfzahl der Räuber abermals an, wodurch wiederum der Beutetier-Bestand sinkt und folglich auch die Zahl der Räuber – und so fort. Wie stark die Populationszahlen im „Lotka-Volterra-Modell“ schwanken, hängt nur von der Anzahl der Räuber und der Beutetiere zu einem bestimmten Anfangszeitpunkt ab. Die Gleichungen des Modells lassen lediglich regelmäßige Schwingungen oder konstante Populationen zu.

Obwohl es in der Natur offensichtlich unregelmäßiger und vor allem unvorhersagbar zugeht, glaubten Wissenschaftler lange an die prinzipielle Berechenbarkeit der Räuber-Beute-Beziehung.

Doch dann erschütterte eine Entdeckung des Physikers Robert May diesen Glauben: Selbst ökologische Entwicklungen

Fressen und gefressen werden ist die Regel in der belebten Natur

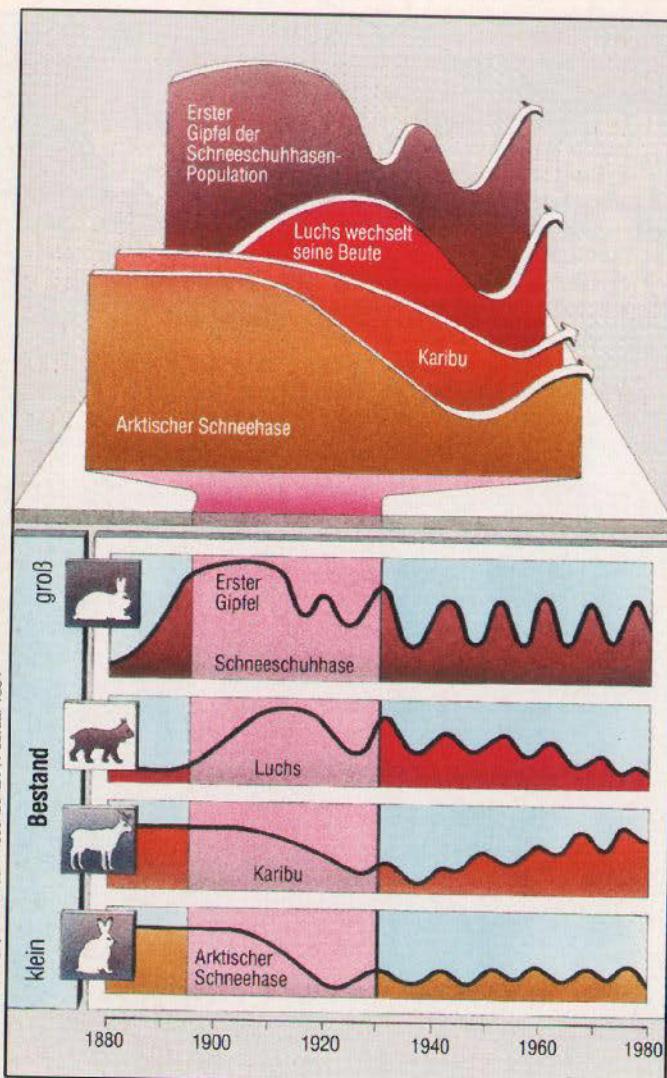


Wenn Räuber Opfer ihrer Beute werden



Ein Gepard schlägt eine Gazelle: Hinter der scheinbar eindeutigen Aktion verbirgt sich ein verwickeltes Wechselspiel zwischen Jägern und Gejagten

Optimisten sehen im Chaos-Konzept einen Schlüssel, der



In detektivischer Kleinarbeit hat der kanadische Biologe Arthur Bergerud herausgefunden, wie subtil auf Neufundland die Populationsdynamik von Schneeschuhhase, Karibu und Arktischem Schneehasen sowie der Räuber-Spezies Luchs miteinander verwoben ist. Dazu verglich er die Entwicklung der jeweiligen Bestände zwischen 1880 und 1980: Nachdem im Jahr 1864 Schne-

schuhhasen auf der Insel ausgesetzt worden waren, vermehrten sie sich rapide, bis ihre Population zusammenbrach. Danach sank auch der Bestand der heimischen Luchse, deren Zahl durch den Hasen-Boom gestiegen war. Als die leichte Beute knapp wurde, begannen die Katzen, vermehrt Karibu-Kälber und Arktische Schneehasen zu schlagen. So pendelte sich ein Rhythmus ein, dessen Takt von der Schneeschuhhase-Population bestimmt wird. Die Bestandskurven zeigen die relativen Schwankungen der Populationen, geben also keinen Aufschluß über die tatsächliche Kopfzahl

lungen, die mit einfachsten Gleichungen beschreibbar sind, können im „deterministischen Chaos“ enden und damit unvorhersagbar werden. Elektrisiert von dieser Erkenntnis, begannen Forscher die neuen mathematischen Werkzeuge zu erproben. Heute sehen Optimisten in den teils euphorisch begrüßten Konzepten einen magischen Schlüssel, der ihnen einen Zugang zum Rätsel der verwirrenden Vielfalt von Ökosystemen öffnet. Viele Biologen bleiben jedoch reserviert. So glaubt etwa Hermann Remmert, Zoologie-Professor an der Universität Marburg und Autor eines Standard-Lehrbuches der Ökologie, schlicht nicht an Chaos in der Natur.

Ungeachtet der Kritik möchten Chaos-Enthusiasten an die Stelle des Zufalls als den – neben der Selektion – grundlegenden Mechanismus der Evolution das deterministische Chaos setzen, das bei „nichtlinearen Wechselwirkungen“ zwischen den Teilen eines Ganzen entstehen kann. So empfiehlt der Kieler Zoologe Sievert Lorenzen das Chaos als „eine höchst wirksame und empfindliche Sonde bei der Suche nach dem Neuen“. Im Wechselspiel mit der natürlichen Auslese könnten, so spekuliert er, vom Chaos gesteuerte Mutationen der biologischen Evolution zu grunde liegen. Die „Selbstorganisation in der belebten Welt“, folgert Lorenzen, könne „dann und nur dann“ angemessen verstanden werden, wenn wir Biologie konsequent als nichtlineare Wissenschaft betreiben“.

Feldbeobachtungen scheinen das zu bestätigen: Was Biologen über Lebensräume von der arktischen Tundra bis zum Stadtpark herausgefunden haben, relativiert den herkömmlichen Begriff des ökologischen Gleichgewichts. Konstante Zustände sind in



nen einen Zugang zum Geheimnis der verwirrenden Vielfalt von Ökosystemen öffnet



Karibus ziehen durch das Delta des Mackenzie im Nordwesten Kanadas. Gehen Schwankungen im Karibu-Bestand auf »nichtlineare« Gesetze zurück?

Mit einem Trick vergrößern die »periodischen Zikaden« als Beutetiere

der Natur seltener als zunächst angenommen.

Solch ein Auf und Ab belegt eindrucksvoll die Wühlmaus-Art *Lemmus lemmus*: Alle drei bis vier Jahre vermehren sich die gedrungen gebauten Berglemminge im Norden Skandinaviens rapide, bis die Überbevölkerung sie in Massen aus ihren angestammten Revieren treibt. Der zur Legende gewordene Zug der Lemminge entspringt keineswegs einer Laune der Natur. Er ist Teil eines Tricks, den Biologen „Strategie der Unvorhersehbarkeit“ nennen: Der Wechsel zwischen Bevölkerungsexplosion und -zusammenbruch verhindert, daß Raubtiere die Wühlmaus-Art bedrohlich dezimieren.

Die Kluft zwischen nährendem Angebot und räuberi-

scher Nachfrage haben die in den USA vorkommenden „periodischen“ Zikaden noch erweitert: Die Larven der Insekten leben in manchen Gängen 17, in anderen 13 Jahre lang unter der Erde. Wie auf ein geheimes Kommando kriechen dann innerhalb weniger Wochen Millionen „reifer“ Larven aus dem Boden. Die Zikaden schlüpfen, paaren sich, legen Eier und sterben.

„Warum haben wir 13- und 17-Jahres-Zikaden“, fragt der Evolutionsbiologe Stephen Jay Gould von der Harvard University, „aber keine Zyklen von von 12, 14, 15, 16 oder 18 Jahren?“ Seine spekulativen Antwort: „Die Zahlen 13 und 17 haben etwas gemeinsam. Sie sind groß genug, um den Lebenszyklus je-

des möglichen Räubers zu übertreffen, aber sie sind auch Primzahlen“ – also durch keine kleinere ganze Zahl teilbar. Weil die meisten potentiellen Zikadenfresser nur zwei bis fünf Jahre leben, haben sie keine Chance, ihre Generationenfolge im Lauf der Zeit mit dem Vermehrungsrhythmus der Insekten zu synchronisieren.

Derlei Überlebensstrategien haben nicht nur Tierarten entwickelt: Auch Baum-Spezies, darunter Buchen und Eichen, produzieren ihre Samen in schöner Unregelmäßigkeit: Mal können die Tiere des Waldes den Segen nicht auffressen, mal suchen sie vergebens nach sättigenden Eicheln und Bucheckern.

Für solche Zyklen und Schwankungen haben Forstforscher Erklärungen parat, die sich grob in drei Kategorien einordnen lassen:

1. Ein genetisches Programm steuert die periodischen Abläufe, wobei Umweltfaktoren die Verhaltensmuster auslösen könnten.

2. Der direkte Einfluß von Nahrung, Klima und Krankheiten verursacht die Schwankungen.

3. Nichtlineare Gesetze beschreiben die Bevölkerungsentwicklung einer Art, so daß die Population im äußersten Fall chaotisch schwanken kann.

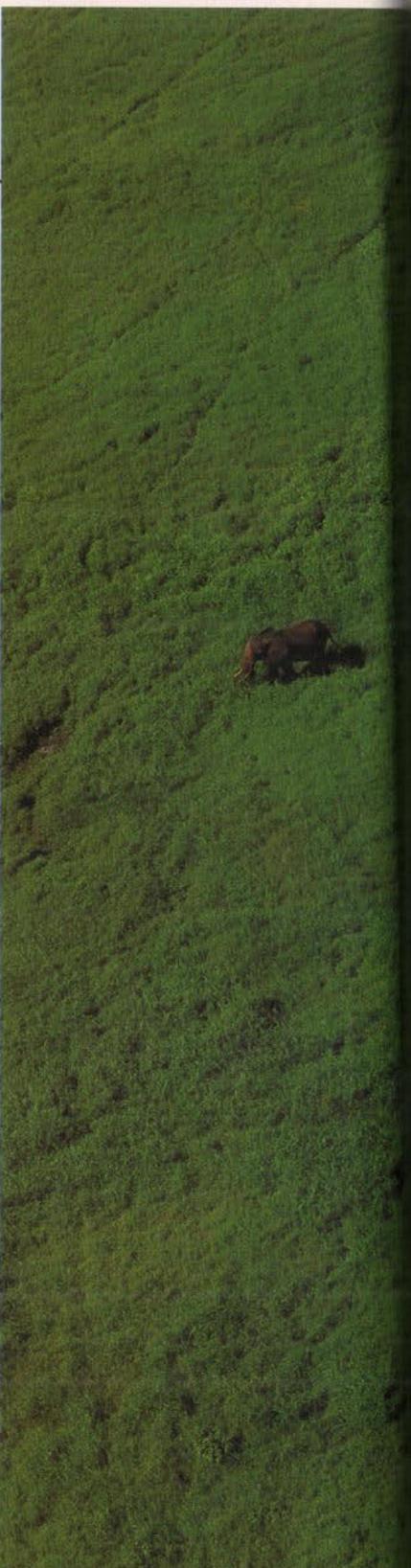
Alle drei Erklärungen spielen vermutlich eine Rolle. Die dritte – und jüngste – geht auf eine überraschende, vor etwa 20 Jahren gemachte Entdeckung zurück: Bereits die einfache „logistische Gleichung“ kann „eine außergewöhnliche Vielfalt im Verhalten zeigen“, erklärt Robert May, viel „reicher als die Biologen früher angenommen haben“.

May, einer der Pioniere der Chaos-Forschung in der Biologie, hat als abtrünniger Physiker in der Ökologie eine Nische gefunden. Anfang der siebziger Jahre begann der ge-

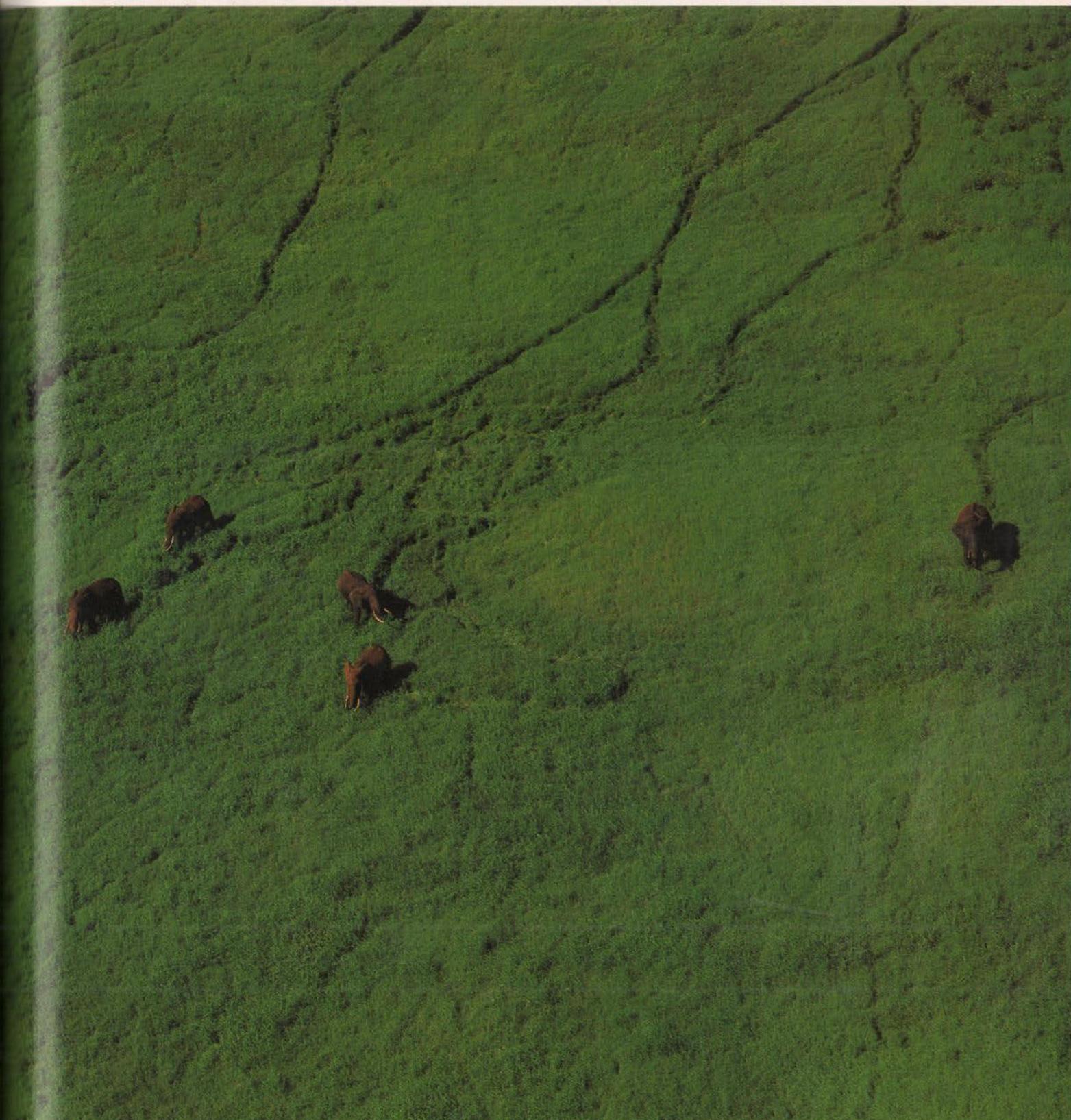


Pünktlich nach 17 Jahren waren sie wieder da: Im Mai 1987 krochen die Larven »periodischer Zikaden« im Osten der USA zu Millionen aus dem Boden.

Die Insekten schlüpften, paarten sich, legten ihre Eier und starben. Da die meisten Zikadenfresser nur zwei bis fünf Jahre leben, haben sie keine Chance, die eigene Generationenfolge mit dem 17jährigen Vermehrungsrhythmus ihrer Beutetiere zu synchronisieren



die Kluft zwischen nährendem Angebot und räuberischer Nachfrage zu ihren Gunsten



Elefanten-Bullen in einem Feuchtgebiet östlich des Mount Kenya: Auch die Dickhäuter sind »Räuber«, die von einer »Beute« leben – von Pflanzen

Seit vor zwei Jahrzehnten ein abtrünniger Physiker in der Ökologie seine

bürtige Australier an der amerikanischen Princeton University die logistische Gleichung zu untersuchen. Sie modelliert die Veränderung einer Tierpopulation in einem Lebensraum mit begrenztem Nahrungsangebot. Entscheidend ist dabei die Wachstumsrate: Bei gemächerlicher Fortpflanzung pendelt sich die Größe der Bevölkerung auf einem konstanten Niveau ein. Treiben es die Lebewesen wilder, oszilliert ihre Zahl. Bei noch stärkerer Vermehrung schließlich scheint die Anarchie auszubrechen: Die Population wächst und schrumpft ohne erkennbare Regelmäßigkeit. Und: Nur um Nuancen differierende Anfangsbedingungen können grundverschiedene Entwicklungen auslösen – ein Merkmal des deterministischen Chaos.

Was Computer-Simulationen zeigen, tritt auch in Labor-Experimenten deutlich zutage: Kleine Kreaturen – etwa Käfer und Wasserflöhe – verhalten sich dort tatsächlich so, wie die Gleichung nahelegt. Das jedoch ist in der Natur gewöhnlich kaum sichtbar.

Weniger überzeugend für die ökologische Relevanz der Chaos-Theorie fiel ein Test aus, den Michael Hassell vom Imperial College in London unternahm. Er analysierte die aus der Literatur verfügbaren Daten über 28 Insektenpopulationen daraufhin, wie sich die Bevölkerungszahlen der teils im Freiland, teils im Labor beobachteten Tiere entwickelt hatten. Ergebnis: Das Freiland-Krabbelzeug tendierte in der Regel zu einer stabilen Bevölkerung, wäh-

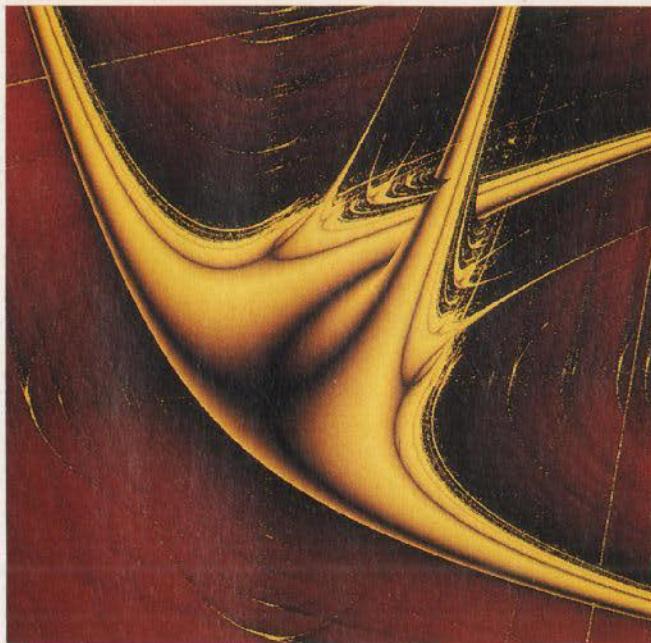
rend die Zahl der Labor-Kerfe auch periodisch oder chaotisch schwankte.

Dieser Befund, kommentiert Robert May, sei keineswegs „ein Beweis dafür“, daß „natürliche Populationen einen stabilen Gleichgewichtspunkt besitzen“. Abgesehen von der geringen Datenmenge müsse immer noch bedacht werden, daß es – außer in Labors – keine Eine-Spezies-Ökosysteme gibt: Wo eine Beute anzutreffen ist, findet sich in der freien Natur auch ein Räuber.

Aber auch die Gleichungen des alten „Räuber-Beute-Modells“ von Lotka und Volterra greifen zu kurz. Ein Ökologe bügelte es als „biologisch unwahrscheinlich und mathematisch naiv“ ab. Tatsächlich erwies sich ein klassischer Beleg für das Modell – die Zyklen von Luchs und Schneeschuhhase im nördlichen Kanada – auf den zweiten Blick als wenig beweiskräftig. Die angeblich miteinander gekoppelten, neun- bis zehnjährigen Populationsrhythmen der beiden Spezies waren aus den Zahlen der „Hudson's Bay Company“ errechnet worden, die vom frühen 19. Jahrhundert an die alljährlich in ihren Handelsstationen abgelieferten Pelze registriert hatte. Schneeschuhhasen jedoch erleben auch dort ihre Hochs und Tiefs, wo sie nicht von Luchsen gejagt werden.

Wie verwickelt die natürlichen Verhältnisse sein können, zeigt eine im Osten Kanadas beobachtete Vierer-Beziehung. In detektivischer Kleinarbeit hat der Biologe Arthur Bergerud herausgefunden, warum nach der Jahrhundertwende die Bestände von Karibus und Arktischen Schneehasen auf Neufundland dramatisch schrumpften (siehe Grafik Seite 90).

Als Ursache des Schwunds ermittelte Bergerud eine gutgemeinte Tat: Im Jahr 1864 waren Schneeschuhhasen auf



Die Bevölkerungsentwicklung einer Tierart mit begrenztem Nahrungsangebot beschreibt die »logistische Gleichung«. Daraus berechnete »Ljapunow-Exponenten« zeigen, ob für gewisse Umweltbedingungen in dem simplen

Ökosystem Chaos oder Ordnung herrscht. Mario Markus vom Dortmunder Max-Planck-Institut für Ernährungsphysiologie ordnete negativen Exponenten (Ordnung) Farben von Schwarz bis Gelb zu, positive (Chaos) »malte« er auf seinem Computerbildschirm in Schwarz bis Rot



Flamingos in natronhaltigem

Nische fand, müssen sich die Biologen mit »deterministischem Chaos« herumschlagen



Wasser des Logipi-Sees in Kenya: Während sich im Labor »Chaos« nachweisen lässt, tendieren viele Tierarten in freier Wildbahn zu stabilen Populationen

Haie und kleine Fische sind Räuber-Beute-Paare – wie Masernvirus und Mensch

der Insel ausgesetzt worden, um hungrenden Fischern eine zusätzliche Nahrungsquelle zu verschaffen; sie hatten den neuen Lebensraum rasch erobert. Zufällige Nutznießer der Einbürgerung waren auch die auf Neufundland damals nur spärlich vorkommenden Luchse, die nun ihrerseits einen Aufschwung erlebten. Nachdem die Schneeschuhhasen-Population jedoch die ökologischen Grenzen ihres Wachstums erreicht hatte und zusammengebrochen war, stellten sich die vielen hungrigen Katzen um: Sie begannen

in zuvor ungekanntem Ausmaß Karibus und Arktische Schneehasen zu jagen.

Weil die Luchs-Population dennoch abnahm, konnten sich die Schneeschuhhasen wieder erholen; ihr Bestand begann in einem für sie typischen Zehn-Jahres-Rhythmus zu schwanken. Die Luchse aber, so interpretiert Bergerud die Daten, schalteten auf jedem „Schneeschuhhasen-Gipfel“ auf diese Beute um, während sie im „Hasen-Tal“ vermehrt Karibu-Kälber und Arktische Schneehasen schlügen. Die Karibu-Popula-

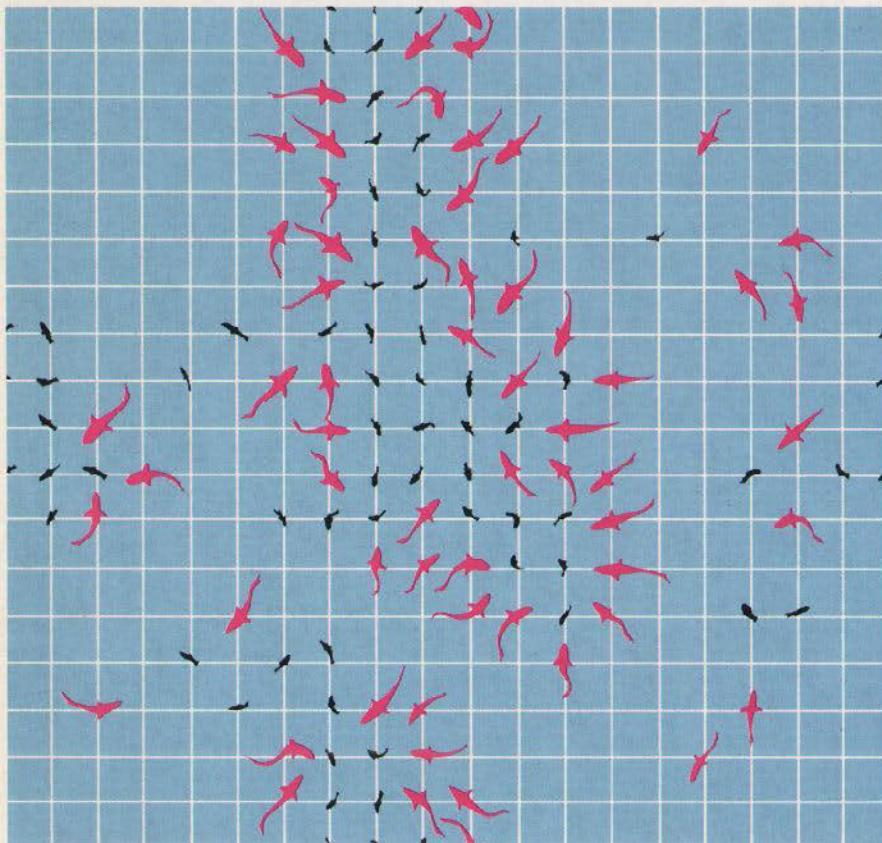
tion erholte sich wieder, nicht jedoch die der Arktischen Schneehasen. Den Takt der gekoppelten Schwingungen bestimmt indes der Schneeschuhhase: Die Beute regiert den Räuber.

In solch verwickelten Abhängigkeiten fahnden Wissenschaftler nach mathematischen Kennzeichen des deterministischen Chaos wie etwa „chaotischen Attraktoren“ (siehe Seite 178). Einem zweidimensionalen Attraktor glauben die Amerikaner Mark Kot und William Schaffer bei einem ungleichen Räu-

ber-Beute-Paar auf der Spur zu sein: Masernvirus und Mensch. Das Auf und Ab der Erkrankungen, das von 1928 bis 1963 in New York City registriert worden war, lässt sich der Analyse zufolge am besten als deterministisches Chaos deuten.

Das formale Stochern birgt freilich das Risiko, den Bezug zur belebten Welt zu verlieren. „Wir können versuchen“, erklärt Robert May, „den Attraktor zu konstruieren, ohne irgend etwas von den biologischen Mechanismen zu verstehen, die ihm zugrunde liegen.“ Das pralle Leben verschwindet allerdings auch hinter den mathematischen Gerüsten der alt hergebrachten Systemmodelle, und auch hier sieht der Ökologe Hermann Remmert eine Gefahr: „Phänomene, die ganz verschiedene Ursachen haben, werden unter der gleichen mathematischen Beschreibung subsumiert.“

Eines jedoch vermag das „nichtlineare“ Denken: unser Bewußtsein im Umgang mit der belebten Natur zu schärfen. Kleine Ursachen können auch in Ökosystemen große Wirkungen nach sich ziehen. Diese Erkenntnis erschüttert beruhigende Vorstellungen über die Stabilität unserer natürlichen Umwelt kräftig. Wenn der „ganz und gar nichtlineare Sturm“ in der Ökologie losbricht, den Mark Kot und William Schaffer prophezeien, wird er auch die weitverbreitete Vorstellung hinwegblasen, daß wir unsere Eingriffe in Ökosysteme kalkulieren und damit beherrschen können. Denn die Chaos-Theorie lehrt: Die Folgen solcher Manipulationen sind im Zweifelsfall nicht voraussagbar. Wir wissen nicht, was wir tun. □



Ein Räuber-Beute-Spiel für Personal-Computer hat der Kanadier Alexander Dewdney entwickelt. Auf dem »Pla-
neten Wa-Tor«, so seine Ausgangssituation, gibt es nur zwei Spezies: »Fische« (blau) und

»Haie« (rot), die »Fische« fressen. »Die-
ses schlichte Ökosystem«, bemerkt Dewdney in der Zeitschrift »Spektrum der Wissenschaft«, könnte »gähnend langweilig sein.« Ist es aber nicht: Riesige Fischschwärme nähren gewaltige Hai-Bestände, werden fast komplett aufgefress-

sen – und die Jäger verhungern. Je nach Randbedingung kann sich das »Räuber-Beute-System« einpendeln: auf zyklische Schwankungen, die der tatsächlichen Populationsdynamik etwa von Luchs und Hase ähneln

Der Diplomchemiker und Wissenschaftsjournalist **Klaus Bachmann**, 32, lebt in Buchholz südlich von Hamburg. Er hat bereits mehrere Berichte für GEO-Wissen geschrieben.

Stop!
FCKW

Jeder Tag zählt!

Jägesch + Partner, Hamburg

Liebe Klavierlehrerin, stop FCKW!

*Udo Lindenberg,
Sänger*

FCKW zerstört die Erdatmosphäre, das ist bekannt. Aber noch immer werden weltweit pro Jahr mehr als 1.000.000 Tonnen hergestellt. Davon über 112.000 Tonnen FCKW in der Bundesrepublik Deutschland. Nicht nur für Spraydosen.

Viele meinen, FCKW sei schon verboten. Das stimmt nicht. Bonn plant, die Herstellung und Verwendung in den nächsten Jahren stufenweise einzuschränken. Im Ausland passiert noch weniger. Das reicht nicht aus.

Schicken Sie uns den Coupon aus dieser Anzeige. Wir sagen Ihnen dann, wie sie zum FCKW-Stop beitragen können. Als Verbraucher, in Industrie, Handel und Dienstleistung, in der Politik und in den Kommunen.

Auch wenn Sie andere Fächer unterrichten.

FCKW-Stop ist ein Zusammenschluß der Initiative DEMokratie Entwickeln e.V., Ärzte und Pharmazeuten gegen FCKW e.V. und der Aktion Ozonloch e.V.

Die Initiative wird unterstützt von Senta Berger-Verhoeven, Wolf Biermann, Alfred Bielek, René Böll, Ina Deter, Klaus Doldinger, Jürgen Flimm, Jürgen Fuchs, Herbert Grönemeyer, Peter Härtling, Hans-Dieter Hüsch, Udo Jürgens, Freya Klier, Alexander Kluge, Stephan Krawczyk, Udo Lindenberg, Peter Maffay, Marius Müller-Westernhagen, Reinhard Mey, Wolfgang Niedecken, Witta Pohl, Hanna Schygulla, Johannes Mario Simmel, Karlheinz Stockhausen, Dorothee Sölle, Michael Verhoeven, BUND für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V. (BUND), Robin Wood und Einzelpersonen und Unternehmen der Kommunikationsbranche.

Ich bin für den FCKW-Stop!

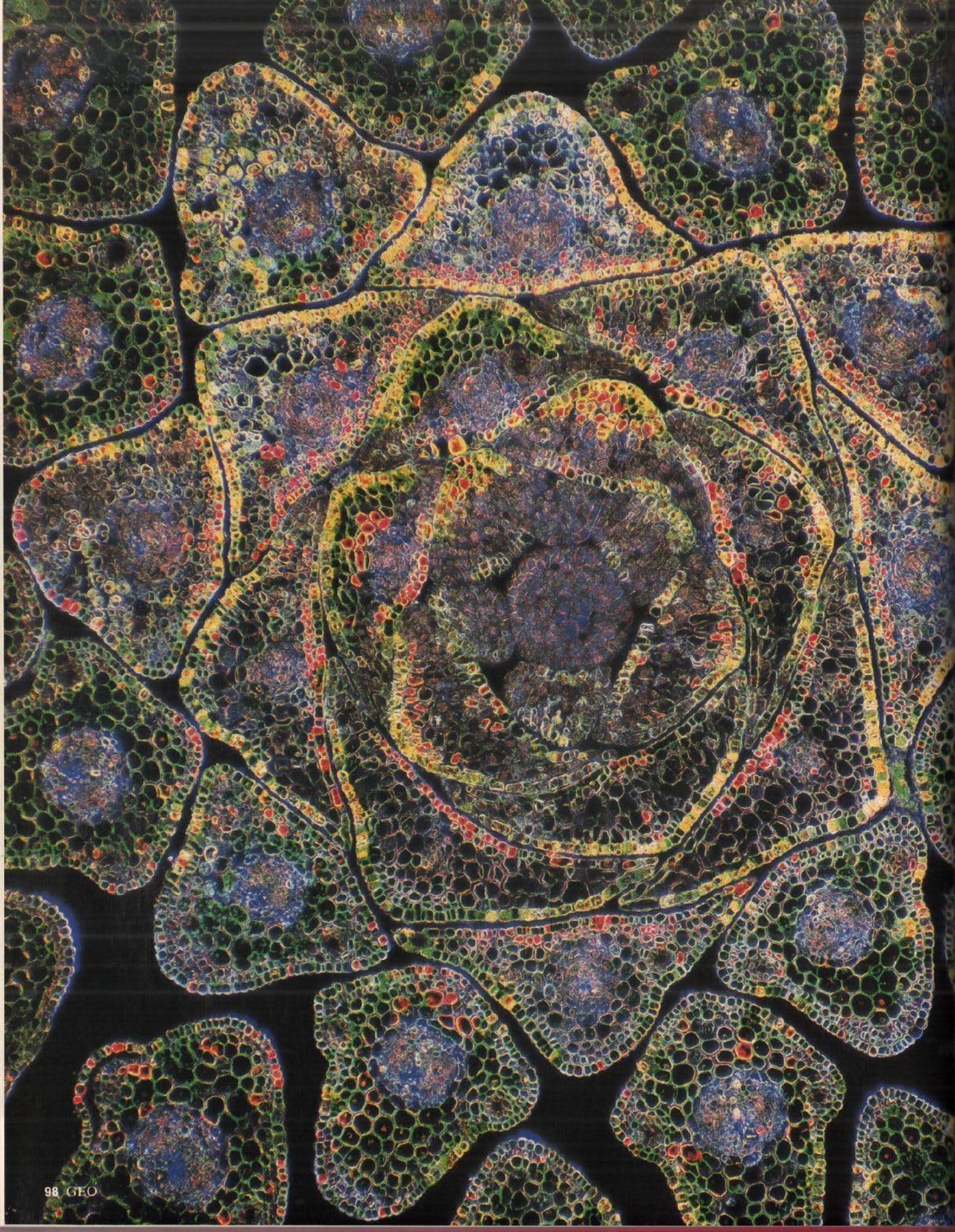
Sagen Sie mir bitte, wie ich zum FCKW-Stop beitragen kann.

Vorname, Name _____

Straße, Nr. _____

PLZ/Ort _____

Diesen Coupon bitte mit 3,00 DM in Briefmarken für die Antwort einsenden an FCKW-Stop, Prinz-Albert-Str. 43, 5300 Bonn.



Der gezähmte Zufall

Wem fraktale Formen vertraut sind, dem ist das »Romanesco«-Gemüse – eine Neuzüchtung aus Blumenkohl und Broccoli – mehr als eine Beilage auf dem Teller: Die reizvolle Form entsteht durch die Verschachtelung und Wiederholung eines Grundmusters. Auch wenn dieses fraktale Prinzip der Selbstähnlichkeit nicht immer so sichtbar ist wie bei der jüngsten Kohl-Sorte: Es findet sich in der Form und vor allem in der embryonalen Entwicklung der Tiere und Pflanzen – auch im Schnitt durch den Wipfeltrieb einer Fichte. Nun hoffen Biologen, besser zu verstehen, wie das Leben immer wieder verblüffende – und sich verblüffend ähnliche – Muster hervorbringt

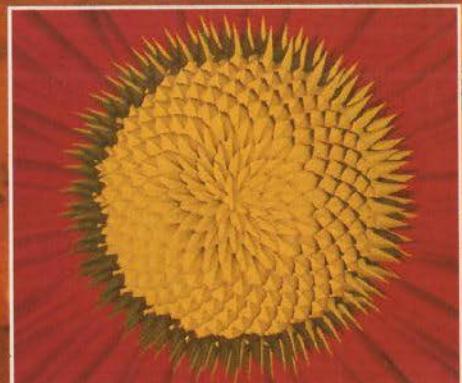
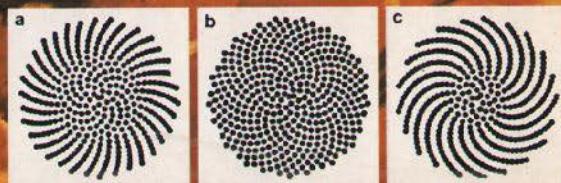


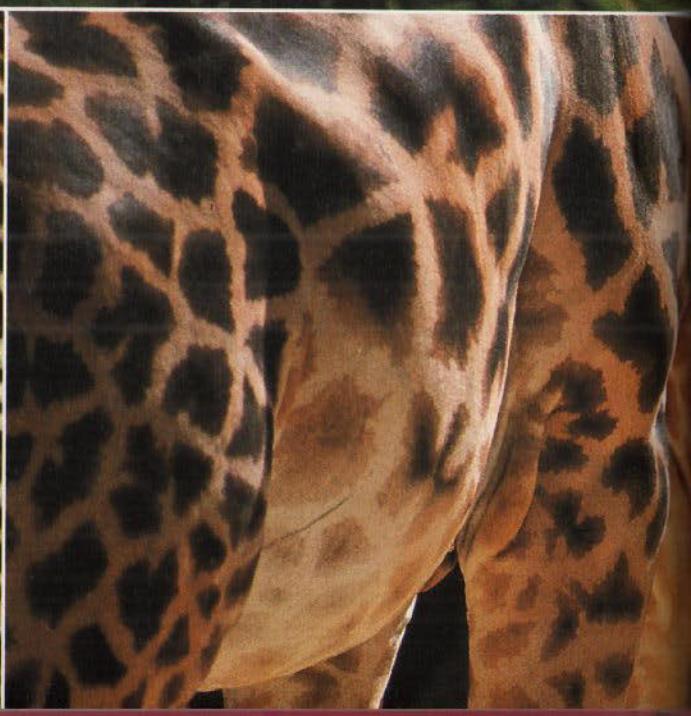
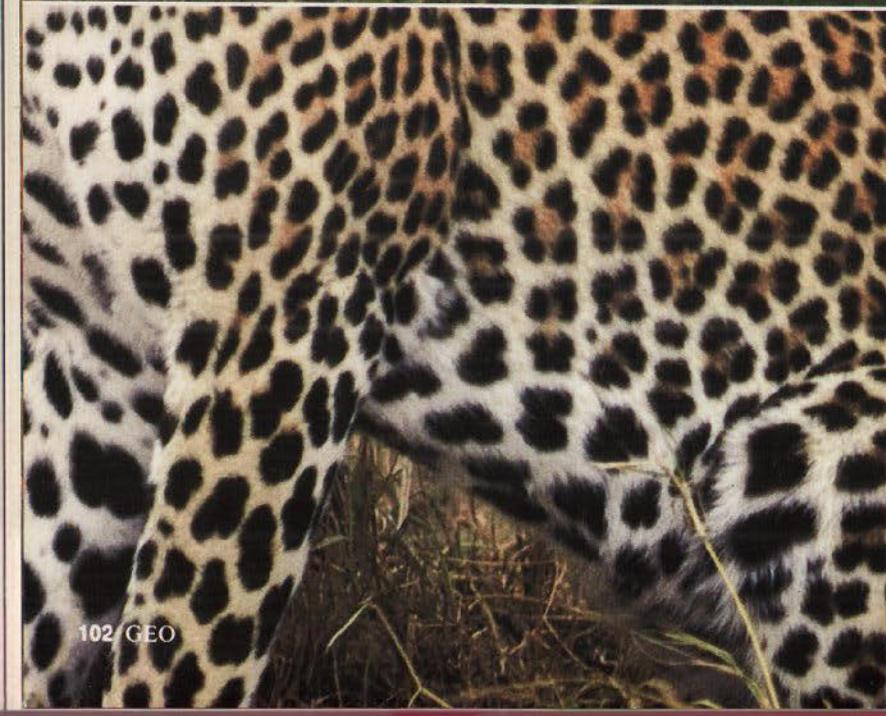




Faszinierende mathematische Verwandtschaft von echten und per Computer konstruierten Pflanzenmustern enthüllt die Arbeit eines Forscherteams der University of Regina in Kanada: Die Anordnung natürlicher Blütenkörbchen, Kaktus- und Agavenblätter oder Sonnenblumen-Samen folgt einem Zahlenmuster, der »Fibonacci-Sequenz« – ebenso wie das aus wenigen Rechenvorschriften konstruierte »Köpfchen« eines Gänseblümchens (ganz unten). Im Modell können die »Elemente« einer Blüte mit dem »richtigen« Abweichungswinkel von 137,5 Grad optimal aneinandergepackt werden (unten); die beiden Muster a und c entstanden durch jeweils minimale Veränderungen des »korrekten« Winkels

Im Computer wird das Muster sonnenklar



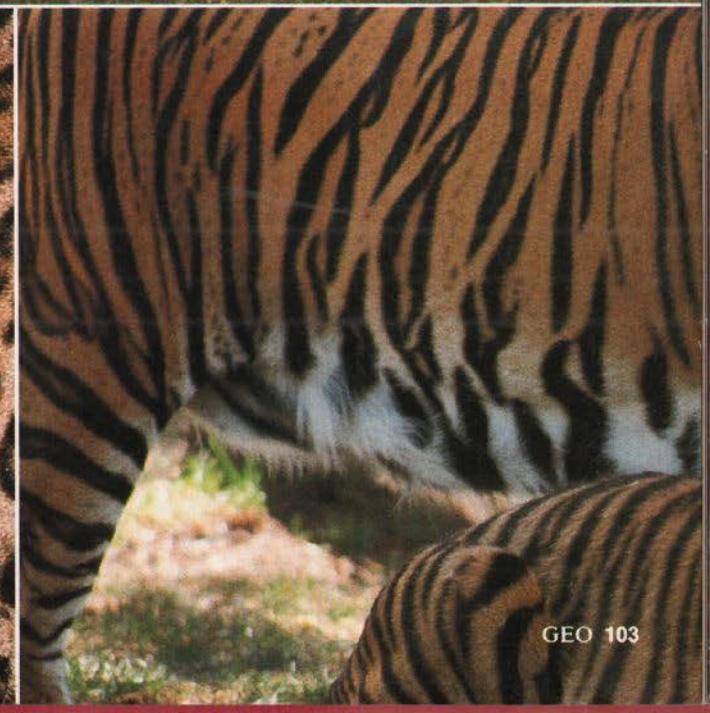




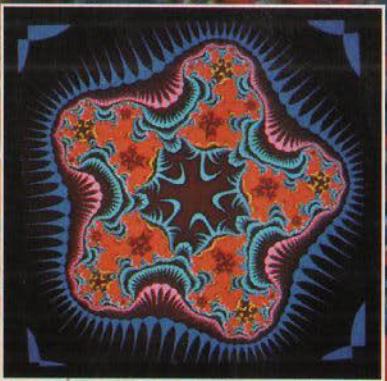
**Simple Formeln
zeichnen nützliche Flecken
auf die Felle**

Zebra-Streifen und Leoparden-Flecken, das »Netz« einer Giraffe, die Fellmuster eines Ozelets und eines Tigers: Sie alle sind das Ergebnis von Musterbildungs-Mechanismen, denen relativ simple geometrische Prinzipien zugrunde

liegen. Ein mathematisches Modell namens »Reaktions-Diffusions-Mechanismus« erzeugt beispielsweise Fleckenmuster, die – per Computer sichtbar gemacht – der Fellzeichnung verschiedener Säugetiere verblüffend ähneln (siehe Seite 112)



**Im Wasser verästeln
sich Tiere wie die Pflanzen
in der Luft**





Ein »Federstern« hat sich vor der Südsee-Insel Palau auf eine Fächerkoralle gepflanzt. Die Form beider Tierarten folgt der (mathematischen) Funktion: Ein einfaches Grundmuster wird während des Wachstums immer wieder angewandt (»iteriert«). Ebenfalls durch bloße Iteration einfacher Formeln erzeugt der IBM-Forscher Clifford Pickover per Computer »biomorphe« Muster, die an Seesterne erinnern. Sich selbst ähnliche, fraktale Formen prägen auch das Erscheinungsbild des »Dornenkronen-Seesterns«, der Hirnkoralle und des Mundes einer Seeanemone

S

o vollmundig dürfte eine revolutionäre Entdeckung der Biologie kaum jemals hinausposaunt worden sein: „Wir haben das Geheimnis des Lebens entdeckt“, hatte Francis Crick an einem Tag im März des Jahres 1953 allen verkündet, die in Hörweite waren – im „Eagle“, einer Pub in der englischen Universitätsstadt Cambridge.

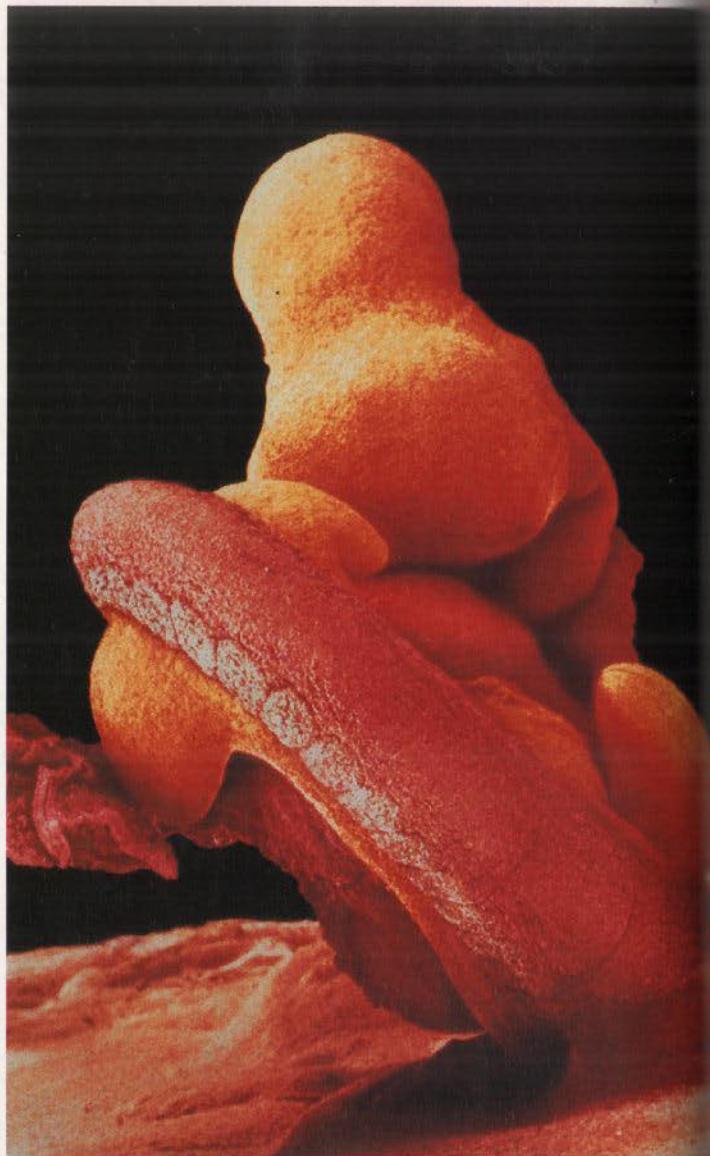
Selbst Cricks Partner, der just 25 Jahre alte Amerikaner James Watson, fühlte sich, obwohl nicht gerade auf den Mund gefallen, bei diesen starken Worten „nicht recht wohl“. Wie Watson anderthalb Jahrzehnte und einen Nobelpreis später in seinem Bestseller „Die Doppel-Helix“ eingestand, sei die Entdeckung „viel zu wichtig“ gewesen, „als daß man es riskieren könnte, blinden Alarm zu schlagen“: die Entdeckung, daß der Träger der Erbinformation im Kern jeder Zelle – jenes kurz DNA genannte Molekül – die Form einer in sich verdrillten Strickleiter hat, einer „Doppel-Helix“.

Watsons Vorsicht war damals zwar eher taktisch gemeint, geboren aus der Sorge, den Wettlauf um die Entschlüsselung der DNA-Struktur doch noch zu verlieren. Aber sie gilt für die gesamte Biologie – bis heute: Allein die Kenntnis der materiellen Form, in der das Leben die Erbinformationen speichert, enthüllt dessen „Geheimnis“ keineswegs.

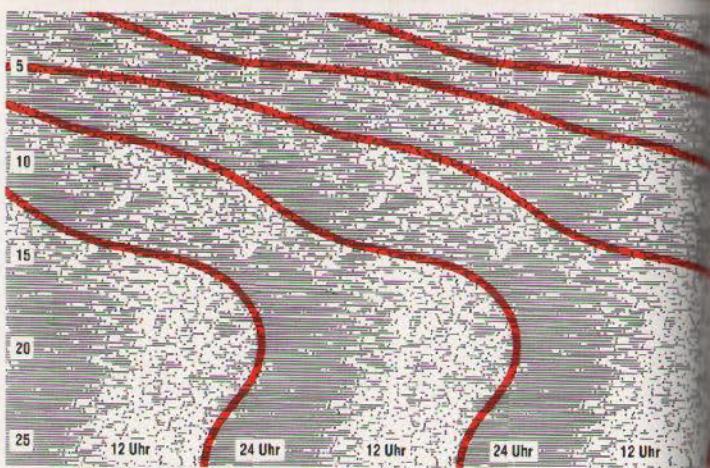
So ist schon deshalb Skepsis angebracht bei den hochgespannten Erwartungen, die sich auf das inzwischen in den USA anlaufende „Genom-Projekt“ richten. Mit diesem Projekt – Koordination: James Watson – soll die gesamte genetische Struktur des Menschen aufgelistet werden, jeder einzelne der rund drei Milliarden Nukleotide genannten „Buchstaben“ der menschlichen DNA. Ergebnisse der Chaos-Forschung jedoch lassen erkennen, warum die so gewonnenen Daten noch keinen *Homo sapiens* machen: Sie repräsentieren einen Menschen so wenig wie ein ausgestopfter Tiger den indischen Dschungel.

Kein Genom – und auch kein Organismus – kann autonom, ohne Rücksicht auf seine Umwelt definiert werden. Stets müssen die Bedingungen mit berücksichtigt werden, die zu seiner Entstehung beigetragen haben und während seiner Existenz einwirken. Die von Chaos-Forschern „Anfangs- und Randbedingungen“ genannten Voraussetzungen sind nicht in den Genen gespeichert: Die Welt, die uns – also auch das Leben selbst – her-

Vier Wochen nach der Befruchtung scheint ein menschlicher Embryo einen „Schwanz“ zu entwickeln: Die an zusammengefügten Bausteine erinnernden „Somiten“ sind die Vorläufer der Wirbelsäule-Knochen und Rumpfmuskulatur. Mit dem Wachstum des Rumpfes verschwindet der „Schwanz“ schon in der 8. Schwangerschaftswoche. Sich wiederholende Grundmuster wie die Somiten spielen beim embryonalen Wachstum eine entscheidende Rolle



Recht chaotisch ist der Schlaf-Wach-Zyklus eines Babys kurz nach der Geburt. Das Diagramm verdeutlicht, wann er sich stabilisiert: Die senkrechte Achse zeigt die Wochen nach der Geburt, die waagerechte die Tagesgänge; Linien markieren den Schlaf, Punkte das Stillen des beobachteten Säuglings. Die „innere Uhr“ des Menschen scheint von Schwingungen des Zuckerstoffwechsels angetrieben zu werden



Was von Dauer sein soll, stabilisiert sich durch Selektion

vorgebracht hat, enthält sie *per se*. Diese „scheinbar überschüssige Information“ ist, schreibt Bernd-Olaf Küppers*, „in den physikalischen Milieubedingungen enthalten, die zusammen mit der genetischen Information die Struktur und Funktion eines lebenden Systems erst bestimmen.“

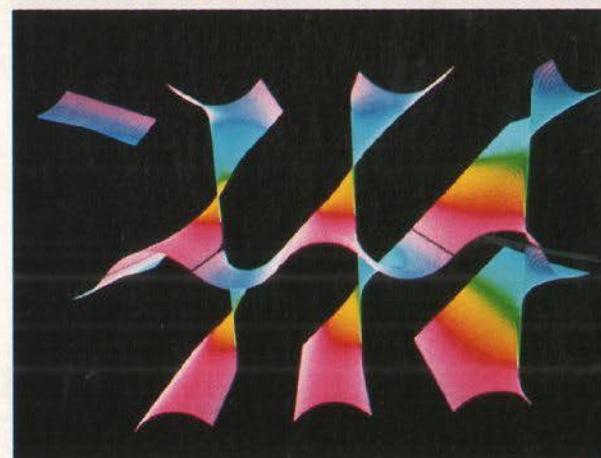
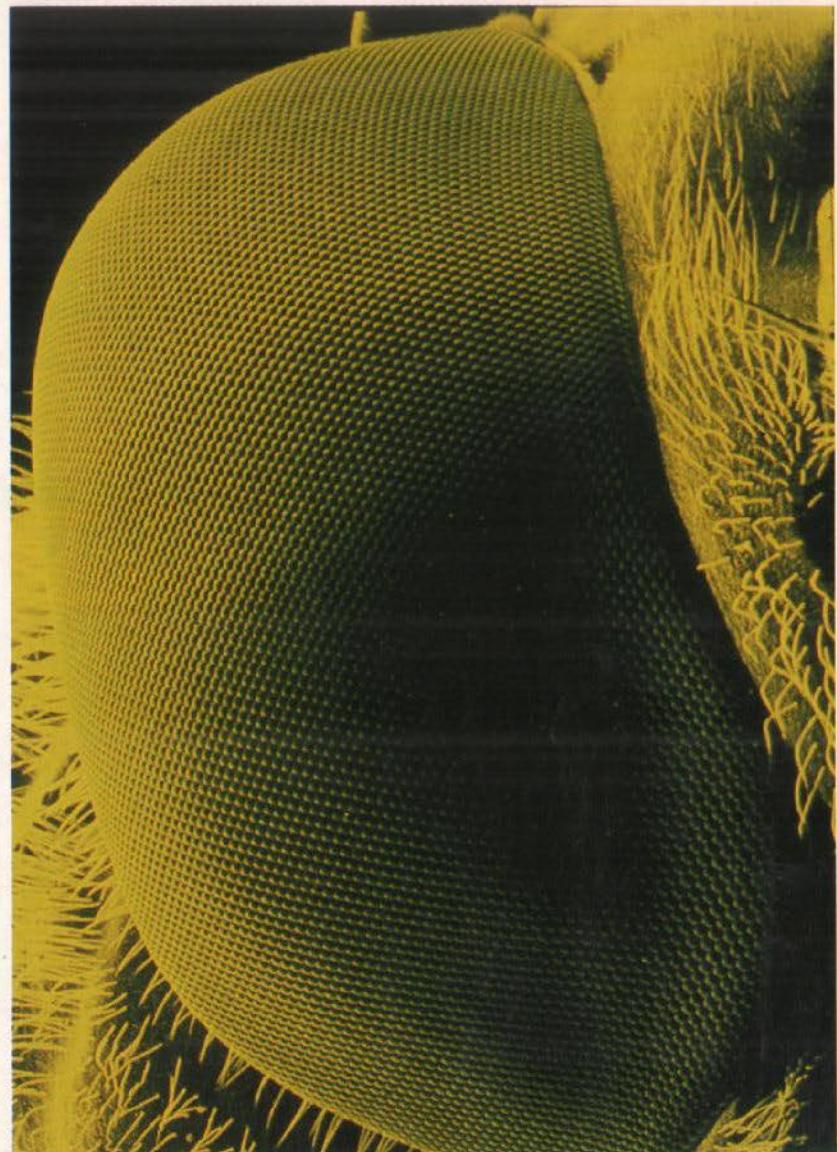
Mehr noch: Milieu und Gene wirken beim Werden eines Organismus durchaus nicht beliebig zusammen, sondern in einer ganz bestimmten, nicht umkehrbaren zeitlichen Folge – sie „kanalisieren“ dessen Lebenslauf. Die Entwicklung eines Lebewesens ist ein dynamischer Prozeß, bei dem sich naturgesetzliche Zwangsläufigkeit mit Zufällen paart, auf die es im Laufe seiner Zeit trifft. Dieser sowohl unberechenbare als auch unwiederholbare historische Prozeß ist das, was uns Individualität verleiht.

Die Entdeckung, daß so gut wie alle für das Leben wichtigen Vorgänge „nichtlinear“ verlaufen und damit unberechenbar sind, beschert den Biologen eine paradoxe Situation.

Zwar können sie heute die gesetzmäßigen Bedingungen des Lebens so exakt wie niemals zuvor beschreiben und deswegen hoffen, endlich einige zentrale Phänomene ihres Fachs befriedigend erklären zu können. Zum Beispiel:

- Woher kommt der unübersehbare Trend zu höherer Komplexität in der Entwicklung des Lebens? Die Evolution an sich – dieser von Charles Darwin erstmals beschriebene duale Prozeß, der aus einem vielfältigen Angebot die jeweils am besten angepaßten Organismen ausliest – läßt nicht erkennen, daß sie auf ein „Ziel“ ausgerichtet ist. „Wie kommt es“, fragt der US-Biologe John Tyler Bonner in seinem Buch „The Evolution of Complexity“, „daß ein Bakterium sich im Lauf von vielen Millionen Jahren in einen Elefanten entwickeln konnte?“
- Warum und wie finden Organismen während ihrer embryonalen Entwicklung die für ihre jeweilige Art typischen Formen und Muster? Warum zeugen Hasen immer Hasen, Menschen immer Menschen? „Nichts in der Biologie“, konstatiert der Harvard-Professor Stephen Jay Gould, „ist komplexer als die Produktion eines erwachsenen Wirbeltiers aus einer einzigen befruchteten Eizelle.“

Hingegen werden die Biologen niemals exakte Erkenntnis in zwei entscheidenden Bereichen gewinnen können: Weder die Evolution des Lebens noch die Entwicklung eines Individuums von der Komplexität eines Menschen lassen sich im



Das Auge einer Schwebfliege spiegelt optimale Effizienz wider: Dichter sind Facetten nicht zu packen. Effizient ist offenbar auch der diesem zugrundeliegende embryonale Prozeß: Er kommt mit wenigen Instruktionen aus. Solche Ökonomie erlaubt flexible Anpassungen, etwa die Neueinstellung der »inneren Uhr« von Fruchtfliegen nach dem Schlüpfen, hier als 3-D-Computergrafik sichtbar gemacht

Wenn die Effizienz ins Auge geht

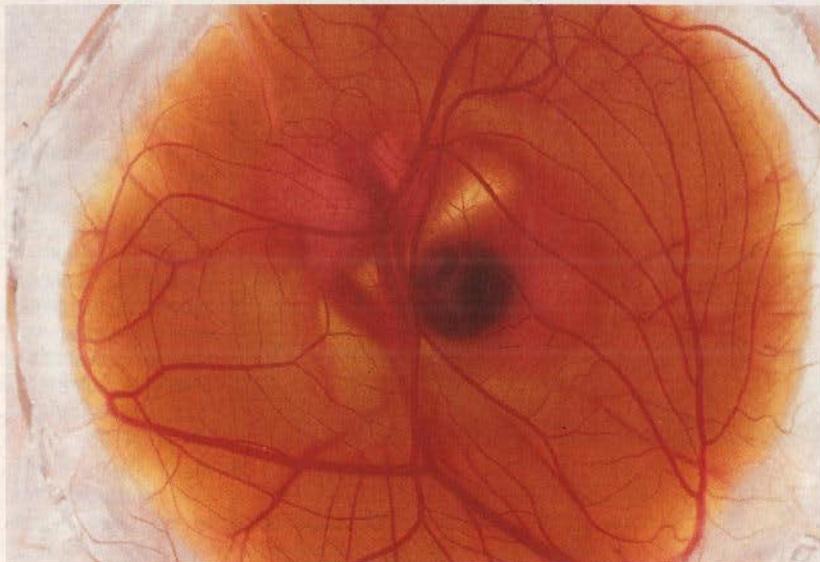
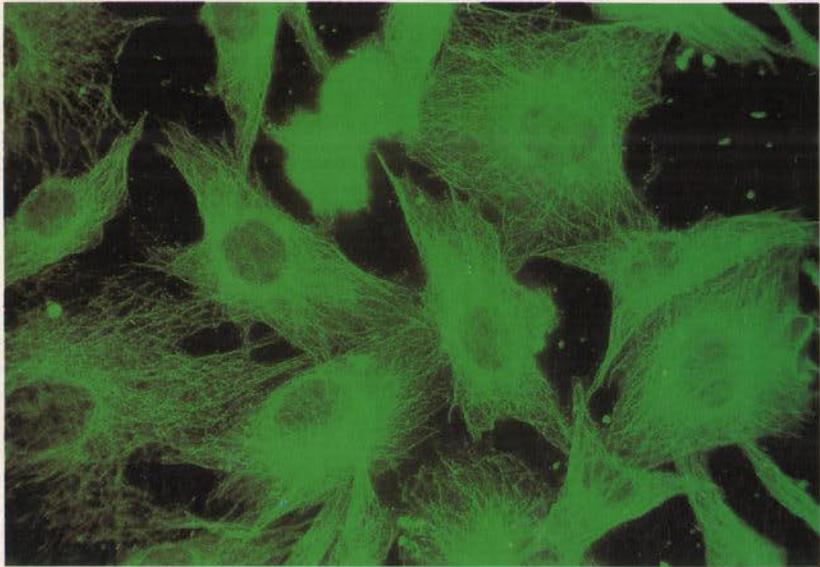
* Küppers ist Autor des Essays „Wenn das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile“, Seite 28.

nachhinein in allen ihren Details rekonstruieren.

Die Individualität gebärende Zufälligkeit ist weder mit Ahnentafeln noch mit naturwissenschaftlicher Reduktion auf die materiellen Voraussetzungen des Lebens zu erhellen. „Bei der Jagd nach dem Geheimnis des Lebens“, bekannt der ungarische Nobelpreisträger Albert Szent-Györgyi in seinen „Lebenserinnerungen“, „begann ich meine Forschungen in der Histologie. Da ich mit der Information unzufrieden war, die mir die Gestalt der Zelle über das Leben geben konnte, wandte ich mich der Physiologie zu. Da ich die Physiologie zu kompliziert fand, beschäftigte ich mich mit Pharmakologie. Doch die Situation war immer noch zu kompliziert, so daß ich Bakteriologie stu-

Nur wenige, genetisch festgelegte Faktoren für Form und Verbindungsstellen erlauben Eiweißmolekülen, die höchst komplexen Gespinste des »Cytoskeletts« – hier unter dem Mikroskop sichtbar gemacht – zu knüpfen und somit Zellen eine innere Struktur zu geben. – In einem Wachtel-Ei wachsende Blutgefäße bilden typische »dendritische« Verzweigungsmuster

Ein Skelett in den Zellen stützt die Ordnung



derte. Aber selbst Bakterien waren zu komplex, und so tauchte ich in die molekulare Ebene hinab und studierte Chemie und physikalische Chemie. Nach 20 Jahren Arbeit kam ich zu dem Schluß, daß wir bis in die Ebene der Elektronen und in die Welt der Wellenmechanik hinuntergehen müssen, um Leben zu verstehen. Aber Elektronen sind nur Elektronen und überhaupt nicht lebendig. Offensichtlich hatte ich unterwegs das Leben verloren; es ist mir zwischen den Fingern hindurchgeronnen.“

Während der platten naturwissenschaftliche Reduktionismus scheiterte, gewannen in den letzten Jahrzehnten auch in der Biologie wieder ganzheitliche – „holistische“ – Erklärungsmodelle an Gewicht. Zwar schwankte die Geschichte der Wissenschaft vom Leben immer wieder zwischen Reduktionisten und Holisten hin und her – kein Wunder angesichts der immensen Vielfalt pflanzlicher und tierischer Erscheinungsformen, die es erst einmal zu sortieren galt. Nun aber können weder Reduktionisten noch Holisten sich weiterhin auf rein biologische Argumente zurückziehen: Mit der Entdeckung, daß die universale Gesetzmäßigkeit der „Nichtlinearität“ – die Ursache des Wechselspiels zwischen Chaos und Ordnung – auch in der Welt der Organismen regiert, müssen deren Anfangs- und Randbedingungen mit berücksichtigt werden.

Ohne die ständige Befruchtung durch Ideen und Techniken aus Physik, Chemie und – in wachsendem Maß – auch aus der Mathematik wären die Biologen übers Botanisieren kaum hinausgekommen. „Selbst wenn wir alle Daten sammeln könnten“, argumentiert der Stuttgarter Physiker Hermann Haken, „so trübt dies zuweilen unser Urteilsvermögen mehr, als daß es ihm nützt. Wir sehen den Wald vor lauter Bäumen nicht mehr.“

Physiker haben, so gesehen, den unverstellteren Blick für das Wesentliche: Die universal gültigen Gesetze der Physik regieren auch die Welt der Organismen – sie sind ihnen als Randbedingungen ihrer Existenz gleichsam aufgeprägt. Und je genauer diese Randbedingungen bekannt sind, um so präziser läßt sich der Freiraum beschreiben, innerhalb dessen Leben möglich ist, um so schärfer treten die Besonderheiten lebender Systeme im Vergleich zu unbelebten Phänomenen hervor. Somit zeichnet sich eine hierarchisch gegliederte Natur ab, deren Ordnung auch den Verlauf der Evolution wider spiegelt:

Die „virtuelle“ Welt der Zahlen – also der *Mathematik* – regiert die materiell realisierte Welt der *Physik*, die wiederum im kühleren Bereich des Kosmos *Chemie* er-

möglich, die ihrerseits an zumindest einem begünstigten Ort des Universums – auf der Erde – Leben hervorbringen konnte. Es führte schließlich zu Phänomenen, die von der *Biologie* und ihren Sub-Disziplinen *Ökologie*, *Genetik* und *Embryologie*, *Immunologie* und *Neurologie* beschrieben werden. Die Entwicklung von zentralen Nervensystemen – Gehirnen – machte *Sozialverhalten* bei Tieren und beim Menschen möglich; dessen besonders leistungsfähiges Gehirn erlaubte im Wechselspiel mit einem zusehends differenzierten Sozialverhalten schließlich *Sprache* und *Kultur* und *Wissenschaft*.

Hinter dieser zunächst sehr reduktionistisch wirkenden Perspektive verbergen sich zwei gegenläufige Trends:

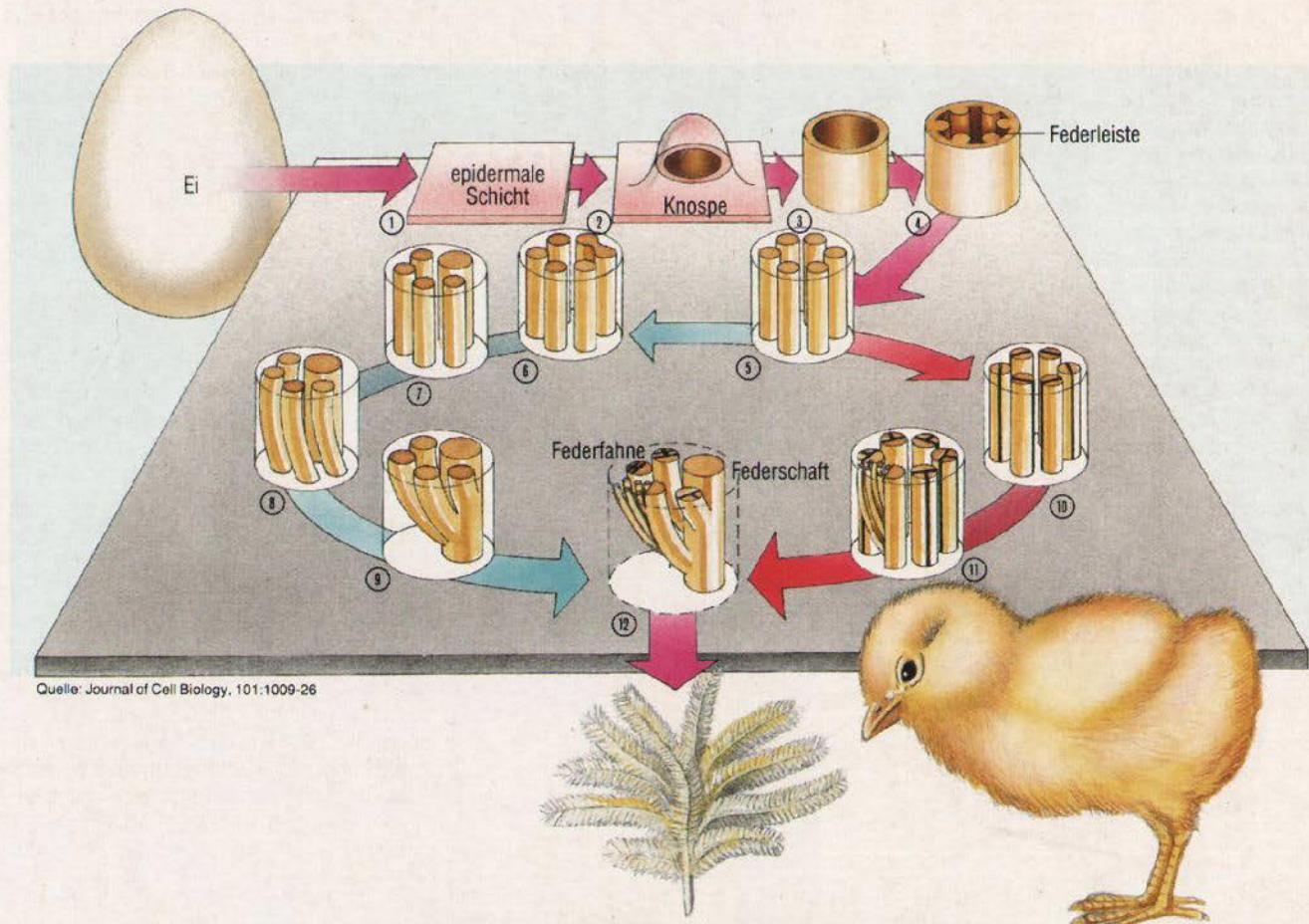
● Je später eine dieser hierarchischen Ebenen im Lauf der kosmischen Entwicklung erschien, um so kleiner ist der Raum, in dem ihre spezifischen Gesetzmäßigkeiten gelten. Leben, wie wir es kennen, ist zum Beispiel auf die Oberfläche der Erde begrenzt.

● Je kleiner – und damit physikalisch „empfindlicher“ – der Raum ist, den eine jener hierarchischen Ebenen einnimmt, um so größer scheint andererseits die Zahl der „Freiheitsgrade“ zu sein, über die seine Systeme verfügen. Ein menschliches Gehirn etwa überlebt zwar kaum zwei Minuten ohne Sauerstoffnachschub, kann sich aber dennoch einen eigenen geistigen Kosmos schaffen.

Diese beiden Trends wiederum gehen offenbar auf eine universell gültige Ten-

denz zu höherer Komplexität zurück. Sie läßt jedoch nicht erkennen, daß sie auf ein bestimmtes Ziel gerichtet ist: Es ist die ihr gleichsam angeborene, aus der grundlegenden Ebene der Mathematik hervorgehende Nichtlinearität, die eine Berechenbarkeit und damit Zielgerichtetetheit des evolutionären Prozesses unmöglich macht. Diese Nichtlinearität verhindert auch, daß sich aus den bekannten, durchaus deterministischen, auf einer niederen hierarchischen Ebene gültigen Gesetzen die Phänomene der nächsthöheren errechnen lassen. Will sagen: Neues ist prinzipiell möglich in dieser Welt.

Und Neugkeiten hat das Leben in der Tat in Hülle und Fülle hervorgebracht. Zwar können auch anorganische Strukturen – etwa Kristalle – sich selbst organisie-



Quelle: Journal of Cell Biology, 101:1009-26

Das Küken kommt zu seinen Federn wie die Henne zum Ei

Wenn ein neuer Organismus sich selbst organisiert, läuft ein nicht umkehrbarer Prozeß ab, der auf raffinierte und effiziente Weise genetisch gesteuert ist. Welchen Weg diese „Morphogenese“ etwa beim Entstehen von Hühnerfedern nimmt, hat das Team des US-Nobelpreisträgers

Gerald Edelman im Detail untersucht: Im frühen Embryo bildet sich zunächst eine Epidermis, eine dünne Schicht noch nicht spezialisierter Hautzellen (1). Das Zusammenspiel hormonähnlich wirkender „Morphoregulatoren“ lässt bestimmte Zellen knospen (2) und

einen Zylinder formen (3). In ihm bilden Ausbuchtungen primitive „Federleisten“ (4), aus denen dann auf zwei möglichen Entwicklungspfaden die vom Federschaft abgehenden „Äste“ und „Zweige“ der Federfahne entstehen (5 bis 12)

ren oder sich sogar als eine Art „stehende Welle“ für eine gewisse Zeit im Fließgleichgewicht erhalten, wie jede Kerzenflamme beweist. Aber nur lebende Organismen haben die Fähigkeit, die Information über ihre Struktur inklusive einer „Betriebsanleitung“ weiterzugeben – als genetische Information, niedergeschrieben im Erbmolekül DNA.

Die Konsequenzen dieser Fähigkeit sind bekannt – die Vielfalt des Lebens, inklusive Mensch. Und auch das Prinzip, nach dem diese Vielfalt sich im Lauf der Erdgeschichte entfaltete, ist den Biologen geläufig, seit Charles Darwin im Jahr 1859 seine Theorie im Buch „Die Entstehung der Arten“ veröffentlicht hat.

Darwins epochale Leistung war es, als erster das Evolutionsprinzip in der belebten Natur zu erkennen. Erst jetzt wird sichtbar, wie mächtig aber dieses Wechselspiel zwischen dem Angebot von Vielfalt und der Selektion der jeweils am besten angepaßten Strukturen wirklich ist. Im Zug der Chaos-Forschung entdecken Wissenschaftler dessen kreative Macht auch in der anorganischen Welt und sogar schon – wie die „Fraktale“ zeigen – im Universum der Zahlen: Von allen möglichen Zuständen sind offenbar manche mathematisch „stabiler“.

Diese Stabilität findet offenbar ihre Entsprechung in den „höheren“ hierarchischen Ebenen. Dort konnte sie sich im Lauf der Evolution – und kann sie sich auch in Zukunft – im nichtlinearen Wechselspiel zwischen Chaos und Ordnung konkretisieren, in Galaxien wie in Organismen: Sie sind sämtlich Ergebnis einer „selektiven Stabilisierung“.

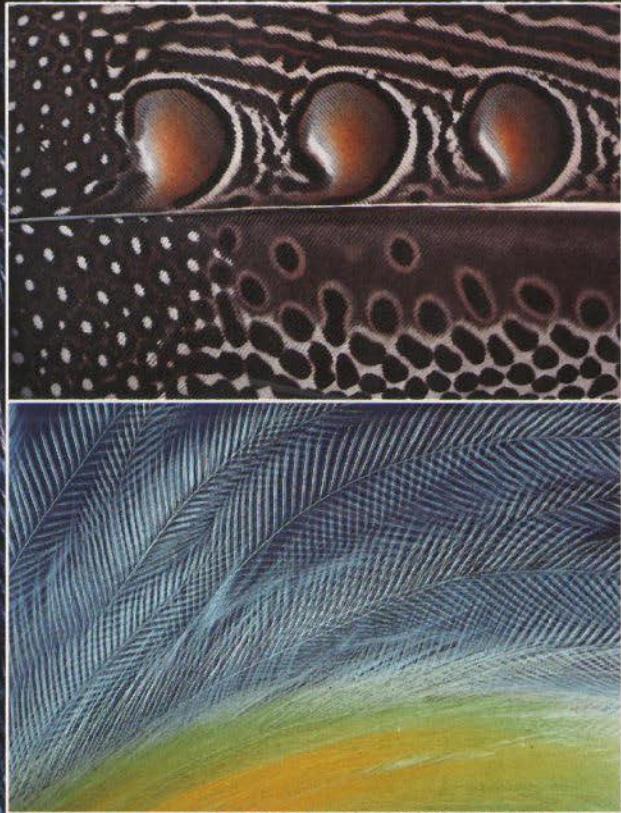
Was diese bewirkt, erblickt etwa das Team um den Nobelpreisträger Manfred Eigen in den Resultaten der Experimente mit RNA-Molekülen, die als mögliche Vorläufer der Erbsubstanz DNA gelten: Das Bild einer höchst effektiven, auf optimale Anpassung ausgerichteten Evolution (siehe Seite 64). Wie sie den Weg durchs Nadelöhr der Lebensentstehung nahm, wird sich im Detail zwar nicht mehr nachzeichnen lassen. Aber einmal entstanden, hatte das Leben sich seine eigene hierarchische Ebene erobert – einen Kosmos möglicher Entwicklungen.

Die neue, dynamische Sicht des Lebens verknüpft bislang unzusammenhängend erscheinende und unerklärliche biologische Phänomene. Nun wird beispielsweise jene vermeintlich paradoxe Konsequenz der biologischen Evolution verständlich, die uns Menschen – als erste ihrer Existenz bewußte Wesen auf diesem Planeten – ein unlösbares Problem beschert: Der Tod des Individuums ist Teil der Überlebensstrategie biologischer Sy-



**Prächtiges
Gefieder aus dem
Baukasten**

Das Gefieder der Vögel ist das vielleicht schönste Beispiel für die Kunst der belebten Natur, aus einfachen fraktalen Mustern eine nahezu beliebige Formenvielfalt zu schaffen. Näheres Hinsehen macht die »Selbstähnlichkeit« etwa der Federn am Hals eines Fasans oder im Schweif eines Paradiesvogels (ganz unten) deutlich. Auf welche Weise allerdings so farbenprächtige Zeichnungen wie die des Argus-Fasans beim Wachsen der Federn dem Grundmuster »aufgeprägt« werden, ist im Detail noch unklar.



steme. Denn in der unberechenbaren Welt der Nichtlinearität hat kein noch so ausgeklügeltes Lebewesen eine Garantie, daß die bestehende „Ordnung“ – seine Umwelt, die es am Leben hält – im nächsten Augenblick noch gilt. Eine Konsequenz der Vielfalt, die den Weg in die Zukunft öffnet.

Das Wechselspiel zwischen Chaos und Ordnung erzwingt diese Vielfalt schon auf der Ebene der Erbmoleküle. Deren her-

vorstehende Eigenschaft ist ja, sich zu vermehren – und zwar um so öfter, je besser sie ihrem Milieu angepaßt sind. Dabei entsteht Konkurrenz um „Nahrung“ und andere begrenzte Ressourcen – also ein makroskopischer „Selektionsdruck“. Und es entstehen, im Mikrokosmos der Gene, zwangsläufig Mutationen.

Das zeigt nicht nur Manfred Eigens Arbeit, das belegt auch die 1968 formulierte „neutrale Theorie der molekularen Evo-

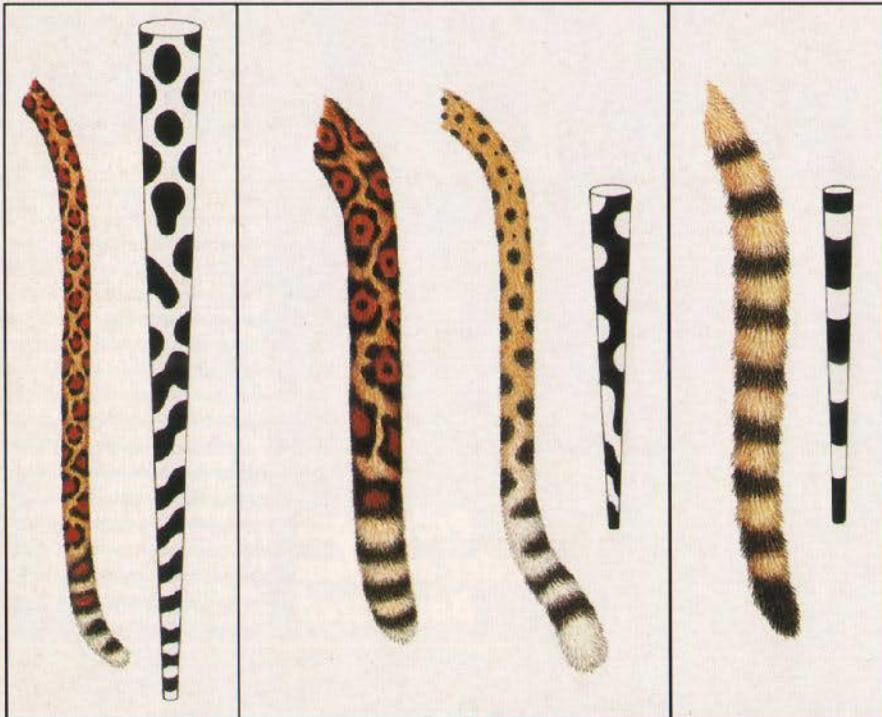
lution“ des Japaners Motoo Kimura: Sie erklärt, scheinbar im Widerspruch zu Darwin, daß auf der Ebene der Erbmoleküle „die Rolle des Mutationsdrucks und der zufälligen Veränderungen“ viel größer ist als von der klassischen Evolutionstheorie postuliert. Doch diese permanenten molekularen Veränderungen sind nicht der „natürlichen Zuchtwahl“ ausgesetzt, wie Darwin die Selektion auf der Ebene der Lebewesen genannt hatte, sondern unabhängig von ihr, also „neutral“ – sie bieten zunächst weder Überlebensvorteile noch -nachteile.

Nach zwei Jahrzehnten beginnt sich der Widerspruch zwischen Darwins und Kimuras Theorie aufzulösen. „Wenn Sie das Muster langer historischer Sequenzen verstehen wollen“, argumentierte kürzlich Stephen Jay Gould, „beten Sie für Zufälligkeit. Ironischerweise wirkt nichts einer Auflösung (des Rätsels der Entstehung stabiler biologischer Strukturen, Red.) so sehr entgegen wie herkömmliche Formen des Determinismus. Wenn jedes Ereignis in einer Sequenz eine definierte Ursache hat, dann sind wir – in einer Welt dieser Komplexität – verloren.“

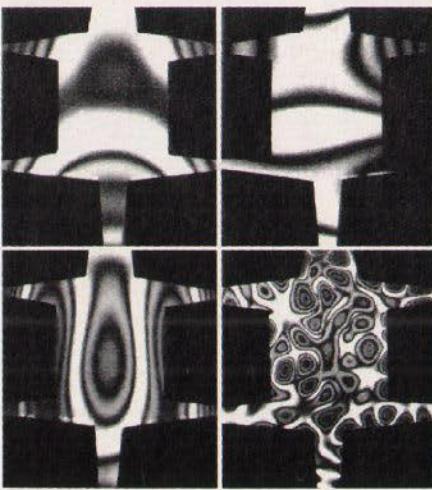
Daß wir nicht verloren sind, verdanken wir dem „deterministischen Chaos“, das gesetzmäßig Unberechenbares hervorbringt. „Die Schönheit (und Einfachheit) dieser Zufälligkeit“, fährt Gould fort, „liegt in der Abwesenheit höchst verwirrender Eigenschaften“ – Eigenschaften einer Sequenz von genau definierten Ursachen. Und Kimuras „Neutrale Theorie“ sei „eines der besten Beispiele für das entscheidend wichtige, aber gegen unsere Intuition laufende Prinzip, daß solche Zufälligkeit maximale langfristige Ordnung hervorbringt“: Nun wird klar, daß die „neutrale molekulare Evolution“ das Spielmaterial – die nötige genetische Vielfalt – für die natürliche Auslese und damit für die darwinische Evolution bereitstellt.

Die Selektion stabilisiert, so Gould, „einem Wachhund gleich“ jene Gene, die für das Überleben des Organismus unentbehrlich sind. Werden sie verändert, stirbt der Organismus oder kann sich nicht fortpflanzen. Und in der Tat konnte nachgewiesen werden, daß „neutrale Mutationen“ in nicht überlebenswichtigen Genen – etwa in „Pseudo-Genen“ – am häufigsten vorkommen: In ihnen kann, wie der Evolutionsbiologe schreibt, „evolutionäre Veränderung mit höchstmöglichen Tempo ablaufen“.

Offenbar hat sich das Leben im Laufe seiner Evolution diese Arbeitsteilung zwischen maximaler Vielfalt im scheinbar Unwesentlichen und selektiver Stabilisierung im Wesentlichen immer wieder zunutze gemacht, wenn es darum ging, Un-



Was haben die Schwänze von Leopard, Jaguar, Gepard und Ginsterkatze mit oszillierenden chemischen Reaktionen gemein? Den Mechanismus der Musterbildung, fand James Murray aus Oxford heraus: Morphogenetische Reaktionen während des embryonalen Wachstums können ähnliche Muster auf Schwänzen entstehen lassen wie der per Computer modellierte »Reaktions-Diffusions-Mechanismus« auf Kegelstümpfen. Auch bei Vibrationsversuchen mit dünnen Platten entstehen solche typischen Flecken und Streifen



Wo der Jaguar seine Flecken trägt, stehen im Modell die Wellen



Was Züchter beim Dalmatiner »herausgemeldet« haben, dient Leopard oder Hyäne als Überlebenshilfe: Fellzeichnungen »verwischen« die Umrisse eines Tieres in dessen natürlicher Umwelt. Diese Illustration gilt Neurowissenschaftlern als Musterbeispiel für die Fähigkeit des menschlichen Gehirns, auch in solchen »Suchbildern« Sinnvolles schnell zu erkennen: eine Fähigkeit, die offenbar ihrerseits auf die Musterbildung durch »selektive Stabilisierung« in den neuronalen Netzen der Hirnrinde zurückgeht

Wer den Hund erkennt, durchschaut den Überlebenstrick

vorhersehbares zu bewältigen: Denselben Trick finden Forscher auch

- im Immunsystem des Menschen, wo die „B-Zellen“ wahllos Abermillionen unterschiedlicher Antikörper produzieren; welche dieser körpereigenen Abwehrwaffen trifft, „entscheiden“ die ein dringenden Krankheitserreger selbst – ein auf sie „passender“ Antikörper ist für die ihn produzierende B-Zelle das Signal, sich rasend zu vermehren und damit eine Armada identischer Antikörper auszuschütten;

- im Nervensystem von Wirbeltieren: Dort werden während des embryonalen

Wachstums – und wahrscheinlich auch bei Lernvorgängen – zunächst zufällig entstandene neuronale Verbindungen verstärkt, sobald sie funktionable Kontakte zwischen Nervenzellen herstellen; nicht funktionierende Kontakte sterben ab (siehe „Gehirn“, Seite 118).

Im Immun- und Nervensystem ermöglicht selektive Stabilisierung also eine na-

hezu unbegrenzte Flexibilität bei minimalem Aufwand an genetischer Information. So erweist sich dieses zunächst verschwenderisch erscheinende Prinzip bei genauer Analyse als höchst effizient: Die selektive Stabilisierung wählt beim ungeplanten Spiel mit unterschiedlichen Genen oder Zellen, Organismen oder Spezies jene Varianten aus, die den jeweils herrschenden Randbedingungen nicht widerlaufen.

Die Dauerhaftigkeit einer so gefundenen, genetisch festgelegten Variante ist allerdings nicht garantiert: Sie muß immer wieder den Überlebenstest der Fortpflanzung bestehen, muß also – bei vielzelligen Pflanzen und Tieren – durchs Nadelöhr des embryonalen Stadiums. „Die Evolution ist sehr stark durch die konservative Natur der embryonalen Programme eingeschränkt“, erklärt Gould. „Nichts kann radikal geändert werden, ohne den Embryo durcheinanderzubringen. Die Ordnung des Lebens – und die Dauerhaftigkeit nahezu aller grundlegenden anatomischen Strukturen während der gesamten Entwicklungsgeschichte der vielzelligen Tiere – dokumentiert, wie kompliziert und widerstandsfähig die komplexen embryonalen Programme gegen Veränderungen sind.“

Dieses Beharrungsvermögen im Fluß der Evolution bei gleichzeitiger Nutzung neuer Entwicklungschancen im Universum der Möglichkeiten dokumentieren



Fraktale Kräuter sprießen im elektronischen »Garten«, den der holländische Biologe Aristid Lindenmayer gemeinsam mit den kanadischen Computer-Exper-

ten Przemyslaw Prusinkiewicz und James Hanan bestellt: Die Form entsteht, wenn sich ein simuliertes Wachstumssignal von der »Wurzel« her ausbreitet

beispielhaft die Arbeiten von zwei Wissenschaftlern, die zeitlich und thematisch Welten auseinander zu liegen scheinen: die 1988 veröffentlichte Theorie der „Topobiologie“ des New Yorker Nobelpreisträgers Gerald Edelman und das im Jahr 1917 erschienene, 1942 erweiterte Werk „Über Wachstum und Form“ des damals in Schottland lehrenden Biologen D’Arcy Thompson.

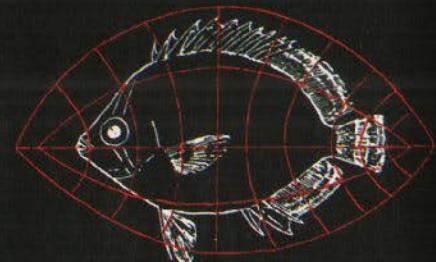
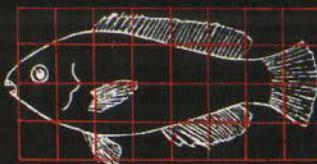
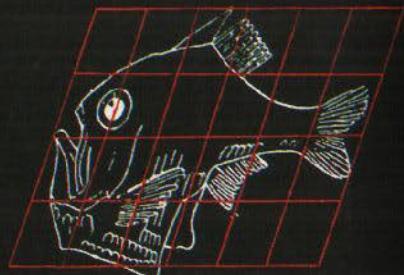
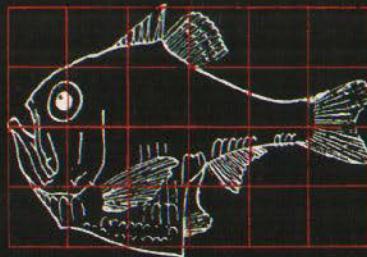
Edelman entwarf mit seiner Topobiologie ein elegantes Modell dessen, wie bei der embryonalen Entwicklung die genetische Information mit „Morpho-Regulatoren“ genannten Eiweißsubstanzen zusammen spielt und so in zeitlich und räumlich geordneter Weise Organe und Organismen entstehen lässt. Dabei konnte der Nobelpreisträger die zunächst unübersichtlich erscheinende Fülle der Morpho-Regulatoren in drei Klassen einteilen: drei Grundmuster, die ausreichen, um die Wechselwirkungen zwischen den Zellen eines Embryos zu vermitteln. Im Licht der Topobiologie-Theorie erscheint die Steuerung embryonaler Zellen, die sich beispielsweise in einem Hühner-Embryo zu Haut und dann Federn spezialisieren (siehe Grafik Seite 109), nicht mehr als unentwirrbar-kompliziertes „Wunder“, sondern als höchst ökonomischer Vorgang: ein biologisches Baukasten-System, das embryonal konservativ ist und doch eine höchst unterschiedlichen Anforderungen angepaßte Formenvielfalt an Organen und Organismen ermöglicht.

Während Edelmans Arbeit sofort breite Aufmerksamkeit gewiß war, galt D’Arcy Thompsons Werk dagegen bis vor kurzem als „glorioser Anachronismus des 20. Jahrhunderts“: eine faszinierende, im Original 1116 Seiten mächtige, höchst einprägsam geschriebene und illustrierte Sammlung der unterschiedlichsten biologischen Phänomene – von der Form der Qualle über die „Deformation“ der Gestalt von Fischen bis zu den „kuriosen mathematischen Eigenschaften“ der so genannten Fibonacci-Zahlen, die sich unter anderem in der Anordnung von Blütenblättern wiederfinden.

Inzwischen haben vor allem die Chaos-Forscher das Werk des 1948 gestorbenen Pioniers als schier unerschöpfliche Quelle für Beispiele entdeckt, wie sich die mathematische Grundstruktur des Kosmos im Reich des Lebens widerspiegelt. Aber immer noch ist die meist elegant-effiziente mathematische Komponente des Wachstums und Formens in Lebewesen rätselhaft – obwohl einige besonders schöne Beispiele schon seit Jahrhunderten bekannt sind.

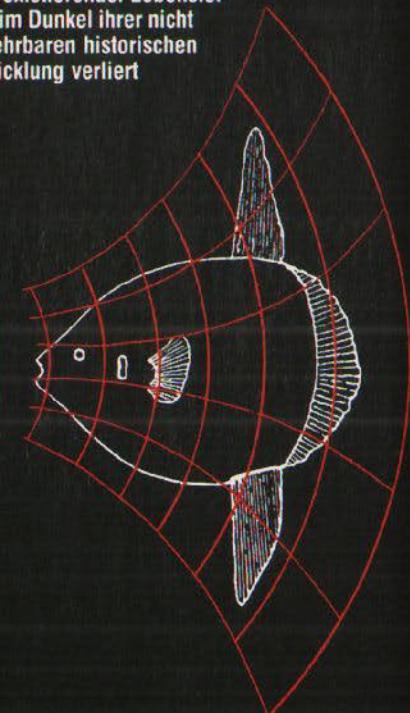
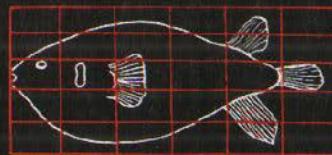
Die „Fibonacci-Sequenz“ etwa hat Leonardo von Pisa, genannt Fi Bonacci,

Ein „glorioser Anachronismus“ wurde wieder aktuell



Wie das gemeinsame Grundmuster von Fischen durch Maßstabs- und Winkelveränderungen zu unterschiedlichen und doch ähnlichen Formen führt, hat der schottische Biologe D’Arcy Thompson 1917 in seinem Buch „Über Wachstum und Form“ demonstriert. Das lange Zeit als „glorioser Anachronismus“ unterschätzte Werk ist heute eine

Fundgrube für Beispiele, wie die Evolution mit einmal entwickelten Grundmustern spielt. Thompson hatte früh erkannt, daß sich die Herkunft existierender Lebensformen im Dunkel ihrer nicht umkehrbaren historischen Entwicklung verliert





Was Tintentropfen im Wasser mit Quallen gemein haben



Ein »sehr schönes Experiment«, schreibt D'Arcy Thompson, sei es, »einen Tintentropfen in Wasser fallen zu lassen«: Die so »erzeugte Figur ist nahezu analog der Gestalt einer Qualle«. Solche Analogien, erkannte schon Thompson, geben Hinweise auf gemeinsame mathematische Prinzipien: Abstrakte Formen sind optimale Lösungen für ähnliche Probleme

schon Anfang des 13. Jahrhunderts beschrieben: eine Serie von Zahlen, bei der jede Zahl jeweils die Summe der beiden vorangegangenen ist – also 1, 1, 2, 3, 5, 8 etc.; das Verhältnis einander folgender Zahlen nähert sich dem „Goldenem Schnitt“.

Über diese faszinierende Zahlenfolge stolpern nun auch theoretische Biologen wie Aristid Lindenmayer von der Universität Utrecht und seine Kollegen Przemyslaw Prusinkiewicz und James Hanan, Computerexperten an der kanadischen University of Regina. Sie sind den mathematischen Grundstrukturen pflanzlicher Formen so weit auf die Spur gekommen, daß sie inzwischen eine Fülle verblüffend realistisch aussehender „Gewächse“ von Computern errechnen lassen können: Ohne detaillierte Konstruktionsangaben, nur mit wenigen Algorithmen formen sich auf dem Monitor fraktale Blumen oder Kräuter quasi von allein (siehe Fotos Seite 113).

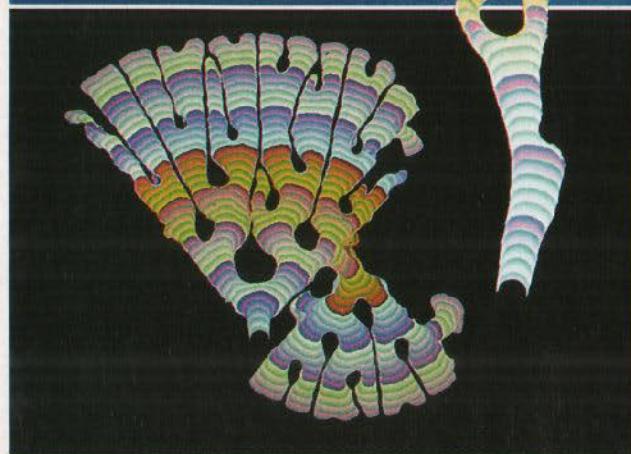
Mit ihren Computern können die Forscher nun auch mühelos testen, was geschiehe, wenn eine Pflanze ihre Blütenblätter oder Samen nicht exakt im Winkel des „Goldenem Schnitts“ von 137,5 Grad – also in der Fibonacci-Sequenz – anordnen würde: Schon bei einer Abweichung von 0,2 Grad würde sich statt eines maximal dicht und damit effizient gepackten Blütenköpfchens eine auseinanderstrebende „Spirale“ bilden (siehe Grafiken auf Seite 101).

Hinter dieser „Phasen-Schönheit“, wie D'Arcy Thompson die pflanzlichen Muster am Beispiel des Maiglöckchens genannt hat, steckt offenbar ebenfalls mathematisch begründete Ökonomie. Sie hat den englischen Mathematiker Michael Barnsley angeregt, über das „fraktale Skelett“ von Pflanzen als Beispiel für die Reduktion von Bilddaten bei der Datenübertragung nachzudenken: Wenn die Form aus der mathematischen Funktion folgt, genügt es, nur die entsprechenden Formeln zu speichern oder zu übertragen.

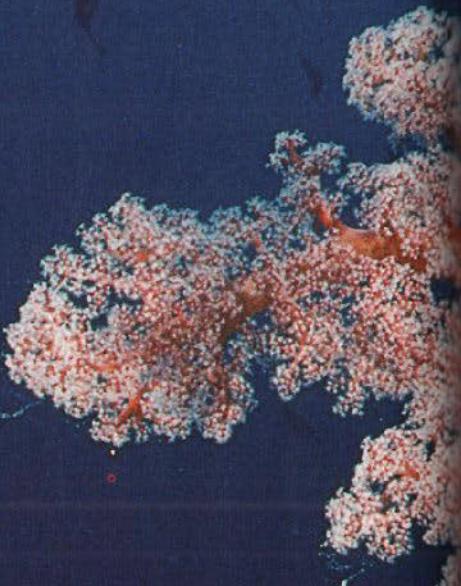
Thompson, würde er noch leben, könnte das kaum verblüffen – auch nicht, wenn sich herausstellen sollte, daß unsere Erbinformationen auf ähnlich effiziente Weise mit vergleichsweise wenig genetischer Information maximal komplexe Organe wie unser Gehirn entstehen läßt: D'Arcy Thompson hat in den abstrakten Formen schon vor einem guten halben Jahrhundert die optimalen Lösungen für alltägliche Probleme erkannt. Bei der Frage jedoch, warum „gute“ Formen oft „solche einfache, numerische Regelmäßigkeit aufweisen“, schreibt Stephen Jay Gould mit Berufung auf Thompson, „kann ich nur meine Ignoranz und mein Staunen kundtun“.

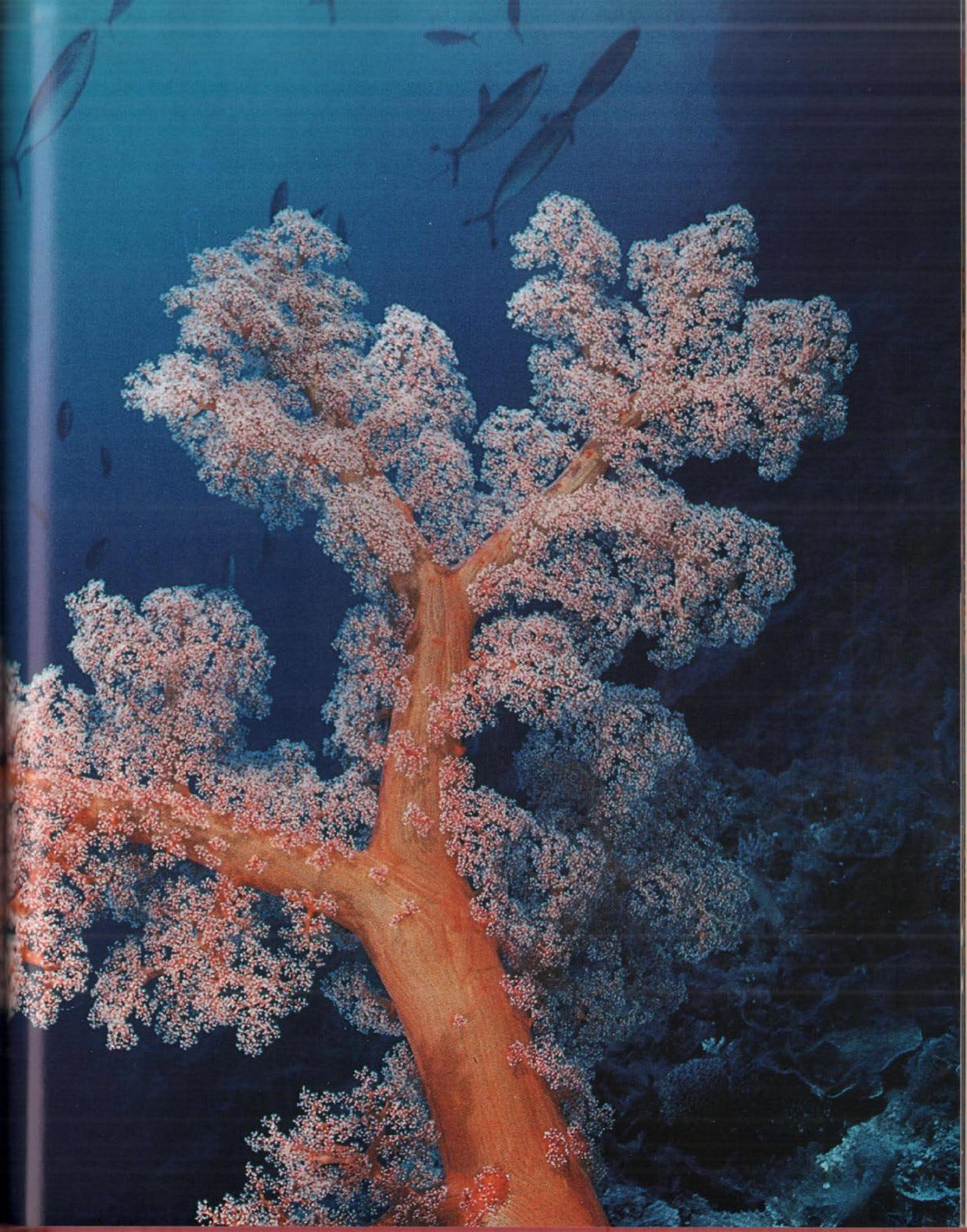
□

Beim fraktalen Spiel kommt auch der Schwamm 'rüber



Geweihschwämme, die ihren natürlichen Vorbildern verblüffend ähneln, produziert der Amsterdamer Forscher Jaap Kaandorp, indem er seinem Computer Formeln für fraktale Wachstum eingibt und das errechnete Resultat auf dem Monitor sichtbar macht. Kaandorp hofft, daß solche Computermodelle »für ökologische Forschungen nützlich sein könnten«. Schon heute bewirkt die fraktale Revolution, daß auch Laien das Prinzip der Selbstähnlichkeit etwa in den vermeintlich extravaganten Gestalten exotischer Organismen entdecken können – wie in den »Bäumen« der Weichkorallen aus dem Südwest-Pazifik





E

s ist kaum zu glauben: Obwohl der Hirnrinde nachempfundene Schaltungen die Computertechnik zu revolutionieren beginnen, galten Hirntheoretiker im Kreise ihrer experimentierenden Kollegen bis vor kurzem als Außenseiter. 1986, bei einem internationalen Treffen einiger dieser Sonderlinge in Bad Homburg, hielt auch Walter Freeman aus dem kalifornischen Berkeley einen Vortrag – mit dem er sich als Außenseiter unter den Außenseitern auswies. Sein Thema: „Wie Gehirne Chaos produzieren, um Ordnung in der Welt zu entdecken“.

Chaos im Gehirn? Das kennen Hirnforscher zur Genüge: Nervenzellen feuern „zufällig“, und im Elektroenzephalogramm (EEG) dominiert das „Rauschen“. Das allgegenwärtige Tohuwabohu macht den Forschern das Leben sauer, gilt es ihnen doch nur als äußerst unwillkommene Störung, Überdeckung, „Verrauschung“ der „richtigen“, der wiedererkennbaren Signale, die sie suchen. Und diese „Störungen“ sollten sinnvoll sein, sollten gar – wie Freeman behauptete – die Arbeit des Gehirns überhaupt erst ermöglichen? Als in Wahrheit kreatives Chaos?

Im Laufe seines Vortrages zog Freeman ein Ding aus Pappmaché aus seinem Rucksack, das einem sehr zerbeulten Reifen glich: das selbstgebastelte Modell eines „chaotischen Attraktors“, der das Geschehen im Hirn „regieren“ sollte. Manche der Wissenschaftler kicherten ein wenig hilflos beim Herumreichen.

Dabei betonte der For- scher aus Berkeley immer wieder, daß seine Überlegungen zum „Chaos“ das von den meisten Theoretikern favorierte „konkessionistische

Kann das Hirn das Chaos bändigen?

Hirnmodell“ im Prinzip bestätigen und nur in einem kleinen, aber entscheidenden Punkt erweiterten.

„Konnektionismus“ ist ein etwas unglücklicher Sammelname für das Credo einer wachsenden Gruppe von Hirnforschern und neuer-

dings auch Computerbauern. Diese sehen die Hirnrinde nicht in Analogie zum programmierbaren digitalen Computer, sondern als sich selbst organisierendes „neuronales Netz“. Im Gehirn besteht dieses Netz aus Nervenzellen, die sehr vielfältig mit

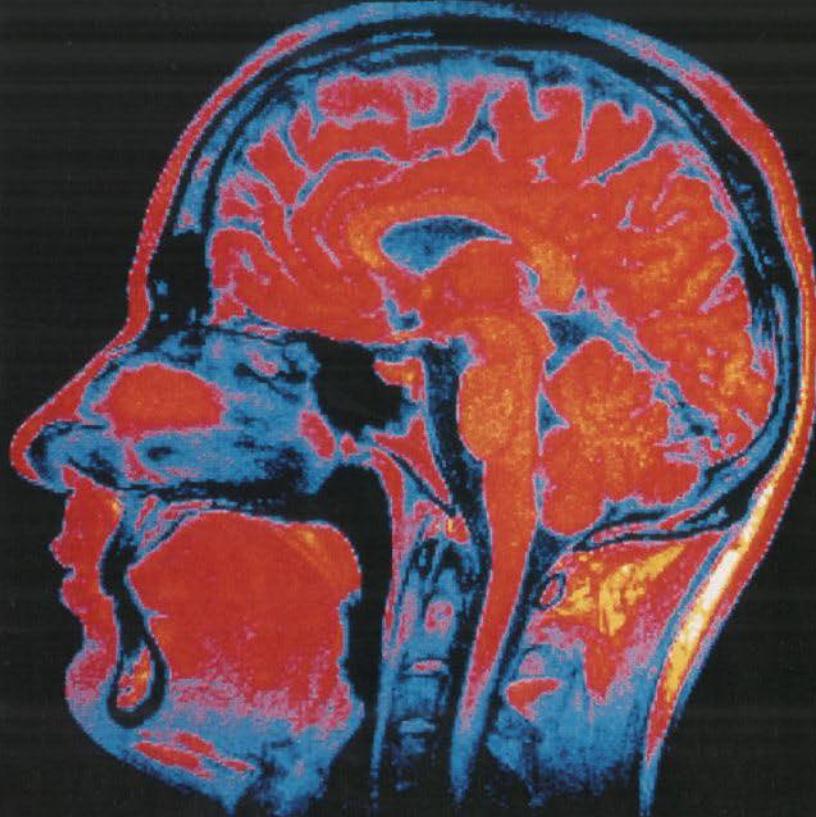
einander verbunden sind: Eine kleine graue Zelle schickt Informationen zu etwa 10 000 anderen Neuronen und empfängt Signale von ebenso vielen – jedes Neuron berücksichtigt ungezählte Informationen gleichzeitig. Nach der Überzeugung der „Konnektionisten“ könnte dieses Verschaltungsmuster erklären, warum das Gehirn kann, was klassische Computer nicht können: Wir deuten Situationen auf der Basis eines riesigen, unausgesprochenen, aber präsenten Hintergrundwissens. Mathematische Be- trachtungen haben gezeigt, daß neuronale Netzwerke auch in der Lage sind, unvollständige Informationen zu ergänzen. Diese Fähigkeit könnte erklären, wie wir nach Jahren das oft nicht unerheblich veränderte Gesicht eines alten Freundes wiedererkennen oder aus Geräuschenfetzen eine Sinfonie.

Zellverbände brauchen keinen zentralen Befehlshaber

Das Gesicht des Freundes kommt nach der Vorstellung der Konnektionisten auf folgende Weise ins „neuronale Netzwerk“ hinein: Während herkömmliche Computer als Gedächtnis einen Speicher besitzen, wo Gelerntes in digitaler Verschlüsselung abgelegt wird, benötigen neuronale Netze keinen separaten Speicher. Erinnerungen entstehen hier, indem eine Vielzahl von Nervenzellen durch gemeinsame Aktivität stär-



Die Nervenzellen der menschlichen Großhirnrinde – hier ein eingefärbter Schnitt – organisieren ihre präzise Verknüpfung selber: Im Gewirr zufälliger Verbindungen werden jene verstärkt, die sich als sinnvoll erweisen



Das Bild eines menschlichen Gehirns, aufgenommen mit einem Kernspin-Tomographen, läßt nichts ahnen von dem Chaos unter der Schädeldecke. Chaos im Kopf? Die meisten Menschen würden sich, danach gefragt, weniger davon wünschen. Hat allerdings der US-Hirnforscher Walter Freeman recht, dann ist es eben das Chaos, das unser Gehirn so lernfähig macht

ker miteinander verbunden werden. Ohne Befehle oder organisierendes Zentrum, vielmehr durch „Selbstorganisation“, entstehen so im Netz Teilnetze stärker miteinander verbundener Zellen, sogenannte Cell Assemblies oder Zellverbände. In der Cell Assembly, die sich etwa als Reaktion auf das Bild eines von den Augen aufgenommenen Gesichtes gebildet hat, feuern – so die Hypothese – alle zugehörigen Neuronen auch dann gemeinsam, wenn sie später nur von einem Teil des Gesichtes erregt wird oder durch ein Gesicht, das dem ursprünglichen ähnelt.

Daß Gehirne gemäß den Prinzipien solcher lernenden neuronalen Netze funktionieren, ist eine Hypothese. Doch immer mehr Experimente unterstützen die Vorstellung, daß Gehirne sich tatsächlich durch die gemein-

same Aktivität von Nervenzellen selber strukturieren: Lernen scheint mit einer Verstärkung oder Abschwächung von „Synapsen“, den Kontaktstellen zwischen Nervenzellen, einherzugehen.

„Selbstorganisation“ könnte also das Schlüsselwort zum Verständnis der Prozesse sein, welche die Verknüpfungsmuster unserer kleinen grauen Zellen hervorbringen. Unsere Gene programmieren die Verbindungen unserer Nervenzellen in der Großhirnrinde lediglich grob vor, so daß wir fast alle Fähigkeiten, die wir zum Leben brauchen, erst lernen müssen. So könnten wir beispielsweise ohne solche Lernprozesse nicht einmal sehen: Eine normal funktionierende Sehrinde bildet sich bei Säugetieren nur, wenn sie das Sehen nach der Geburt üben.

In der Sehrinde gibt es zunächst viel zu viele Verbin-

dungen zwischen den Zellen. Wenn die Nervenzellen durch Signale von den Augen aktiv werden, festigen sich – ohne Befehle oder organisierendes Zentrum – manche dieser Verbindungen, während die restlichen wahrscheinlich verkümmern.

Blinder Zufall, selektiv stabilisiert, öffnet uns die Augen

Der „adaptive“ Selbstorganisationsprozeß, durch den das endgültige Verknüpfungsmuster in der Sehrinde entsteht, verläuft gemäß dem grundlegenden Prinzip der „selektiven Stabilisierung“: Ein durch „deterministisches Chaos“ oder blinden Zufall erzeugtes, vielfältiges Angebot wird durch Selektion auf „Überlebensfähiges“ eingeschränkt.

Ausgebildet werden kann die Sehrinde nur während ei-

ner „kritischen Phase“ nach der Geburt. Doch andere Gebiete unseres Gehirns bleiben zeit des Lebens „plastisch“ und bewahren sich sozusagen ihre Kindlichkeit, die Pragbarkeit durch Neues. Dieser lebenslangen Fähigkeit zum Lernen und Umlernen liegt die Fähigkeit des Gehirns zugrunde, sich immer wieder neu zu organisieren und umzuorganisieren.

Michael Merzenich von der University of California in San Francisco hat dies in Versuchen an Affen plausibel gemacht: Er bewies, daß sich beispielsweise die neuronale „Repräsentation“ eines Fingers in der Großhirnrinde der Tiere verändert, wenn dieser Finger ein neues Bewegungsmuster lernt. Auch durch Computersimulationen von neuronalen Netzen läßt sich die Vorstellung begründen, daß das Gehirn keineswegs irgendwann fest verdrahtet

ist. Durch dauernden „Umbau“, durch immer wieder neue Veränderung der Synapsenstärken könnte es sich veränderten Bedingungen anpassen.

Vielleicht beruht eine bisher unverstandene menschliche Fähigkeit auf solchen dynamischen Mechanismen: die Fähigkeit, nach Hirnverletzungen verlorengegangene oder gestörte Fertigkeiten wieder zu lernen.

Unser Gehirn ist also den Konnektionisten zufolge deshalb so effektiv, weil es in Antwort auf die Ordnung der Welt in seinem Netzwerk adaptive geordnete Strukturen wie die Cell Assemblies ausbilden kann.

Da kann jemand, der das Chaos zu einem grundlegenden Arbeitsprinzip des Gehirns erklärt, befreudlich wirken. Doch genau das tut Walter Freeman. Ja, er behauptet, daß die neuronalen Netze im Gehirn ohne chaotische Nervenaktivität nichts Neues lernen können.

Im Riechkolben des Kaninchens entstehen seltsame Muster

Walter Freeman und seine Kollegen bemühten sich in Experimenten, wiedererkennbare, informationshaltige Aktivitätsmuster im Gehirn zu entdecken. Sie untersuchten dazu das EEG, das der „Riechkolben“ – ein über den Nasenraum vorgestülpter Teil des Gehirns – als Antwort auf Gerüche produziert. Versuchstiere waren Kaninchen. Diesen wurden ein Bündel von 64 feinen Elektroden eingepflanzt, die Punkt für Punkt die elektrische Aktivität auf der Oberfläche des linken Riechkolbens registrierten. Die Tiere waren trainiert worden, auf verschiedene Gerüche zu reagieren, und die Forscher hofften, daß ihre Apparatur für jeden dieser Gerüche ein typisches Aktivitätsmuster aufzeichnen werde.

Doch es dauerte lange, bis die Hirnforscher den Versuch

Aus dem Wirrwarr organisiert sich das Sinnvolle selbst

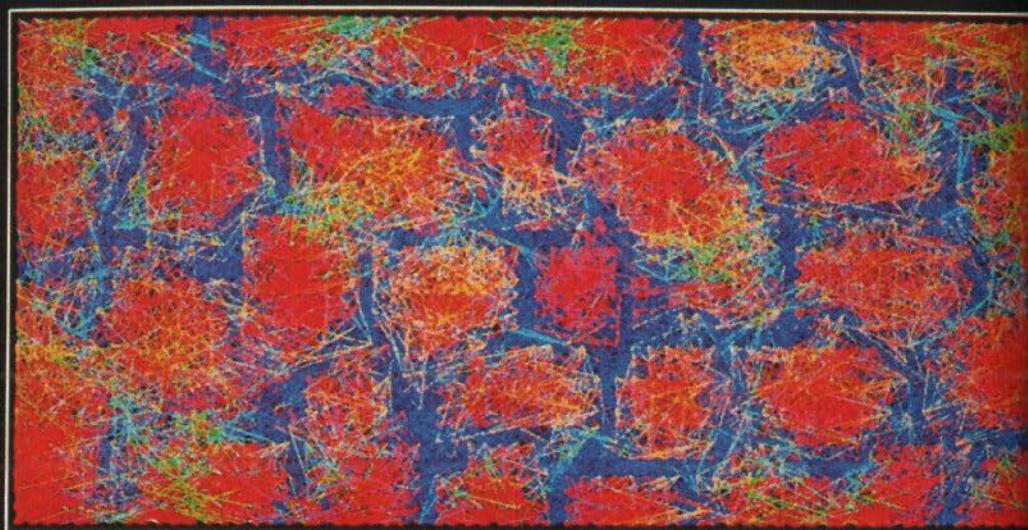
Per Computer-Simulation hat ein Team um den US-Nobelpreisträger Gerald Edelman sichtbar gemacht, wie ein neuronales Netzwerk sich selber organisieren könnte: Zunächst sind die „Nervenzellen“ über „Synapsen“ mehr oder weniger beliebig verknüpft (oben).

Auf „Sinnesindrücke“ hin verstärken sich jene Verbindungen, die zur Verarbeitung benutzt werden. Die so verknüpften Zellgruppen können nun geordnet auf den Reiz antworten. „Synaptic strength“ ist ein Maß für die Stärke synaptischer Verbindungen



SYNAPTIC STRENGTH

MIN MAX



SYNAPTIC STRENGTH

MIN MAX

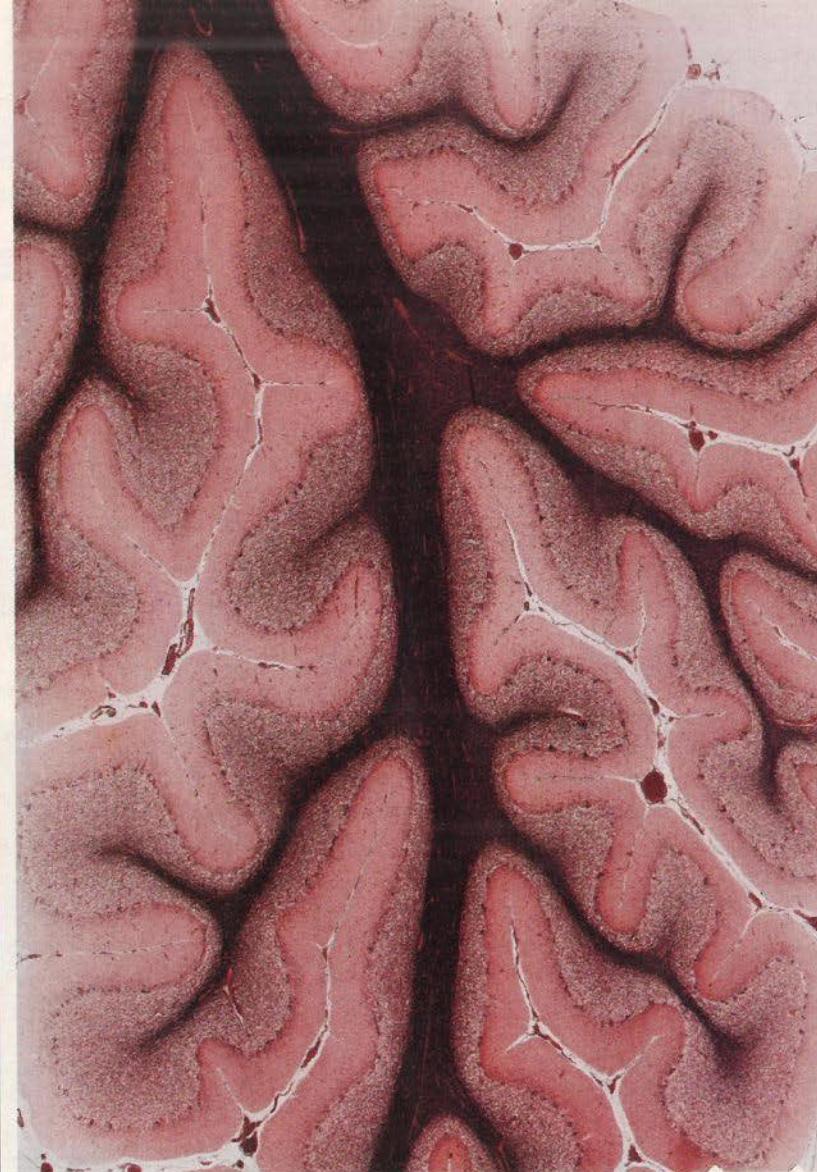
und dessen Auswertung so vervollkommen hatten, daß sie im „Rauschen“ – in der scheinbar zufälligen Aktivität der Nervenzellen – überhaupt etwas erkennen konnten.

Vor einigen Jahren fanden sie endlich die gesuchten Signale: Die spezifische Antwort auf einen gelernten Geruch sahen die Forscher in einer räumlichen Verteilung der Signal-Intensität – über einen kurzen Zeitraum gemittelt. Sie ähnelt damit einem Schwarzweißbild, dessen wesentliche Information nicht in der Wellenlänge, sondern in der räumlichen Helligkeitsverteilung des Lichtes steckt. Jeder Geruch erzeugt beim Einatmen einen für ihn typischen, wiedererkennbaren Aktivitäts-„Fingerabdruck“ auf der Oberfläche des Riechkolbens.

Beim Ausatmen verschwindet blitzartig der »Fingerabdruck«

Doch die Details ihrer Entdeckung waren den Forschern zunächst vollkommen rätselhaft:

- An der Reaktion auf einen gelernten Geruch scheinen sehr viele, wenn nicht alle Zellen des Riechkolbens beteiligt zu sein – und nicht nur, wie zunächst vermutet, einige wenige, dem jeweiligen Geruch zugeordnete.
- Lernt das Tier einen neuen Geruch, verändern sich auch die Antwortmuster auf die bereits bekannten Gerüche.
- Ein bestimmter Geruch erzeugt in den Riechkolben verschiedener Kaninchen vollkommen unterschiedliche Aktivitäts-„Fingerabdrücke“.
- Wenn das Kaninchen einen Geruch erwartet, ist der Riechkolben zunächst scheinbar zufällig aktiv, aber deutlich stärker als bei Ruhe des Tieres. Blitzartig erscheint dann beim Riechen gegen Ende des Einatmens der „Fingerabdruck“, das räumlich geordnete Aktivitätsmuster des Riechkolbens, und es verschwindet ebenso



»Baum des Lebens« nennen Anatomie die Faltenstruktur, die beim Schnitt durch die menschliche Kleinhirnrinde sichtbar wird. Wie Bäume und Blätter ist auch dieser Teil des Gehirns ein »fraktales« – ein selbstähnliches – Gebilde: Die Baumstruktur im großen gleicht der Bäumchenstruktur im kleinen

Im Kleinhirn wächst der »Baum des Lebens«

blitzartig wieder zu Beginn des Ausatmens.

All diese Seltsamkeiten unterstützen zwar die Vorstellung, daß die Antworten des Riechkolbens auf Gerüche auf der „Selbstorganisation“ eines neuronalen Netzes beruhen. Doch wie diese Vorgänge im Detail aussehen könnten, war rätselhafter als zuvor. Das Ende der Ratlosigkeit kam, als Freeman von den Erkenntnissen der neuen Chaos-Mathematik erfuhr, in deren Licht die eigenartigen Ergebnisse erklärbar zu sein schienen. Ihm wurde klar, daß seine selbstverständliche Annahme, die „zufällige“ Aktivität des Riechkolbens

sei hauptsächlich von anderen Hirnteilen verursachtes „Rauschen“, falsch sein könnte. Vielleicht war sie – so spekulierte der Forscher – ein vom Riechkolben selbst gezielt erzeugtes deterministisches Chaos?

Aus den Daten folgerten Freeman und sein Team: Der Riechkolben produziert tatsächlich deterministisches Chaos. Selbsterzeugtes Chaos ist ein wichtiges Funktionsprinzip des Gehirns. Und es eröffnet neuronalen Netzwerken Möglichkeiten, die Netzwerke ohne deterministisches Chaos nicht haben.

Für die Vorstellung, daß es sich bei dem scheinbaren Zu-

fall im Riechkolben tatsächlich um intern erzeugtes deterministisches Chaos handelt, sprechen vor allem drei Beobachtungen:

1. Das EEG ruhender Tiere scheint von einem „chaotischen Attraktor“ mit 4 bis 7 Dimensionen regiert zu werden – ein Indiz für deterministisches Chaos. Dagegen sieht der zeitliche Verlauf des EEG während der „Fingerabdruck“-Muster periodisch aus, könnte also von periodischen Attraktoren bestimmt sein.

2. Simulationen der Riechkolben-Aktivität erzeugen je nach Bedingungen deterministisches Chaos oder Ordnung: Die Nervenzellen im Riechkolben sind hochgradig rückgekoppelt. Nichtlineare Differentialgleichungen, die solche Verschaltung plausibel beschreiben, haben unter gewissen Vorgaben chaotische, unter anderen aber regelmäßige Lösungen: Diese „Inseln der Ordnung“ manifestieren sich, so Freeman, im Experiment in den gelerten „Fingerabdrücken“.

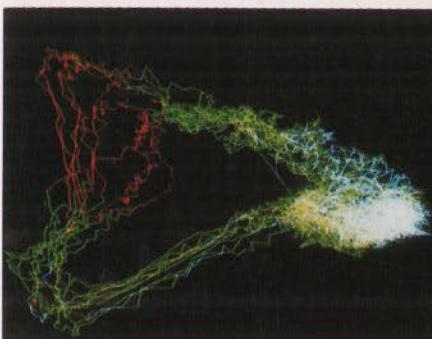
3. Die blitzartigen Wechsel von „Zufalls-“ und „Fingerprint“-Mustern sind kaum zu erklären, wenn der „Zufall“ durch „Rauschen“ (siehe Glossar) entsteht. Rauschen ist nur langsam veränderbar – um thermisches Rauschen zu verringern, muß etwa die Temperatur vermindert werden. „Chaos“ dagegen ist ein dynamischer Zustand, der mit seinen Entstehungsbedingungen schlagartig entsteht und verschwindet.

Von den Vorteilen des deterministischen Chaos im Kopf

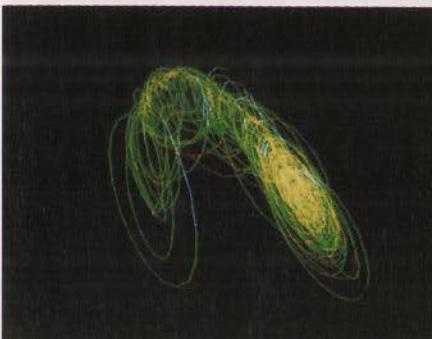
Deterministisches Chaos in neuronalen Netzwerken – und damit im Gehirn – hat nach Ansicht der Wissenschaftler eine Reihe von Vorteilen:

- Deterministisches Chaos ist insofern kontrollierbar, als das Gehirn durch leichte Veränderung von „Parametern“ einen Attraktor blitzartig,

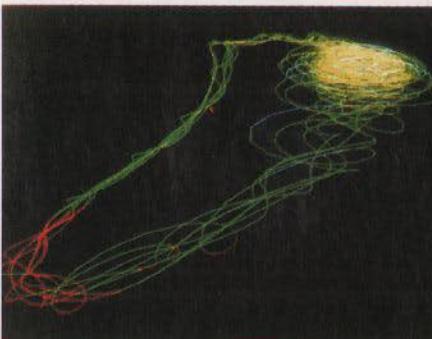
Attraktoren zeigen die Ordnung im Chaos des Gehirns



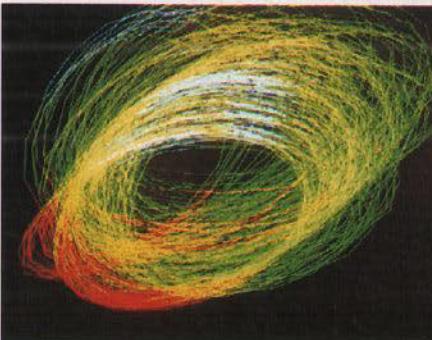
Feuern die Neuronen des „Riechkolbens“ während eines epileptischen Anfalls koordinierter als üblich, läßt sich im EEG aus ihrer Aktivität ein „Attraktor“ mit nur zwei bis drei Dimensionen ermitteln ...



... während der Attraktor bei „normaler“ Aktivität – hier das Ergebnis einer Modellrechnung – wohl fünf bis sechs Dimensionen hat: Normal ist nach Freeman für die Neuronen des Riechkolbens das deterministische Chaos



Bei einem epileptischen Anfall ist die Komplexität der Hirnströme geringer. Diese Computer-Simulation erzeugte einen Attraktor mit drei bis vier Dimensionen



Wird ein Geruch im Riechkolben wahrgenommen, ordnet – wie dieser periodisch aussehende Attraktor geringer Dimension den Forschern verrät – sich die neuronale Aktivität

ohne langwieriges Suchen „ansteuern“ kann. Ein Sinnenindruck mag eine solche Veränderung bewirken. Dadurch wird Gelerntes sofort erkannt.

- Chaos ermöglicht erst, einen periodischen oder quasi-periodischen Attraktor auch „wieder zu verlassen“: Sonst bestünde die Gefahr, daß beispielsweise der Riechkolben nach dem Erkennen eines Geruchs unablässig im durch ihn angeregten „Fingerprint“-Zustand schwingen würde. Das Kaninchen müßte somit, wenn die Kolbenaktivität nicht gestört und das „Fingerprint“-Muster gelöscht würde, ständig den gleichen Geruch riechen. Deterministisches Chaos verhindert Starrheit im Gehirn. Es könnte somit eine wichtige Voraussetzung für das Denken sein.

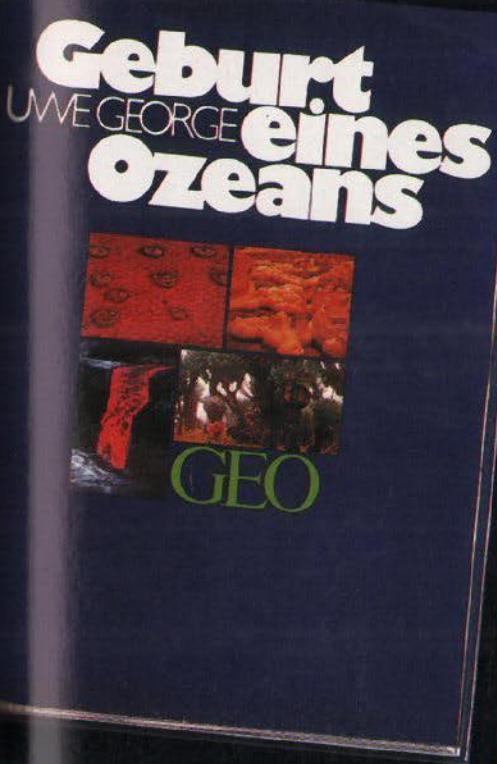
- Gäbe es kein „Chaos“ im Gehirn, würden außerdem neue Eindrücke oft nicht als neu erkannt und gelernt, sondern sie würden das neuronale Netzwerk in einen bereits gelernten Schwingungszustand fallen lassen.

Wenn die Forscher um Walter Freeman recht haben, dann wären wir ohne deterministisches Chaos im Hirn lernbehindert. Der Gedanke drängt sich auf, daß deterministisches Chaos nicht nur auf der „niedrigen“, von Freeman untersuchten Ebene wichtig ist: Der Reichtum all unserer „unnützen“ Gedanken und Ideen ist gewiß keine sinnlose „Überschuß-Aktivität“ und mag von der Kreativität chaotischer Prozesse auch auf höheren Ebenen röhren.

Das verschwenderisch scheinende, Vielfalt erzeugende deterministische Chaos hat vielleicht die Entwicklung des Lebens auf der Erde ermöglicht.

Auch im Gehirn könnte es Vielfalt erzeugen und so den Lauf unseres Lebens in ähnlicher Weise stimulieren wie die Evolution des Lebens selbst: als ein schöpferisches Spiel. □

Die schönsten Seiten des Lesens. Von GEO.



Ein Kontinent zerbricht

Das aufregende Geschehen, wie ein Ozean entsteht, hat Uwe George auf mehreren Expeditionen beobachtet. Hier fasst er seine Erfahrungen und Erkenntnisse der modernen Wissenschaft zusammen. Ausgezeichnet mit dem Kodak-Fotobuchpreis.

Uwe George **Geburt eines Ozeans**

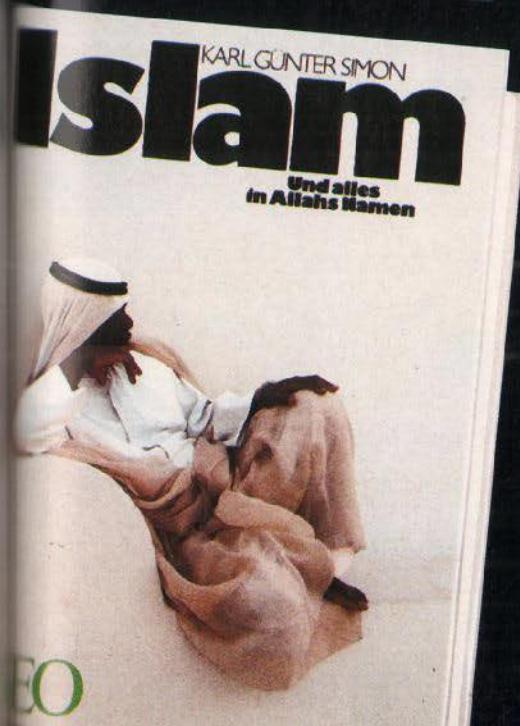
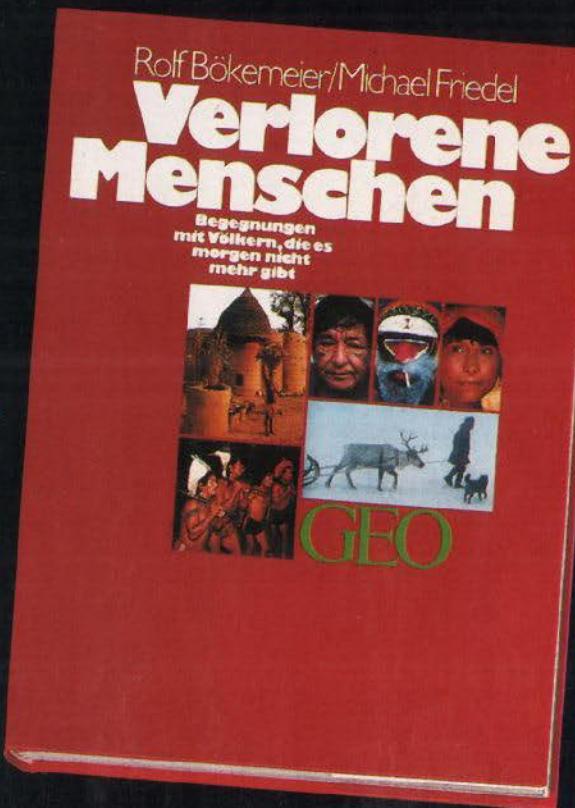
362 Seiten mit 278 farbigen Fotos, Leinen, DM 98,-.

Begegnung mit Völkern, die es morgen nicht mehr gibt

Dieser Band führt zu den letzten Naturvölkern unserer Zeit, zeigt ihr paradiesisches Dasein und beschreibt ihren Weg in den Untergang.

In Text und Bild ein aufrüttelndes Buch.
Bökemeier/Friedel **Verlorene Menschen**

348 Seiten mit 268 farbigen Abbildungen, Leinen, DM 98,-.



Bedroht uns der Islam?

Kaum eine andere Religion hat heute soviel Einfluss auf das Weltgeschehen wie der Islam. Das Buch gibt einen tiefen Einblick in die arabische Seele.

Karl Günter Simon **Islam**

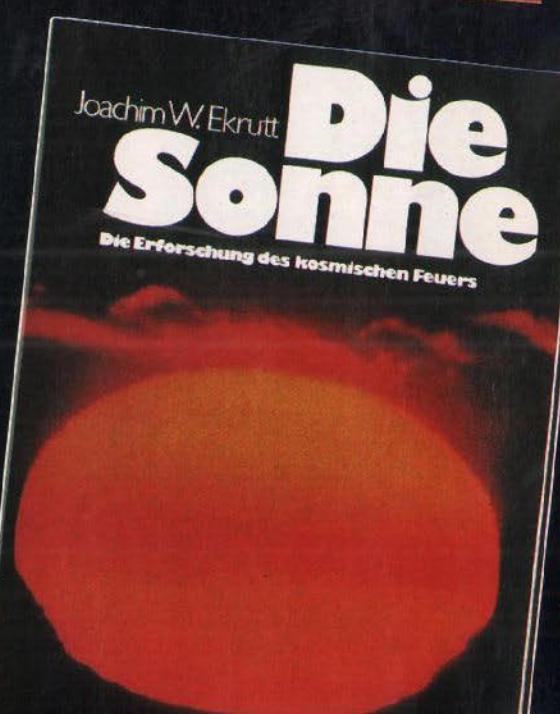
Und alles in Allahs Namen. 364 Seiten mit 315 farbigen Abbildungen, Leinen, DM 98,-.

Die Erforschung des kosmischen Feuers

Ein Standardwerk, das die vielfältigen wissenschaftlichen Erkenntnisse über unser Zentralgestirn zusammenfaßt.

Joachim W. Ekrutt **Die Sonne**

368 Seiten mit 274 farbigen Fotos, Leinen, DM 98,-.



In jeder guten Buchhandlung erhältlich

Expeditionen ins Reich



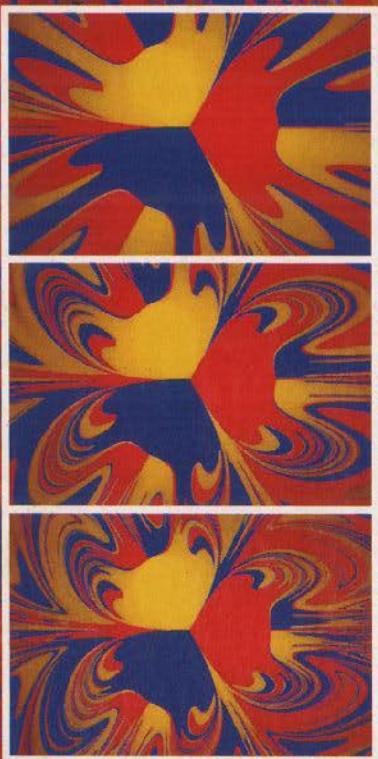
der Fraktale

Aus nebligem Nichts ragt schroff ein Gebirge - geschaffen vom Team des Instituts für Dynamische Systeme der Universität Bremen. Die Pseudo-Landschaft entstand aus »deterministischen Fraktalen«: Diese sind, mathema-

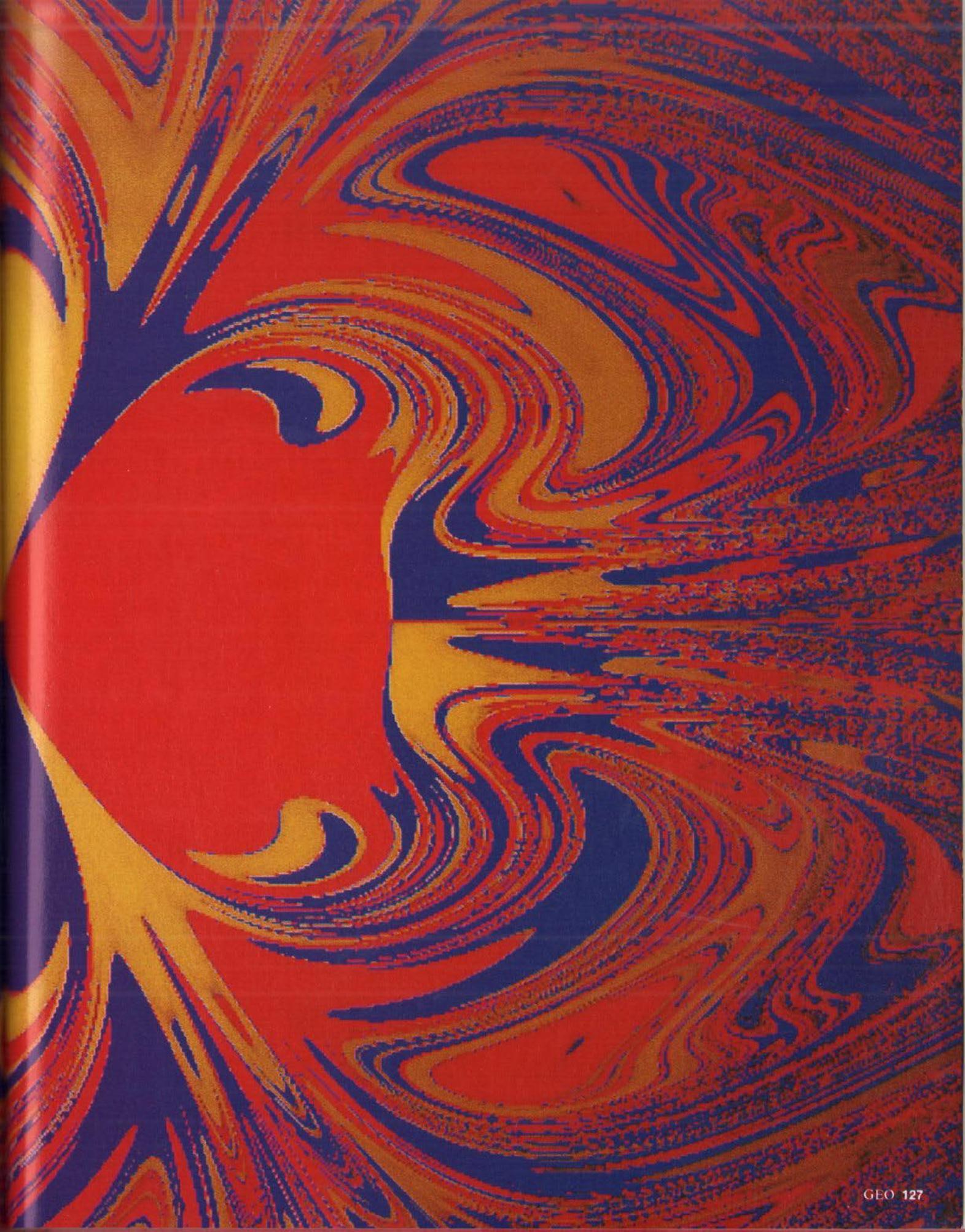
MAGAZIN

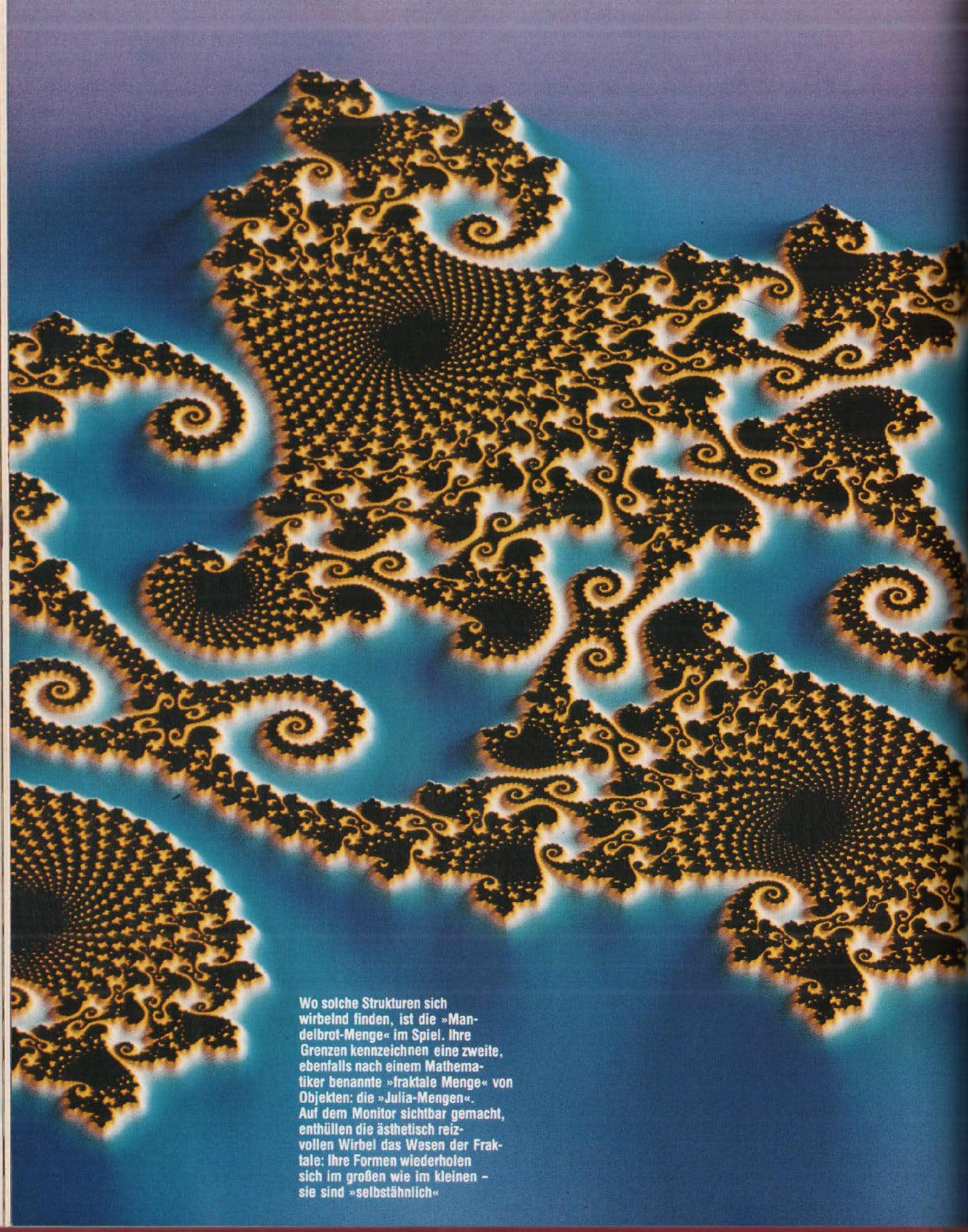
tisch gesehen, Resultate der Mandelbrot-Menge, die ihrer sichtbar gemachten Form wegen auch »Apfelmännchen« genannt wird. Den »Himmel« bilden »zufällige« Fraktale



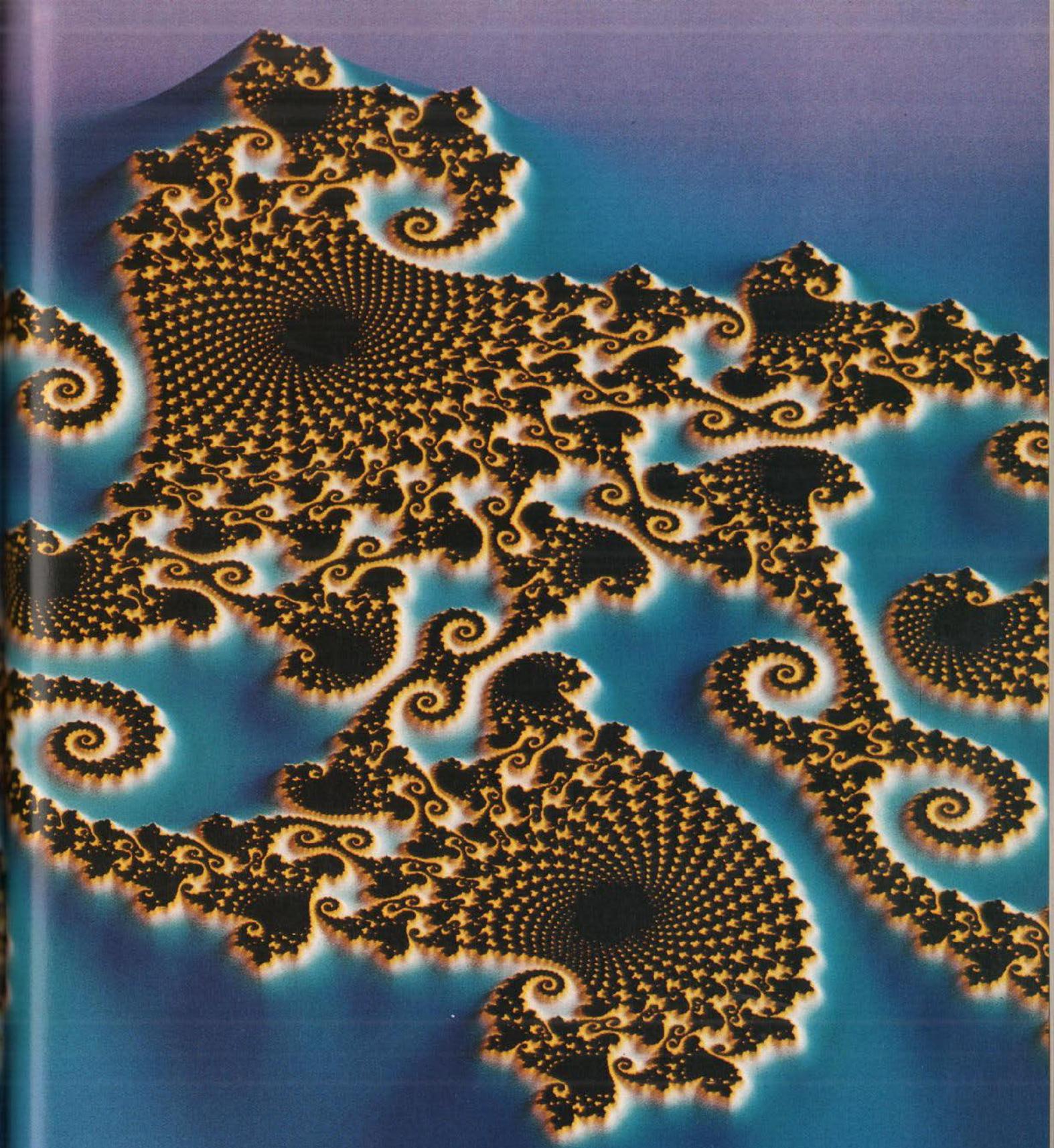


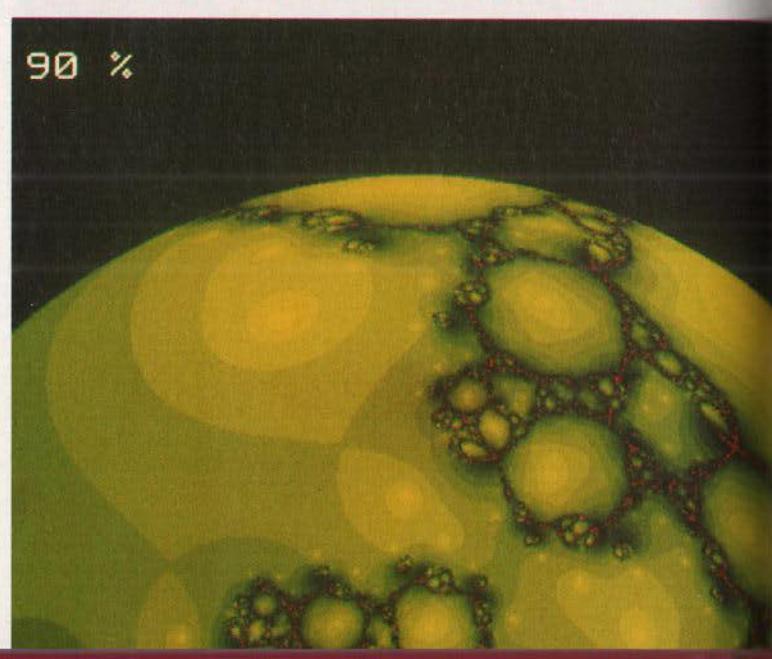
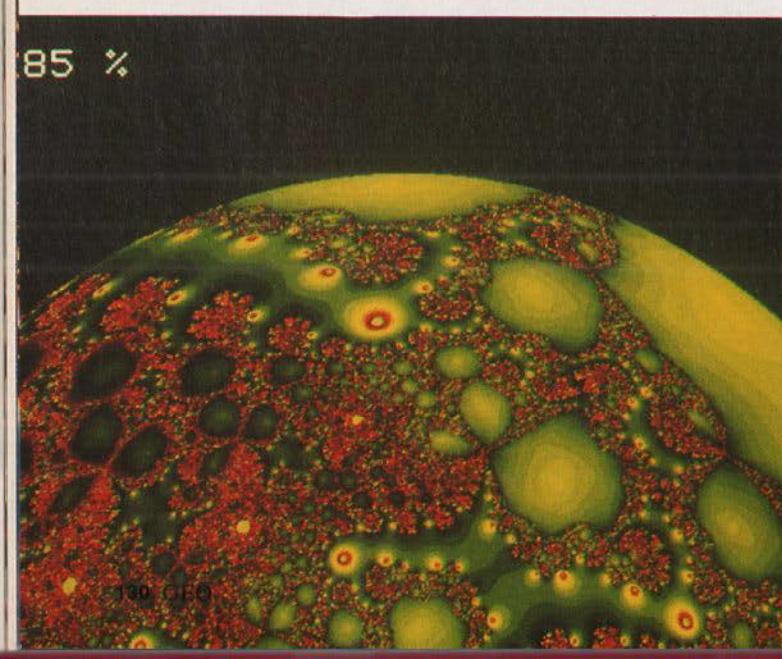
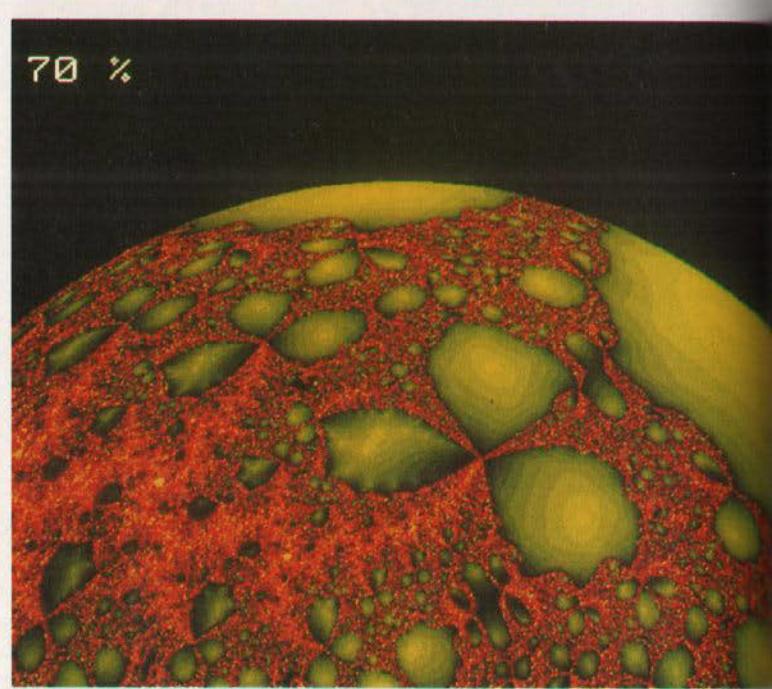
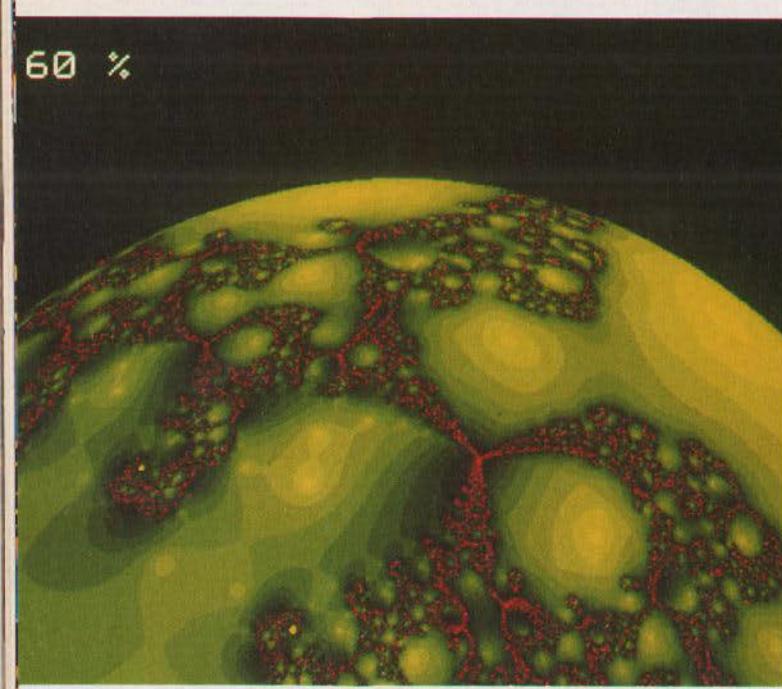
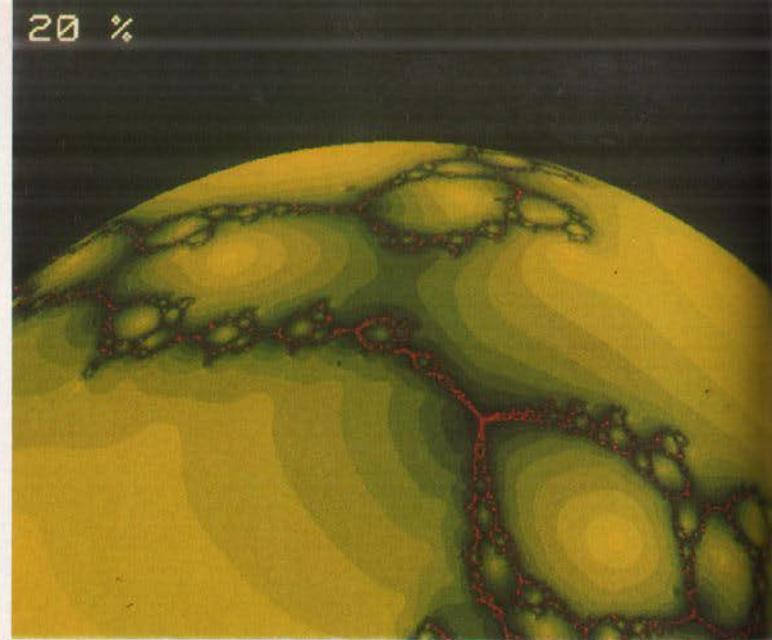
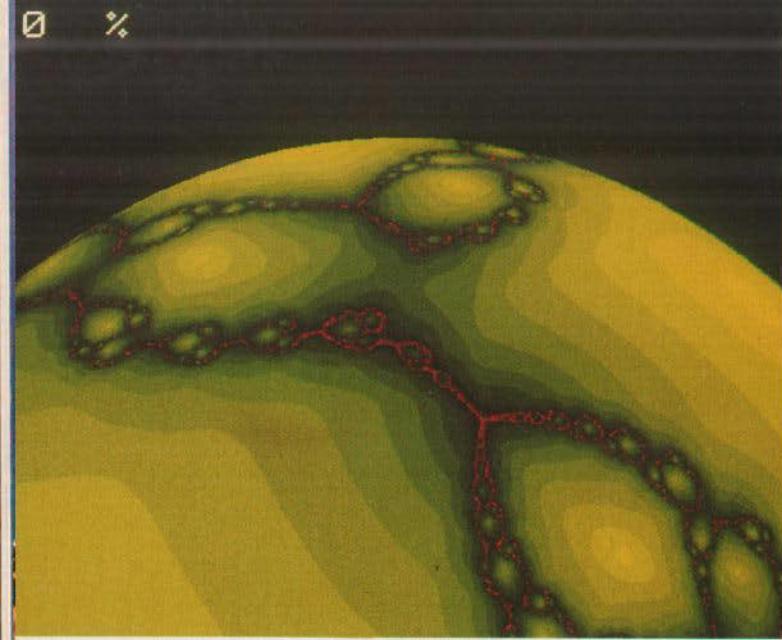
Per Computer errechnetes »Schicksal« eines imaginären Pendels. Die eingefärbten Muster illustrieren, über welchem von drei Magneten eine am Faden aufgehängte Eisenkugel schließlich endet. Die drei »Attraktoren« sind sternförmig in gleichem Abstand um den Ruhepunkt des ungestörten Pendels angeordnet. Zu sehen sind die jeweiligen Anfangsbedingungen der Bewegung – im großen Bild bei voller Erdanziehungskraft sowie bei 0, 20 und 40 Prozent Schwerkraft (kleine Bilder von oben)

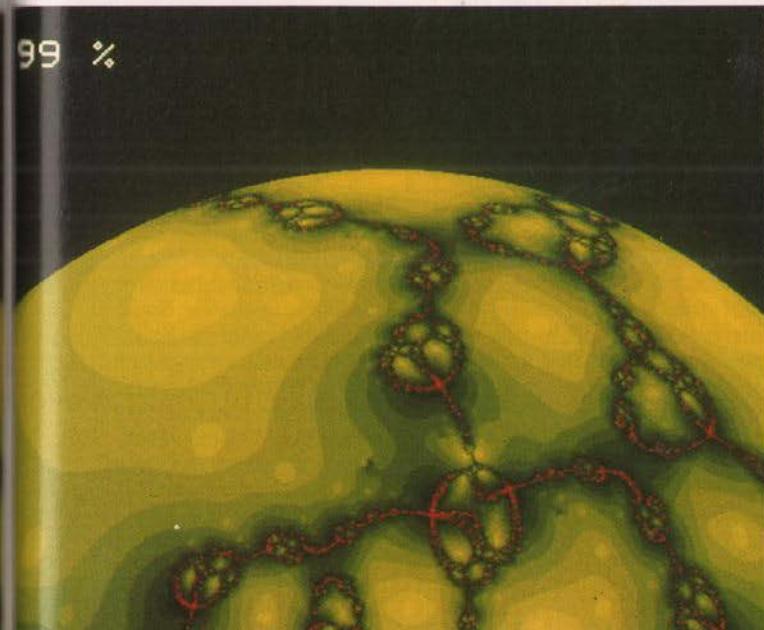
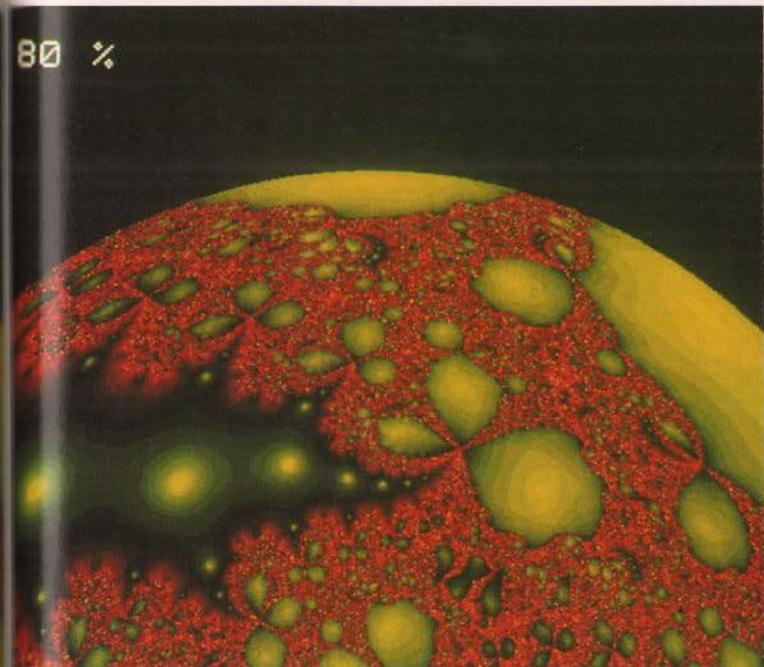
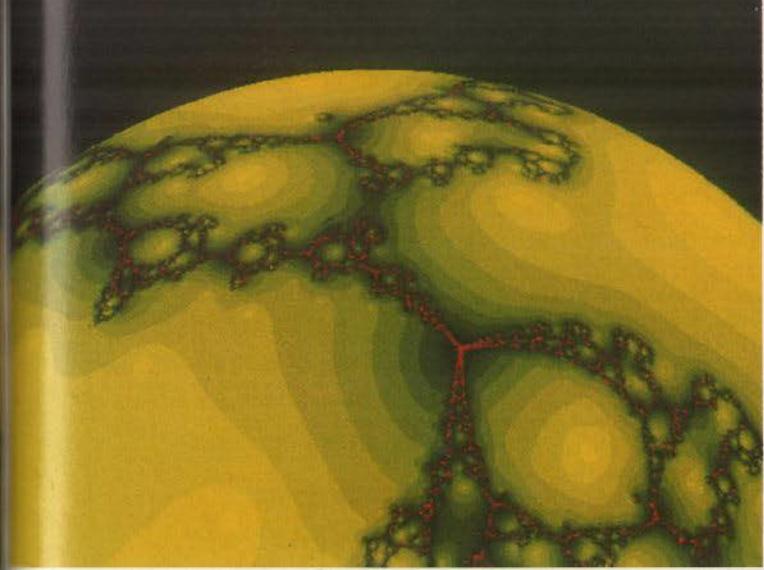




Wo solche Strukturen sich
wirbelnd finden, ist die »Man-
delbrot-Menge« im Spiel. Ihre
Grenzen kennzeichnen eine zweite,
ebenfalls nach einem Mathe-
matischen benannte »fraktale Menge« von
Objekten: die »Julia-Mengen«.
Auf dem Monitor sichtbar gemacht,
enthüllen die ästhetisch reiz-
vollen Wirbel das Wesen der Frak-
tale: Ihre Formen wiederholen
sich im großen wie im kleinen -
sie sind »selbstähnlich«







DYNAMISCHE SYSTEME

Wo das Apfelmännchen herrscht

Bedürfte es eines Beweises, daß die Beschäftigung mit „Fraktalen“ mehr ist als brotlose Kunst: Heinz-Otto Peitgen verkörpert ihn.

Entspannt sitzt der 45jährige Professor im 6. Stock des tristen „Mehrzweck-Hochhauses“ der Universität Bremen in seinem großzügigen Büro und erzählt. Die schöne Aussicht auf die Türme der Hansestadt lenkt den norddeutsch-kühl wirkenden Wissenschaftler ebensowenig ab wie all die kleinen Störungen – die Anrufe seiner New Yorker Lektorin, die Kollegen und Studenten, die kurz den Kopf durch die Tür stecken, um Termine abzuklären.

Denn der Mathematiker Peitgen hat eine Story zu erzählen, die ihm – wäre sie erfunden – niemand abnehmen würde: von unerlaubt angefertigten Computer-Grafiken während der Studentenzeit in Bonn; von Experimenten „fast wie in Trance“ im fernen Salt Lake City; von plötzlicher und weltweiter Beachtung; von einer Wanderausstellung in etwa 100 Städten rund um den Globus mit 140 000 Besuchern allein in London; von einem Vortrag

in Hamburg vor 3500 Teilnehmern der Jahrestagung des „Deutschen Betonvereins“; von einer „Gesellschaft bürgerlichen Rechts“, die Peitgen und seiner Kollegen Honorare kassiert und dann dem Institut ganz legal, ganz clever „als Viertmittel“ spendet. So gar GEO spielt eine hübsche Nebenrolle.

Ein schönes Chaos. Aber eines mit ordentlichen Strukturen – Strukturen, die hinter Glas gerahmt an den Wänden des „Instituts für Dynamische Systeme“ hängen: phantastisch formenreiche fraktale Bilder, die bunten Produkte von Peitgens „Forschungsgruppe Komplexe Dynamik“.

Die mathematische Basis ihrer Arbeit wurde schon zur Zeit des Ersten Weltkriegs geschaffen. Damals hatten die Franzosen Gaston Julia und Pierre Fatou unabhängig voneinander über Rückkopplungen nachgedacht: Was geschieht, wenn eine Rechen-Vorschrift immer wieder mit ihrem eigenen Ergebnis gefüttert wird? Die unscheinbare Formel „ $z^2 + c$ “ – die Quadratur eines „ z “ genannten Punktes in einer sogenannten komplexen Zahlenebene plus die komplexe Zahl „ c “ – brachte die beiden Wissenschaftler ganz dicht an die Fraktale. Ohne sie freilich bildlich darstellen zu können, entdeckten sie eine „Staubwolke“ aus unendlich vielen Punkten im Universum der Zahlen, heute „Julia-Menge“ genannt.

Befreit aus dem mathematischen Kuriositätenkabinett wurden die Julia-Menge sowie andere nicht mit der herkömmlichen Geometrie des Euklid beschreibbare Phänomene erst ein halbes Jahrhundert später: von dem mathematischen Außenseiter Benoit Mandelbrot, der am Thomas-Watson-Forschungszentrum des US-Computerkonzerns IBM bei New York arbeitet.

Mandelbrot war Anfang der sechziger Jahre den lange vernachlässigten Dimensionen auf die Spur gekommen, die zwischen den ganzen Zahlen, 1 = Linie, 2 = Fläche, 3 = Würfel, angesiedelt sind. Er erkannte, daß die geometrisch „rauhen“ Objekte der

Das Kräftefeld eines Algorithmus, den Isaac Newton vor drei Jahrhunderten ersonnen hat, wird von den „Grenzen“ auf der Oberfläche eines Phantasie-Planeten umrissen. Fließend wandeln diese sich vom Drei- zum Vierländerecken-Muster. „Die Sequenz“, schreiben die Bremer Forscher Heinz-Otto Peitgen und Peter Richter in ihrem Buch „The Beauty of Fractals“, „zeigt, wie unser künstlicher Planet neue Kontinente hervorbringt.“ So machen Computer die Schönheit der Mathematik, die bis vor kurzem nur Experten priesen, auch für Laien sichtbar

wirklichen Welt viel besser entsprechen als die „glatten“ Gebilde Euklids, schrieb ihnen „gebrochene“ Dimensionen wie 1,65 oder 2,37 zu und gab ihnen 1975 den Namen „Fraktale“ (lateinisch „fractum“ = gebrochen).

Die seltsamen Phänomene haben eine ungewöhnliche Eigenschaft, die in ihren Auswirkungen auf die wirkliche Welt bis heute nicht vollständig verstanden ist. Fraktale ähneln jeweils sich selbst – in

„dierte“, erzählt Peitgen, „waren Visualisierungen streng verpönt, da sie Anlaß zu Mißinterpretationen geben.“

Im Winter 1982/83 war die Bremer Gruppe wieder in Utah – diesmal allerdings schon infiziert vom Virus der Chaos-Forschung, den in Deutschland vor allem der Stuttgarter Physik-Professor und Begründer der „Synergetik“ Hermann Haken verbreitete. Kaum in Salt Lake City angekommen, entwickelte das

Anfang 1984 eröffnete Peitgens Team, ergänzt durch ihren Physiker-Kollegen Peter Richter, in der Hansestadt die erste Ausstellung ihrer frisch vom Monitor abfotografierten Arbeiten. Die Mathematik-Schau mit dem Titel „Harmonie in Chaos und Kosmos“ faszinierte auch Menschen, denen Mathe immer ein Greuel war und ist seitdem als Wanderausstellung unterwegs – allerdings mit dem griffigeren Titel „Grenzen des Chaos“. Schnell überzeugt war damals auch die GEO-Redaktion: Im Juni 1984 hatten die GEO-Leser die erste Veröffentlichung der epochalen Bilder auf dem Tisch.

Einer dieser Leser war Benoit Mandelbrot. „Die Bilder“, schreibt er im Vorwort des von Peitgen und Saupe herausgegebenen Buchs „The Science of Fractal Images“, „verrieten ein geübtes und künstlerisches Auge und eine sichere Hand, eine, die Erfahrung gesammelt hatte, aber nicht faul oder hastig geworden war.“

Allerdings sehen die Bremer Mathematiker heute, daß die entscheidende Rolle der Fraktale bei der Selbstorganisation aller möglichen Erscheinungen in der belebten und unbelebten Natur erkannt ist, auch eine gewisse Gefahr für ihre Arbeit: Bei „mathematischen Experimenten ist hohe Disziplin erforderlich“, warnt Peitgen, „da wir sonst Sinnloses sammeln“. Mit solcher Disziplin könnte der „tiefe Sinn der Mandelbrot-Menge“ erkannt, könnte vielleicht „Ordnung in der Flut der Vielfalt gefunden werden“. Diese Suche nach dem – so Peitgen – „Bild der Bilder“ kann durchaus handfeste, sehr nützliche Nebeneffekte haben.

Die Bremer Gruppe gab dennoch nicht auf, experimentierte „fast wie in Trance“. Als es dem Trio schließlich gelang, erstmals eine Julia-Menge – ihr erstes Fraktal – sichtbar zu machen, rollte „eine Lawine bis Ende März 1983“: Das Video wurde pünktlich fertig, die Fachkollegen waren angetan, und die drei Forscher kehrten mit einem Koffer voller Bilder nach Bremen zurück. „Erst danach“, gesteht Peitgen, „haben wir Mandelbrot richtig zur Kenntnis genommen.“

Genaugenommen entdeckte Benoit Mandelbrot die Bremer, doch bis dahin verging noch ein weiteres Jahr.

ganz anderen Bereich. Die neue, aufregende Mathematik könnte die „Öde in der Schule“ beenden: Der Bremer Professor entwickelt „Teachware“ – Computerprogramme und Begleitmaterialien, die auch Lehrer und Schüler die Schönheit der Mathematik mit eigenen Augen erleben lassen.

Günter Haaf

WETTER-VORHERSAGE

Im Winde verwehen die Prognosen

Als „Hugo“ kam, gingen die Bürger von Charleston in Deckung. Am 22. September 1989 fiel der schwerste Hurrikan seit zwei Jahrzehnten über die geschichtsträchtige Stadt im amerikanischen Bundesstaat South Carolina her. Mit Urgewalt zerschmetterte er strandnahe Siedlungen und mähte ganze Wälder um, warf Brücken aus ihren Verankerungen und knickte Fernsehtürme.

Die meisten Menschen kamen immerhin mit dem Schrecken davon: Sie waren rechtzeitig vorgewarnt und zum Teil evakuiert worden.



Wetter-Protokolle in Reading

Die lebensrettende Vorhersage erfüllt Austin Woods im fernen englischen Reading noch Monate später mit Stolz. Der Meteorologe am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage präsentiert eine Karte der Karibik mit dem Weg des Hurrikans über das Meer zwischen Süd- und Nordamerika: Wie ein Schatten war der Sturm

Das Team des Instituts für Dynamische Systeme der Universität Bremen (im Uhrzeigersinn von unten): Heinz-Otto Peitgen, Cornelia Zahltan, Dietmar Saupe und Hartmut Jürgens



jedem Maßstab: Sie sind „selbstähnlich“ und „skalenunabhängig“ – so wie das „Apfelmännchen“, jene von Mandelbrot 1980 entdeckte und nach ihm benannte „Menge“ komplexer Zahlen.

Die neu entdeckte „fraktale Geometrie der Natur“ – so der Titel eines von Mandelbrot's Büchern – blieb nicht lange auf mathematische Außenseiter begrenzt. Physiker, die sich etwa mit unberechenbaren Turbulenzen herumschlügen, oder Biologen auf der Spur von Räuber-Beute-Beziehungen entdeckten in den störrischen Naturphänomenen fraktale Gesetzmäßigkeiten.

Peitgen wußte nichts von alledem, als er 1981 die „Forschungsgruppe Komplexe Dynamik“ einrichtete. Und das galt auch noch, als er mit seinen damaligen Studenten und heutigen Mitarbeitern Hartmut Jürgens und Dietmar Saupe mehrere Forschungsfreise mester an der University of Utah in Salt Lake City verbrachte, einer der US-Hochburgen für Computergrafik. „Als ich in Bonn in den sechziger Jahren Mathematik stu-

Team die „fixe Idee“, für eine bevorstehende Konferenz einen Video-Film zu produzieren: Auf ihm sollte die „komplexe Dynamik“ mit den frisch gewonnenen Chaos-Resultaten verbunden und per Computer farbig visualisiert werden. Der Chef des Grafiklagers war weniger begeistert: „In zwei Monaten? Das zeigt, daß ihr keine Ahnung habt. Unmöglich.“ Er hat, so Peitgen, „uns vor die Tür gesetzt“.

Die Bremer Gruppe gab dennoch nicht auf, experimentierte „fast wie in Trance“. Als es dem Trio schließlich gelang, erstmals eine Julia-Menge – ihr erstes Fraktal – sichtbar zu machen, rollte „eine Lawine bis Ende März 1983“: Das Video wurde pünktlich fertig, die Fachkollegen waren angetan, und die drei Forscher kehrten mit einem Koffer voller Bilder nach Bremen zurück. „Erst danach“, gesteht Peitgen, „haben wir Mandelbrot richtig zur Kenntnis genommen.“

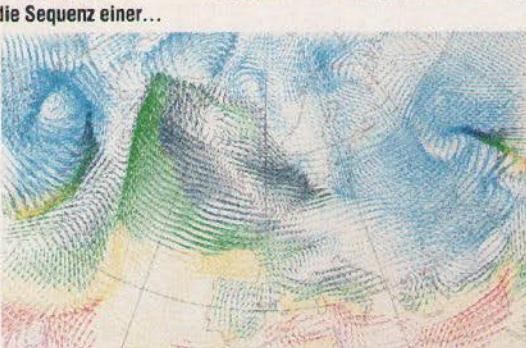
Genaugenommen entdeckte Benoit Mandelbrot die Bremer, doch bis dahin verging noch ein weiteres Jahr.



An einem gewöhnlichen Dienstag über dem Nordatlantik beginnt die Sequenz einer...



...Prophezeiung des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage:



Jede der vom Computer ausgedruckten Karten zeigt eine um 24 Stunden weitergerechnete...



...Prognose; die Pfeile geben Windrichtung und -stärke an, ihre Farben die Temperatur



dem vorhergesagten Pfad gefolgt, den die europäischen Wetterfrösche schon am 17. September – fünf Tage vor „Hugos“ Attacke auf Charleston – prognostiziert hatten.

Fast scheint es, als habe sich der monströse Wolkenwirbel – für Meteorologen nichts weiter als ein besonders heftiges Tiefdruckgebiet – der Prophezeiung fügen müssen.

Aber Woods und seine Kollegen hatten auch Glück. Denn über das künftige Wetter sind nur Aussagen mit mehr oder minder großer Wahrscheinlichkeit möglich. Um sie auf Wetterkarten sichtbar zu machen, lässt Tim Palmer, Leiter der „Vorhersagbarkeits- und Diagnose-Abteilung“, zum Beispiel eine Prognose für Europa von den Supercompu-

tern des Zentrums nicht nur einmal, sondern gleich 25mal berechnen – und zwar in jedem Fall mit minimal veränderten Anfangswerten für Luftdruck und -feuchtigkeit, Temperatur und Windgeschwindigkeit.

Solche Simulationen verdeutlichen, daß fast gleiche Ausgangssituationen zu höchst unterschiedlichen

Wetterlagen führen können – für Fachleute das wichtigste Symptom für „chaotisches“ Verhalten. Schon die Datenbasis für die Computerberechnungen enthält geringfügige Ungenauigkeiten: Sie entstehen zwangsläufig beim Erfassen der Wetterdaten mit Hilfe eines globalen Meßnetzes aus Landstationen und Ballonsonden, Bojen und Schiffen, Flugzeugen und Satelliten. Diese feinen Diskrepanzen können sich beim Berechnen des Wetters der nächsten Woche zu gewaltigen Unterschieden aufschaukeln: Je nach Prognose weht der Wind über der Po-Ebene vielleicht von Norden, vielleicht von Osten – oder von irgendwo dazwischen. Und das ist keine Macke des Computerprogramms.

Schmetterlingseffekt“ nennen die Meteorologen die empfindliche Abhängigkeit des Wetters von Anfangsbedingungen: Theoretisch kann der Flügelschlag eines Falters auf einem anderen Kontinent dem atmosphärischen Geschehen eine ganz andere Richtung geben (siehe Seite 178). Wie sehr dieser Effekt die Arbeit der Wetterfrösche bestimmt, erklärt Tim Palmer am Beispiel einer – nach der berühmten Spielbank benannten – „Monte-Carlo-Vorhersage“: Nur in einer von 25 Computerberechnungen „regnet“ es zum Beispiel in Schleswig-Holstein, weshalb Palmer Trockenheit für das Land zwischen Nord- und Ostsee prophezeite – und zwar mit 96 Prozent Wahrscheinlichkeit. Dagegen sagen alle Simulationen für Bordeaux Regen voraus, was „mit Sicherheit Niederschlag“ bedeutet. Aber Vorsicht: Der Rechnerlauf Nummer 26 könnte trockenes Wetter ermitteln.

Natürlich hängt die Exaktheit der Vorhersagen auch von der Leistungsfähigkeit der Computer ab. Deshalb gilt die Faustregel: Wer den besten Rechner hat, sieht am schärfsten in die Zukunft. „Und wer hat den stärksten Computer?“ Austin Woods lächelt stolz: „Wir natürlich!“ Wegen der stürmischen technischen Entwicklung ordert das Readinger Zentrum alle

zwei bis fünf Jahre einen neuen Supercomputer.

Allerdings sieht Palmer, der sich früher als Astrophysiker mit „Schwarzen Löchern“ befaßte, eine Zeit kommen, in der nicht mehr unzulängliche Rechner und Computermodelle Probleme machen, sondern die Wetterdaten. Und selbst mit einem noch so dichten Netz von Meßstationen werden sich Vorhersagen nicht unbegrenzt verbessern lassen: Dem Wetter ist „chaotisches Verhalten“ gleichsam angeboren, weshalb die Meteorologen den Ruf der Unzuverlässigkeit auch künftig nicht loswerden.

Das hängt mit zwei Eigenschaften der Atmosphäre zusammen: Sie besteht zum einen aus unfaßbar vielen beweglichen Luftteilchen und besitzt deshalb entsprechend viele „Freiheitsgrade“ – ein Maß für voneinander unabhängige Entwicklungsmöglichkeiten. Und sie gehorcht – wie alle strömenden Gebilde in der Natur – Gesetzen, die Turbulenzen zulassen. Charakteristisch für solche turbulenten Strömungen aber ist, daß sie sich aus minimal unterschiedlichen Anfangsbedingungen in völlig verschiedene Richtungen entwickeln können.

Wenn Meteorologen wie Klaus Fraedrich von der Freien Universität Berlin vom „chaotischen Verhalten“ des Wetters sprechen, meinen sie allerdings nicht etwa Anarchie am Himmel. Vielmehr

hoffen sie, daß die atmosphärischen Turbulenzen in einem „Attraktor“ (siehe Glossar) organisiert sind. Solch ein theoretisches Gebilde – mathematisch eine verwinkelte Kurve in einem mehrdimensionalen Raum – würde alle möglichen Wetterzustände in ihrer räumlichen und zeitlichen Entwicklung enthalten.

Mit Hilfe dieses „chaotischen Attraktors“ – wäre er für die Lufthülle einmal gefunden – könnten Meteorologen zwar keine präzisen Vorhersagen machen, wohl aber Wahrscheinlichkeiten angeben, etwa: „Mit 60 Prozent Wahrscheinlichkeit wird der kommende Juli überdurchschnittlich warm.“

„Ist der Januar hell und weiß“, lautet eine alte Bauernregel, „wird der Sommer sicher heiß.“ Tatsächlich fand Fraedrichs Kollege Horst Malberg beim Vergleich von klimatologischen Daten, die über einen Zeitraum von 80 Jahren in Berlin aufgezeichnet worden sind, daß auf einen wolkenarmen und verschneiten Januar in sechs von zehn Fällen ein überdurchschnittlich warmer Sommer folgt: ein Muster, das auf einen Klima-Attraktor zurückgeht? Noch streiten sich Experten darüber, wie komplex das Wetter- und Klimageschehen eigentlich ist. Für sie ist die Frage noch nicht beantwortet, ob es einen „niedrigdimensionalen Attraktor“ gibt – ob sich das Wettergeschehen also mit einer überschau-

baren Zahl veränderlicher Größen beschreiben läßt.

Bei ihrer Suche nach dem atmosphärischen Attraktor werten Forscher Zeitreihen aus – lange Listen von Meßwerten, etwa Temperatur, Druck oder Windgeschwindigkeit. Zeitlich aufeinanderfolgende Meßwerte ordnen sie sukzessive den Achsen eines abstrakten mathematischen Raums zu: In einem zweidimensionalen Diagramm würden zwei aufeinanderfolgende Temperaturen – etwa für zehn und für elf Uhr morgens – einen Punkt festlegen. In einem 24dimensionalen Raum schrumpfen bei stündlicher Messung die Temperaturschwankungen eines ganzen Tages auf einen Punkt zusammen. Aus Messungen am nächsten Tag kann der nächste Punkt entstehen. Mit etwas Glück ballen sich die Punkte zu einem geometrischen Gebilde mit wenigen Dimensionen, das manche

Forscher als Wetter-Attraktor interpretieren.

Die Methoden, mit denen Meteorologen aus Wetter- und Klimageschehen Attraktoren herauszufiltern suchen, sind allerdings umstritten. Die angewandten Verfahren können, argumentiert etwa der Wuppertaler Physiker Peter Grassberger, außer für gemessene Zeitreihen von Temperatur oder Luftdruck auch für künstlich erzeugte, zufällig schwankende Werte funktionieren – also für bloßes „Rauschen“: So kann ein Kunstprodukt entstehen, das einem Attraktor niedriger Dimension zum Verwechseln ähnlich sieht. „Grassberger“, räumt Klaus Fraedrich ein, „hat im Prinzip recht.“

Um wirkliche Attraktoren von Rausch-Produkten unterscheiden zu lernen, üben Atmosphärenforscher der Oxford University im Labor an scheinbar simplen Versuchsanordnungen. Peter Read, ein ehemaliger Astronom, experimentiert beispielsweise mit einer Lösung aus Wasser und Glycerin, die zwischen zwei ineinanderstehenden Zylindermänteln aus Metall eingeschlossen ist. Die Rotation dieses Bechers und das Erhitzen eines der beiden Mäntel bringen die Flüssigkeit in Wallung, die entstehende Strömung kann durch beigegebene Kunststoffteilchen sichtbar gemacht werden. So entsteht ein einfaches Modell für die Erdatmosphäre: Auch sie wird ja einseitig aufgeheizt und gerät in Zirkulation, wodurch Winde entstehen.

Read betont die Ähnlichkeit zwischen den mathematischen Gleichungen, die „seinen rotierenden Kreisring“

Erst für Astronauten wird das ganze Ausmaß eines „Zyklons“ sichtbar. Für Meteorologen ist selbst ein solch gigantischer Wolkenwirbel nichts weiter als ein besonders heftiges Tiefdruckgebiet. Tropische Stürme ab einer bestimmten Stärke heißen in der Karibik „Hurrikan“ und im Pazifik „Taifun“



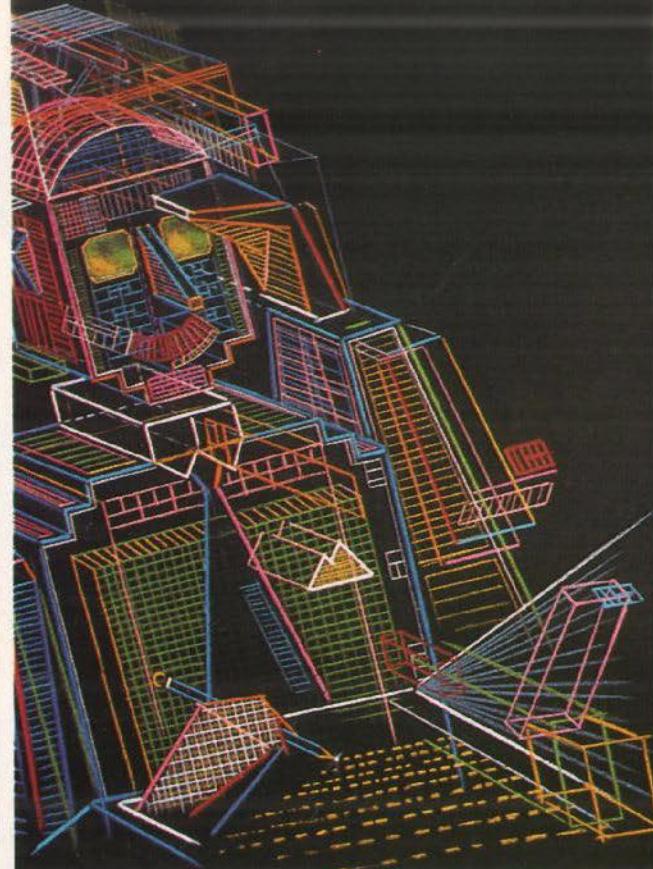
regieren, und denen für die Erdatmosphäre. Also interpretiert er die Wirbel in der Laborflüssigkeit als Hoch- oder Tiefdruckgebiete. Der Sturm im Wasserglas hat einige Vorteile: Er lässt sich viel genauer vermessen als wirkliche Winde, hat weniger „Freiheitsgrade“ und – besonders wichtig – lässt sich experimentell gezielt beeinflussen.

So kann Reads Team die Heizung verstehen oder die Drehgeschwindigkeit ändern und dadurch verschiedene Strömungsmuster erzeugen – von einer ganz glatten Strömung über stabile Wirbel bis zu völliger Turbulenz. Diese Strömungsbilder könnten, Peter Read zufolge, unterschiedlichen Planetenatmosphären entsprechen: etwa dem „Großen Roten Fleck“ des Jupiter, einem stabilen Gaswirbel fast von der Größe der Erdoberfläche, der seit mindestens 112 Jahren existiert. In der irdischen Lufthülle geht es dagegen viel turbulenter zu.

Aus der zeitlichen Veränderung von Temperatur, Druck oder Strömungsgeschwindigkeit in seinem rotierenden Becher destilliert Read schöne Attraktoren niedriger Dimension. Sie sind – je nach Stabilität der Wirbel – mehr oder weniger chaotisch und lassen hoffen, daß es auch für das wirkliche Wetter und Klima Attraktoren mit wenigen Dimensionen gibt. Beweise dafür verschaffen vielleicht einmal Messungen der Turbulenzen in der Jupiteratmosphäre.

So könnten die teuren Flüge unbemannter Raumsonden einen attraktiven Nebeneffekt haben: ein besseres Verständnis davon, nach welchen prinzipiellen Regeln sich Wetter und Klima auf der Erde ändern. Das wäre nicht nur für die Frühwarnung vor Wirbelsürmen nützlich, sondern auch für Branchen wie Landwirtschaft und Tourismus. „In der Klimavorhersage“, weiß Tim Palmer, „steckt eine Menge Geld.“

Der Physiker **Barnabas Thwaite**, 29, schrieb auch den Beitrag „Chemie“ (Seite 136) sowie die Glossar-Kästen „Attraktor“ und „Synergetik“. Als Dokumentar überprüfte der in Düsseldorf geborene britische Staatsbürger dieses Heft auf sachliche Richtigkeit; seine eigenen Beiträge wurden von Jürgen Scriba „gedokt“. Seit Ende März ist Thwaite Wissenschaftsredakteur bei der Deutschen Presseagentur in Hamburg.



Ohne zentrale Steuerung erhandeln Rechner ein Optimum

COMPUTER-NETZE

Nichts geht mehr, wenn alle den Vorteil wittern

Die „Computerpost“ ist eigentlich nicht das richtige Kommunikationsmedium für den quirligen Bernardo Huberman. Wenn der Amerikaner ein paar Zeilen in den Rechner tippt, um einen Termin zu bestätigen oder den Artikel eines Kollegen zu kommentieren, werden zwar seine elektronischen Bot-schaften – einem unsichtbaren Stafettenstab gleich – blitzschnell von Computer zu Computer bis zum Empfänger weitergereicht. Aber auf der Strecke bleibt sein Temperament.

Immerhin dient die schnelle Post dem Wissenschaftler am Xerox-Forschungsinstitut in Palo Alto südlich von San Francisco als gutes Beispiel dafür, was ihn an Rechner-Verbundsystemen interessiert. „Computernetze wie

das weltumspannende Bitnet“, erklärt er, „wachsen und verändern sich heute laufend. Hier kommt ein Computer hinzu, dort wird eine Verbindung unterbrochen – alles ohne jede zentrale Administration. Kein Mensch weiß genau, wie sich das Netz in einem bestimmten Augenblick zusammensetzt.“

Allein im Xerox-Institut sind Hunderte Personal Computer und andere „Workstations“ miteinander verbunden; sie haben außerdem Zugang zu den globalen Netzen. Niemand kann einen solchen Verbund überschauen. Deshalb installieren Computerfachleute Rechner, die selbstständig miteinander verhandeln können. Wollen beispielsweise zwei Computer Nachrichten austauschen, müssen sie sich auf Übertragungsmodalitäten einigen, bevor der eigentliche Transfer beginnt.

Bei der „Computerpost“ kann eine Nachricht auf dem Weg vom Absender zum Adressaten verschiedene Wege nehmen. Im Dickicht der

elektronischen Netze sind jedoch weitaus komplexere Transaktionen möglich – was teilweise chaotische Vorgänge sind, die Bernardo Huberman in dem von ihm 1989 herausgegebenen Buch „The Ecology of Computation“ mit dem Verhalten ganzer Ökosysteme vergleicht.

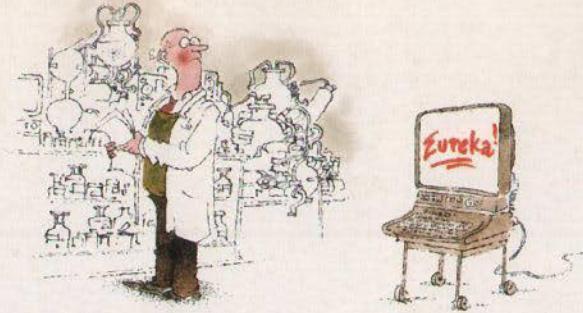
Die Arbeitsgruppe um Huberman studiert Computer, die untereinander regelrechte Auktionen veranstalten, um sich die Unterstützung der anderen zu sichern. Gewöhnlich beginnt ein Experiment, indem einer der Computer eine umfangreiche Rechenaufgabe bekommt. Zu den Spielregeln gehört, daß dieser sich von gerade arbeitsfreien Rechnern gegen eine fiktive Gebühr helfen lassen kann, wobei deren Höhe Verhandlungssache ist. Außerdem erhalten die Computer die Auflage, mit einem Startkapital gut zu haushalten: Sie sind so programmiert, daß sie sich nach günstigen Angeboten umsehen und das günstigste annehmen. Jeder versucht, fremde Rechenzeit so billig wie nur möglich einzukaufen.

Selbst wenn alle Computer mit einheitlichen Anfangsgebühren ins Rennen gehen, geht es bald genau so zu wie im richtigen Leben: Notorisch unterbeschäftigte Rechner versuchen, mit Dumpingpreisen wieder ins Rechengeschäft zu kommen, während die stark gefragten Computer sich ihre Rechenzeit vergolden lassen. „Das Faszinierende an offenen Computersystemen“, sagt Huberman, „ist, daß die Rechner ohne übergeordnete Steuerung, einfach durch lokales Verhandeln, an das globale Optimum herankommen, also eine recht gleichmäßige Auslastung des ganzen Netzes erreichen.“

Mit Hilfe eines Computermodells, das seinerseits das Verhalten von Computern simuliert, untersuchten die Forscher, was passiert, wenn plötzlich ein Superrechner in das Netz integriert wird. Der Zahlenfresser konnte zwar mehrere Jobs gleichzeitig preiswert erledigen, war für einen einzi-

gen Kunden jedoch sehr teuer. Das stellte die Computer im Verbund vor ein Dilemma: Offensichtlich wäre es für alle billiger gewesen, gemeinsam den Superrechner in ihren schwunghaften Handel einzubeziehen. Jeder Computer registrierte jedoch, daß der Superrechner noch verwaist war und scheute deshalb vor einer Zusammenarbeit mit ihm zurück. Denn der Pionier hätte – solange kein zweiter mitzog – den unverschämten Exklusivpreis berappen müssen. Also tat keiner den ersten Schritt.

Doch die Isolation des Neuankömmlings währt nicht ewig, wie Hubermans Team erfuhr: „Unsere Versuche zeigen, daß die Rechner die optimale Strategie lange Zeit ignorieren. Plötzlich kommt es aber zu einem fast revolutionären Umschwenken auf das neue Verhalten, in dem das System dann bleibt. Bis zum Umbruch kann viel Zeit vergehen.“ Berechnungen bestätigten den Forschern, daß es um so länger dauert, je mehr Individuen einem solchen System angehören: Die Wartezeit verlängert sich „exponentiell“ mit der Anzahl der Teilnehmer. „Das erinnert an die biologische Evolution, bei der Tierarten über Jahrtausende ihr Erbgut stabil erhalten und sich dann in einem vergleichsweise kurzen Zeitraum genetisch verändern.“



Das Umschwenken auf die optimale Strategie gelänge viel schneller, wären die Computer im Netz mit etwas mehr Übersicht ausgestattet: Dann würden sie ja sehen, daß sie nur gemeinsam den ersten Schritt tun müßten, um die billige Rechenquelle sprudeln zu lassen.

Nachdem jedoch die Forscher ihre Computer mit mehr „Intelligenz“ ausgerüstet hatten, erlebten sie eine böse Überraschung. Solange nur ein paar Rechner über mehr Weitblick verfügten, glätteten sich die Wogen beim Umschwenken auf die bessere Strategie merklich. Wenn allerdings zu viele Computer den Vorteil witterten und sich zur selben Zeit auf den vermeintlich lukrativen Neuzugang stürzten, wurde dieser völlig überlastet und somit schlagartig wieder unattraktiv – womit das Spiel von neuem begann.

In einer solchen Situation kann das Computernetz, wie Huberman und seine Kollegen heute wissen, aus dem Gleichgewicht kippen: Die Rechnerauslastung fängt dann an, heftig zu oszillieren

und sie kann sogar chaotisch werden.

Die Vorstellung, daß sich in Computernetzen – Nervenbahnen der gegenwärtigen technischen Zivilisation – chaotisches Verhalten breitmacht, irritiert Bernardo Hubermann keineswegs. „Man darf die Ebenen nicht vermischen. In einem Computernetz, das nach außen chaotisch wirkt, können zur selben Zeit durchaus sinnvolle Programme korrekt bearbeitet werden.“ Selbst für die Rechnerauslastung muß es kein Nachteil sein, wenn im Netz Chaos herrscht und dessen Verhalten damit praktisch unvorhersehbar wird. „Es wäre immerhin möglich“, spekuliert Huberman, „daß Chaos der Schlüssel zur Fähigkeit ist, sich an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen. Noch wissen wir es nicht, aber das ist ein Grund dafür, daß wir solche Systeme erforschen.“

Der Physiker **Karlhorst Klotz**, 31, arbeitet zur Zeit an der Technischen Universität München an seiner Promotion. Dort hat er auch sein Diplom erworben – bei Professor Alfred Hübner, dessen Chaos-Experimente er auf Seite 146 dieses Heftes beschreibt.

CHEMIE

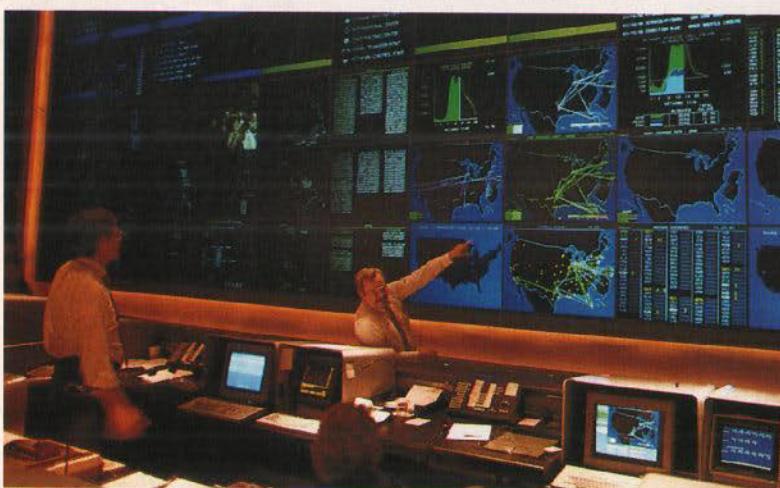
Das Ballett der Moleküle

Der Ablehnungsbescheid der Fachzeitschrift war vernichtend: „Ihre angebliche Entdeckung“, las Boris Belousov, „ist unmöglich.“ Dabei hatte der Moskauer Forscher seine Beobachtung einer seltsamen chemischen Reaktion – sie oszillierte im Laborgefäß stundenlang zwischen Ausgangs- und Endzustand – so gern veröffentlichen wollen.

Sechs Jahre später wagte der Chemiker einen zweiten Versuch, nachdem er sich mit der Überprüfung seiner Ergebnisse viel Arbeit gemacht hatte. Doch diesmal verwarten die Gutachter sein Manuskript als „zu lang“. Daraufhin schwor sich der Unglückliche, in Zukunft die Finger von periodisch pendelnden Reaktionen zu lassen. Erst 1964 – nach Belousovs Tod – gelang es seinem Kollegen Anatol Zhabotinskii, die Arbeit des verkannten Wissenschaftlers zu rehabilitieren.

Heute gilt die Belousov-Zhabotinskii („B-Z“)-Reaktion als das Paradebeispiel einer chemischen Schwingung: Bromid-Ionen bilden Brom-Moleküle, die dann mit Malonsäure reagieren und wieder zu Bromid werden. Dabei wechselt der Farbstoff Ferroin seine Farbe. Er färbt eine Lösung mit den entsprechenden Zutaten abwechselnd blau und rostrot.

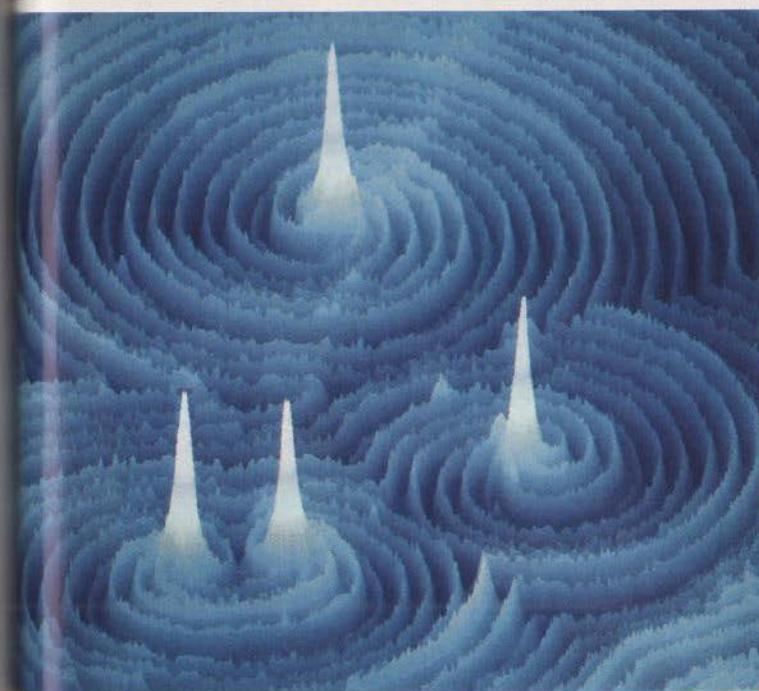
Wie das Phänomen ausgelöst werden kann, demonstriert Stefan Müller vom Dortmunder Max-Planck-Institut für Ernährungsphysiologie, an dem seit 25 Jahren „nichtlineare“ Phänomene in Chemie und Biologie erforscht werden: Er tunkt einen Draht in den kleinen blauen See in einer Petrischale. Ein roter Punkt entsteht, wird größer und färbt sich in seinem Zentrum wieder blau, während ein konzentrischer roter Ring nach außen läuft. Ohne weiteres Zutun bilden sich in der Mitte der Schale immer wieder rote



Der schlimmste Computer-Zusammenbruch in der Geschichte des US-Telefonsystems blockierte Mitte Januar 1990 beim AT & T-Konzern – hier dessen Verbund-Zentrale in New Jersey – die Hälfte von etwa 150 Millionen Ferngesprächen: Ein Rechner hatte irrtümlich „geglaubt“, überlastet zu sein



Was niemand Boris Belousov glauben wollte, gilt heute als Paradebeispiel einer chemischen Schwingung: Bei der »Belousov-Zhabotinskii-Reaktion« färbt sich eine Lösung mit den entsprechenden Zutaten abwechselnd blau und rostrot



Seltsame dreidimensionale Wirbel entstehen, wenn sechs unmittelbar aufeinanderfolgende Wellenmuster der B-Z-Reaktion digital aufgenommen und per Computer übereinanderlagert werden. Die »chemischen Tornados« sol-

len zeigen, daß die Reaktion im winzigen Zentrum einer Wellenausbreitung nicht oszilliert. Mit diesem Trick macht Stefan Müller vom Max-Planck-Institut für Ernährungsphysiologie in Dortmund die Stärke der von mehreren Punkten nach außen laufenden chemischen Schwingungen sichtbar

Punkte, entstehen immer neue Ringe, die an den Rand des Gefäßes wandern.

Nun bläst Müller durch ein Röhrchen über die Flüssigkeit. Der Mini-Sturm reißt die Ringe auseinander, die sich sogleich zu Spiralen formieren. Tritt keine weitere Störung auf, kann die Reaktion im Prinzip so lange weiter-schwingen, bis die Malonsäure – ihre „Nahrung“, von der sie zehrt – aufgebraucht ist: eine chemische Metapher für den Tod?

Unter Umständen zerfließt das ordentliche Muster jedoch schon nach wenigen Minuten in chaotische Farbschleier. Ursache dafür, erklärt Müllers Kollege Theo Plessner, sei der „Marangoni-Effekt“: Rollenförmig aufsteigende und wieder sinkende Flüssigkeit zerfetzt die Spiralen. Das Zerstörungswerk läßt sich stoppen, wenn eine aufgelegte Glasplatte die Verdunstung verhindert und damit den Antrieb der Strömung lahmt. Dann wachsen wie Phönix aus der Asche wieder Spiralen aus dem Chaos.

„Ordnung – Chaos – Reorganisation“: Während er die Schlüsselworte der Erforschung des Komplexen benennt, hält Mario Markus vom Dortmunder Max-Planck-Institut drei Bilder der B-Z-Reaktion nebeneinander. Sie ist für ihn ein Paradebeispiel für nichtlineare Systeme – und damit für die Welt, wie wir sie kennen: Ohne die Eigenart solcher Systeme, sich selbst zu organisieren, gäbe es kein Leben auf der Erde.

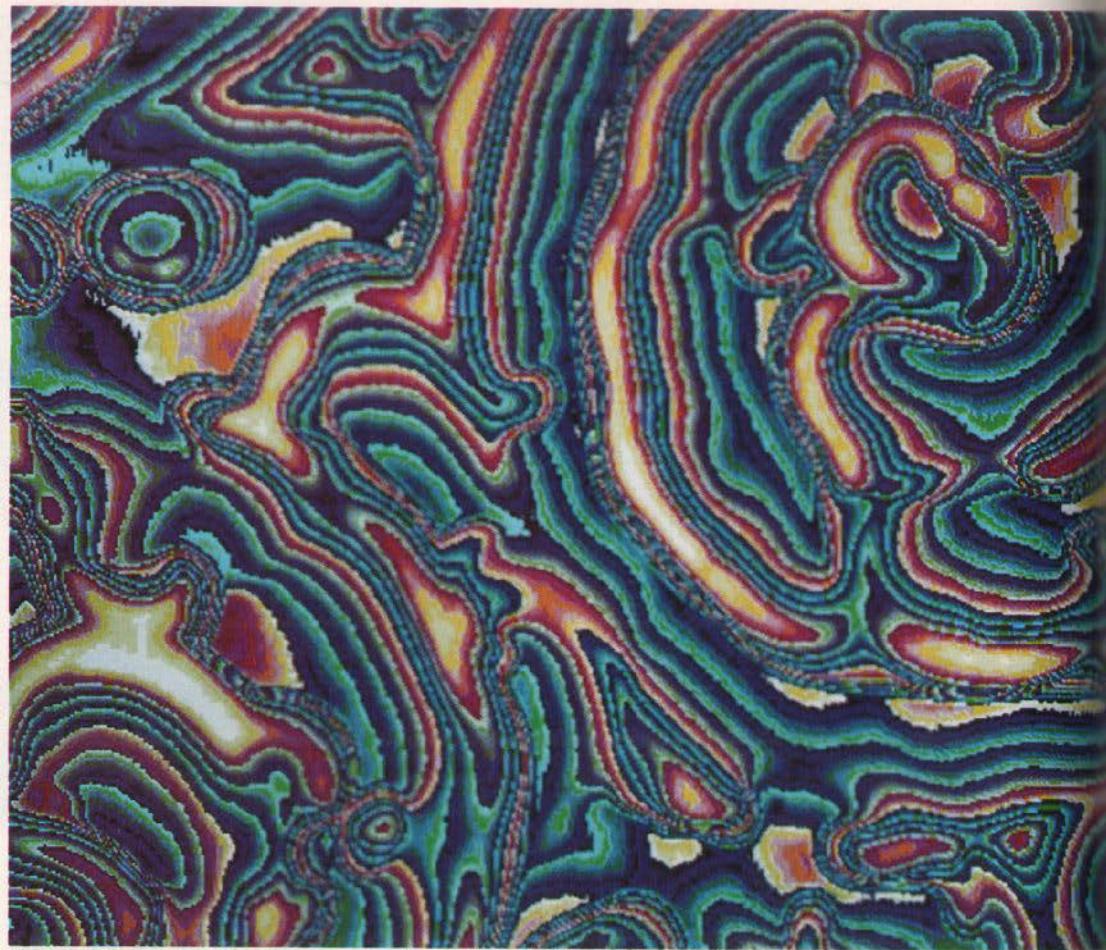
Weshalb in der Glasschale deterministisches Chaos entsteht, ist Markus klar: „Gekoppelte Schwingen können immer Chaos machen – genau wie gekoppelte Pendel.“ Einen der „Schwingen“ in der B-Z-Reaktion bilden die chemischen Oszillationen, den anderen die Strömungsrollen.

Um solche chaoträchtigen Systeme ohne experimentellen Aufwand simulieren zu können, hat der Dortmunder Physiker ein Computermodell entworfen, einen „zellulären Automaten mit Zufalls-

prinzip". Damit kann er nicht nur die B-Z-Reaktion – wahlweise mit oder ohne Turbulenz – nachahmen, sondern auch auf den ersten Blick höchst unterschiedliche Vorgänge: wie sich Schleimpilze der Art *Dictyostelium discoideum* bei Nahrungsknappheit verhalten, was im menschlichen Herzmuskel beim lebensbedrohlichen Flimmern geschieht, wie sich Galaxien bilden oder Seuchen ausbreiten: Spiralformen überall.

Mario Markus erklärt das immer gleiche Funktionsprinzip seines Modells am Beispiel einer Epidemie wie etwa des Trippers. Dabei bilden die „Zellen“ des Automaten kleine Einheiten, die wahlweise drei Zustände – gesund, krank oder immun – einnehmen: Kranke Einheiten können in einem gewissen Umkreis gesunde anstecken; angesteckte Zellen werden nach Ende der Krankheit immun, sind aber nach einiger Zeit erneut für Infektionen anfällig. Das klingt wie aus dem Medizin-Lehrbuch, aber der Schöpfer des zellulären Automaten könnte statt „krank“ auch „rot“ sagen – und beschreibe dann die B-Z-Reaktion.

Ursprünglich befaßten sich die Wissenschaftler am Dortmunder Max-Planck-Institut tatsächlich mit Fragen der Ernährung und entwickelten unter anderem Diätpläne. Doch seit der Mediziner und Molekularbiologe Benno Hess 1965 zum Direktor berufen wurde, hat es sich – so Mario Markus – zu einem „Institut



Chaos ist ausgebrochen, wenn das ordentliche Muster der B-Z-Reaktion zerfließt

für Alles“ entwickelt. Und der Stoffwechsel einzelner Zellen hat schließlich auch etwas mit Ernährung zu tun. So untersuchten Hess und seine Mitarbeiter die „Glykolyse“ genannte alkoholische Gärung. „Das ist“, erläutert Markus, „wenn Hefezellen

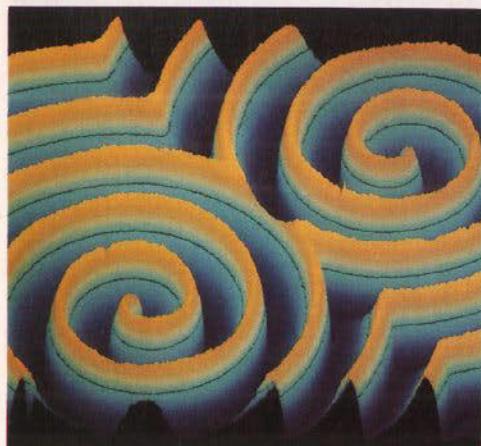
Zucker fressen und Alkohol pinkeln.“

Das Interesse der Forscher wurde zunächst durch eine Eigenschaft der Bierhefe erregt: Die Mikroorganismen fressen und pinkeln nicht gleichmäßig, sondern periodisch – mal mehr und mal weniger. Durch diese Schwingung des Stoffwechsels können, so stellte sich heraus, die Einzeller einen größeren Anteil der im Zucker gebundenen chemischen Energie verwerten. Dieses Ergebnis regt die Phantasie der Wissenschaftler an: „Warum schlafen und wachen wir, anstatt 24 Stunden auf halber Flamme zu leben?“ fragt sich Mario Markus. Und Benno Hess denkt über Energiesparen durch periodische Energieerzeugung in Kraftwerken nach.

Die alkoholische Gärung schwingt sogar dann noch weiter, wenn die Hefezellen zerstört und alle ihre festen

Bestandteile beseitigt worden sind: Zum Antrieb dieser „chemischen Uhr“ sind nur jene Enzyme nötig, die Zucker verdauen helfen. In einem Experiment der Dortmunder Forscher schwingt die Glykolyse in gleichmäßigen, gut elf Minuten langen Zeiteinheiten – ihrer „Eigenfrequenz“. In diesen Abständen steigt die Intensität der Gärung jedesmal zu einer höchsten Stärke an.

Neugierig darauf, was mit dieser Uhr passieren würde, mischten die Wissenschaftler den Hefe-Saft auf, indem sie den Zufluß an Zuckerlösung – also die Ernährung – für einige Minuten verdoppelten und dann wieder auf den alten Wert zurücknahmen. Obwohl nach dem Eingriff die gleichen Bedingungen herrschten wie zuvor, bildete sich ein zusätzlicher, kleiner Intensitätsipfel zwischen jeweils zwei großen: Für gleiche Lebens-



Ordnung beherrscht die B-Z-Reaktion. Sie zeigt sich in Form eines symmetrischen Paares spiraliger Wellen, solange nicht Strömungswellen in der Lösung das Muster zerreißen

bedingungen existieren unterschiedliche Entwicklungsmuster oder – wie die Forscher sagen – „Attraktoren“, auf welche sich die alkoholische Gärung langfristig einpendeln kann. Eine solche „Koexistenz von Attraktoren“ kennen Wissenschaftler auch aus vielen anderen physikalischen, chemischen und biologischen Systemen.

Die Dortmunder Forscher wollten noch mehr über die Natur der Glykolyse-Uhr erfahren. Sie fütterten den Enzymsaft nicht mehr gleichmäßig mit Zuckerslösung, sondern periodisch. Ergebnis: Solange die gepulste Nahrungszufuhr mit dem Stoffwechsel im gleichen Takt schwingt, werden nur die schon bestehenden Gipfel ein wenig höher.

Wenn aber Ebbe und Flut im Zuckerfluss einander immer schneller folgen, passen sich die Enzyme dem äußeren Takt an. Schwingt aber der Fütterungs-Rhythmus etwa zweieinhalbmal so schnell, dann wird es dramatisch: Plötzlich überholt der Stoffwechsel den äußeren Takt, erreicht ein Mehrfaches seiner Eigenfrequenz und beginnt schließlich hältlos – chaotisch – zu schwanken.

Für Hess und Markus war die ins Chaos tickende Glykolyse-Uhr keine Katastrophe, sondern eine Chance: Um herauszufinden, wie komplex die Verdauung der Hefe wirklich ist, fragten sie sich, von wie vielen veränderlichen Größen der Stoffwechsel der Pilze abhängt.

Chaosforscher gehen ein solches Problem an, indem sie in regelmäßigen zeitlichen Abständen gemessene Werte – eine sogenannte Zeitreihe – sukzessive den Achsen eines abstrakten mathematischen Raums zuordnen: In einem zweidimensionalen Diagramm legen zwei, vielleicht durch zehn Sekunden getrennte, Stoffwechsel-Intensitäten einen Punkt fest. In einem sechsdimensionalen Raum steht ein Punkt für die Stoffwechselwankungen einer ganzen Minute. Aus den nächsten sechs Messungen – gegenüber den ersten um jeweils eine Zehntelsekunde zeitlich versetzt – entsteht der nächste

Punkt. Und aus den Punkten erwächst mit der Zeit die Struktur eines „chaotischen Attraktors“.

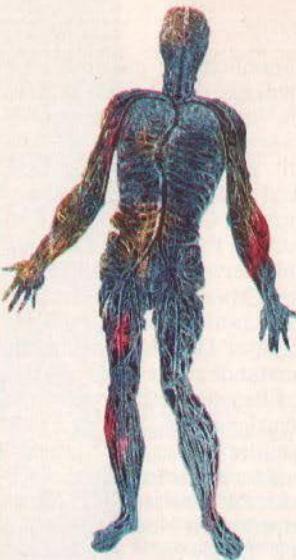
Die Dortmunder Wissenschaftler werteten eine Zeitreihe der chaotischen Hefeschwingung aus und stellten fest, daß sich der zugehörige Attraktor schon in einen gewöhnlichen dreidimensionalen Raum „einbettet“ läßt. Also müßten drei unabhängige Größen ausreichen, um die alkoholische Gärung zu beschreiben. Sie gehört – wie die B-Z-Reaktion – zu einer Klasse mathematisch verwandter Systeme aus Physik, Chemie und Biologie: Wann in ihnen Chaos herrscht und wann Stabilität, bestimmt die „logistische Gleichung“.

Dieses mathematische Instrument hat Mario Markus in Computer-Grafiken sichtbar gemacht. Es sind auf dem Monitor Bilder entstanden, die Ordnung und Chaos nach Umweltbedingungen sortieren – utopisch anmutende Gebilde mit selbstähnlicher, fraktaler Struktur (siehe Seiten 14/15 und 94).

Begeistert erklären die Forscher, was auf den farbigen Computer-Gemälden alles zu erkennen ist. „Dort“, sagt Benno Hess, während er auf ein Kreuz von sieben goldenen Strahlen deutet, „koexistieren sieben Attraktoren inmitten des Chaos.“ Dieses Miteinander der Attraktoren gibt es auch bei der alkoholischen Gärung. „Und das“, erklärt Markus, „haben wir nur mit Hilfe dieser Bilder gefunden.“

Markus fertigt die Computer-Grafiken jedoch nicht allein aus wissenschaftlicher Neugier an. „Ich habe schon immer Naturwissenschaft als eine Art Kunst betrachtet“, sagt er, „aber mein Gefühl, dabei kreativ zu sein, habe ich Nicht-Wissenschaftlern bis dahin nie vermitteln können.“ Gemeinsam mit Benno Hess, Stefan Müller und Theo Plessner hat der Physiker inzwischen eine Sammlung dieser wissenschaftlich nützlichen und zugleich ästhetisch reizvollen Bilder ausgestellt. „Ich glaube“, bekannte Mario Markus, „daß der Gott von Chagall und der Gott von Einstein der gleiche ist.“

Barnabas Thwaites



MEDIZIN

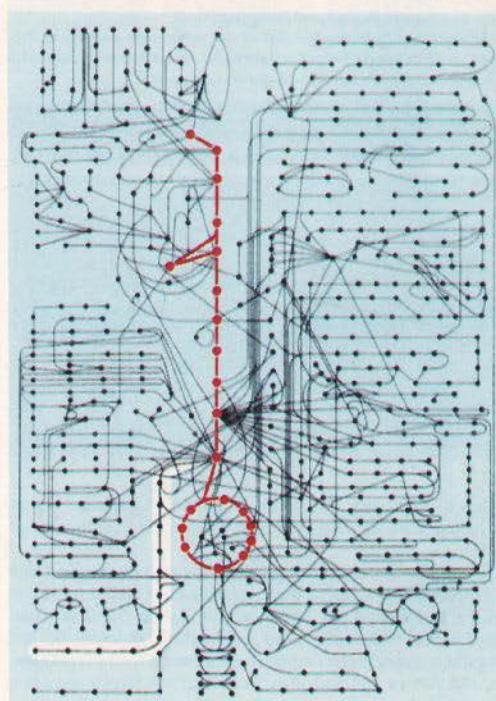
Hab Chaos im Herzen...

Ordnung ist das halbe Leben – die bessere Hälfte, wie es lange schien. Doch jetzt sind Biologen und Mediziner der anderen Hälfte des Lebens auf der Spur. Und was sie dabei herausfinden, zwingt uns, die Geringsschätzung der Un-Ordnung aufzugeben. In Leber und Lunge, in Genen und Gefäßen, in Hirn und Hormonen entdecken sie immer mehr „Chaos“.

Auch unsere Herzen sind – so gesehen – Chaoten. Als Ary Goldberger von der Harvard Medical School den Herzschlag mit dem Rüstzeug der Chaos-Theorie analysierte, stieß er auf ein verblüffendes Ergebnis: Bei gesunden Menschen variiert die Schlagfrequenz zwar unvorhersehbar, aber nach den Regeln des „deterministischen Chaos“ – in den scheinbar zufälligen Schwankungen steckt das dafür charakteristische „Gesetz der Selbstähnlichkeit“. Egal, ob Herzschläge pro Minute oder Stunde betrachtet werden – stets schwankt ihre Frequenz nach einem ähnlichen, unordentlichen Muster. Ordnung dagegen ist hier eine Vorbotin des Todes: Acht Tage vor einem Stillstand schlagen Herzen regelmäßiger. Und 13 Stunden vor dem Exitus verschwindet das chaotische Auf und Ab fast vollständig.

Ist Chaos also gesund?

Nicht immer. Chaos kann auch tödlich sein: So geben beim „Sekundenherztod“ Abertausende von Muskelfasern plötzlich ihre exakte Koordination auf, die sie ein Leben lang aufrechterhalten haben – ein Vorgang, den Mediziner am Massachusetts Institute of Technology bei Versuchen an Hühnerherzen als



Das Netzwerk der Stoffwechselreaktionen einer einzigen Leberzelle verdeutlicht, wie wohlbalanciert die zu einem „Fließgleichgewicht“ geordneten Lebensvorgänge sein müssen: Jeder Punkt kennzeichnet ein Stoffwechsel-Zwischenprodukt. Die rote Linie zeigt den Abbau von Glukose zum „Zitratzyklus“, der weiße Bereich die Synthese von Cholesterin

Chaos enttarnt haben. In Herzstromkurven, die das unkontrollierte Herzflimmern beim Sekundenherztod aufzeichnen, fanden die Forscher die mathematische Struktur, die den Weg ins deterministische Chaos beschreibt: die „Perioden-Verdoppelung“ (siehe Glossar „Mathematik“).

Ist Chaos mithin ungesund? **W**eder noch. Gesundheit, erklärt der Freiburger Professor für innere Medizin Wolfgang Gerok, ist eine heikle „Balance zwischen Ordnung und Chaos“. Das System unserer Blutgerinnung verhindert zum Beispiel durch feingesteuerte, miteinander rückgekoppelte Enzymkaskaden sowohl Blutgerinnung – und damit Herzinfarkte – als auch das Verbluten. Aber einen Absturz zu einer oder anderen Seite kann es nicht immer verhindern. Und diesen Balanceverlust deutet Gerok als „Krankheit“.

Mit seiner Interpretation setzt Gerok sich ab vom her-

kömmlichen medizinischen Denken, das Krankheit meist als Verlust einer stabilen Ordnung und Harmonie betrachtet. Ein Patient, der seinem Arzt klagt, „mit mir ist etwas nicht in Ordnung“, bringt es auf den Punkt: Krankheit gilt üblicherweise als Störfall in der „Maschine Mensch“, die irgendwann – nach Analyse all ihrer Details – vollständig verstanden sein wird.

Eben diese Hoffnung wurde von der Chaos-Forschung erschüttert. Sie hat gezeigt, welch unvorhersehbare Effekte in Systemen mit Rückkopplungen – und dazu zählen alle Lebewesen – auftreten können. Schon die biochemischen Reaktionen etwa einer einzigen Leberzelle sind ungeheuer vernetzt, die Zahl der

möglichen Rückkopplungen ist unübersehbar groß (siehe Grafik Seite 139). Der klassische Ursache-Wirkungs-Zusammenhang – aus A folgt B – weicht hier einem hochkomplexen Wirkungsgefüge mit vielen Einflußfaktoren und Wahlmöglichkeiten. Biologische Systeme können, je nach – mitunter marginalen – Bedingungen, so oder auch anders funktionieren.

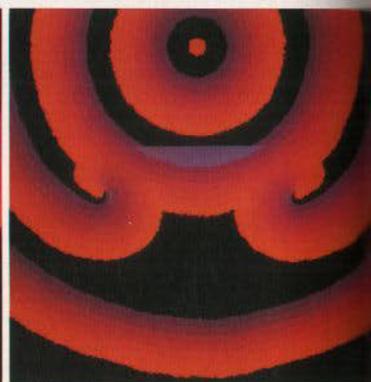
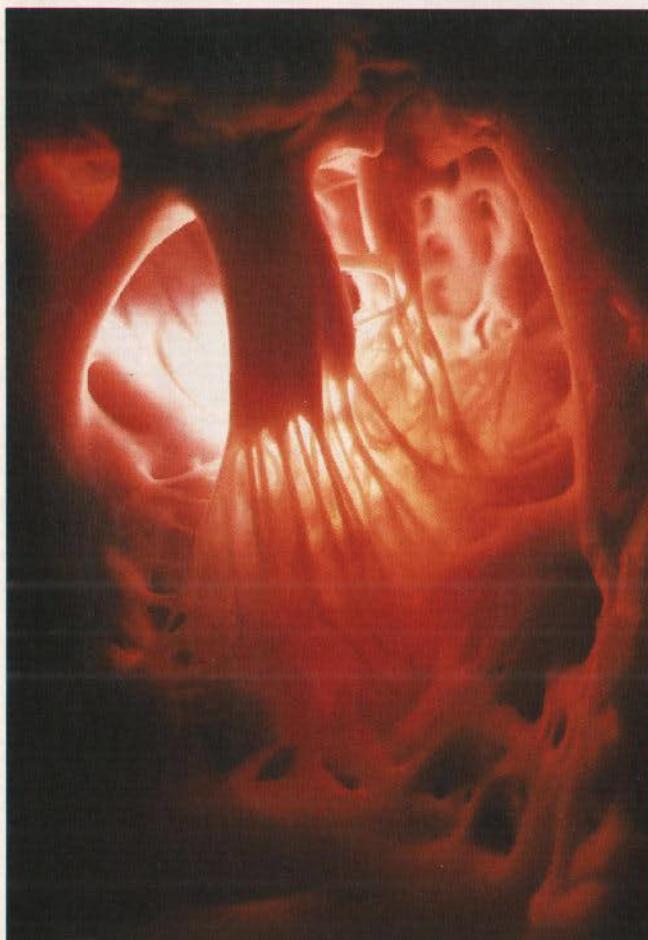
Was für eine einzige Zelle gilt, stimmt erst recht für ein Organ oder gar den gesamten Organismus. Es sei eine „intellektuelle Nachlässigkeit“, sagt Friedrich Cramer, Direktor am Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin in Göttingen, „anzunehmen, daß in Wissenschaften wie der Biochemie oder der Neurophysiologie sich ein Gesamtbild des Lebewesens aus Mosaiksteinchen zusammensetzen läßt.“

„Das Ganze“, betont auch Gerok, „ist mehr als die Summe seiner Teile.“ Es sei der

Die Chaos-Theorie, die hatten forschende Mediziner Ende der siebziger Jahre erkannt, wirft neues Licht auf solche zeitgebundenen Vorgänge. In rascher Folge gewannen sie eine Fülle aufreißender Einsichten ins körperliche Geschehen. Schon 1986 versammelten sich Mediziner und Biologen unweit der US-Hauptstadt Washington zur ersten großen internationalen Konferenz zum Thema, und zwei Jahre später stellte die „Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte“ ihr Treffen in Freiburg unter das Thema „Ordnung und Chaos in der unbelebten und belebten Natur“.

Angeregt durch die Chaos-Mathematik begannen die Mediziner auch im menschlichen Körper nach „fraktalen“ – in verschiedenen Maßstäben ähnlich aussehenden – Strukturen zu suchen. Sie wurden schnell fündig: in den Verästelungen der Lunge und in den Zotten des Dünns

... denn Ordnung ist nur das halbe Leben



Was der Blick in die Herzkammer nicht zeigt, simuliert Mario Markus mit einem „zellulären“ Spiralwellen entstehen, die den „normalen“ Herzschlag verdrängen und einen neuen

große Mängel der klassischen Medizin, daß ihr „der gerichtete Pfeil der Zeit“ fehle. Denn „biologische Prozesse verlaufen meist in einer Richtung und sind in ihrer Gesamtheit nicht umkehrbar: Der Baum kann nicht wieder zum Samen, die differenzierte Leberzelle nicht wieder zur unendifferenzierten Zelle des embryonalen Bindegewebes werden“. Diese unerbittliche zeitliche Ausrichtung hat eine existentielle Konsequenz: Altern und Tod sind unauflöslich mit dem Leben verbunden.

darms, in den fein verzweigten Blutgefäßen und Nervenfasern. „Im Jahre 1986 haben Sie das Wort Fraktale noch in keinem Physiologie-Lehrbuch gelesen, aber im Jahre 1996“, prophezeit Harvard-Mediziner Ary Goldberger, der Entdecker des deterministischen Chaos im Herzschlag, „werden Sie kein Physiologie-Buch ohne diesen Begriff finden.“

Biologische Systeme – also auch Menschen – wagen den Balanceakt zwischen Chaos und Ordnung aus gu-

ten Gründen. Das „deterministische Chaos“ – aus festen Regeln entsteht eine unvorhersehbare Entwicklung – erlaubt flexible Reaktionen auf kleinste Störungen und macht damit Anpassungsprozesse möglich: Es gibt dem Organismus eine Chance, den „Zufall“ zu kanalisieren, ihn gleichsam kreativ zu nutzen, und damit eine starre Ordnung zu vermeiden. Unseren komplizierten Regulationssystemen etwa für Atmung, Herzschlag oder Blutdruck scheint vollenkte Regelmäßigkeit eher zu schaden: Ständig müssen Störungen und Ungleichgewichte ausbalanciert werden. Sogar einer der zentralen Stoffwechselprozesse – der Abbau des Blutzuckers – verläuft, wie Wissenschaftler um Benno Hess vom Dortmunder Max-Planck-Institut für Ernährungsphysiologie nachweisen konnten, gleichförmig bis chaotisch und steuert eine „innere Uhr“ mit einem Minuten- und einem Stundenzeiger.



Freipräpariert enthüllen die Bronchien eines Menschen ihre baumähnliche, fraktale Struktur: die großen Verzweigungen ähneln den kleinen – und umgekehrt

vom Institut für physikalische und theoretische Chemie an der Universität Tübingen maß in Abständen von weniger als einer Minute die Konzentration verschiedener Hormone im Blutplasma. Er fand „schnelle, unregelmäßi-

Wichtige Signale beim komplizierten Auf- und Abbau des Knochengewebes gibt das Parathormon, dessen Menge wiederum von der Kalziumkonzentration im Blut abhängt. Doch selbst bei schwerster Osteoporose, die Knochen spontan brechen läßt, ist die Blutkonzentration beider Stoffe normal. Diese Ordnung ist allerdings trügerisch, wie Professor Rolf-Dieter Hesch, Hormonspezialist an der Medizinischen Hochschule Hannover, kürzlich entdeckte: Er maß die Konzentration beider Substanzen im Zwei-Minuten-Abstand und fand, daß sie bei Gesunden chaotisch schwankt. Bei Osteoporose-Kranken jedoch fehlt diese „Dynamik der Sekretion“ fast völlig – eine Ordnung, die den Knochenstoffwechsel entgleisen läßt.

Gerade die Hormone als

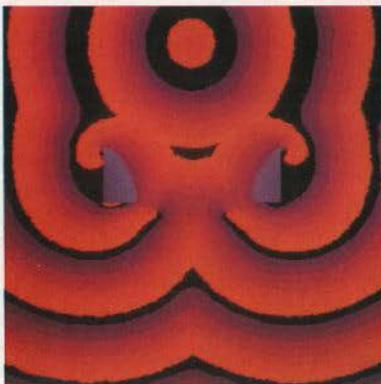
Informationsträger und Botenstoffe könnten, wie Hesch in einem Beitrag des kürzlich von ihm herausgegebenen Lehrbuchs „Endokrinologie“ vermutet, zum idealen Studienfeld der Chaos- und System-Theoretiker werden. Wie das Beispiel der Osteoporose lehrt, ist die diagnostische Aussagekraft der gängigen Mittelwerte begrenzt. Hesch hofft, daß die Chaos-Forschung neue Diagnosemöglichkeiten bei Hormonstörungen eröffnet, die deren Ursachen erhellen, mindestens aber entsprechende Krankheiten früher erkennen lassen. Vielleicht lassen sich

so sichere Frühwarnsysteme etwa bei Schilddrüsenerkrankungen entwickeln.

Solche Hoffnungen betreffen nicht nur Hormonstörungen: Waren zum Beispiel die Warnzeichen des Herzflimmerns im EKG leicht ablesbar, könnten Ärzte die Risikopatienten rechtzeitig herausfiltern und behandeln. Kann die Chaos-Forschung weitere Details der natürlichen, physiologischen Rhythmen erhellern, lassen sich womöglich für Herzschrittmacher-Implantationen und Insulingaben, für Epilepsie- und Leukämiebehandlungen die günstigsten Zeitpunkte ermitteln.

Spekulationen über den „Sinn“ des deterministischen Chaos in uns gibt es viele, doch bewiesen ist bisher wenig. Eine der interessanten Thesen: Chaos könnte ein zu gleichförmiges Verhalten benachbarter Zellen unterbinden, das zerstörerisch wirkt – dem Gleichschritt eines Trupps Soldaten auf einer Brücke ähnlich, der diese derart schwingen läßt, daß sie einstürzt. Auch das Muskelzittern bei der Parkinsonschen Krankheit läßt sich möglicherweise als eine derartige „Resonanz-Katastrophe“ deuten – ebenso ein epileptischer Anfall: Vielleicht ist die Ursache beider Phänomene eine zu starke Koordination der Nervenzellen. Die Hirnstromkurven von Epileptikern während eines Anfalls deuten jedenfalls darauf hin: Das Elektroenzephalogramm (EEG) weist dann gleichförmigere und periodischer verlaufende Kurven auf als bei Gesunden.

Die Suche nach dem deterministischen Chaos in uns hat den Medizinern immerhin zwei neue Begriffe beschert: „Systemerkrankung“ und „dynamische Erkrankung“. Damit werden Leiden gekennzeichnet, die auf Probleme der Koordination und Kontrolle im Körper zurückgehen, auf die Unfähigkeit von Systemen, sich selbst auszubalancieren, auf Schwingungen, wo keine sein sollten, auf plötzliche Stillstände – Leiden, die mit dem traditionellen medizinischen Instrumentarium kaum zu erfassen sind. „Krankheiten als Sy-



„Ihren Automaten“: eine Herz-Arrhythmie. Das rechteckige Stück „krankes Gewebe“ läßt zwei Takt angeben: Das Herz beginnt zu rasen

Krankheit, Sterben und Altern könnten – so gesehen – Folgen des Verlustes jener Reaktionsfähigkeit sein. Das gestörte Miteinander von Chaos und Ordnung wird auch bei bestimmten Leukämieformen sichtbar: Der Spiegel der weißen Blutkörperchen schwankt nicht mehr – wie beim gesunden Menschen – wie zufällig, sondern von Woche zu Woche zwischen zwei Extremwerten.

Auch die Konzentration von Hormonen kann chaotisch oszillieren. Otto Rössler

ge Schwingungen, die auf einen unabhängigen Mechanismus zurückgehen“.

„Erstarre Ordnung“ im Stoffwechsel des menschlichen Körpers kann böse Folgen haben. Sie führt beispielsweise zum schmerzvollen Knochenschwund, zur Osteoporose, die zu 90 Prozent der Fälle Frauen in und nach den Wechseljahren trifft; das „Deutsche Ärzteblatt“ nennt sie „eines der größten und teuersten gesundheitlichen Probleme unserer Gesellschaft“.

stemstörungen zu beschreiben", so der Endokrinologe Hesch, „überschreitet definitiv gemäß die Grenzen der klassischen Organmedizin.“

Diese liefert zum Beispiel keine Erklärung für viele Herzrhythmus- oder Schlafstörungen und für den Atemstillstand, der zum „Plötzlichen Kindstod“ führt, versagt bei Volkskrankheiten wie Fett sucht oder Diabetes und bietet keine befriedigende Behandlung für Schizophrenie oder Depression an.

Hier hoffen Ärzte auf die biomedizinische Chaos-Forschung. Sie könnte Einsichten in eine höhere, komplexe Ordnungsstufe unseres Organismus eröffnen, auf der dessen Teile auf noch unbekannte Art zusammenwirken. Zu den medizinischen Rätseln, die dadurch womöglich gelöst werden, zählen Fragen wie: Warum erkranken nicht alle Menschen, die gleichen Risikofaktoren – etwa Zigarettenrauch – ausgesetzt sind, zur gleichen Zeit und mit gleicher Heftigkeit (oder auch gar nicht)? Folgen Epidemien wie Grippe oder Masern den Gesetzen des deterministischen Chaos – und was bedeutet das für Impfprogramme? Warum verlaufen Infektionskrankheiten so unterschiedlich?

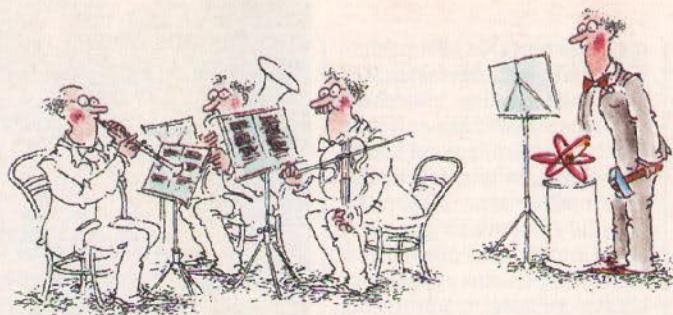
Noch, betont Wolfgang Gerok, steht Krankheitsfor-

schung unter dem Gesichtspunkt des deterministischen Chaos „erst in den Anfängen. Die Bedeutung für das Verständnis von Krankheiten, deren Diagnostik, Therapie und Prognose ist wahrscheinlich viel umfassender, als wir derzeit aufgrund weniger bekannter Beispiele annehmen.“

Patienten wie Ärzten beschert die Chaos-Forschung zunächst vor allem Theorien – zwischen diesen und neuen verlässlichen Diagnosemethoden und Therapien klafft noch eine riesige Lücke. Doch zweifellos ist der Mensch – so der amerikanische Publizist James Gleick – das „Paradebeispiel eines komplexen dynamischen Systems“. Gerade deshalb ist die Medizin ein Prüfstein für die universelle Relevanz der Chaos-Theorie. In 10 bis 20 Jahren, schätzen Experten, wird sich zeigen, ob die heute hochfliegenden Träume berechtigt sind, ob die Vermutungen und Hypothesen in handfeste Hilfe für leidende Menschen münden.

Vielleicht sagt eines Tages ein Patient zum Arzt: „Mit mir ist etwas nicht im Chaos.“ Denn Ordnung, das wissen wir nun, ist nur das halbe Leben.

Die Lübecker Publizistin Charlotte Kerner, 39, hat in fast allen bisher erschienenen Ausgaben von GEO-Wissen mitgearbeitet. Im März 1990 erschien ihr sechstes Buch „Nicht nur Madame Curie...“: 13 Porträts von Nobelpreisträgerinnen.



HÖREN

Wenn die Tonleiter steigt und steigt

Manfred Euler hat seinem Sohn den Radiorecorder entführt und an den Heimcomputer angeschlossen. Nun kann der Test beginnen. Als erstes fragt mich der Physiker: „Welcher Ton ist höher?“ Ein Tastendruck – und der Computer produziert nacheinander zwei merkwürdig schnarrende Töne. Eine leichte Übung für jeden, der schon einmal eine Gitarre gestimmt hat: Der zweite Ton ist deutlich tiefer.

Reingefallen. Eine Textzeile auf dem Bildschirm meldet: Der zweite Ton hatte eine doppelt so hohe Grundfrequenz wie der erste; er hätte also eine Oktave höher klingen müssen.

Manfred Euler, Professor an der Fachhochschule Hannover, führt sein akustisches Kuriositätenkabinett gern bei Seminaren für Physiklehrer vor. Denn die mathematischen Gleichungen, die etwa „nichtlineare dynamische Systeme“ beschreiben, werden um vieles anschaulicher, sobald sie sich – in Töne umgesetzt – gleichsam sinnlich erfahren lassen. Das Ohr übt dabei Selbsterkenntnis: Unser Gehör ist selbst ein Musterbeispiel eines nichtlinearen Systems.

Zustände kommt die verblüffende akustische Täuschung, weil die schnarrenden Töne aus „nichtharmonischen“ Obertönen bestehen. Sie sind gewissermaßen „Bruchstücke“ ganzzahliger Töne.

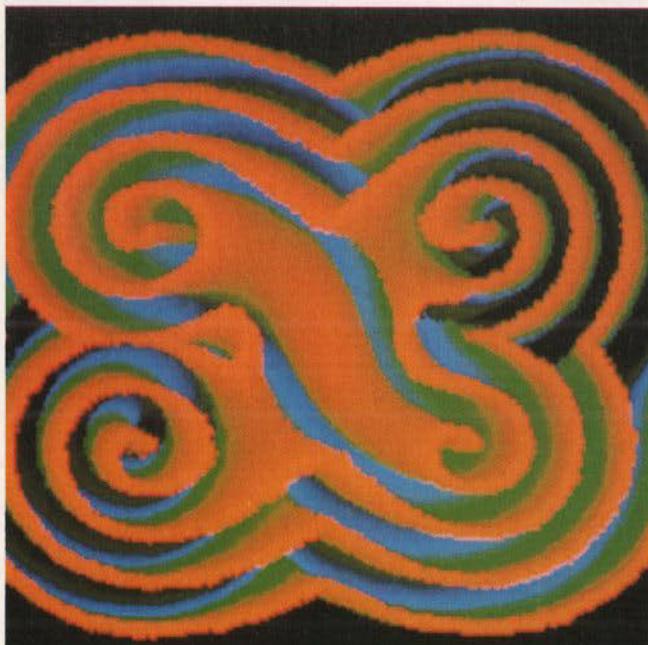
Nur ein reiner Sinuston, wie ihn ein elektronischer

Tongenerator erzeugen kann, besteht aus einer einzigen Frequenz. Natürliche Schallquellen strahlen jedoch gewöhnlich ein ganzes Spektrum von Tönen und damit Schallfrequenzen ab: den Grundton und „harmonische“ Obertöne, ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz.

Mathematisch gesehen ist jedes Spektrum unendlich vieler Obertöne „fraktal“ – selbstähnlich. Solche Überlagerung von Schallwellen geht aus einer Verdopplung oder Halbierung aller Frequenzen im Prinzip unverändert hervor. Liegt der Grundton im unhörbar tiefen Bereich und erklingen alle dazu harmonischen Frequenzen gleich laut, nimmt das Ohr keinen Unterschied wahr. Verschiedene Intensitäten der „harmonischen Töne“ verleihen Musikinstrumenten ihr charakteristisches Timbre.

Auch ein Ensemble nicht harmonischer Obertöne hat selbstähnliche Struktur. Sie schwingen allerdings nicht auf ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz: In der Hierarchie der Obertöne kann jeder in einer Frequenz schwingen, die im Vergleich zum darunterliegenden etwas mehr als doppelt so groß ist. So entsteht – auf einem Monitor sichtbar gemacht – eine zerklüftete Wellenform.

Das Gehör wird zwar durch den verzerrten Klang irritiert. Aber geleitet durch die Erfahrung, versucht es dennoch, das Lautgemisch als Harmonie zu interpretieren. Als Kompromiß „meldet“ es eine mittlere Tonhöhe. Das ist jedoch ein voreiliger Schluß. Denn als Euler per Knopfdruck die Frequenzen aller Teiltöne verdoppelt und so um eine Oktave erhöht, höre ich nicht etwa einen Anstieg, sondern ein leichtes Ab-



Ein zellulärer Automat simuliert Wellen im Herzmuskel

Angebot mit 3 Vorteilen

zur Anzeige auf Seite 26/27

- Gratis zur Begrüßung eine aktuelle GEO-Ausgabe
- Gratis 4 außergewöhnliche GEO-Farbdrucke
- Ca. 15% Preis-Vorteil = DM 1,50 pro Heft gespart gegenüber Einzelpreis

Detail-Garantie auf der Rückseite



Bitte
mit 60 Pf
freimachen,
falls Marke
zur Hand

Antwort-Postkarte

GEO
Leser-Service
Postfach 10 25 25

2000 Hamburg 1

GEO-VISION: Faszination aus Wissenschaft und Forschung auf Video

Exklusiv für unsere Leser gibt es GEO-Videos zu den Themen von GEO-WISSEN. Erleben Sie Höhepunkte aus den Bereichen Forschung, Wissenschaft und Technik »live« – Experimente, Recherchen und neueste Erkenntnisse. GEO-VISION berichtet über: Die Geburt der Materie – eine beeindruckende Dokumentation über das Schicksal unseres Universums. Mit den großartigen Leistungen unseres Immunsystems beschäftigt sich der »Angriff aus dem Mikrokosmos« und die »Rückkehr der Seuchen« – Themen, wie sie aktueller nicht sein könnten! GEO-VISION – eine faszinierende Kombination aus wissenschaftlichen Berichten und Unterhaltung.



Bitte
mit 60 Pfennig
freimachen,
falls Marke
zur Hand

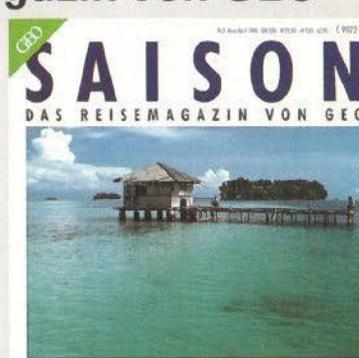
Antwort-Postkarte

GEO
Versand-Service
Postfach 600

7107 Neckarsulm

SAISON: Das Reisemagazin von GEO – für alle, die mehr über ihr Reiseziel erfahren möchten

Ein unerlässlicher Urlaubsplaner – kompromisslos recherchiert bekommen Sie auf ca. 180 Seiten klare und nutzbare Informationen zum Thema Reisen. Wobei Unterhaltung und Erlebnis nie zu kurz kommen. Jede Ausgabe von SAISON stellt Ihnen die Vielfalt lohnender Urlaubsziele vor: Städteporträts mit herausnehmbarer Reiseführer, kulturelle Schauplätze und verborgene Kleinodien, persönliche Eindrücke und getestete Fakten; Erlebniszonen, Attraktionen, Dokumentationen. Und damit Sie keine Ausgabe versäumen und das neue SAISON sofort frei Haus beziehen können, gibt es SAISON jetzt im Abonnement zum Preis von derzeit DM 6,50 pro Heft (statt DM 7,50 bei Einzelheftkauf).



Provence Eine Reise in den Frühling • Barcelona Mit Extra-Stadt-
führern zum Herausnehmen • DDR aktuell Zwanzig Reiseziele für
den Sommer • Thüringen Kulturstadt Erfurt • Indonesien Tausend
Inseln zum Träumen • Cluburlaub Ein Dorf geht um die Welt

Bitte
mit 60 Pfennig
freimachen,
falls Marke
zur Hand

Antwort-Postkarte

SAISON
Leser-Service
Postfach 10 25 25

2000 Hamburg 1

Nutzen Sie den Preis-Vorteil!

Abruf-Karte für ein GEO-Abonnement

JA, ich nehme Ihre Einladung an.

Schicken Sie mir bitte kostenlos die GEO-Begrüßungs-Edition, dazu 4 GEO-Farbdrucke und die GEO-Dokumentation. Ich darf diese Geschenke auch dann behalten, wenn ich mich nicht für GEO entscheide. Nach Erhalt habe ich 14 Tage Zeit, GEO kennenzulernen. Nur wenn mich GEO überzeugt und ich nicht widerrufe, möchte ich GEO jeden Monat per Post frei Hause beziehen. Für nur DM 9,- statt DM 10,50, also z. Zt. mit ca. 15% Preis-Vorteil. Ich kann keine Kündigungsfrist versäumen, denn ich darf jederzeit kündigen.

Name/Vorname

Straße/Nr.

Postleitzahl Wohnort

Telefon-Nummer für evtl. Rückfragen

Datum

Datum

Unterschrift

Wenn ich bei GEO bleibe, bezahle ich bequem und bargeldlos durch 1/4-jährliche Bankabbuchung DM 27,-

Bankleitzahl (bitte vom Scheck abschreiben):

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

Meine Kontonummer:

Geldinstitut:

Ich möchte statt 1/4-jährlicher Bankabbuchung lieber eine Jahresrechnung (12 Hefte DM 108,-).

Bitte ankreuzen, falls gewünscht:

Auslandspreise: Schweiz: Fr. 8.50 statt Fr. 10.50 Einzelpreis.

Österreich: S 65,- statt S 80,- Einzelpreis.

Sonstiges Ausland: DM 9,- zuzüglich Porto. 86269 A/O

Detail-Garantie

- Gratis zur Begrüßung eine aktuelle GEO-Ausgabe und dazu 4 außergewöhnliche GEO-Farbdrucke, 21x15 cm groß: die 900jährige Bavaria-Büche. (Abbildung auf der Vorderseite.) Beide Geschenke gehören in jedem Fall Ihnen.
- Dazu: eine umfangreiche Dokumentation über GEO, die Ihnen zeigt, welche Themenbreite GEO bietet.
- Ca. 15% Preis-Vorteil, wenn Sie sich für GEO entscheiden. Sie sparen DM 1,50 pro Ausgabe gegenüber Einzelpreis.
- Sie können keine Kündigungsfrist versäumen, denn Sie dürfen jederzeit absagen.

Abruf-Karte für GEO-VISION

JA, bitte liefern Sie mir gegen Rechnung folgende Videos von GEO (Anzahl bitte eintragen):

»Die Geburt der Materie« (G 0609) DM 49,80

»Angriff aus dem Mikrokosmos« (G 0615) DM 49,80

»Rückkehr der Seuchen« (G 0616) DM 49,80

Name

Vorname

Straße/Nr.

Postleitzahl Wohnort

Datum/Unterschrift

Alle Preise zuzüglich DM 2,- Versandkosten-Anteil pro Lieferung.

Ausland: Lieferung nur gegen Vorkasse per Scheck zuzüglich DM 3,-.

Bitte beachten Sie, daß GEO-Videos nur für das System VHS lieferbar sind.

86270

»Die Geburt der Materie«

In unterirdischen Großexperimenten suchen Physiker den Urknall und das Schicksal des Universums zu ergründen. Ein Dokumentarfilm über eines der großen Abenteuer der Physik. Ca. 40 Min.

»Angriff aus dem Mikrokosmos«

Volker Arzt stellt das raffinierte Verteidigungssystem des Körpers vor: unersättliche Freßzellen, die Eindringlinge einfach auffressen. Oder das phantastische Gedächtnis des Immunsystems, das ein Leben lang Erreger wiedererkennen und bekämpfen kann. Ca. 45 Min.

»Rückkehr der Seuchen«

Hier setzt Volker Arzt das zentrale Thema »Immunsystem« fort. Durch die zunehmende Resistenz der Erreger wird die Suche nach neuen, wirksamen Medikamenten immer dringlicher. Diese und andere (lebens-)wichtige Themen behandelt dieses GEO-Video. Ca. 45 Min.

Abruf-Karte für ein SAISON-Abonnement

JA, ich möchte den Preis-Vorteil nutzen.

Ich bestelle SAISON – das Reisemagazin von GEO – im Abonnement. Senden Sie mir bitte alle Ausgaben sofort nach Erscheinen zum Preis von derzeit nur DM 6,50 je Heft (statt DM 7,50 Einzelpreis), inkl. Porto und Verpackung.

Falls ich auf SAISON nach einem Jahr verzichten möchte, teile ich Ihnen dies 6 Wochen vor Ablauf der Bezugsfrist mit. Nach einem Jahr kann ich jederzeit die Zustellung beenden lassen.

Meine Zahlungsweise (bitte ankreuzen):

Bequem und bargeldlos durch jährliche Bankabbuchung (DM 39,- für 6 Hefte)

Bankleitzahl (bitte vom Scheck abschreiben):

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

Kontonummer:

Geldinstitut:

Gegen Jahresrechnung (DM 39,- für 6 Hefte)
Bitte keine Vorauszahlung leisten.
Rechnung abwarten.

Widerrufs-Garantie: Diese Bestellung kann ich durch Absenden einer kurzen Mitteilung an den SAISON Leser-Service, Postfach 10 25 25, 2000 Hamburg 1, innerhalb von 10 Tagen widerrufen. Rechtzeitiges Absenden genügt. Ich bestätige dies mit meiner zweiten Unterschrift.

Name/Vorname

Straße/Nr.

Postleitzahl Wohnort

Datum/Unterschrift Bitte unbedingt hier unterschreiben!

Auslandspreise z. Zt.: Schweiz: Fr. 6.50 statt Fr. 7.50 Einzelpreis;
Österreich: S 45,- statt S 55,- Einzelpreis; sonstiges Ausland:
DM 6,50 zuzüglich Porto.

Ihre Vorteile, wenn Sie SAISON jetzt im Abonnement bestellen:

- Sie zahlen derzeit nur DM 6,50 je Heft (statt DM 7,50 Einzelpreis).
- Sie können kein Heft versäumen – Lieferung sofort nach Erscheinen.
- Frei-Haus-Lieferung. Zustellung und Verpackung sind bereits im günstigen Preis enthalten.
- Sie können die Bestellung durch Absenden einer kurzen Mitteilung an den SAISON Leser-Service, Postfach 10 25 25, 2000 Hamburg 1, innerhalb von 10 Tagen widerrufen. Rechtzeitiges Absenden genügt.

sinken des Tons. Euler erklärt das Phänomen: Jeder in seiner Frequenz verdoppelte Oberton hat eine etwas kleinere Frequenz als der nächsthöhere Oberton vor der Verdoppelung. Durch die Selbstähnlichkeit ist der Effekt der gleiche, als seien alle Töne leicht abgesenkt worden.

Entsprechend verwirrend endet denn auch der Versuch, mit dem merkwürdigen Instrument eine Tonleiter zu spielen. Note für Note steigt das Geräusch die Halbtonleiter empor, ohne jedoch die nächste Oktave zu erreichen: Die Tonleiter scheint jedesmal mit einem Grundton zu beginnen, der ein wenig tiefer ist als zuvor.

Nun gönnt der Physiker meinen Ohren etwas Einfaches und erzeugt durch fortlaufende Verdoppelung der Grundton-Frequenz ausschließlich reine Oktaven als Obertöne. Die Klangfarbe des entstehenden Tons erinnert an eine Orgel. Erneut spielt der Computer die aufsteigende Halbtonleiter, während auf dem Bildschirm die Aufforderung erscheint: „Bitte mitsummen“.

Eigentlich ist es kein Problem, die zwölf Halbtöne einer chromatischen Tonleiter zu summen, der Rechner macht's ja vor. Aber nach zwei Oktaven merke ich, daß ich offenbar zu hoch geraten bin – die nächste Falle. Also eine Oktave tiefer weitersummen – um nach zwölf Halbtönen erneut aufs akustische Glatteis geführt zu werden. Selbst noch so genaues Zuhören hilft nichts: Die Tonleiter steigt und steigt, um doch immer wieder am selben Punkt zu landen.

Meine Ohren sind auf die Selbstähnlichkeit des Tons hereingefallen. Nach dem Durchlaufen einer Oktave entsteht exakt der gleiche Schwingungsverlauf wie zuvor: Jeder Oberton liegt auf der Frequenz, die vorher der nächsthöhere hatte. Und während der höchste Oberton aus dem hörbaren Frequenzbereich verschwindet, taucht am unteren Ende der Frequenzskala ein neuer Ton auf.

Wären Forscher in der Lage, in einem Mini-U-Boot das Innenohr zu durchstreifen,



Das menschliche Gehör ist ein Musterbeispiel eines „nichtlinearen Systems“

könnten sie in diesem Moment die Selbstähnlichkeit der Tonleiter sehen. Die Gehörknöchelchen – Hammer, Amboß und Steigbügel – übertragen die Schwingungen des Trommelfells auf die flüssigkeitsgefüllte Schnecke des Innenohrs. Sie besteht aus drei nebeneinander aufgerollten Röhren, die voneinander durch Membranen getrennt sind.

Die Flüssigkeit schlägt je nach Tonhöhe kurze oder lange Wellen im Inneren der Schnecke. Die trennenden Hämpe schwingen im Takt dieser Wogen mit. Auf einer von ihnen – der Basilar-

membran – sitzen feine Härchen mit Nervenzellen. Aus deren „Meldungen“ kann das Gehirn die Tonhöhe ermitteln. Beim Abspielen der selbstähnlichen Tonleiter würden die imaginären Forscher im U-Boot ein Wellenmuster sehen können, das sich mit dem Aufsteigen der Töne in der Innenohrschnecke verschiebt: Es wäre nach einer Oktave exakt um einen Wellenberg der Grundfrequenz verschoben und hätte damit genau die gleiche Form wie vorher.

Obwohl die Analyse des Wellenmusters mit Hilfe der Nervenzellen-Härchen beim Hören eine wichtige Rolle spielt, kann sie allein die phantastischen Leistungen unseres akustischen Sinnesorgans nicht erklären: Wären unsere Ohren, schwingenden

Mikrofonmembranen ähnlich, rein passive Empfänger, könnten sie Tonhöhen nicht so fein unterscheiden – klassische Musik hätte gar nicht erst entstehen können. Doch das Gehör ist ein aktives System mit „Rückkopplung“ zwischen Ohr und Gehirn: Vermutlich vermögen die Härchen der Basilarmembran auch willkürlich zu schwingen. So könnten sie ihrerseits der Flüssigkeit im Innenohr durch passende Nervenimpulse ein Wellenmuster überlagern und dadurch etwa die Trennschärfe zwischen Tönen erhöhen – also quasi die unscharfen Ränder einer verwachsenen Kontur nachzeichnen.

Dadurch mag auch die enorme Empfindlichkeit des Ohres selbst für leiseste Töne zustande kommen: Wäre die Hörschwelle nur eine Stufe niedriger, würden wir einzelne Luftmoleküle gegen das Trommelfell prallen hören.

Das Ohr wird durch die Rückkopplung mit dem Gehirn zu einem „nichtlinearen System“. Dabei ist die Gesamtempfindung nicht einfach die Summe der Teilreize. Das demonstriert Manfred Euler mit dem „kubischen Differenzton“: Aus einem der Lautsprecher des Radiorecorders erklingt ein konstanter Ton, aus dem anderen ein tieferer Laut, der langsam ansteigt. Wenn die gleitende Schallfrequenz über die Höhe der feststehenden gerät, ist plötzlich ein sirenenartiger Ton zu hören, der immer tiefer zu werden scheint – ein seltsames Phänomen, das offenbar vom Gehör selbst erzeugt wird: Der abnehmende Unterschied zwischen der doppelten Frequenz des feststehenden Tons und der einfachen Frequenz des aufsteigenden Tons bestimmt die Höhe dieses kubischen Differenztons.

Noch sind die komplexen Vorgänge im Gehör nur teilweise aufgeklärt. Zu der trickreichen Mechanik des Ohrs kommen die raffinierten „Schaltungen“, mit denen das Netzwerk der Nervenzellen im Gehirn die empfangenen Signale interpretiert. Und auch dieses neuronale Netz selbst ist ein schwingungsfähig-

ges System. Das zeigt zum Beispiel das Phänomen der „binauralen Schwebung“: Schwingungen bilden sich, wenn zwei Töne leicht unterschiedlicher Frequenz gleichzeitig erklingen. Die Überlagerung der einzelnen Schwingungen lässt die Lautstärke periodisch an- und abschwellen; sie ist die Ursache für den rauen Klang eines unsauber gestimmten Blockflötenchors.

Überraschenderweise sind solche Schwebungen auch zu hören, wenn die unterschiedlichen Töne getrennt – binaural – in die beiden Ohren eingespielt werden: Offenbar überlagern schwingende Nervenimpulse einander nach demselben Prinzip wie Schallwellen.

Als dynamisches System kann das Gehör auch in labile

– „chaotische“ – Zustände geraten. Manfred Euler startet ein neues Programm auf seinem Computer, und aus den Lautsprechern klingt ein verwirrendes Musikstück: In vertrackten synkopischen Rhythmen schwirren fremdländisch anmutende Melodien zwischen den Stereo-kanälen hin und her. Auf Knopfdruck vergrößert sich die Tonhöhdifferenz zwischen den Kanälen, und während die Dissonanz allmählich unangenehm wird, bringt das Erkennen schlagartig Ordnung ins vermeintliche tonale Chaos: Links spielt „Hänschen klein“ und rechts „Bakke, backe Kuchen“.

Der Diplom-Physiker Jürgen Scriba, 25, arbeitet zur Zeit in München an seiner Promotion. Er hat schon für GEO-Wissen Nr. 2/1989 „Kommunikation“ geschrieben.

EXPERIMENTE

Das Chaos in die gewünschte Richtung lenken

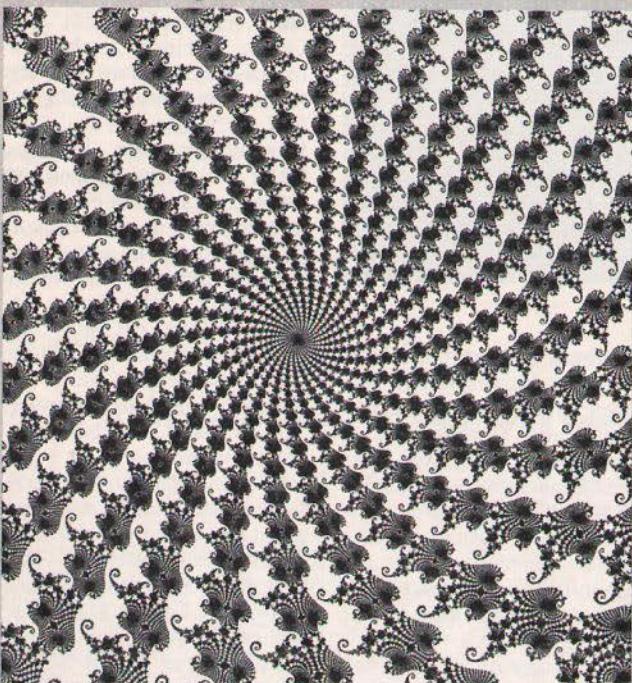
Die „Chaoten“ unter den Physikern sind immer wieder für Überraschungen gut. Da haben sie uns erst kürzlich den Sinn dafür geschärft, daß in scheinbar simplen Vorgängen der Keim für chaotisches Verhalten verborgen sein kann: Wo endet ein Salzkörnchen im Brot, wenn der Bäcker ein paarmal den Teig umrührt?

Wir werden es nie zuverlässig voraussagen können. Kaum haben die Chaos-Forscher aber solche Vorgänge als „unberechenbar“ entlarvt, versetzen sie dem sich gerade formenden neuen Weltbild auch schon einen Stoß: Chaotische Vorgänge lassen sich unter bestimmten Bedingungen nicht nur im groben beschreiben, sondern erstaunlich genau analysieren. So genau, daß es sogar gelingen kann, sie mit geringem Aufwand zu steuern.

„Eigentlich ist das nicht neu, was wir tun“, schränkt Alfred Hübner ein. Der junge Physik-Professor – Jahrgang 1957 – arbeitet an der Technischen Universität München und ist Leiter des Turbulenz-Labors am Beckman Institute der University of Illinois in Urbana-Champaign. Hübner hatte vor drei Jahren als erster eine allgemeine Analysemethode für chaotische Systeme vorgeschlagen. „Wir beschreiben lediglich das mit Formeln, was beispielsweise erfolgreiche Manager schon lange intuitiv können: komplexe Vorgänge mit minimalem Aufwand in die gewünschte Richtung lenken. Und es zeigt sich, daß es um so einfacher ist, ein System durch dauernde leichte Störungen zu steuern, je chaotischer es sich verhält.“

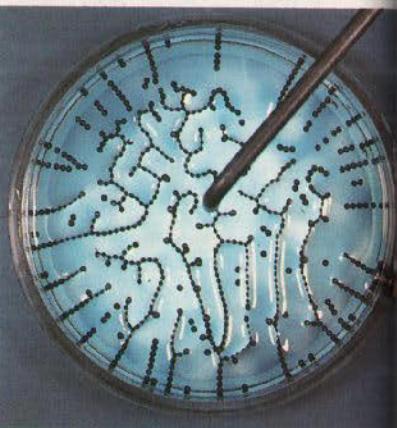
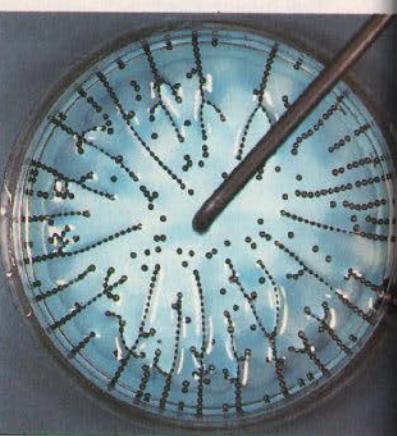
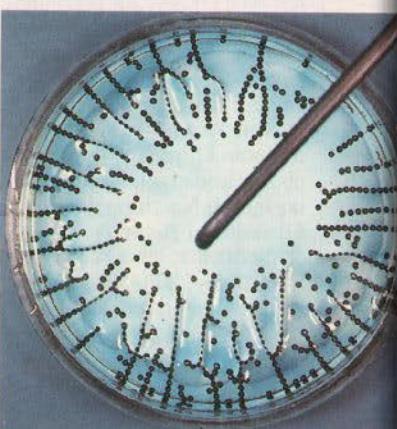
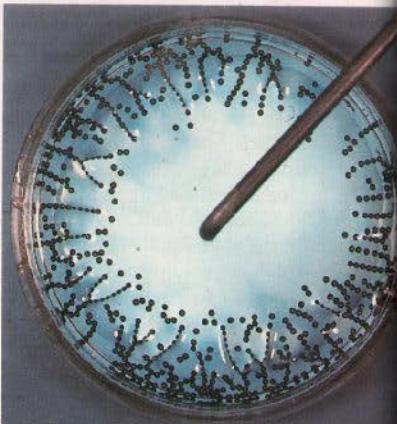
Welche Aspekte der Steuerung von chaotischen Systemen für den Physiker interessant sind, erläutert der Vater dreier Töchter an seinem Lieblingsbeispiel: Wie bringe ich das Kind auf der Schaukel in Schwung? Kein Problem –

Fraktale Seepferdchen-Etude für Klavier



»Mich interessiert alles«, sagt der in Hamburg lehrende ungarische Komponist György Ligeti. »Naturwissenschaften, Linguistik, Geschichte, Politik.« Schon früh ließ er sich von den fraktalen Kreationen der Bremer Mathematiker um Heinz-Otto Peitgen anregen.

Besonders das Bild »Legionen von Seepferdchen gruppieren sich in 29 Spiralen um ein Apfelmännchen« (Peitgen) hat es dem Musiker angetan: Er vertont die »Ordnung-Chaos-Ordnung-Übergänge« in seiner Klavieretüde »Désordre«



solange dem hilfsbereiten Kinderfreund nicht die Augen verbunden sind: Hat er die Schaukel nach dem ersten Schwung erst einmal losgelassen, läuft er bei deren Rückkehr entweder Gefahr, ins Leere zu fassen oder sich die Finger zu brechen – je nachdem, wie gut die Lager der Schaukel geölt sind. Und auch auf die Schwingungsdauer ist – selbst bei reibungsfreier Schaukel – kein Verlaß: Sie wird größer, wenn die Schaukel weiter ausschlägt.

Kein Zweifel: Sogar eine einfache Schaukel kann nur von jemandem vernünftig in Schwung gebracht werden, der zuvor den Einfluß des Anschubs genau kennt – und zwar aus allen relevanten Situationen. Denn in nichtlinearen Systemen läßt das Verhalten in einem Bereich keinen Analogieschluß auf andere Bereiche zu. Durch die Änderung einer Kenngröße – eines Parameters – kann berechenbares Verhalten in Chaos umschlagen. Wer etwa sein Auto zum erstenmal vorsichtig rückwärts aus der Garage fährt, weiß nichts darüber, wie es bei Tempo 130 auf ein Schlagloch in der Kurve reagiert.

Das Chaos, das aus der Ordnung geboren wird, hat Alfred Hübner schon Mitte

der achtziger Jahre fasziniert. Als frischgebackener Diplom-Physiker versuchte er Kollegen und Studenten der TU München für die subtilen Erscheinungen zu begeistern, die in scheinbar wohlverstandenen Experimenten oft nur als lästige Abweichung vom Idealzustand gelten. Was die Lehrbuchphysik bislang eher als „Dreckeffekte“ abgetan hatte, wurde im Lichte der Chaos-Forschung plötzlich zum zentralen Objekt wissenschaftlicher Neugier. Eigentlich „ausgelutschte“ Experimente aus dem Physikunterricht bekamen so einen neuen Reiz.

Da war etwa das ehrwürdige Kundtsche Rohr. Generationen von Schülern und Studenten hatten das einseitig geschlossene, waagrechte Glasrohr mit etwas Pulver aufgefüllt und am offenen Ende einen Ton eingekoppelt. Die Schallschwingungen graben

Ein einfaches Experiment enthüllt die Bildung baumartig verzweigter Strukturen: Auf dem Öl in einer Schale verteilen die Chaos-Forscher Stahlkügelchen (links oben), legen eine hohe elektrische Spannung an und unter einem Regen von Elektronen formen sich „Dendriten“



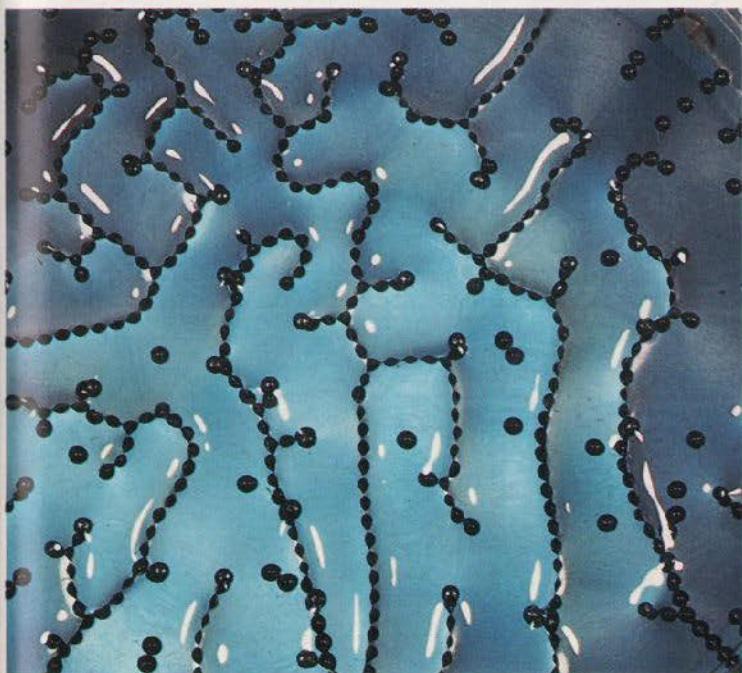
Alfred Hübner inmitten seiner Kollegen im »Café Chaos«

in das feine Pulver regelmäßige Muster, die Aufschluß über die Länge der Wellen geben. Als Hübner das Pulver durch Öl ersetzte, stand er plötzlich vor einer Fülle von Phänomenen. Erwartet hatte er, daß sich die Oberfläche des Öls rütteln würde. Doch nun sah er auch kleine Öltröpfchen, die auf der Oberfläche hin- und herzanzten, bevor sie von größeren Tröpfchen aufgesogen wurden oder in den Wellenkämmen verschwanden: Der Blick ins Ölbenetze Kundtsche Rohr eröffnete einen Blick in die Welt der Strukturbildung und des „deterministischen Chaos“ – zwei Forschungsthemen, die Hübner bis heute nicht losgelassen haben.

Der Physiker will sich allerdings nicht aufs Beobachten beschränken, sondern möchte an seinen Studienobjekten gezielt das Verhalten hervorrufen, das für ihn aufschlußreich ist. Eine übliche Methode war bisher, ein System irgendwie zu „stören“ und dann zu beobachten, wie es wieder in seinen natürlichen Zustand zurückkehrt.

Übertragen auf die Schaukel hieße dies, ihr erst einmal einen wuchtigen Tritt zu versetzen. Doch so radikale Untersuchungsmethoden nimmt nicht nur das auf der Schaukel sitzende Kind übel. Die Schaukel selbst vibriert und zerrt an ihren Lagern, statt brav die gesamte Energie des Stoßes in ihre typische Bewegung umzusetzen.

Jähe Energiezufuhr weckt allerlei verwirrende Reak-



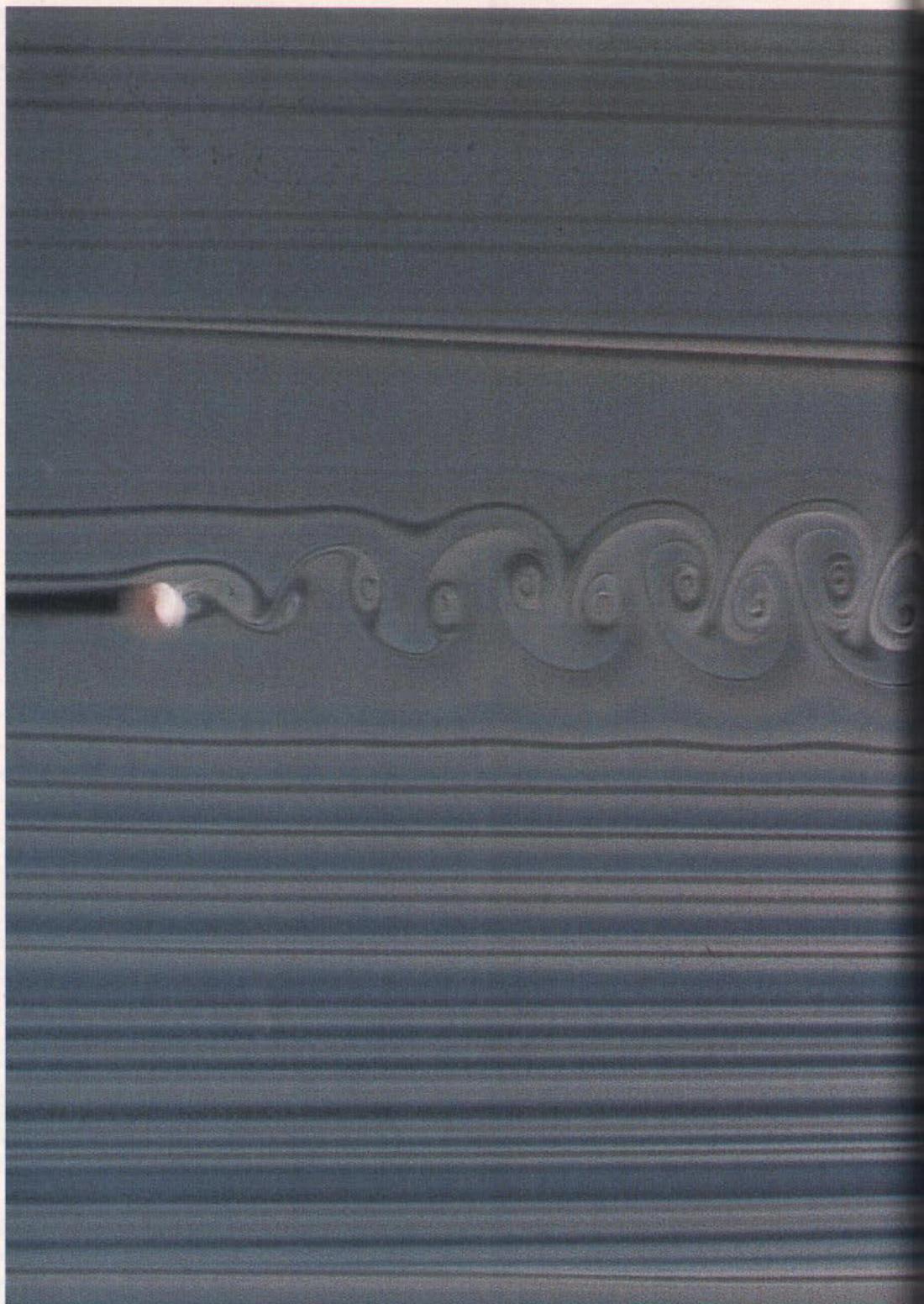
wärtslaufende Film zeigt, ist nichts anderes als die zeitlich gespiegelte Eigenbewegung der Schaukel – und darauf reagiert sie besonders sensibel.

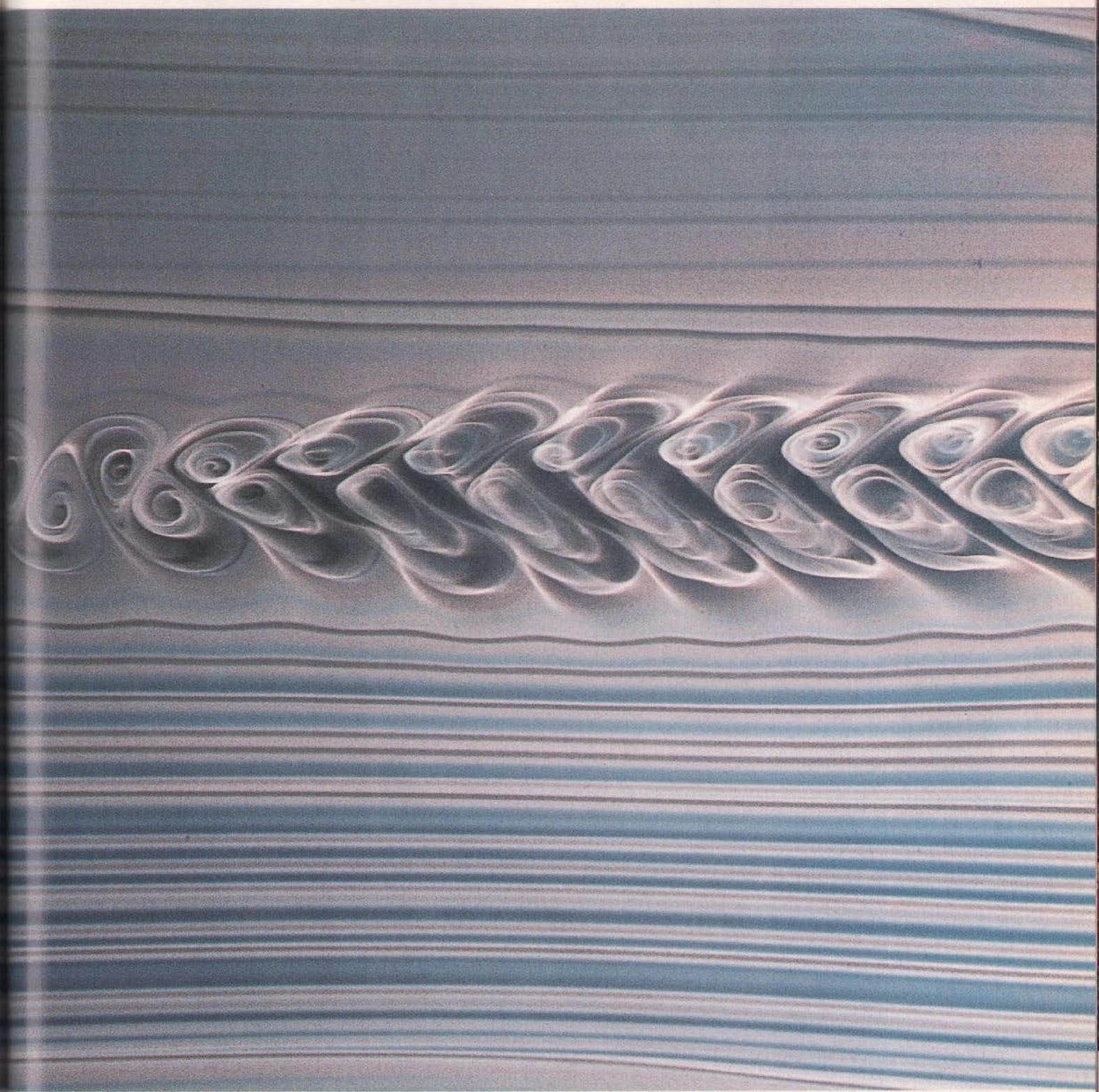
Jeder Körper spricht, das ist ein lange bekanntes Prinzip, auf die ihm eingeprägte Bewegung am leichtesten an. So schwingt eine Stimmgabel sofort mit, wenn „ihr“ Ton erklingt. Bei nichtlinearen Systemen sind diese Eigenbewegungen allerdings nicht einfache, periodische, sondern gewöhnlich recht komplizierte Schwingungen, weshalb sie sich nur sehr schwer mit erwünschter Präzision erzeugen lassen. Doch der Aufwand lohnt: Er liefert das Handwerkszeug, mit dem chaotische Systeme sehr gezielt und gleichzeitig schonend untersucht werden können.

Über Mittel und Wege, diese sensitive Analysemethode in den Griff zu bekommen, diskutieren Spezialisten in diesem Jahr auf mehreren Symposien und Konferenzen. Alfred Hübner will seine Ideen jedoch auch Laien vermitteln: Es ist kein Zufall, daß er auf Einladung des amerikanischen „School of Art and Design and Painting Program“ einen Vortrag über „Chaos und Katastrophen: Parallele Strukturen zwischen Wissenschaft und Kunst“ gehalten hat.

„In unserer Forschungsgruppe an der TU München“, erzählt er, „waren eigentlich immer auch Nicht-Physiker beschäftigt oder kamen einfach so vorbei, um über das Chaos zu diskutieren. Das hat sich als unheimlich befruchtend erwiesen.“ Die Münchner Chaos-Gruppe hat nicht nur im – von einer ehemaligen Mitarbeiterin eröffneten – Café „Chaos“ eine Heimstatt gefunden. Es ergab sich auch oft die Möglichkeit, wissenschaftliche Erkenntnisse darauf abzuklopfen, ob sie auf alltägliche Phänomene anwendbar sind. Und die Diskussionen mit Laien trugen gewiß mit dazu bei, daß die Experimente der Chaos-Gruppe durch ihre Einfachheit bestechen.

Um Strukturbildung zu studieren, reicht ein Schälchen mit Öl, in dem millimetergro-





**Wunderschöne
Wirbelzöpfe entstan-
den bei Versuchen mit
Rauch im Windka-
nal. Auslöser ist**

**ein in die gleich-
mäßige Strömung hin-
eingeschobener
zylindrischer Draht,
hinter dem eine
»Wirbelstraße« ent-
steht. In solchen
Experimenten gelang
Alfred Hübner und**

**seinen Kolle-
gen vom Max-Planck-
Institut für Strömungs-
forschung in Göt-
tingen ein erster Schritt
zur Steuerung
des Chaos**

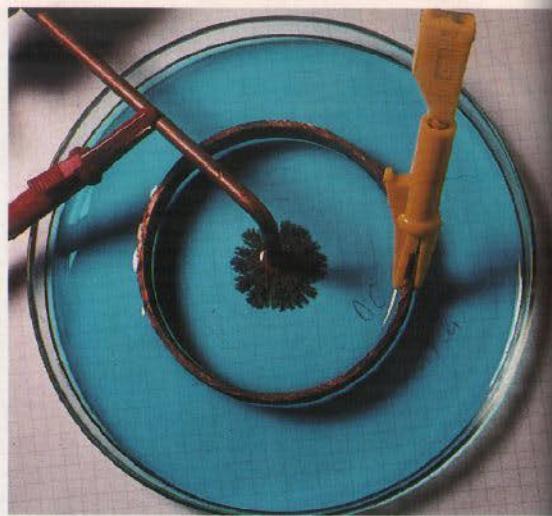
Bei Stahlkügelchen gleichmäßig verteilt werden. Unter dem Einfluß hoher elektrischer Spannung beginnen sich die stromdurchflossenen Kügelchen zu baumähnlichen Strukturen – „Dendriten“ – zu verzweigen. Das zweidimensionale Experiment zeigt besser als Versuche mit „echten“, etwa durch elektrolytische Abscheidungen an Elektroden entstehenden Dendriten, daß die scheinbar losen Strukturen unter dem Einfluß der Spannung recht stabile Gebilde sind: Jedes Kügelchen kehrt, nachdem es ein bißchen aus seiner Ideallage verschoben worden ist, sofort an seinen ursprünglichen Platz zurück (siehe Seite 146).

Am Beckman Institute in Urbana-Champaign hat Alfred Hübner jenen Versuch wiederaufgebaut, an dem der erste Schritt zur Steuerung des Chaos gelungen war: die Luftströmung im Windkanal. Aus den schwachen Turbulenzen hinter einem Draht konnte er mit Kollegen vom

Max-Planck-Institut für Strömungsforschung in Göttingen Gleichungen herleiten, mit denen die Geschwindigkeit der Luftströmung an einer Stelle der Wirbelstraße in Übereinstimmung mit dem Experiment berechnet werden konnte. Diese Arbeit eröffnet die Möglichkeit, Steuersignale zu berechnen, mit deren Hilfe beispielsweise die Wirbelstraße in einem an sich wohl chaotischen Bereich der Luftströmung beruhigt werden könnte. Derzeit scheitert ein solcher Versuch noch am damit verbundenen experimentellen Aufwand.

Die Idee der Steuerung chaotischer Systeme läßt sich allerdings auch an einem einfachen Laborexperiment demonstrieren: am tropfenden Wasserhahn. Wenn die ausfließende Wassermenge nicht ganz ausreicht, um einen gleichmäßigen Strahl zu bilden, tropft der Hahn normalerweise völlig chaotisch vor sich hin. Eine entsprechende mechanische Vibra-

Auch elektrolytische Experimente erzeugen schöne „dendritische“ Formen: Wenn Strom vom äußeren Kupferring zum Stab fließt, lagern sich dort Kupferlizen aus der blauen Lösung ab

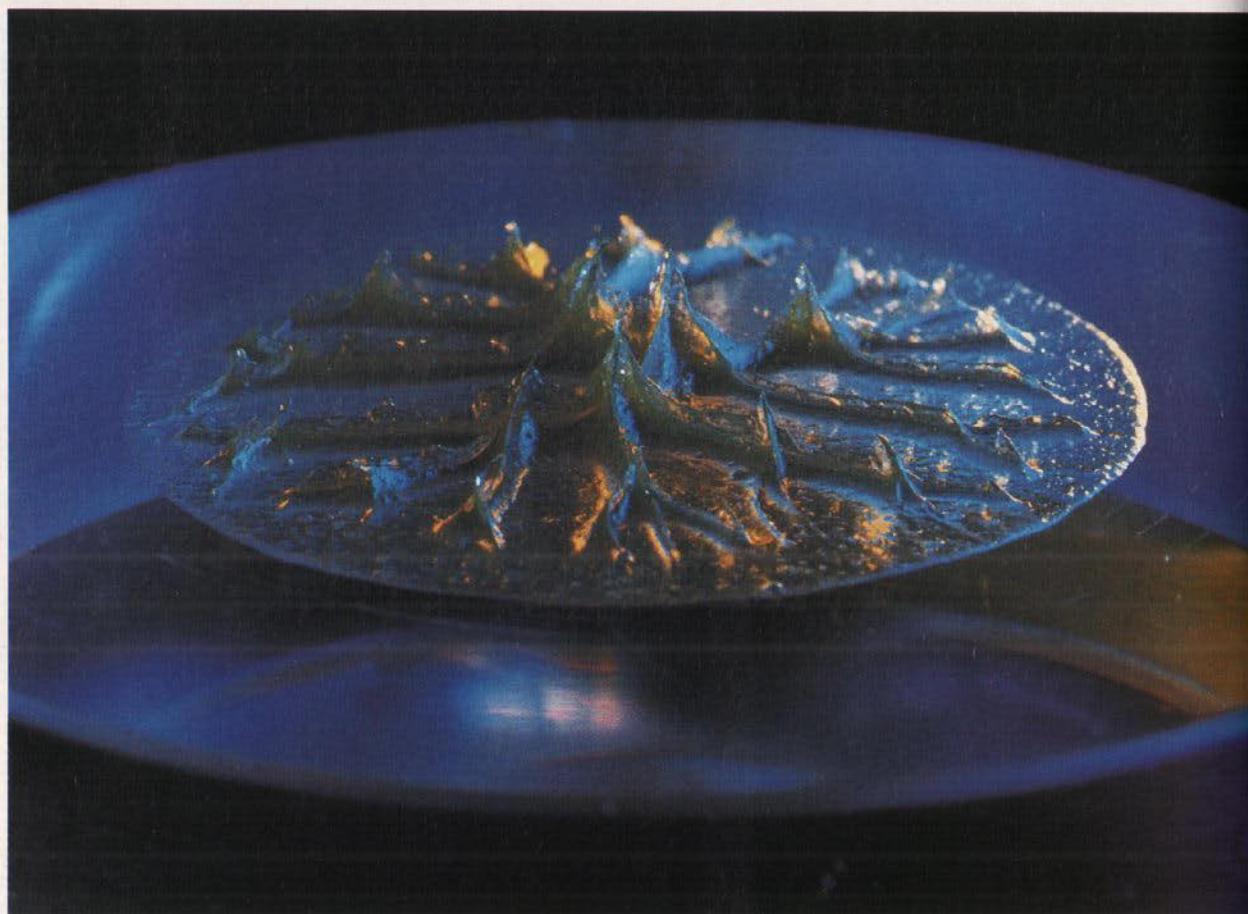


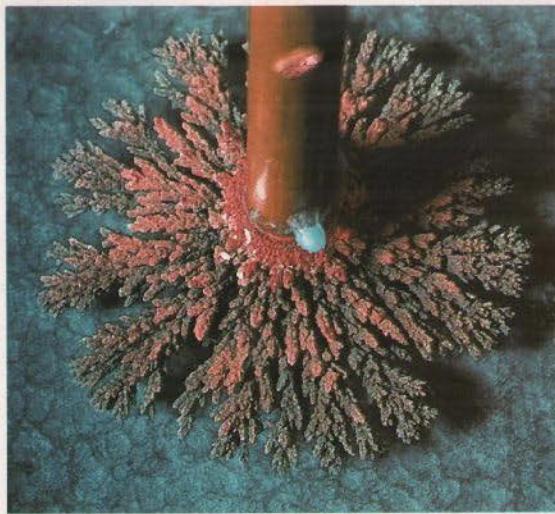
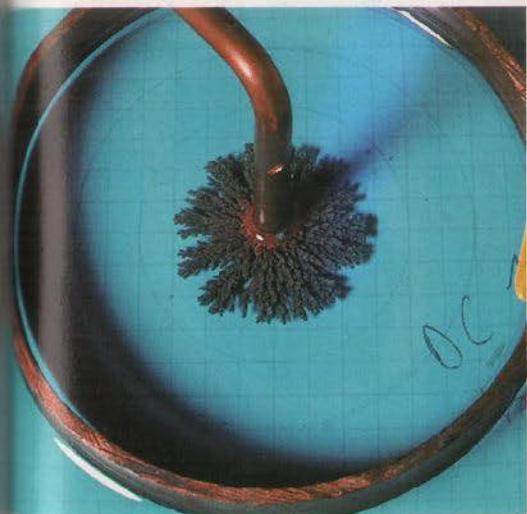
tion zwingt jedoch die Wassertropfen sofort in den Gleichtakt, so daß sie im Blitzlicht einer Stroboskoplampe wie auf einer Perlenschnur aufgereiht erscheinen.

Weniger Probleme als im echten Experiment macht die Steuerung chaotischer Vor-

gänge in der Computer-Simulation. Die Rechner leisten den Forschern unschätzbare Hilfe, weil sich mit ihnen jeder noch so komplizierte Bewegungsablauf synthetisieren und untersuchen läßt. Solche Versuche liefern dann das scheinbar paradoxe Resultat,

Versuche mit unterschiedlichsten Materialien enthüllen die universale Geltung fraktaler Gesetzmäßigkeiten – egal, ob zähflüssige Fette zwischen zwei Platten erst zusammengedrückt und dann auseinandergezogen werden (links) oder ob die Erosion im Laborgefäß vom Wasser ausgewaschene „Landschaften“ im Quarzsand hinterläßt, die großen Canyons frappierend ähneln





daß Systeme sich um so leichter steuern lassen, je chaotischer sie sind. Warum, ist leicht einzusehen: Steht die Schaukel gerade am Überschlagspunkt, so genügt schon ein Windhauch, um sie nach rechts oder links fallen zu lassen, während bei kleineren

Schaukelbewegungen auch eine stramme Bö die Bewegungsrichtung kaum umkehren kann.

Der Fußballer, der einen Ball ins Tor abfängt, ist ein lebendiges Beispiel für die sprichwörtliche kleine Ursache, die eine große Wirkung

nach sich zieht. Und chaotische Systeme sind gerade dadurch charakterisiert, daß sie andauernd durch solche kritischen Bereiche laufen, in denen eine winzige Steuerkraft dramatische Konsequenzen hat.

Die moderne Chaos-Theorie erklärt jedoch nicht nur,

daß gewisse Alltagserfahrungen bestimmten physikalischen Erkenntnissen entsprechen. „Es ist zwar sehr leicht“, warnt Hübler, „hochchaotische Systeme willkürlich zu beeinflussen, aber auch sehr gefährlich, weil man leicht über das Ziel hinausschießen kann. Ganz nah bei den Verzweigungspunkten, also da, wo ein System sich entweder in die eine oder in die andere Richtung entwickeln kann, sind die Systeme nicht mehr gedämpft. Das heißt, jeder äußere Einfluß kann sich ohne Abschwächung voll auswirken. Man muß mit der Steuerung einsetzen, bevor das System in diesen kritischen Bereich kommt. Aber auch nicht zu früh, weil sonst noch zu große Kräfte nötig sind.“

Wo der optimale Zeitpunkt für das Einsetzen der Steuerung liegt, sagt die Chaos-Theorie – wenigstens für Systeme, die Physiker im Labor untersuchen können. Wenn es dagegen um Wetter, Politik oder Börsenkurse geht, sind möglicherweise schon die Meßdaten nicht präzise genug, um einerseits die für Vorhersagen nötigen Modellgleichungen und andererseits Anfangsbedingungen zu liefern: Jede auf solchen Daten basierende Prognose wäre reine Glückssache.

Für Alfred Hübler ist das Anlaß genug, um vor Scharlatanen zu warnen. „Die Bestimmung des Systemverhaltens aus experimentellen Daten bei komplexen Systemen ist im wissenschaftlichen und technischen Bereich in der Zwischenzeit zum Standardwerkzeug geworden. Wendet man sie dagegen auf Systeme an, für die diese Analysemethode nicht paßt, kommt sie nur in Verruf.“

Unter Laborbedingungen sind Chaos und Steuerbarkeit keine unverträglichen Gegensätze mehr. Deterministisches Chaos ist beherrschbar – wenigstens, wenn Modellgleichungen und Anfangsbedingungen hinreichend genau bekannt sind. Im täglichen Leben dagegen wird die Intuition der Manager und Macher weiterhin gefragt bleiben.

Karlsruher Klotz



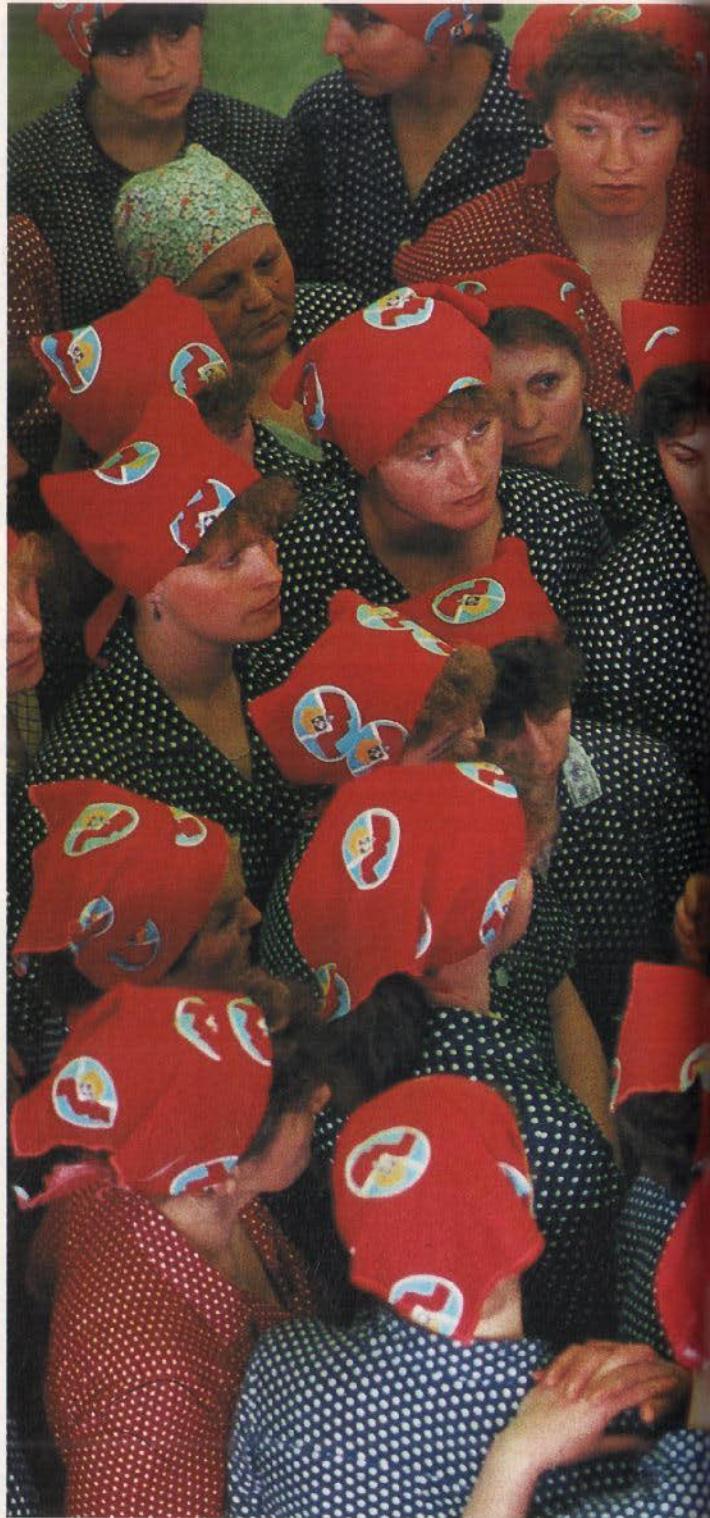
Am Anfang jedes Gemeinwesens steht der „Gesellschaftsvertrag“: der freie Entschluß vieler Menschen, sich zu einer Gemeinschaft gegenseitigen Nutzens zusammenzufinden. 1762, ein Vierteljahrhundert vor der Französischen Revolution, verkündete der Philosoph Jean-Jacques Rousseau diese Staatstheorie. Mit seinen englischen Vorfahren Thomas Hobbes und John Locke gehört Rousseau zu den geistigen Urvätern all jener, die glauben, daß Gesellschaften durch souveräne Beschlüsse begründet und gelenkt, aber auch zum Besseren verändert werden können.

Besonders Philosophen des 19. Jahrhunderts – unter ihnen bis heute besonders nachwirkend: Karl Marx – waren überzeugt, daß die Gesellschaft nur vernünftiger organisiert zu werden brauche, um das Glück aller Menschen auf Erden zu garantieren.

Für den Bielefelder Soziologen Niklas Luhmann sind solche Vorstellungen völlig naiv. Wer etwa durch eine neue Ethik oder politische Reformen die Probleme unserer Gesellschaft zu lösen versuche, möge besten Willens sein. Doch das ist auch das einzige Positive, das Luhmann den wohlmeinenden Gesellschaftsveränderern zubilligt. Denn der gute Wille reicht nicht, ja: Er führt in die Irre, wie der scharfsinnige Kontrahent des linken Sozialphilosophen Jürgen Habermas und Verfasser vieler Bücher argumentiert: „Systeme“ wie Staatsverwaltung, Wirtschaft oder Kirche, aber auch einzelne Menschen und andere Organismen entstehen und funktionieren nach schwer zu beeinflussenden internen Gesetzen, welche sie gegen geplante Veränderungen nahezu immun machen.

„Selbstorganisation“ heißt das Zauberwort, das Luhmann den gutwilligen Predigern entgegenhält: Systeme entwickeln, erhalten und verändern sich nicht durch ratio-

Das Gespräch der beiden sowjetischen Manager mit den uniformierten Arbeitern einer Textilfabrik in Minsk ist ein Versuch, im Rahmen der »Perestroika« die starre Kommandowirtschaft abzulösen. Für den Bielefelder Soziologen Niklas Luhmann ist die Vorstellung, ein so komplexes gesellschaftliches System wie Wirtschaft planen zu wollen, völlig naiv. Nach seiner Theorie organisieren sich soziale Systeme selber: Sie entwickeln, erhalten und verändern sich nicht durch Planung und Beschlüsse, sondern durch Evolution – und zwar jedes System nach seiner eigenen Gesetzlichkeit



Die unvernünftige



Gesellschaft

nale Planung und Beschlüsse, sondern durch Evolution – jedes System nach seiner eigenen Gesetzmäßigkeit, die es erst einmal zu verstehen gelte. Der Soziologe mokiert sich darüber, daß Kritiker oft diese so notwendige Analyse vergessen und aufs Geratewohl moralische oder sonstige Forderungen an die Gesellschaft stellen. „als ob sie kein System wäre“.

Wer hätte denn beispielsweise bei der Entstehung der Gesellschaft etwas planen und beschließen sollen? Luhmann macht immer wieder darauf aufmerksam, daß alle Theorien, die solche Ursprünge beschreiben wollen, scheitern müssen. Denn sie setzen etwas voraus, was es vor allem anderen zuerst einmal zu erklären gilt: daß Menschen sich versammeln und etwas beschließen – eine soziale Welt also.

„Gemeinsinn“ hält keine Gesellschaft zusammen

Die klassischen Theoretiker von Aristoteles bis Kant, von Plato bis Rousseau haben sich damit beholfen, daß sie von bestimmten Annahmen über die „Natur des Menschen“ ausgegangen sind. So glaubten sie, daß im Menschen ein Streben wirke, in Gemeinschaften leben zu wollen. Gesellschaftstheorie hatte dann zu erklären, wodurch ein gedeihliches Zusammenleben gestört wurde. Jean-Jacques Rousseau identifizierte beispielsweise das Eigentum und die Familie als Ursache allen Übels.

Solche Theorien haben, so Luhmann, eine Schwäche: Werde menschliche Gemeinschaft von etwas abgeleitet, das selbst nicht menschliche Gemeinschaft sei, etwa von einem „natürlichen Gemeinsinn“, dann werde die Gesellschaft mit dafür ungeeigneten Begriffen gedeutet.

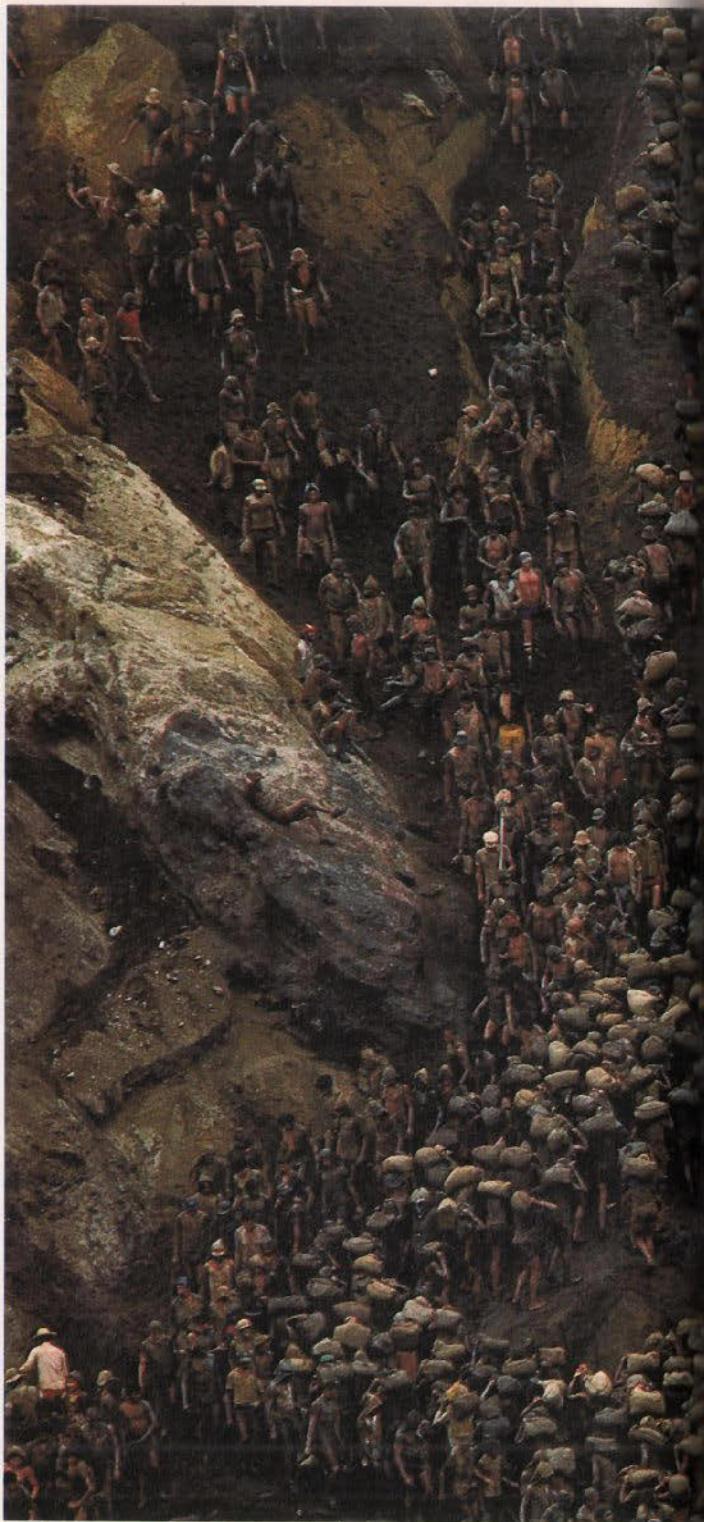
Jahrhundertelang verstanden Philosophen die Gesellschaft als eine Art „Organismus“: Sie war als Ganzes mehr als die Summe ihrer Teile, und jeder hatte seinen unverwechselbaren Platz in ihr.

So schön solche Theorien sind, sie haben in Luhmanns Augen den Nachteil, daß sie sich im Detail kaum sinnvoll entfalten lassen: Wo ist beispielsweise das „Ganze“ der Gesellschaft anschaulich, und wer sagt, wer wo seinen Platz in diesem Organismus hat?

Für Theoretiker der linken politischen Seite ist es ganz selbstverständlich, daß Gesellschaftstheorie den Sinn hat, Gerechtigkeit, Gleichheit und auch die Emanzipation des Individuums zu fördern. Luhmann steht solchen Ideen als Basis wissenschaftlicher Arbeit mit leichtem Erstaunen gegenüber. Erstens glaubt er, daß mit Hilfe einer solchen „alteuropäischen Gesellschaftsphilosophie“ das Zusammenleben der Menschen kaum wirklich zu begreifen ist. Zweitens kann er sich nicht vorstellen, daß etwa das Wirtschaftssystem durch eine „Ethik“ steuerbar sein soll, die seinen eigenen Gesetzen fremd ist. Denn „jedes System“, so lautet der Befund des Bielefelder Professors, „kann sich nur selbst steuern“. Mit seiner scheinbaren politischen Indifferenz röhrt Luhmann an Tabus. Wird ihm, wie von Rolf Dahrendorf, „verstiebler Zynismus“ vorgehalten, ist das noch eine der freundlicheren Reaktionen.

Luhmann seinerseits ist auch nicht zimperlich, wenn er sich darüber lustig macht, daß bei den Forschungen der meisten Soziologen so gar nichts Neues mehr herauskommt. Die Mehrzahl seiner Kollegen nage, so Luhmann, an den „alten Knochen der Klassiker“ oder aber produziere Daten, die „keinerlei theoriegeleitete Fragestellung erkennen lassen“. Als vorrangige Aufgabe der Soziologie sieht er die möglichst zutreffende Beschreibung sozialer Systeme, wie sie entstehen und funktionieren.

Um zu verstehen, wie Luhmann zu seinen Vorstellungen kommt, die dem Wunschedenken so vieler Menschenfreunde widersprechen, müssen zunächst seine zentralen Begriffe vorgestellt werden – Begriffe, die nicht zufällig jenen ähneln, mit denen Natur-



Goldgräber in der Sierra Pelada, Brasilien



Wo ist das 'Ganze'
der Gesellschaft anschaubar, und wer
sagt, wer wo seinen Platz im
Organismus hat?

wissenschaftler komplexe, dynamische Systeme beschreiben: Soziale Systeme entstehen, erhalten und verändern sich ähnlich wie biologische durch „Selbstorganisation“, durch – im Fachjargon der Systemtheoretiker – „Autopoiesis“. Jedes System läßt sich charakterisieren durch eine ganz spezielle „selbstreferentielle“ – sprich: rückgekoppelte – Grundoperation, durch die es seine vergänglichen Bestandteile und damit sich selbst reproduziert.

Ein U-Boot als moderne Version von Platons Höhle

Der Rückgriff auf die naturwissenschaftlichen Theorien komplexer Systeme ermöglicht Luhmann vor allem, eine allgemeine Theorie zur Selbstorganisation sozialer Systeme zu entwerfen. Wichtige Anregungen hat er von den chilenischen Biologen Francisco Varela und Humberto Maturana bekommen, deren Theorie zufolge Organismen sich „autopoietisch“ entwickeln: durch Reaktion auf interne Veränderungen, weitgehend abgeschottet von der Umwelt.

Zur Illustration dieses Gedankens erzählen die beiden Chilenen in ihrem Buch „Der Baum der Erkenntnis“ ein Gleichnis: Jemand beobachtet von einem Strand aus, wie sich ein U-Boot nähert und die zahlreichen Klippen äußerst geschickt umschifft. Der Steuermann, mit dem der Beobachter über Funk Kontakt aufnimmt, versteht gar nicht, warum dieser ihn so bewundert: Er habe von Klippen und Riffen noch nie etwas gesehen oder gehört. Statt dessen erzählt der Steuermann von den vielen Zeigern und Hebeln im U-Boot und davon, daß er die Zeiger durch Hebelbewegungen in bestimmten Stellungen zu halten habe.

Die Pointe der Geschichte ist klar: Das U-Boot enthält Meßinstrumente, die auf Klippen reagieren. Der Steuermann weiß davon aber nichts. Er weiß nur, in welchen Bereichen er die Zeiger halten soll. Diese Geschichte

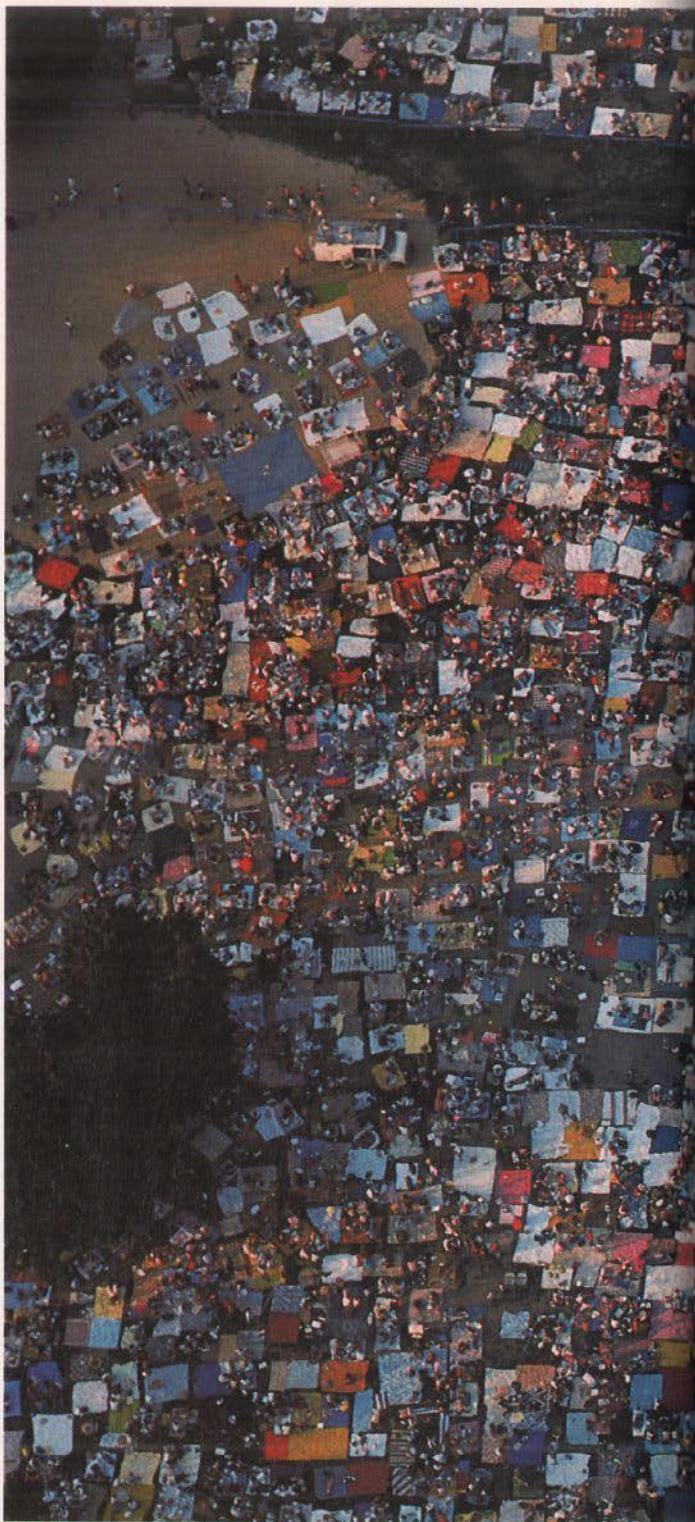
wirkt wie eine moderne Fassung von Platons Höhle-Gleichnis: Auch da erkennen die Menschen in der Höhle nicht die Wirklichkeit, sondern nur die Schatten, welche die Sonne auf die Rückwand der Höhle projiziert.

Luhmann glaubt, daß die Sozialwissenschaft Systeme nur dann adäquat betrachten kann, wenn sie die „Grenze“ zwischen System und Umwelt untersucht. Systeme leben – so Luhmann – keineswegs in unendlichem Austausch und in immer neuer kurzfristiger Anpassung an die Vielfalt ihrer Umgebung, sondern praktisch von ihr abgeschottet. Ihr Kontakt mit der Außenwelt beschränkt sich auf wenige, spezielle „Meßfühler“. Sie zeigen manche, vielleicht für das System wichtige Umweltveränderungen als „systeminterne Differenzen“ an, registrieren aber die meisten nicht.

Um die Dynamik eines Systems zu verstehen, ist es mithin nötig, die jeweiligen Meßfühler zu erkennen und zu begreifen: bei der Wirtschaft etwa die Preise. Mit deren Hilfe nimmt die Wirtschaft jedoch weniger die „tatsächliche“ Umwelt wahr, sondern konstruiert sich ihre eigene: den Markt.

Diese Betrachtungsweise bedeutet eine Kehrtwendung in der soziologischen Systemtheorie. Sie hatte anfänglich zum Beispiel eine Gruppe steinzeitlicher Sammler und Jäger wie eine Maschine beschrieben, die aus der Umwelt mit Energie und Rohstoffen versorgt wird und darauf reagiert. Von der Kybernetik inspirierte Soziologen entwarfen in den sechziger Jahren die Vorstellung, daß auch die zunehmende Vielschichtigkeit einer Gesellschaft – im Fachjargon: die Ausdifferenzierung eines Systems zu höherer Komplexität – eine Reaktion sei: eine Antwort auf die Komplexität der Umwelt. Demnach spezialisierten sich Mitglieder früher Gesellschaften immer stärker, um den komplexen Anforderungen des Überlebens besser genügen zu können.

Doch das simple Input-Output-Schema war, wie sich



Besucher eines Freiluft-Rockkonzerts im Central Park, New York



Soziale Systeme
erhalten und entwickeln sich in ihrer
Isolation, indem sie mit sich selbst
beschäftigt sind

baldest herausstellte, nicht in der Lage, die Eigenart sozialer Systeme zu erfassen. Denn diese reagieren ganz unterschiedlich auf Veränderungen der Umwelt, und meistens, so Luhmann, überhaupt nicht: Sie erhalten und entwickeln sich in ihrer Isolation, indem sie mit sich selbst beschäftigt sind. Um ein Bild ihrer eigenen Situation zu erhalten, beschreiben Systeme nicht die „wirkliche“ Umwelt, sondern sich selbst.

Der Markt ist beispielsweise die selbsterzeugte „innere Umwelt“ der Wirtschaft. Was nicht in der Sprache des Marktes und der Preise ausgedrückt ist, kann diese nicht wahrnehmen. Selbst wenn die handelnden Menschen privat viel umfassender nachdenken: „Ein System kann nicht sehen“, sagt Luhmann, „was es nicht sehen kann.“ Deshalb heißen solche Systeme „selbstreferentiell“: Sie koppeln sich von der Umwelt ab und beziehen sich auf sich selbst.

Komplexe soziale Systeme existieren nur im „Fließgleichgewicht“

Die Abschottung der Systeme von der Umwelt hält Luhmann für besonders wichtig: Sie ermöglicht die spezifische innere Dynamik, die Entwicklung und kreative Ausdifferenzierung eines Systems wie etwa der menschlichen Gesellschaft. „Evolutions-theoretisch gesehen wird man sogar sagen können, daß die sozio-kulturelle Evolution darauf beruht, daß die Gesellschaft nicht auf ihre Umwelt reagieren muß und daß sie uns anders gar nicht dorthin gebracht hätte, wo wir uns befinden. Die Landwirtschaft beginnt mit der Vernichtung von allem, was vorher da wuchs.“

Was eine Gruppe oder auch ein einzelner tut, ist nicht zwangsläufig eine vorhersehbare Reaktion auf die jeweilige Umwelt. Es kann etwas Neues sein und genau daran scheitern: „Man muß mindestens auch mit der Möglichkeit rechnen“, sagt Luhmann, „daß ein System so auf seine

Umwelt einwirkt, daß es später in dieser Umwelt nicht mehr existieren kann.“

Naturwissenschaftler haben in den letzten Jahrzehnten erkannt, daß komplexe dynamische Strukturen nur als „Fließgleichgewichte“ bestehen können: Stets müssen Energie und Materie von außen zufließen – bei Pflanzen etwa Sonnenlicht und Nährstoffe. Auch Luhmann betont, daß kein System ohne eine Umwelt existieren kann, von der es „gehalten“ wird. Oder, paradox formuliert: Abgeschottete Systeme sind offen. Allerdings determiniert die Umwelt nicht, was im System passiert – ebenfalls eine Erkenntnis aus den Naturwissenschaften. So „hält“ zwar die Sonnenenergie das Leben, doch die Evolution verläuft fast unvorhersehbar, durch Selbstorganisation nach systeminternen Regeln.

Alle komplexen dynamischen Systeme erhalten und entwickeln sich, wie Naturwissenschaftler in den letzten Jahrzehnten erkannt haben, durch „Rückkopplung“: Das Grundelement des Systems sorgt – da es selbst vergänglich ist – dafür, daß es selbst immer wieder neu entsteht. So gibt es Leben nur, weil Erbsubstanz neue Erbsubstanz erzeugt, die wieder neue Erbsubstanz hervorbringt.

Luhmann begreift auch soziale Systeme als kreative, sich unvorhersehbar entwickelnde Fließgleichgewichte. Sie sind stets in Gefahr zu zerfallen, wenn die Umwelt sie nicht mehr „hält“ oder die grundlegende Rückkopplung nicht mehr funktioniert. So bricht die Wirtschaft zusammen, wenn nicht ständig Zahlungen neue Zahlungen ermöglichen, die wiederum Zahlungen erlauben. Die „Zahlung“ entspricht in der Wirtschaft dem, was die Erbinformation für das Leben bedeutet. Und folglich ist die Erzeugung immer neuer Zahlungsmöglichkeiten für die Dynamik der Wirtschaft so wichtig wie die Erzeugung immer neuer Erbsubstanz für die Dynamik des Lebens.

Eine weitere Parallele zwischen biologischen und sozia-

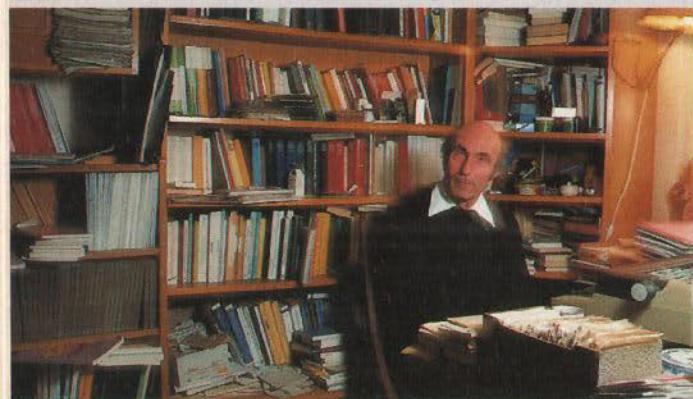


Neujahrsefeier 1990 auf dem Prager Wenzelsplatz



Was eine Gruppe
tut, ist nicht zwangsläufig eine
vorhersehbare Reaktion auf
die Umwelt

Niklas Luhmann: ein Reisender durch Zettelkästen auf dem Weg zu neuen Theorien



Der Bielefelder Soziologie-Professor verlor nach Kriegsende die Illusion, daß »gerechte« und »ungerechte« Gesellschaften unterschieden werden könnten

Niklas Luhmann ist selbst die beste Widerlegung seiner Theorien – jedenfalls was den Zynismus und die Kälte angeht, die ihnen nachgesagt werden: Er gehört zu jenen Professoren, deren ungewöhnliche Kompetenz bei den Studenten keine Angst auslöst, weil sie mit einer pädagogischen Liebenswürdigkeit verbunden ist, die dialogisches Lernen ermöglicht. Dabei ist Luhmann, Jahrgang 1927 und einer der Gründungsprofessoren der Universität Bielefeld, ein Gegner studentischer Mitbestimmung. Die Dinge, auf die es ankommt, lassen sich, sagt er, anders leichter lösen.

Ursprünglich war Luhmann Jurist. Als Anwalt fühlte er sich allerdings nicht wohl, weil er keine Lust hatte, „unmögliche Vorstellungen“ seiner Klienten vor Gericht durchzusetzen. Seine wissenschaftliche Laufbahn begann, als er in die USA ging und bei Talcott Parsons an der Harvard University studierte. Von ihm übernahm er wesentliche Einsichten der gesellschaftlichen Systemtheorie, wobei er deren Elemente sogleich modifizierte. Niklas Luhmanns große Begabung wurde danach in Münster von dem Soziologen Helmut Schelsky entdeckt. Er half mit, daß der Nebeneinsteiger im Ei-

verfahren in Soziologie promovieren und sich habilitieren konnte.

Luhmann gilt als der große Geigenspieler von Jürgen Habermas und der Frankfurter Schule. Dabei hat er Theodor Adorno zeitweilig in Frankfurt vertreten, und es wird gesagt, daß er mit Habermas befreundet sei. Er hält jedoch den theoretischen Ansatz der Neomarxisten für unzureichend. Das hat ihm zeitweilig den Ruf eingetragen, Ideologe der Konservativen zu sein. „Die Konservativen“, hält Luhmann dagegen, „beschäftigen sich mit meinen Theorien ohnehin nicht.“

Verblüffend ist die Themenvielfalt von Luhmanns Veröffentlichungen: Religion und Wirtschaft, Ökologie, Liebe und – in seinem neuesten Buch – „Reden und Schweigen“. Dafür hat er nicht nur Kritik einstecken müssen: Er ist Ehrendoktor der belgischen Universität Gent und Mitglied der Rheinisch-Westfälischen Akademie der Wissenschaften.

Berühmt sind seine Zettelkästen, an denen er mehr arbeitet als an seinen Publikationen – und Luhmann arbeitet stets an mehreren Büchern gleichzeitig. So kamen über die Jahre einige Titel zusammen, zum Beispiel „Funktion der Religion“, „Soziale Systeme“, „Ökologische Kommunikation“ und „Die Wirtschaft der Gesellschaft“.

In seinem Reihenhaus in Oerlinghausen, wo der Witwer zurückgezogen lebt, verbringt er keinen Tag, ohne etwas zu schreiben. Dabei hilft ihm das auf Zetteln gespeicherte Wissen – ein Netzwerk von Daten. Ihnen hat er keine vorher geplante Systematik übergestülpt; vielmehr vergibt er für jedes Thema Nummern und Buchstaben, die sich beliebig ergänzen lassen. Eine Fülle von Querverweisen animiert den Soziologen zu Reisen durchs Archiv, die ihn selbst verblüffen: Niklas Luhmanns Zettelkästen sind, so gesehen, auch ein Beispiel für Selbstorganisation.

len Systemen sieht der Bielefelder Professor in der Fähigkeit, immer differenziertere Strukturen zu bilden – die ungeheure Vielfalt des Lebens wie der menschlichen Gesellschaft. Ein dynamisches System kann sich arbeitsteilig in Subsysteme aufspalten und so immer effektiver und flexibler auf seine systemeigene Umwelt – also auf sich selbst – reagieren. So differenziert etwa unsere Gesellschaft auch sein mag: Ihre Teile können als Systeme im System nur ihre jeweils eigene Umwelt über ihre spezifischen Meßfühler wahrnehmen.

Im U-Boot zum Beispiel gibt es Echolot und Radar, Kompaß und Funkgerät. An all diesen Apparaten sitzen Spezialisten, die nur gelernt haben, ihr Gerät zu bedienen. Sie nehmen nur wahr, was ihr Gerät anzeigt – wobei sie noch nicht einmal wissen, was die Anzeige „wirklich“ bedeutet. Trotzdem gelangt das Boot heil durch die Klippen. So ähnlich, meint Luhmann, funktioniert auch die Gesellschaft: Da gibt es Verwaltungen und politische Einrichtungen, Wirtschaft und Wissenschaft, Religion und Medizin und alle möglichen sonstigen Institutionen.

Alle diese Subsysteme reagieren immer nur auf das, wofür sie da sind. Sie können nicht auf das reagieren, was in ihnen selbst nicht vorkommt. Denn alles, was ein System tut, dient – wenn es nicht sich selbst zerstören soll – der Erhaltung seiner charakteristischen Rückkopplung. So kann die Wirtschaft als solche nichts anderes tun, als immer wieder neue Zahlungsmöglichkeiten zu schaffen. Dadurch unterscheidet sie sich ja von allen anderen Bereichen der Gesellschaft. Ihre „Meßfühler“ – die Preise – sind diesem Zwang angepaßt und können nicht durch andere er-

setzt werden, die etwa ökologische Signale übermitteln.

Die wirkliche Umwelt eines Systems ist, so argumentiert Luhmann, stets komplexer als ihre Repräsentation im System. Die Meßfühler und die „interne Umwelt“, die das System zur Selbstbeschreibung benutzt, sind an dieser Komplexität gemessen primitiv. Das hat Vorteile: Die Vereinfachung ermöglicht es, überhaupt auf die Umwelt zu antworten. Und Nachteile: Systeme sind blind für Ziele anderer Systeme, also auch für übergeordnete Ziele.

Je feiner sich die Gesellschaft also durch Selbstorganisation differenziert, je stärker sie sich in Subsysteme aufspaltet, desto flexibler und effektiver kann sie auf viele Probleme reagieren. Aber gleichzeitig wird sie – so Luh-

mann – auch immer schwerer lenkbar.

Ein aktuelles Beispiel: In unserer Gesellschaft sind viele Menschen dafür, die Umwelt besser zu schützen. Doch der gute Wille ist sehr schwer in die Tat umzusetzen: Ein Jurist darf in seiner täglichen Arbeit nichts anderes tun, als Umweltschäden nach der gesetzlich definierten „Zurechenbarkeit“ zu bewerten; ein Wirtschaftler ignoriert sie, solange sie seine Bilanzen nicht beeinflussen; ein Arzt erkennt Umweltschäden an dem Gesundheitszustand seiner Patienten; ein Chemiker sieht erst da Probleme, wo bestimmte Grenzwerte überschritten werden.

Jeder hat also, selbst wenn ihm der Schutz der Natur privat am Herzen liegt, im öffentlichen Handeln seinen

„blind Fleck“, jeder trifft andere Unterscheidungen, jeder muß andere Rücksichten nehmen. Jeder Mensch ist auch selbst ein „psychisches System“, das auf seine eigene Weise die Welt deutet. Niemand hat den totalen Überblick. Und selbst wenn: Es gibt keine Möglichkeit, der Gesellschaft als Ganzer Vernunft, Moral oder auch nur ökologisches Bewußtsein beizubringen. Es gibt, mit anderen Worten, keine Erlösung durch Ethik.

Politiker können zwar versuchen, ökologische Moral zu verwirklichen, indem sie die einzige Sprache sprechen, welche die Wirtschaft versteht – ökonomische Maßnahmen. Aber die Wahrscheinlichkeit ist groß, daß ihr dies nicht immer gelingt. Denn zum einen spielt die Wirt-

schaft als einer der mächtigsten „Umweltfaktoren“ der Politik eine entscheidende Rolle. Zum andern lassen sich ökologische Vorstellungen oft nur sehr schwer oder überhaupt nicht in fiskalische oder juristische Maßnahmen umsetzen. Wenn jedoch Politiker es trotz aller Hindernisse gelegentlich schaffen und in Sachen Umwelt etwas in Gang setzen, können sie sich leicht irren – und das Gegenteil des erwünschten Effektes bewirken. Das gilt, sagt Luhmann, auch für ähnliche gutgemeinte Vorhaben: „Verwerfliches Handeln kann willkommene Auswirkungen haben, aber ebenso können auch die besten Absichten zu schlimmen Folgen führen.“

Selbst in der beliebten Suche nach dem Schuldigen – etwa bei ökologischen Sünden – sieht der Wissenschaftler nur eine Übung, mit der die Gesellschaft sich ihre Unfähigkeit, nach ethischen Prinzipien zu handeln, verleugnen kann: Der Schuldige ist der, „den man greifen kann“.

Die Jagd nach dem Sündenbock nutzt im Endeffekt wenig. „Die Gesellschaft ist schuld“, spottet der Mann, dem seine Kritiker Zynismus unterstellen. „Und das wissen wir sowieso.“

Niklas Luhmanns Theorie zeichnet eine Gesellschaft „ohne Subjekt, ohne Vernunft“, wie ein Rezentsent scharfsichtig bemerkte. Der Bielefelder Soziologe drückt seine Überzeugung, daß ein öffentlicher, vernünftiger Diskurs die Gesellschaft nicht voranbringen könne, drastischer aus: „Es gibt nur Ratten im Labyrinth, die einander beobachten und eben deshalb wohl zu Systemstrukturen, nie aber zu Konsens kommen können. Es gibt kein labyrinthfreies, kein kontextfreies Beobachten. Und selbstverständlich ist auch eine Theorie, die dies beschreibt, eine Rattentheorie.“ □



Geplante und ungeplante Stadtviertel von Nouakchott, der Hauptstadt Mauretanien

**Auch die besten
Absichten können zu schlimmen
Folgen führen**

Der freie Journalist Dr. Stephan Wehowsky, 39, aus München ist schon lange von den heftigen Reaktionen fasziniert, die der privat so liebenswürdige Soziologe Niklas Luhmann bei Fachkollegen und in der Öffentlichkeit auslöst.

K

VON CHRISTOPHER SCHRADER

Krieg: Nichts scheint ein besseres Beispiel für Chaos zu sein: Im Krieg werden Menschen getötet, Städte verwüstet, Familien auseinandergerissen, gesellschaftliche Strukturen zerstört.

Solche Verheerungen kommen gewöhnlich nicht aus heiterem Himmel. 26mal schlügen sich militärische Großmächte in der Zeit von 1816 bis 1965 – und 23mal ging den Waffengängen ein Rüstungswettkampf voraus. „Willst du Frieden“, sagten die alten Römer, „dann rüste für den Krieg.“ Doch die politische Weisheit des „Si vis pacem, para bellum“ scheint überholt zu sein. Das legen auch aktuelle Computer-Simulationen nahe, bei denen Rüstungswettkämpfe im Chaos endeten.

Das Ergebnis eines Versuchs, Rüstungswettkämpfe im Rechner nachzustellen, veröffentlichte der amerikanische Physiker Alvin Saperstein 1984. Um das komplexe Geschehen in einem mathematischen Modell fassen zu können, mußte der Forscher von der Wayne State University in Detroit versuchen, es auf das Wesentliche zu reduzieren: Er betrachtete als einzige Größen die Rüstungsausgaben der Länder und setzte voraus, daß sie jeweils als Reaktion auf die Aufwendungen des Gegners stiegen oder sanken. Angst vor der Wirtschaftsmacht des anderen – vor dem Reichtum, der sich im Prinzip in zusätzliche Rüstung umsetzen ließe – schlägt sich als „Nichtlinearität“ in den Gleichungen nieder.

Das Wettrüsten im Computer nimmt seinen Lauf, wenn „Land A“ viel Geld in die Rüstung steckt und sich „Land B“ bedroht fühlt. „B“ zieht im nächsten Jahr nach und erhöht seinen Militäretat ebenfalls – wie stark, darüber entschei-

Rüsten bis das Chaos herrscht

den in der Realität seine Politiker. Ihr Wirken faßte Saperstein pro Land in einem Zahlenfaktor zusammen, welcher die Angst vor dem Gegner symbolisiert: Je größer ein solcher Parameter, desto stärker die Reaktion auf die Neubewaffnung des Kontrahenten.

Spätestens an diesem Punkt des Spiels mit dem Ernstfall muß Kritik ansetzen: Menschliches Verhalten darf nicht derart reduziert werden. Saperstein selbst schreibt: „Dieses grobe Modell ist keine glaubwürdige Darstellung des Weltgeschehens.“ Doch die Ergebnisse seiner Rechnung sind interessant genug, um die Bedenken zunächst zurückzustellen.

Eigentlich müßten nach Sapersteins einfachem Modell Politiker die Reaktion des jeweiligen Gegners immer gut einschätzen können. Doch als der Forscher den Furcht-Parameter beider Länder fast bis zum Maximalwert erhöhte, vollführten die Rüstungsausgaben plötzlich wilde Sprünge. Minimale Fehler bei der Beurteilung des Gegenspielers machten dessen Reaktion unvorhersagbar. Selbst das eigene Verhalten entzog sich der Planung, weil es ja von den Ausgaben des Gegners abhängt. Das „deterministische Chaos“ war ausgebrochen. Und mit ihm, schloß Saperstein, auch der Krieg.

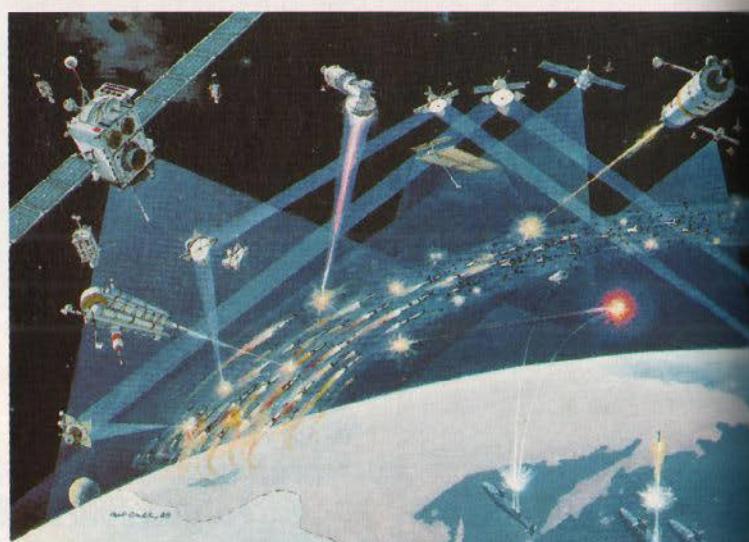
Sapersteins Kritiker halten jedoch die Formel Chaos = Krieg für zu simpel. Allerdings ist Unberechenbarkeit

des Gegners auch im wirklichen Leben sehr gefährlich. Ein weiterer Einwand: Wettrüsten ja oder nein ist nicht nur eine Frage des Geldes. Innenpolitische Faktoren waren bei Alvin Sapersteins Computerspielen belanglos – im wirklichen Leben könnte Aufrüstung Ausdruck von Nationalstolz sein, Abrüstung auf eine pazifistische Strömung in der Gesellschaft zurückgehen.

Wie bei jeder Modellrechnung steht und fällt die Aussagekraft auch beim simulierten Wettrüsten mit der sorgfältigen Auswahl der wichtigsten Größen, die in das Modell als Zahlenfaktoren eingehen. Denn Rückschlüsse auf die

Realität sind nicht allein schon deshalb erlaubt, weil ein Computer benutzt wurde.

Eine genauere Abbildung der Wirklichkeit ist nur mit komplexeren Modellen möglich, die etwa die Art der Bewaffnung berücksichtigen. Deshalb hat sich Saperstein mit Gottfried Mayer-Kress zusammengetan, einem deutschen Physiker, der an der University of California in Santa Cruz lehrt und in Los Alamos sowie am Santa Fe Institute in New Mexico forscht (siehe auch Seite 177). Das deutsch-amerikanische Team wollte mit neuen Simulationen Antworten auf strategische Fragen finden, die mit der Planung des Weltraum-Abwehrsystems SDI aufkamen: Wird es ein Ende des Wettrüstens geben, wenn Laserwaffen feindliche Atomraketen zerstören können? Werden die Zahlen stationierter Raketen zurückgehen? Oder kommt es zu einem zusätzlichen Wettkampf bei den Raketenabwehrsystemen und den Anti-Satelliten-Waffen, mit denen die Raketenabwehrsysteme rechtzeitig unschädlich gemacht werden sollen?



Gewimmel am Himmel: Das Schaubild vom »Krieg der Sterne« gaukelt

Beide Länder sind – davon geht das Modell aus – im Grunde friedlich, aber mißtrauisch. Denn beide befürchten einen vernichtenden Erstschlag des Gegners, legen sich also eine Raketen-Abwehr à la SDI zu. Und beide wollen sich die Möglichkeit eines Vergeltungsschlags offenhalten, brauchen also Raketen und Anti-Satelliten-Waffen. Andere Atomwaffenträger wie U-Boote und Langstrecken-Bomber wurden von den beiden Physikern – wie auch in der öffentlichen Diskussion um SDI – allerdings nicht berücksichtigt.

Zu Beginn der Simulation haben beide Länder nur Raketen. Den Ablauf des Wettrüsts beschreiben Parameter im Rechner: für den Rüstungsetat und für das Stationierungstempo der drei Waffengattungen Raketenabwehrsysteme, Anti-Satelliten-Waffen und Raketen. Auch unterschiedliche Entscheidungen der „Politiker“ sind möglich. Sie werden durch zufällige Schwankungen der Stationierungs-Geschwindigkeiten simuliert. Damit konnten Mayer-Kress und Saper-

stein untersuchen, wie sensibel die jeweilige Zahl der Waffen von Veränderungen der Parameter abhängt.

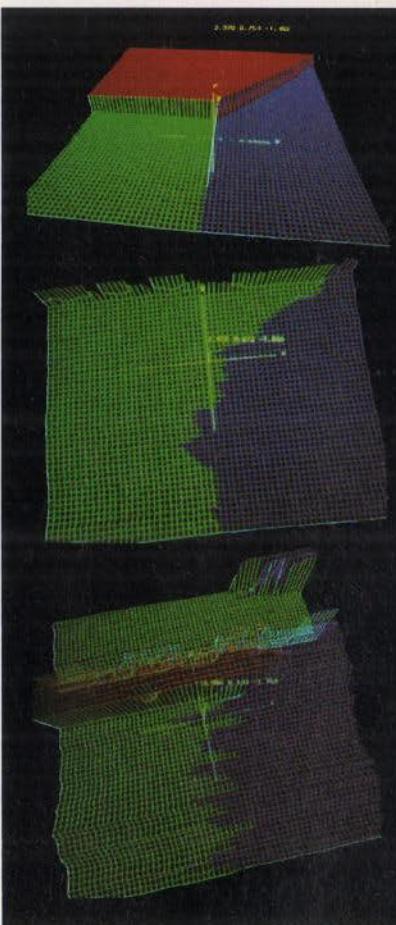
Nachdem die Forscher zehn verschiedene strategische Entwicklungen entworfen und jedes dieser Szenarien in 100 000 Varianten simuliert hatten, kamen sie zu dem Ergebnis: In neun von zehn Fällen löste ein Wettlauf bei allen drei Waffensystemen das Wettrüsten mit Raketen ab – eine gefährliche und teure Entwicklung.

Ein Raketen-Abbau war nur möglich, wenn die Forscher eine anfangs sehr schnelle Installierung aller SDI-Waffen annahmen. Aber gerade in diesem Fall trat Chaos auf: Weil die „politischen Entscheidungen“ zufällig schwankten, kam es in Einzelfällen zu großen Abweichungen der Waffenzahlen vom Durchschnitt aller Rechnungen. Übertragen auf ein wirkliches Wettrüsten hieße das, daß sich ein Land innerhalb weniger Jahre im Besitz einer erdrückenden Übermacht befinden könnte. Es gibt wohl niemanden, der ausprobieren will, was ein

solches Land in einer politischen Krise macht.

Die Realität ist weit komplexer als jedes Modell. Irrationales Verhalten oder Bluffs wirklicher Menschen werden sich wohl niemals mit Zahlen beschreiben lassen. Aber wenn schon die bisherigen einfachen Modelle unter bestimmten Bedingungen unvorhersehbares Verhalten zeigen, würde Chaos im wirklichen Leben vielleicht noch früher eintreten: Die simulierten Politiker verfügen stets über zutreffende und vollständige Informationen. Das wünschen sich die meisten wirklichen Politiker vergebens.

Zunehmend zerknitterte Gitternetz-Landschaften machen auf dem Monitor die Instabilität des Wettrüstens in einem Modell von Gottfried Mayer-Kress sichtbar



Ursache für Chaos in den Modellen ist ihr gemeinsamer Grundgedanke: Wettrüsten ist – wenn überhaupt – mathematisch nur mit gekoppelten nichtlinearen Gleichungen zu fassen. Aber auch die Abläufe der realen Sicherheitspolitik sind nichtlinear. Das Forschungsprojekt „Stabilitätsorientierte Sicherheitspolitik“ der Max-Planck-Gesellschaft ging von der Prämisse aus, daß die internationalen Beziehungen durch kleine Auslöser vom Frieden in den Krieg umkippen könnten. Das 1983 entwickelte Konzept der „Strukturellen Nichtangriffsfähigkeit“ sieht vor, die Armeen mit Waffen auszurüsten, die nur zur Verteidigung taugen. Durch kleine Schritte der Umrüstung würde das Gefüge der Militärblöcke krisenstabil.

Zwar erlauben Computermodelle keine wirklichen Vorhersagen: „Es sind Denk-

instrumente, keine Rechenmodelle“, sagt Albrecht von Müller, der am Max-Planck-Projekt maßgeblich beteiligt war. Aber mit ihnen können Wissenschaftler den Politikern die Dynamik des Wettrüstens veranschaulichen. Die Politiker brauchen bloß zuzuhören. Allerdings hat der Sozialwissenschaftler Karl Deutsch einmal bemerkt: „Ein Politiker hat dasselbe Verhältnis zu einem Sozialwissenschaftler wie ein Betrunkener zu einer Laterne: Er sucht Unterstützung – nicht Erleuchtung.“ □



Sicherheit vor, die das US-Abwehrsystem SDI nicht bieten kann

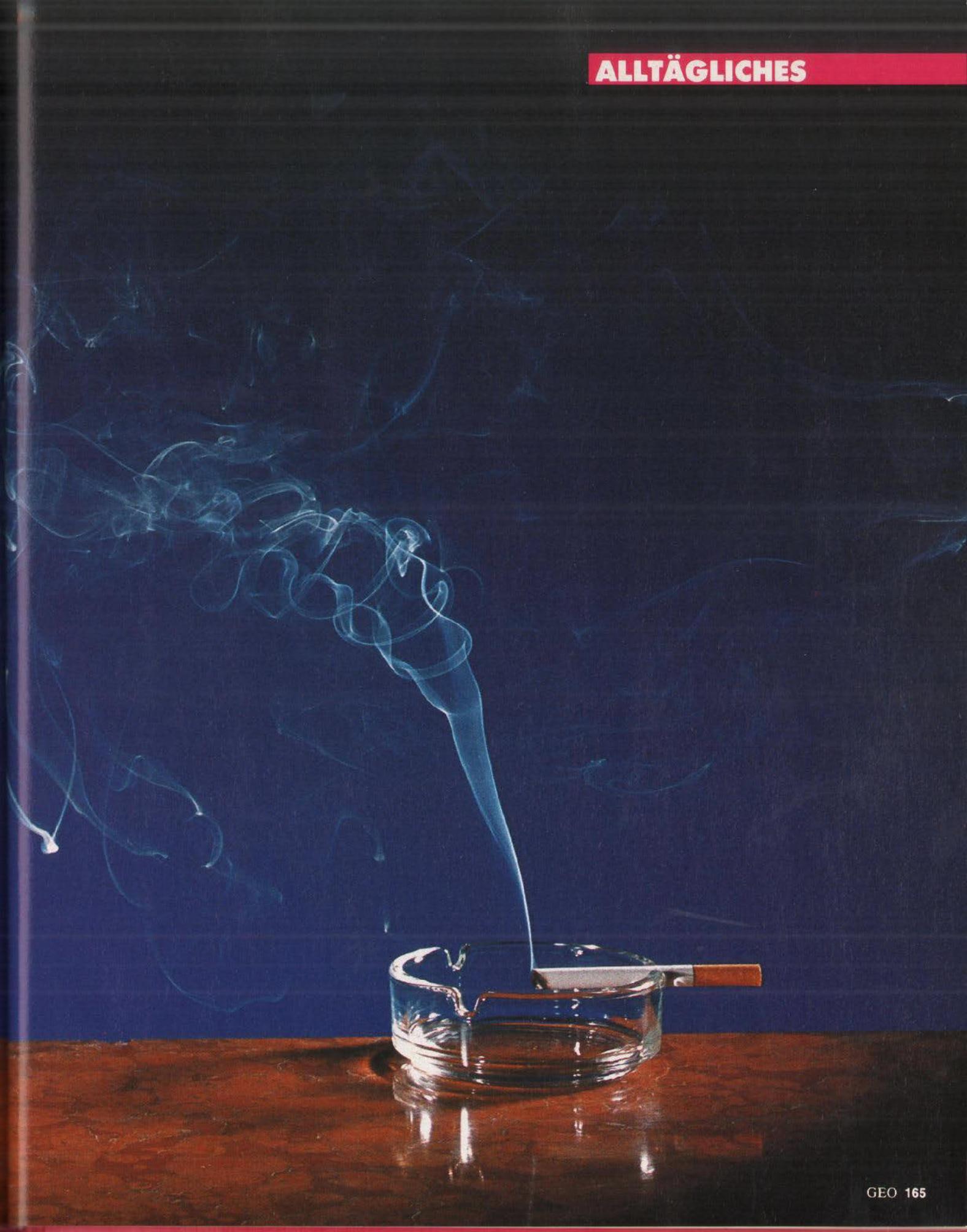
Der Hamburger Diplom-Physiker und Student der Henri-Nannen-Schule Christopher Schrader, 27, schrieb diesen Bericht während seiner Hospitanz in der GEO-Wissen-Redaktion

Schon simpler Rauch symbolisiert manch Sinnigem die Welt: Das Unterste steigt zuoberst, ein Gaukelspiel von Gestalten nährt sich von vergänglicher Glut, zerflattert wieder – unvorhersagbar. Die Wissenschaft schickt sich an, die Gesetze im Chaos zu entdecken. Und wer mag, kann diese Gesetze überall am Werke sehen: in Wolken und im Wasserwirbel am Ausfluß der Badewanne, im marmorierten Kuchenteig und im mäandernden Fluß, in Bäumen, Broccoli und Blitzen

C haos regiert die Welt



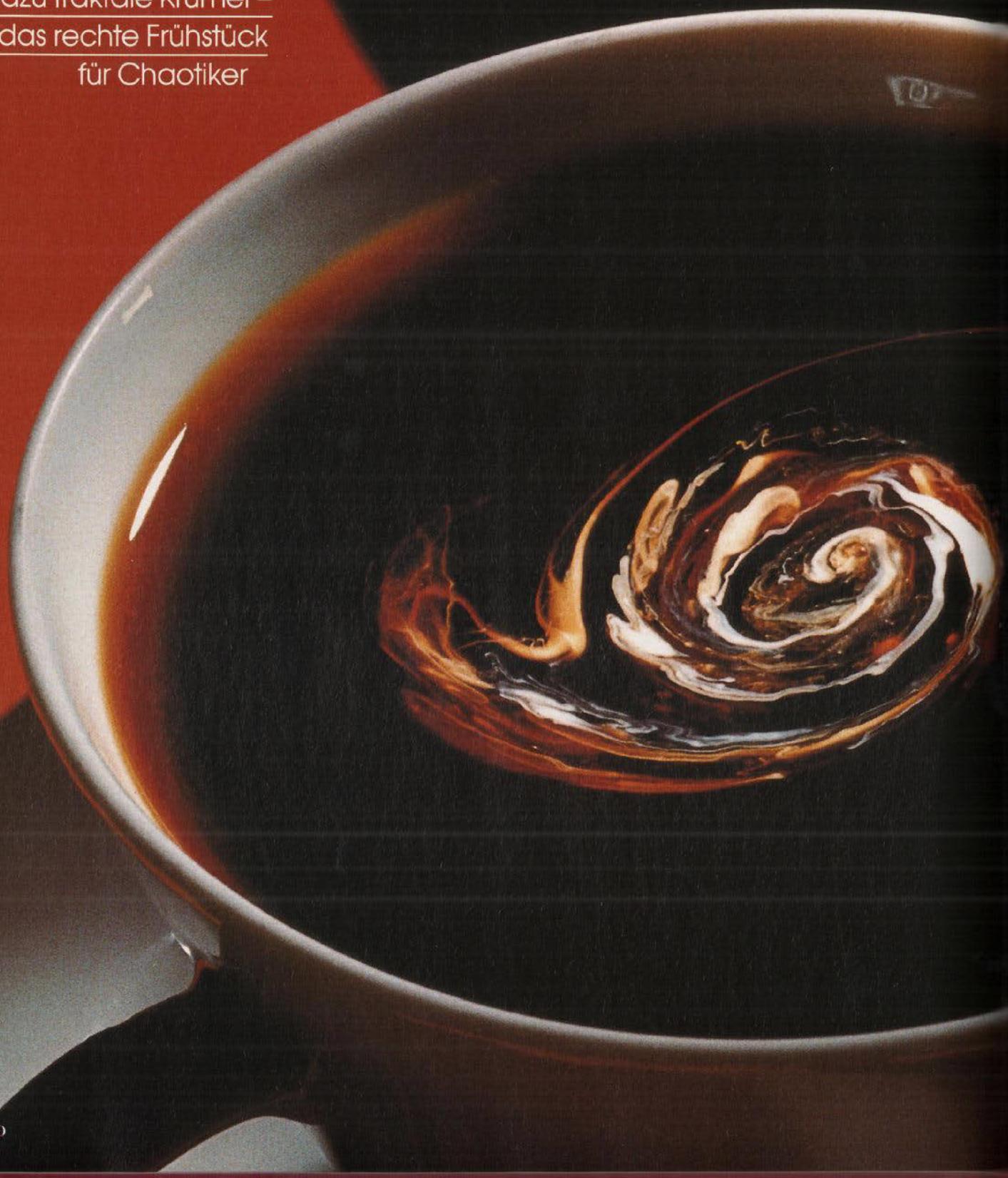
ALLTÄGLICHES

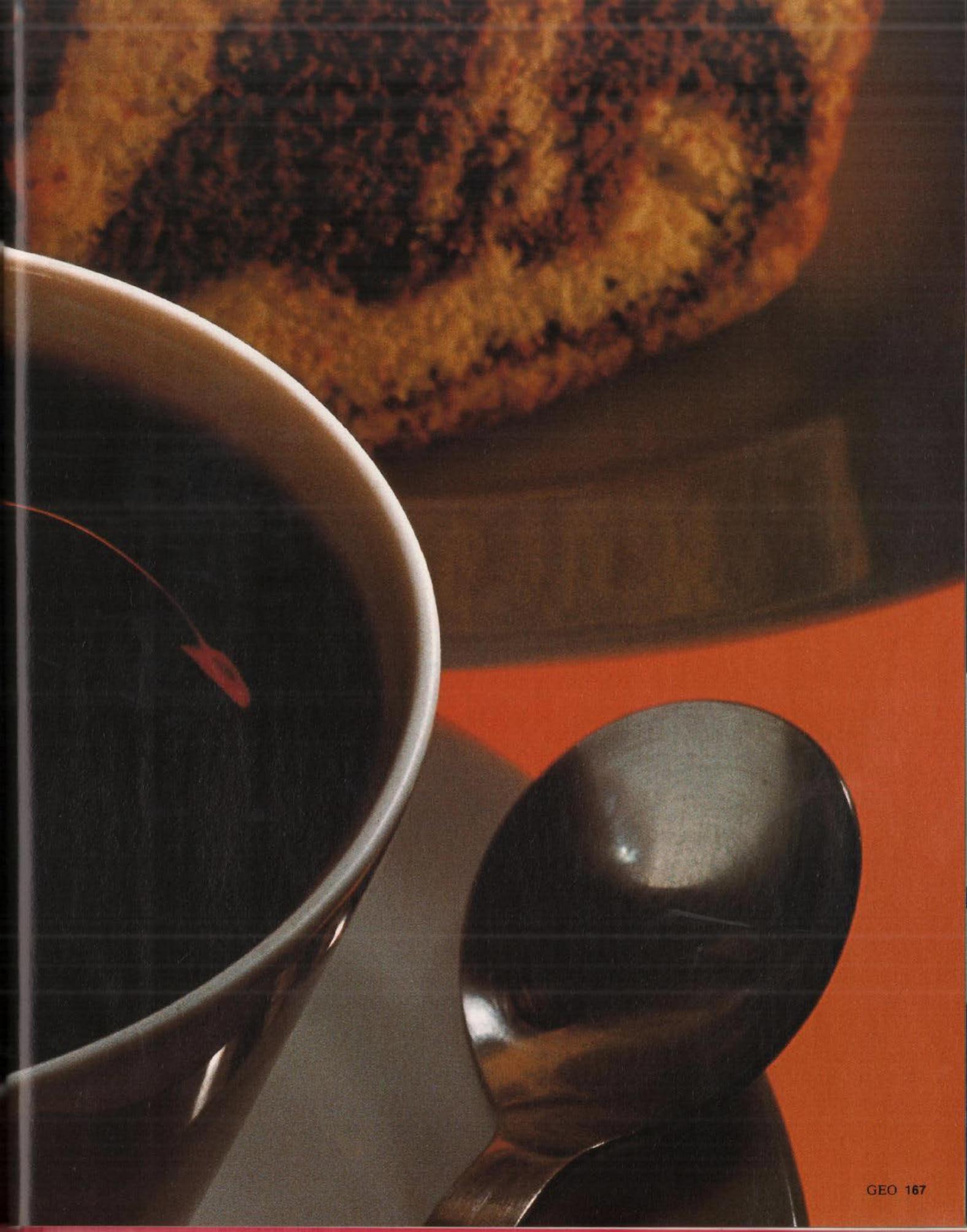


H

Hurrikane

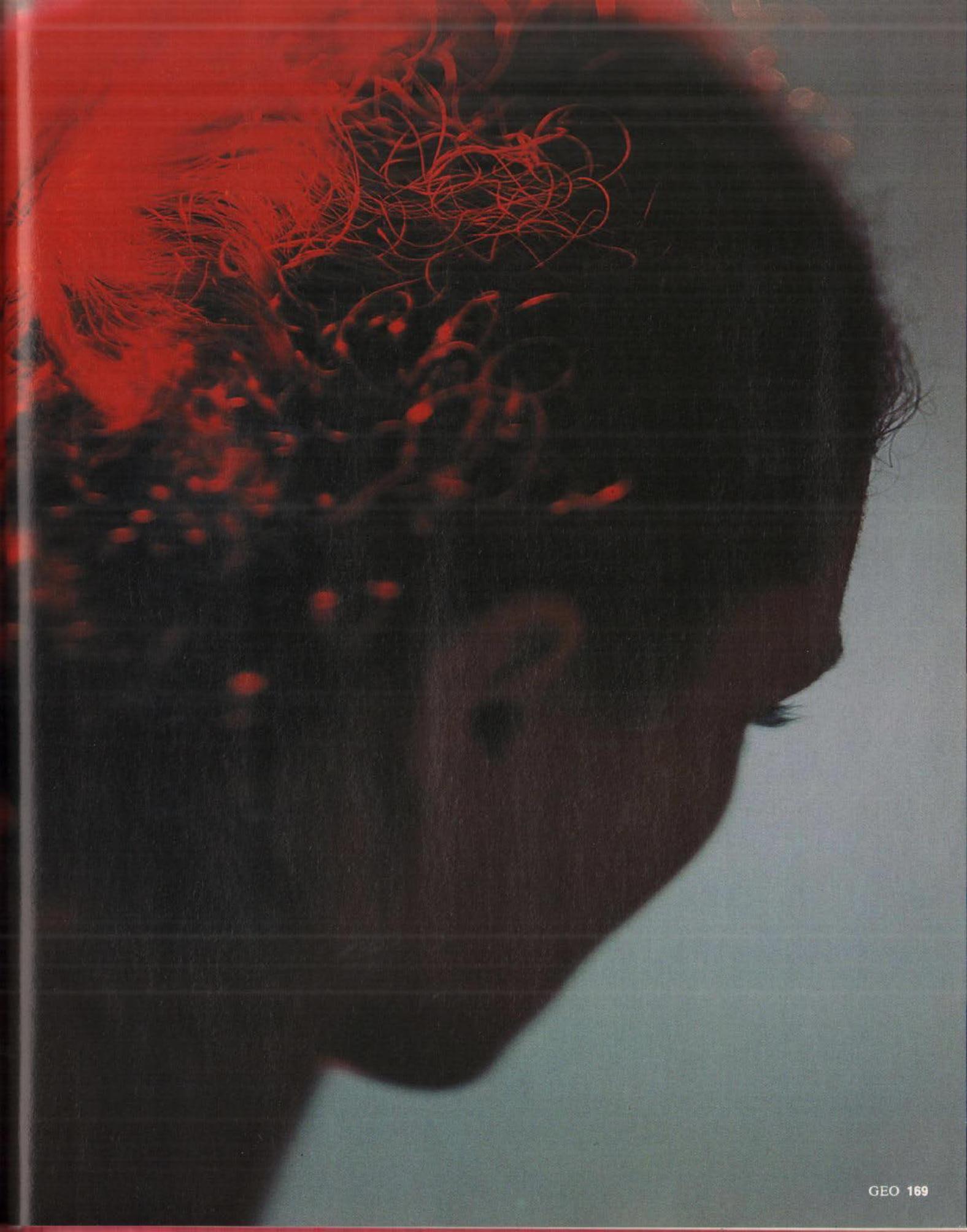
in der Kaffeetasse, Bäcker-
transformationen,
dazu fraktale Krümel –
das rechte Frühstück
für Chaotiker





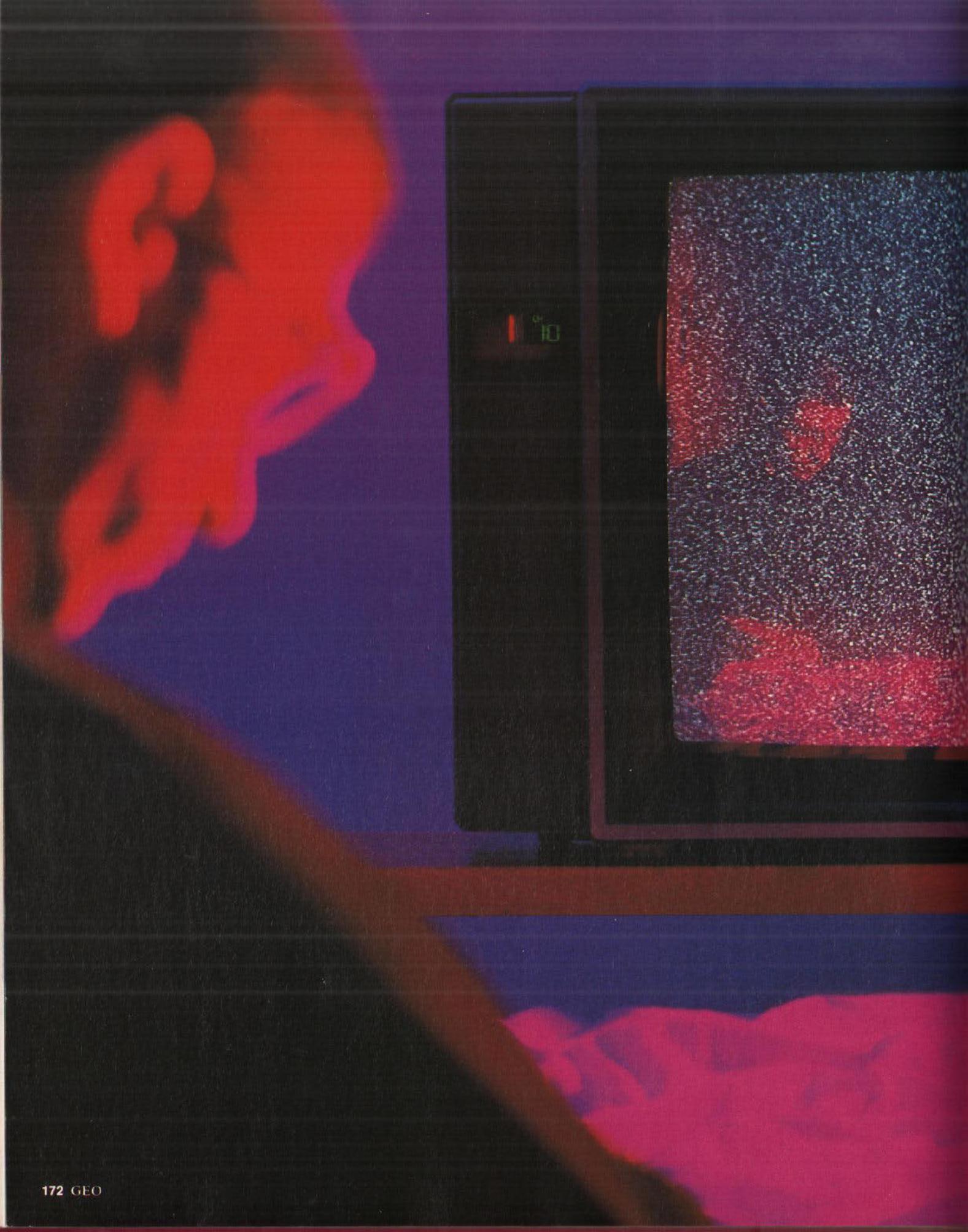


Auch das
wildeste Gewusel lässt sich
bändigen. Gewußt wie –
und der Wirrwarr organisiert
sich zu den schönsten
Mustern



Ob Kraut oder Kohl –
dem nichtlinearen Gourmet gelten
sie gleich. Denn: Fraktale sind überall, im
Gemüse wie im Salat







Schnee nach
Mitternacht – der Müde
mag darin träumen
oder, eingelullt vom »weißen
Rauschen«, in sein
2,31-dimensional zer-
knittertes Bett
sinken

Enzyklopädie der

Naturwissenschaftler verwenden formal strenge Methoden, Neues über die Welt zu erfahren. Auch für die

1

Welche offenen Fragen aus Ihrem Spezialgebiet würden Sie in den nächsten zehn Jahren am liebsten beantworten?

2

Welche Grenzen der Erkenntnis sehen Sie für die Chaos-Forschung?

3

Wie schätzen Sie die Chaos-Forschung im deutschsprachigen Raum im internationalen Vergleich ein?



Prof. Dr. Friedrich Cramer

ist Direktor am Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin in Göttingen. Der Honorarprofessor an den Universitäten Göttingen und Braunschweig ist Autor des Buches »Chaos und Ordnung – die komplexe Struktur des Lebendigen«

In den letzten beiden Dekennien, dem Zeitalter der Molekularbiologie, sind wichtige Einzelheiten und Zusammenhänge in der genetisch gesteuerten Herstellung von Nukleinsäuren und Eiweißen erkannt worden: die Doppel-Helix, der genetische Code, die Boten-Nukleinsäure, die katalytische Ribonukleinsäure. Kürzlich gelang es, die eigentliche Eiweiß-Synthesemaschine der Zelle – das Ribosom – zu kristallisieren. Und diese Kristalle geben sogar hervorragende Röntgenbeugungsbilder, die vielleicht bald eine vollständige Strukturanalyse dieser wichtigsten „Werkzeugmaschine“ der Zelle erlauben.

Dennoch: Eine statische Beschreibung genügt nicht. Leben fließt – und alles ist mit allem vernetzt. Wie sollen wir eine solche komplexe Dynamik experimentell und theoretisch erforschen?

Um nur ein Beispiel aus unserer Arbeit anzuführen: Bei der genetisch von der Erbsub-

stanz DNA gesteuerten Eiweißsynthese unseres Organismus – bei der Produktion von Hormonen oder Magenwänden, Haaren, Herzmuskel- oder Gehirnzellen – spielen die Ribosomen eine wichtige Rolle. Sie dürfen keinen Ausschuss produzieren und müssen deshalb möglichst fehlerfrei arbeiten. Nun bestehen diese „Maschinen“ samt ihren „Zubehörteilen“ aber selbst aus Eiweiß – das sie selber produzieren. Das aber ist eine typische Rückkopplungssituation, in der kleine Fehler sich durch ständige Wiederholung – „Iteration“ – aufzuschaukeln können; ein solcher Iterationsprozeß führt unter anderem auch zur „chaotischen“ Mandelbrot-Menge. Gilt hier das Prinzip des „deterministischen Chaos“: „kleine Ursache – große Wirkung“?

Ich frage mich: Ist der Zelltod die Folge einer Anhäufung von kleinen Fehlern bei der Eiweißsynthese, ist er eine Fehlerkatastrophe? Die Synergetik beschäftigt sich mit dem Aufschaukeln von mikroskopischer zu makroskopischer Ordnung. Passiert beim Altern und schließlich Sterben das Umgekehrte – ein Aufschaukeln von makroskopischer zu mikroskopischer Unordnung?

Auf diesem wichtigen Gebiet – es könnte grundlegende Einsichten in den Prozeß des Alterns ermöglichen – gibt es viel zu tun. Wir haben in unserem Institut viele Einzelheiten gemessen, zum Beispiel Einbaufehler der wichtigsten Aminosäuren in Eiweißmoleküle; auf etwa 10 000 Fälle gibt es einen Fehler. Doch trotz dieser Erkenntnisse sind wir noch nicht in der Lage, das ganze als dynamisches Netzwerk zu verstehen. Vielleicht helfen uns da die in der Chaos-Forschung verwendeten Ansätze zur Be-

handlung dynamischer Systeme weiter.

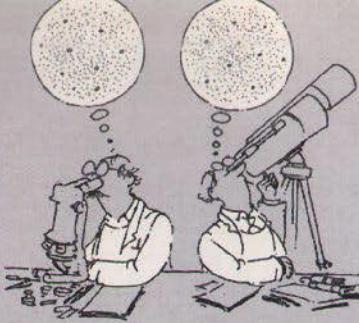
Die Molekularbiologie, die notwendigerweise biologische Einzelphänomene untersucht, müßte eingebettet werden in die System-Physiologie, die Einzelphänomene eher pauschal behandelt. Bisher forschen diese beiden Richtungen noch weitgehend unabhängig voneinander. Die moderne Chaos-Forschung zeigt uns, daß „unscheinbare“ – molekulare – Einzelereignisse große Wirkungen haben können, wie das Beispiel des „Schmetterlings-Effekts“ illustriert. Für diesen Brückenschlag zwischen System-Denken und atomistisch-chemischem Denken in der Biologie sind neue experimentelle und theoretische Methoden notwendig, zu deren Entwicklung ich beizutragen hoffe.

2

„Für Systeme scheint zu gelten, daß sie sich selbst nicht voll zugänglich sind“, sagt Goethe zu Eckermann. Der Alte aus Weimar hatte das schon vor 160 Jahren seherisch erfaßt, ohne daß ihm damals die wissenschaftlichen Argumente zur Verfügung standen. Wir sind heute in besserer und gleichzeitig schlechterer Lage: Die Chaos-Forschung zeigt ganz klare Grenzen des wissenschaftlichen Determinismus; sobald ein dynamisches System – und letzten Endes ist ja alles dynamisch – durch Chaos-Zonen, seltsame Attraktoren, Bifurkationen läuft, ist die Kette der Monokausalität durchbrochen, die wissenschaftliche Prognose ist nicht mehr eindeutig, sondern „nur noch global“. Das

»Nicht Ignoranz,
sondern die Ignoranz der
Ignoranz ist der Tod
des Wissens«

Alfred North Whitehead



Ignoranz

Forscher ist Unbekanntes reizvoller als Bekanntes. GEO-Wissen fragte vier Fachleute aus der Chaos-Forschung

mag den an der klassischen Physik geschulten Denker oder den notwendigerweise auf „Funktionieren“ bedachten Techniker in peinliche Situationen bringen – in der Tat bedeutet es den endgültigen Zusammenbruch des physikalischen und historischen Reduktionismus. Auf der anderen Seite gewinnt die wissenschaftliche Erkenntnis eine völlig neue Dimension: Das wissenschaftliche Weltbild löst sich aus der Erstarrung, die Welt kann nun endlich als Prozeß verstanden werden, als ein offenes, sich selbst organisierendes – und das heißt doch: kreatives – System.

3 Im europäischen, insbesondere im deutschsprachigen Raum ist die Chaos-Forschung (im weitesten Sinne) nicht schlecht repräsentiert. Deutsche Mathematiker haben in den zwanziger und dreißiger Jahren wichtige Vorarbeiten geleistet. Der Marburger Physiker Siegfried Grossmann hat als erster die allgemeine Bedeutung der Feigenbaum-Zahl erkannt; der Begriff „Synergetik“ ist in Deutschland geprägt worden; oszillierende enzymatische Systeme hat das Dortmunder Max-Planck-Institut untersucht; an den Universitäten Bremen und München gibt es bedeutende Gruppen von „Chaos-Forschern“; Göttinger Wissenschaftler arbeiten – wie in diesem Heft berichtet – an einer umfassenden Evolutionstheorie. Ich sehe auch interessante Ansätze zur Übertragung der zunächst an physikalischen Systemen gewonnenen Erkenntnisse auf die gesellschaftliche und ökonomische Entwicklung, zum Beispiel an der Universität Bielefeld. Im Prinzip halte ich es allerdings für unangebracht, Wissenschaft unter nationalen Aspekten zu betrachten.



Prof. Dr. Hermann Haken
ist Direktor des Instituts für Theoretische Physik und Synergetik der Universität Stuttgart, Träger der diesjährigen »Max-Planck-Medaille« der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und Autor von Büchern wie »Erfolgsgeheimnisse der Natur« und »Die Entstehung von biologischer Information und Ordnung«

1 Mein Arbeitsgebiet ist die Synergetik – die Lehre vom Zusammenwirken. Praktisch alles, was Forscher in der unbelebten und belebten Natur untersuchen, läßt sich in kleinere Teile zerlegen, und es gilt geradezu als abendländisches Forschungsprinzip, das Verhalten eines Gesamtsystems auf das Verhalten seiner einzelnen Teile zurückzuführen.

Hingegen sucht die Synergetik nach allgemeingültigen Prinzipien für die Selbstorganisation oder Selbststrukturierung, unabhängig von der Natur der einzelnen Teile.

Das Gesamtsystem, das uns in unseren Forschungen am meisten fasziniert, ist das Gehirn. Die moderne physiologische Forschung hat hier viele verblüffende Einzelresultate über chemische und elektrische Vorgänge sowohl in den einzelnen Nervenzellen als auch in größeren Gehirnbereichen zutage gefördert, so etwa über elektrische und magnetische Felder im Gehirn. Im Sinne der Synergetik

handelt es sich hier um die spontane Bildung makroskopischer Muster. Für uns ist es eine faszinierende Forschungsaufgabe, nachzusehen, inwieweit die Prinzipien der Synergetik es gestatten, großräumige Erregungsmuster im Gehirn zu berechnen, dabei aber zugleich Aufschluß über das Unberechenbare im menschlichen Denken zu erhalten: Wie hängen die Erregungsmuster mit dem zusammen, was wir selbst subjektiv wahrnehmen? Wie sind sie mit den einzelnen Gehirnregionen korreliert? Inwieweit kann ein synergetischer Computer menschliches Wahrnehmungsvermögen wiedergeben?

2 Schon in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts wurde das mechanistische Weltverständnis durch die Quantenmechanik erschüttert: Sie wies nach, daß Anfangslage und Anfangsgeschwindigkeit eines Elementarteilchens überhaupt nicht gleichzeitig und beliebig genau gemessen werden können, so daß die zeitlichen Veränderungen eines Systems nur noch im Sinne der Wahrscheinlichkeitstheorie vorausgesagt werden können.

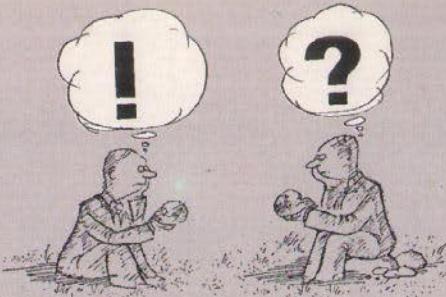
Den zweiten Stoß erhielt das mechanistische Weltbild durch Erkenntnisse der Synergetik und durch die moderne Chaos-Forschung. Wie die Synergetik ganz allgemein nachgewiesen hat, können selbst durch kleine Änderungen von Parametern, etwa des Verschmutzungsgrades eines Gewässers, qualitativ völlig neue Phänomene auftreten – wenn zum Beispiel die Fischpopulation in einem Fluß nicht proportional zum Verschmutzungsgrad abnimmt, sondern schlagartig verschwindet.

An solchen Umschlagpunkten – „Nichtgleichgewichtsphasenübergängen“ – entscheidet eine

kleine, nicht berechenbare Schwankung über die weitere Entwicklung. Dies wird schon an ganz simplen Experimenten sichtbar, etwa bei erhitzen Flüssigkeiten, die in einem Fall nach rechts herum, im anderen Fall nach links herum rotieren.

Diese Gesetzmäßigkeiten der Unvorhersehbarkeit gelten in noch viel größerem Maße für komplexe Systeme wie die Wirtschaft oder politische Systeme. Wir müssen uns mit dem Gedanken abfinden, daß wir in derartigen Systemen – wie übrigens auch bei der Wettervorhersage – die Entwicklung nicht auf längere Zeit vorhersagen können. Dies hat eine noch längst nicht allgemein erkannte weitreichende Konsequenz: Die Nationen müssen eine große Zahl von Experten in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik ständig bereithalten, damit diese in konzentrierten Aktionen auf jeweils neu eintretende Situationen sachgemäß reagieren können. Dies erfordert enorme Sachkenntnis und Fingerspitzengefühl, da zu starkes Eingreifen zu Überreaktionen führt und das System buchstäblich von einem chaotischen in den nächsten chaotischen Zustand gestoßen wird.

3 Die Bundesrepublik kann für sich in Anspruch nehmen, auf dem Gebiet selbstorganisierender und chaotischer Systeme Pionierarbeit geleistet zu haben. Zum einen ist hier Ende der sechziger Jahre – in Form der Synergetik – eine umfassende Theorie der Selbstorganisation entstanden. Zum andern sei auf die grundlegende Arbeit von Siegfried Großmann und Stefan Thomae aus Marburg verwiesen, die



Enzyklopädie der Ignoranz

zu den fundamentalen Skalengesetzen – auch als Gesetz der Feigenbaumzahlen bekannt – beim deterministischen Chaos geführt hat.

Die Volkswagen-Stiftung hat schon vor rund 15 Jahren die Synergetik intensiv zu fördern begonnen und hier einen Schwerpunkt eingerichtet, zu dem viele Forschergruppen in Physik, Chemie, Biologie, Soziologie und anderen Fachrichtungen entscheidende Beiträge geliefert haben.

Die Synergetik erfährt aber auch in anderen Ländern eine enorme Förderung. Hier ist gerade in den letzten Jahren in den USA eine ganze Reihe neuer Institute ins Leben gerufen worden, denen wir in der Bundesrepublik, zumindest von der Organisationsform her, nichts Gleichwertiges entgegenzusetzen haben. Die Arbeit amerikanischer Kollegen profitiert zugleich von einer eindrucksvollen Öffentlichkeitsarbeit, so daß wir vermutlich in den nächsten Jahren auch hierzulande den Eindruck haben werden, daß dies alles aus den USA zu uns gekommen sei.



Dr. Mario Markus

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Ernährungsphysiologie in Dortmund und Physikdozent an der dortigen Universität

I Zehnjahrespläne in der Erforschung nichtlinearer Systeme sind nur schwer aufzustellen, denn die Fragen im übernächsten Jahr hängen von den Antworten im nächsten Jahr ab. Trotzdem:

Mich interessiert, welche von den vielen Beobachtungen vermeintlich chaotischer Rhythmen, die wie Pilze aus den Fachzeitschriften schießen, wirklich auf deterministisch beschreibbarem Chaos beruhen.

Der Streit „Chaos oder Nicht-Chaos“ entzündet sich – aufgrund unterschiedlicher Auswertungsmethoden und Interpretationen – etwa an dem Auf und Ab einiger Epidemien und Insektenplagen, an Herzrhythmen, Hormonschwankungen, am Wetter und neuerdings sogar am Straßenverkehr und Rüstungswettlauf. Sobald Gewißheit über die Natur dieser Rhythmen herrscht, könnte man in dem einen oder dem anderen System Eingriffe austüfteln, um es zu kontrollieren.

Ein aktuelles medizinisches Beispiel ist die Osteoporose, eine Knochenschwäche, die in der Bundesrepublik jährlich einen Sozialschaden von drei Milliarden Mark verursacht. Das Leiden hängt nach Untersuchungen des Mediziners Rolf-Dieter Hesch aus Hannover mit abnormen Rhythmen des Parathormons zusammen, wodurch sich pharmakologische Beeinflussungsmöglichkeiten ergeben.

Ich bin neugierig, ob eine mathematische Beschreibung chaotischer Rhythmen Einzug in das Diagnose-Repertoire der Mediziner halten wird. In diesem Umfeld beeindrucken mich die jüngsten diagnostischen Fortschritte bei der Multiplen Sklerose: Die Physiologen André Longtin, John Milton und Michael Mackey aus Montreal fanden einen Zusammenhang zwischen dieser Krankheit und Pupillen-Flimmerrhythmen, die Uwe an der Heiden von der privaten Universität Witten-Herdecke mathematisch untersucht hat. Von großer medizinischer Bedeutung ist auch die Erforschung des Schlaf-Wach-Rhythmus und dessen Störungen, vor allem hinsichtlich einer gefahrenfreien Beeinflussung.

Eine andere Frage ist eher soziologischer Natur: Wird ein Teil der Forschung in Privatwohnungen oder Klassenzimmern landen? Ich stelle mir diese Frage, weil einerseits eine Reihe von Aufgaben mit einfachen Rechenmethoden – etwa Rekursionen oder zellulären Automaten – behandelt werden können, und andererseits die Leistung der Heimcomputer galoppierend zunimmt. Ein Beispiel dafür ist die ausgezeichnete Arbeit eines 15jährigen Schülers aus Tucson, Arizona über die Simulation von Wellen in anregbaren Medien. Er veröffentlichte sie vor einigen Jahren in der Fachzeitschrift „Physica D“ gemeinsam mit seinem Vater, dem Biophysiker Arthur Winfree und dem Heidelberger Mathematiker Herbert Seifert.

2 Was ihre Grenzen betrifft, hat sich die Chaos-Forschung selber eine Antwort gegeben: Eine ihrer wesentlichen Aussagen ist, daß Voraussagen in chaotischen Systemen nur begrenzt möglich sind, weil kleinste Ungewißheiten des momentanen Zustandes die Zukunft weitgehend vernebeln. Deshalb weiß zum Beispiel kein Mensch, wann die letzten im sogenannten „3-zu-1-Resonanzgürtel“ noch verbleibenden Asteroiden infolge ihrer chaotischen Bahnen aus diesem Gebiet hinauswandern werden. Dabei könnten – wie auch früher schon – einige von ihnen als Meteoriten auf die Erde stürzen.

Zusätzlich zu diesen system-eigenen Grenzen werden Voraussagen dadurch unsicher, daß sich zeitliche Verläufe durch äußere Einflüsse verändern können. Zum Beispiel: Eine

Berechnung zukünftiger Klimaveränderungen müßte politische Variablen einbeziehen. Doch diese sind sicher noch schwerer vorauszusagen als die Variablen, die das ungestörte Wetter bestimmen. Ebenfalls abhängig von schwer voraussagbaren politischen Entwicklungen ist die Zukunft von Ökosystemen, wie beispielsweise dem tropischen Regenwald, die seit Jahrtausenden in ihrer selbstorganisierten Form bestehen.

3 Es gibt in der Bundesrepublik für die Untersuchung von nichtlinearen Phänomenen einige gute Forschergruppen. Es mangelt jedoch hierzulande weitgehend an einer konzentrierten Zusammenarbeit von Mathematikern, Astronomen, Biologen, Chemikern, Geologen, Meteorologen, Informatikern und Medizinern. Eine derartige Kooperation würde viele interdisziplinäre Arbeiten befriedigen, zum Beispiel die schon erwähnten Wellenausbreitung in anregbaren Medien, wie sie in analoger Form bei den Schleimpilzen bis hin zu den Spiralgalaxien vorkommt.

Die fachübergreifende Atmosphäre der University of California oder der Freien Universität Brüssel ist an deutschen Universitäten schwer zu finden. Erste Maßnahmen zur Integration nichtlinearer Phänomene in den Grundvorlesungen für Physiker plane ich zur Zeit zusammen mit den Dortmunder Physikprofessoren Helmut Keiter und Jürgen Baake. Sonst gilt noch häufig: „Gib dem Chemiker, was des Chemikers ist, dem Astronomen, was des Astronomen ist...“ Ich sage dem Fachchauvinismus den Kampf an und wünsche mir für alle deutschen Universitäten eine großzügige interdisziplinäre Entwicklung.



Dr. Gottfried Mayer-Kress

ist Dozent am Mathematics Department der University of California in Santa Cruz und Mitarbeiter am Center for Nonlinear Studies am Los Alamos National Laboratory in New Mexico

1 Die Frage der Anwendbarkeit von Computermödellen auf komplexe Systeme mit chaotischen Verhaltensmöglichkeiten hat für mich eine sehr starke Bedeutung. Traditionelle Computermodelle gehen von der Annahme aus, daß wir eine beliebig genaue Voraussage treffen können, wenn wir unser Modell nur genügend detailliert ausgestalten und alle denkbaren Einflußfaktoren berücksichtigen. Die Chaos-Theorie macht uns klar, daß schon die Frage nach der zukünftigen Entwicklung eines chaotischen Systems neu überdacht werden muß: Ein Kollege des National Center of Atmospheric Research hat mir erklärt, daß Voraussagen eines ihrer Klimamodelle schlechter werden, wenn das Modell detaillierter und damit auch komplizierter gemacht wird.

Im Zusammenhang mit Modellen zu Fragen des Wetters werden oft gefragt, warum wir nicht historische Daten verwenden, um ein Modell zu entwickeln, welches dann zum Beispiel den Zweiten Weltkrieg voraussagt. Das

wäre dann doch ein Beweis dafür, daß die Gleichungen richtig sind, und damit ließen sich zukünftige Entwicklungen vorhersagen. Diese Frage macht keinen Sinn, wie ein überraschendes Resultat der Chaos-Theorie zeigt: Schon die einfachsten nichtlinearen Gleichungen können beliebige geschichtliche Entwicklungen produzieren.

Mich interessiert sehr, inwieweit es möglich sein wird, über nichtlineare Computermodelle politisch-gesellschaftliche „Wettervorhersagen“ zu machen. Auf diese Weise könnte es möglich sein, Anzeichen für Krisen früher als heute zu erkennen und die potentiellen Auswirkungen möglicher Lösungsversuche besser abzuschätzen. Die derzeitigen Entwicklungen in Osteuropa zeigen wohl am deutlichsten, wie schnell und unvorhersehbar sich politische Welten verändern können. Ich könnte mir vorstellen, daß ähnliche Instabilitäten sich zur Zeit in den USA entwickeln, ausgelöst durch Drogen und vernachlässigte wirtschaftliche Probleme.

Eine andere aufregende Forschungsrichtung liegt in der extremen Sensitivität chaotischen Verhaltens gegenüber kleinen äußeren Einflüssen. Ein tiefes Verständnis dieser Eigenschaften hat mögliche weitreichende Auswirkungen: auf medizinische Anwendungen sowohl für die Diagnose als auch für neue „dynamische“ Therapieformen, die das komplexe Zusammenspiel rhythmischer Vorgänge im Körper berücksichtigen – von Gehirnwellen über Herzrhythmen und Hormonschwankungen bis zu Akupunktur und Reflexen auf äußere Reize.

Nach welchen Gesetzen können nichtlineare Systeme durch geschickte Folgen äußerer Störungen – berechnet mit Hilfe von Computermodellen – dazu gebracht werden, daß sie in einen bestimmten, gewünschten Attraktor überwechseln?

Auf einem der „klassischen“ Gebiete der Chaos-Forschung – Wetter und Klimadynamik – sehe ich dramatische Anwendungsmöglichkeiten derartiger Methoden. Mit ihrer Hilfe könnten Wissenschaftler gezielte, konzertierte Maßnahmen zu einer Lösung globaler Umweltprobleme empfehlen. Es ist zum Beispiel bekannt, daß die Temperatur unserer Atmosphäre sehr stark von der Oberflächentemperatur der Weltmeere abhängt. Diese wiederum hängt von der Sturmhäufigkeit über den Ozeanen ab, da diese dazu beitragen, tiefe – und damit kühle – Wasserschichten mit den Oberflächenschichten zu mischen. Wenn es gelänge, kontrolliert Stürme zu „säen“, könnte das vielleicht dem Anstieg des Treibhausgases Kohlendioxid (CO_2) entgegenwirken, da kühleres Wasser mehr CO_2 binden kann. Ich glaube, es ist zu spät, durch Aufrufe zur Reduktion von Emissionen die Klimakatastrophe zu verhindern. Ich glaube deshalb, daß wir heute wissenschaftliche Grundlagen dafür schaffen müssen, unser Klima zu kultivieren.

2 Die Existenz chaotischer Systeme hat unser mechanistisches Weltbild in Frage gestellt, wonach wir durch fortschreitende Verbesserung unserer wissenschaftlichen Werkzeuge die Welt nicht nur verstehen, sondern auch voraussagen können – und zwar mit beliebiger Genauigkeit (abgesehen von Einschränkungen durch quantenmechanische Unbestimmtheiten). Die deutlichsten Grenzen der Erkenntnis sehe ich in dem zwangsläufigen Verzicht auf eindeutige und präzise Lösungen im Zusammenhang mit chaotischen Systemen. Daher kommen die

„exakten Wissenschaften“ auch theoretisch den „soft sciences“ näher, wo es zu jeder Regel viele Ausnahmen gibt und jeder Effekt mehrere Ursachen haben kann.

In einem gewissen Sinn ist diese Erkenntnis sehr positiv für unser Wissenschaftsverständnis: Sie wirkt einer Dogmatisierung innerhalb der Wissenschaften entgegen und erschwert ihren Mißbrauch in einer wissenschaftsgläubigen Gesellschaft. Es wird schwerer werden, „wissenschaftlich erwiesene Tatsachen“ als Begründung für politische Entscheidungen herzunehmen, die gegen den „gesunden Menschenverstand“ gehen, wie es etwa beim SDI-Programm der USA der Fall war (siehe Seite 162). In diesem Sinne ist die Chaos-Theorie für die traditionelle Wissenschaft vielleicht das, was Galilei seinerzeit für das von der katholischen Kirche vertretene Weltbild war.

3 Moderne Kommunikationsmittel, vor allem Computernetzwerke und Computerpost, vereinfachen den Austausch von Informationen und auch das Zusammenarbeiten im weltweiten Rahmen derart, daß eine Klassifizierung nach Ländern weniger eine Rolle spielt als noch vor wenigen Jahren. In meinem Gebiet ist der deutlichste Unterschied in den Forschungsbedingungen zwischen den USA und Europa die Verfügbarkeit von modernen Computersystemen: Hier nehmen die USA nach wie vor eine Spitzenposition ein. Im internationalen Vergleich von Forschungsaktivitäten hat der deutschsprachige Raum sicher einen wesentlichen Beitrag geleistet. □



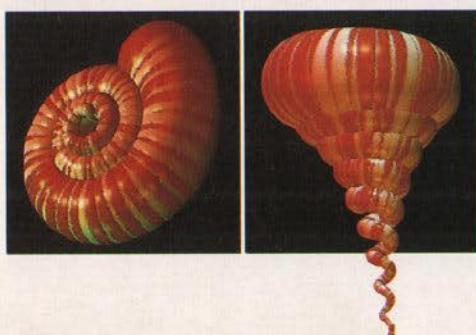
Kursiv gedruckte Wörter sind Querverweise auf andere Stichwörter des Glossars

Anfangsbedingungen

Eine ungefähre Kenntnis der Anfangsbedingungen erlaubt in linearen Systemen – wie einem vom Baum auf die Erde fallenden Apfel – eine Vorhersage der Entwicklung. Für *nichtlineare Systeme* – etwa das Wetter – gilt dies nicht, wenn sie sich chaotisch verhalten: Durch eine leichte Störung kann das System dann eine völlig andere Entwicklung nehmen (siehe *Schmetterlingseffekt*). Da Startwerte prinzipiell nicht beliebig genau zu messen sind (siehe *Unschärfe*), werden präzise Voraussagen unmöglich.



Wohin die Kugel rollt oder wie Schneckenhäuser auf dem Monitor wachsen: Die Voraussetzungen bestimmen das Ergebnis



Apfelmännchen

Spitzname einer ebenen grafischen Darstellung der nach dem Mathematiker Benoit Mandelbrot (s. Seite 54) benannten Mandelbrot-Menge: Sie erinnert an mehrere aufeinander gesetzte Äpfel verschiedener Größe. Jeder Punkt der Ebene lässt sich mit einer (*komplexen*) Zahl c identifizieren. Aus c wird mit Hilfe der *rekursiven* quadratischen Gleichung $z_{n+1} = z_n^2 + c$ der Wert z_1 errechnet, daraus durch erneutes Einsetzen z_2, z_3, z_4 und so fort. Am Beginn der Rechnung wird ein Startwert z_0 benötigt; für die Berechnung der Mandelbrot-Menge wird er festgehalten und immer gleich 0 gesetzt. Bei unendlicher Wiederholung dieser Rechnung können die z -Werte der entstehenden Folge gegen Unendlich streben oder unterhalb einer endlichen Schranke bleiben.

Ein Wert c gehört genau dann zur Mandelbrot-Menge, wenn die Werte „seiner“ Folge im Endlichen bleiben, andernfalls nicht. Kennzeichnet nun der Computer in der Zahlebene die Punkte der Mandelbrot-Menge, etwa durch Schwärzung, dann füllen diese eine seltsame Figur aus: das Apfelmännchen.

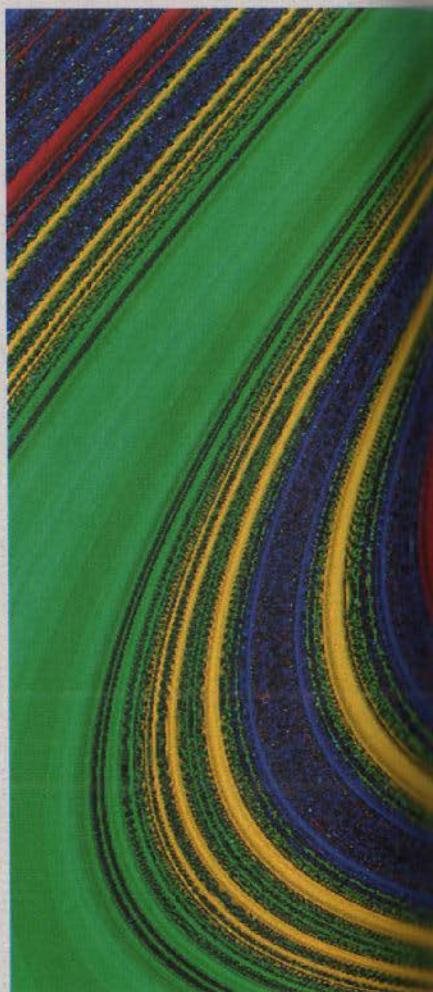
Interessant und wahrhaft faszinierend ist der Rand des Apfelmännchens. Dort entstehen Formen, die an Seepferdchen, Wirbel oder eigenartige Molekülgebilde erinnern. Bei immer stärke-

Attraktoren **Mit der Achterbahn durch den Phasenraum**

Die Rothaarige hatte wie immer ein Lächeln für Emanuel Müller. „Was für eine anziehende Frau“, seufzte der Nachtpoortier der „Herberge zum Vierten Attraktor“, während die Schöne über eine weiße Marmortreppe nach oben verschwand. Vor seinem inneren Auge stand noch ihr Bild. Zimmer 106. Müller machte sich im Geiste auf zur Quelle der Anziehung. Solche un widerstehliche Attraktion verspürt auch ein *Pendel*, wenn es – durch Reibung gebremst – in immer kleineren Ausschlägen seinem Ruhepunkt entgegenschwingt. „Punkt-Attraktor“ nennen ihn Physiker. Er hat neben den drei Koordinaten, die seine Lage im Raum beschreiben, noch drei weitere, welche die Geschwindigkeit des Ruhepunkts verschlüsseln – etwa wenn das Pendel auf einer fahrenden Spielzeugeisenbahn steht. Der Attraktor des Pendels befindet sich in einem Phantasieprodukt mit sechs Dimensionen, seinem sogenannten *Phasenraum*. Dort bedeutet ein jeder Ort nicht nur Position, sondern auch Geschwindigkeit.

Diese Betrachtung bietet Wissenschaftlern einen wichtigen Vorteil: Punkte oder Linien in diesem mathematischen „Raum“ sind für sie gewissermaßen eine Kurzschrift für die wirkliche Bewegung. Kurven im Phasenraum sagen ihnen alles über die Entwicklung des zugehörigen „dynamischen Systems“, egal ob es sich dabei um Pendel, Bevölkerungsvermehrung oder Wirtschaftszahlen handelt. Attraktoren existieren nur für *dissipative* Wirkungszusammenhänge. Das sind dynamische Systeme, die Materie, Energie oder menschliche Arbeit „verbrauchen“ und als „Wärme“ an ihre Umwelt abgeben. Der Punkt-Attraktor ist dabei nur das einfachste von vier allgemeinen Mustern, auf die sich eine Bewegung im übertragenen Sinne „einpendeln“ kann. Diese Vierer-Hierarchie reicht bis hin zum „chaotischen Attraktor“ auf der obersten Stufe.

„Periodische Attraktoren“ nehmen im Repertoire der Natur den zweiten Rang ein. Sie symbolisieren Bewegungen – etwa ein angetriebenes Pendel oder das Ticken einer Uhr –, die sich nach bestimmter Zeit wiederholen. Im Phasenraum dargestellt wird ein solcher Attraktor als geschlossene Kurve, etwa als Kreis, Ellipse oder zu einem Ring gebogene Schraubenlinie. Auch auf der dritten Stufe des Wegs zum Chaos – der Ebene des



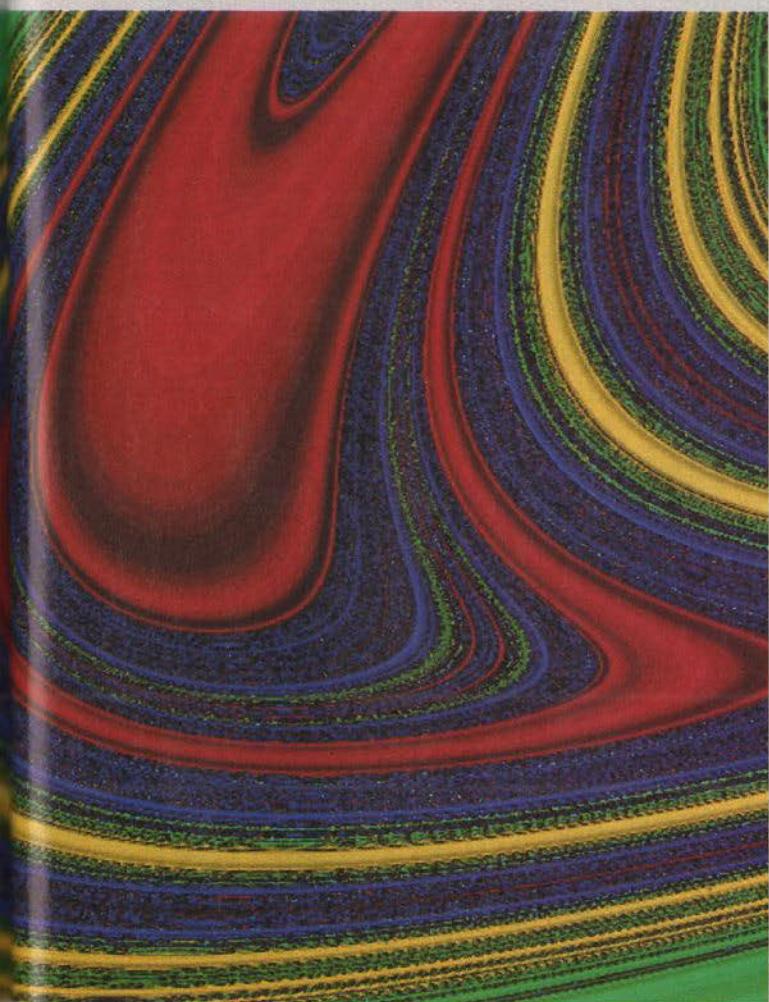
Die Intensität der Farben zeigt, wie schnell die

„quasiperiodischen Attraktors“ – kann ein Pendel schwingen, wenn zwischen seiner natürlichen Schwingungszeit und der Antriebsperiode kein gemeinsames Vielfaches existiert. Im Phasenraum, der ja auch Geschwindigkeit in räumliche Position übersetzt, bewegt sich das Pendel auf der Oberfläche eines „Torus“, wie Mathematiker Gebilde von der Form eines Rettungsringes nennen. Die Bewegung auf einem solchen quasiperiodischen Attraktor ist zwar eine Summe wiederkehrender Anteile, wiederholt sich jedoch nie komplett. Verändert ein neugieriger Physiker die Antriebsstärke des Pendels, kann die quasiperiodische Bewegung ins *deterministische Chaos* münden. Wohin die Spitze des Pendels zucken wird, läßt sich nun, im Reich des „chaotischen



Attraktor auf einem Torus

Attraktors“, nicht mehr genau prophezeien. Aber auch diese Bewegungen haben räumliche und zeitliche Symmetrie: Die Zuckungen des Pendels binnen einer Minute mögen – entsprechend vergrößert – der Bewegung im Verlauf einer Stunde ähneln.



Bahn eines Pendels im Phasenraum verschiedene Attraktoren erreicht

Diese *Selbstähnlichkeit* wird als die Symmetrie nichtlinearer Systeme verstanden. In ihr liegt der Unterschied zwischen deterministischem Chaos und reinem Zufall. Eine zufällige Bewegung hinterläßt im Phasenraum gewissermaßen fein verteilten Staub. Ein chaotischer Attraktor besitzt dagegen eine selbstähnliche Struktur: Auch wenn er stärker vergrößert wird, bietet er immer wieder den gleichen Anblick. Daraus folgt, daß er sich von Kurven, Flächen oder Körpern mit einer ganzzahligen Dimension – wie eins, zwei oder drei – unterscheidet: Seine Dimension ist *fraktal*, das heißt meist gebrochen, etwa 2,7 oder 5,3. Außerdem ist die Dimensionszahl eines chaotischen Attraktors ein Maß für die Anzahl voneinander unabhängiger Entwicklungsmöglichkeiten, die das zugehörige System hat – sei es ein Pendel, eine Population oder eine Konjunktur.

Die fraktale Struktur des chaotischen Attraktors bedingt auch, daß der Verlauf einer Bahn empfindlich von Anfangsbedingungen abhängt: Bewegungszustände trennen sich schnell, selbst wenn sie nur durch unmeßbar kleine Fehler voneinander unterscheidbar sind – eine Eigenschaft, die letztlich den „chaotischen Attraktor“ definiert. Wie schnell genau diese Trennung erfolgt, geben die sogenannten Ljapunow-Exponenten an; sie sind ein Maß für das exponentielle Wachstum, mit dem sich die kleinen Fehler im Lauf der Zeit vergrößern. Physiker versuchen diese Exponenten aus Meßreihen zu errechnen, ebenso wie die Dimensionszahl des zugehörigen Attraktors. Denn aus positiven Ljapunow-Exponenten können sie auf empfindliche Abhängigkeit von Anfangsbedingungen schließen und auf diesem Weg von der Existenz eines chaotischen Attraktors Kenntnis erhalten.

Mehrere Attraktoren können auch zugleich existieren. Allerdings nur für bestimmte Werte der veränderlichen Größen („Parameter“), die den Zustand eines Systems von außen festlegen. Auch Ordnung und Chaos mögen auf diese Weise koexistieren. Auf welchem dieser Attraktoren etwa die Fortpflanzungsrate einer Hasenbevölkerung (siehe Seite 88) herumläuft, hängt von dem Weg ins Chaos ab, den sie durch Verändern der Parameter nimmt.

Barnabas Thwaites

rer Vergrößerung zeigen sich immer wieder neue, den größeren ähnlichen Strukturen im kleinen und kleinsten und allerkleinsten. Und immer wieder sind bei immer stärkerer Vergrößerung neue Apfelmännchen zu entdecken (siehe Seite 182): Die Mandelbrot-Menge ist *fraktal*. Sie ist auch zusammenhängend, jeder ihrer Punkte ist zu erreichen, ohne die Menge zu verlassen.

Benoit Mandelbrot entdeckte, daß die nach ihm benannte Menge gleichsam einen Katalog der Julia-Mengen darstellt, von denen es unendlich viele gibt. Ihre Beschreibung ist mit der Rekursion für die Mandelbrot-Menge eng verwandt. Es wird die gleiche Formel getestet, jetzt bleibt aber c fest, und z_0 wird verändert. So gibt es zu jedem c eine Julia-Menge, die nichts anderes ist als die Menge aller Startwerte z_0 , für die die Werte z_n nie im Unendlichen verschwinden. Julia-Mengen zu c -Werten, die zur Mandelbrot-Menge gehören, sind zusammenhängende, komplexe Gebilde. Liegen die Startwerte außerhalb, so bestehen die zugehörigen Julia-Mengen wie die *Cantor-Menge* aus fraktalem Staub.

Bäcker-Transformation

Eier und Mehl, Butter und Salz und was sonst noch in den Ku-



Schwungvoll ins Chaos: Teigkneten

chenteig kommt, müssen ordentlich durchmischt werden. Der Bäcker kann dazu den Teig auf der Arbeitsplatte flachdrücken, zusammenfalten, wieder flachdrücken, wieder zusammenfalten und so fort bis er alles durchmengt hat. „Bäcker-Transformation“ heißt ein mathematisches Verfahren, das – grob gesprochen – mit dieser Art des Dehnen und Faltens *deterministisches Chaos* erzeugen kann.

Bénard-Instabilität

Wasser wird auf dem Herd erhitzt – ein alltäglicher Vorgang. Beim Erhitzen nimmt das spezifische

Gewicht der Flüssigkeit am Topfboden ab. Das warme Wasser sollte deshalb nach oben strömen und das kalte absinken. Doch die innere Reibung der Flüssigkeit verhindert den Austausch, solange der Temperaturunterschied zwischen oben und unten nur gering ist. Wächst dieser Unterschied durch eine Erhöhung der Wärmezufuhr, dann erreicht das System die Bénard-Instabilität und kippt in einen neuen Zustand: die Konvektion. Es entstehen rollenförmige Strömungsmuster, in denen auf der einen Seite das warme Wasser nach oben strömt, auf der anderen das kalte nach unten. Liegen mehrere solcher Rollen nebeneinander, kreisen die Wasserwalzen abwechselnd im und gegen den Uhrzeigersinn. Steigt die Hitze weiter, dann werden die Rollen ihrerseits instabil und die Strömungen chaotisch.

Bifurkation

(lat: bifurcum = gegabelt) siehe *Mathematik*

Cantor-Menge

Wer aus einer Linie das mittlere Drittel ausschneidet, aus den verbleibenden Stücken wiederum jeweils das mittlere Drittel herausträgt und so weiter, der wandelt auf den Spuren des Mathematikers Georg Cantor. Wird das Ausschneiden unendlich oft wiederholt, entsteht eine Menge mit unendlich vielen vereinzelten Punkten – die Cantor-Menge, später auch „Staub-Fraktal“ genannt. Cantor hat es Benoit Mandelbrot zu verdanken, daß seine Entdeckung nicht im Kabinett mathematischer Kuriösitäten ver-



Kinderzimmer: Tohuwabohu oder schöpferisches Chaos?

Chaos

(griech: gestaltlose Urmasse). In der Alltagssprache gilt Chaos als das Gegenteil oder die Abwesenheit von *Ordnung*. Das Wort selbst stammt aus der griechischen Mythologie: Nach Hesiods Theogonie um 700 v. Chr. war im Anfang das Chaos – eine grenzenlose gähnende Leere, aus der dann Gaia entstand, die Erde. Ähnlich heißt es in der Genesis, dem Eröffnungskapitel der Bibel: „Und die Erde war wüst und leer.“ Auch die Schöpfungsmythologie vieler anderer Völker beginnt im Chaos. Mathematik und Naturwissenschaften sprechen dagegen von „chaotischen“ Systemen, wenn deren Entwicklung nicht determiniert, nicht vorhersagbar ist. Paradox erscheint daher der Begriff **deterministisches Chaos**. Dieses Chaos – auf den ersten Blick bloßer Zufall – entsteht streng gesetzmäßig etwa in *Turbulenzen* oder bestimmten Doppelpendeln.

Trotzdem ist das Verhalten deterministisch chaotischer Systeme nicht berechenbar, da sie äußerst empfindlich auf kleinste Veränderungen der *Anfangsbedingungen* reagieren. Weil sich Startwerte jedoch prinzipiell nicht beliebig genau ermitteln und damit nie exakt wiederherstellen lassen, ist eine Vorausberechnung unmöglich (siehe *Unschärfe*). Die Diagnose „deterministisches Chaos“ bedeutet aber nicht nur Enttäuschung über mißglückte Vorhersagen – in der scheinbaren Reglosigkeit existieren geordnete Strukturen, etwa das Feigenbaum-Szenario (siehe *Mathematik*).

Chemische Wellen

entstehen bei Reaktionen, die periodisch ablaufen. Ein Beispiel ist die Belousov-Zhabotinskii-Reaktion (siehe Seite 137). Sie läuft in einer Lösung von Malonsäure, Kaliumbromat und weiteren Che-

mikalien ab. In einer flachen Schale laufen abwechselnd rote und blaue Ringe nach außen, die Reaktion verläuft „räumlich periodisch“. Wird das Gemisch ständig gerührt, kann es sich abwechselnd rot oder blau färben: Etwa jede Minute wechselt die Farbe. Fachleute sprechen von einer „chemischen Uhr“.



Rechnerbild einer chemischen Welle

Computer-Simulationen

Der Computer kann alles – was Menschen ihm beibringen können. „Kennt“ er etwa die Gesetze, nach denen sich ein gegen die Wand rasendes Auto verformt, dann kann er den Unfall auf dem Bildschirm wieder und wieder geschehen lassen, ohne ein einziges Stahlblech zu verbiegen. Forscher berechnen mit Hilfe von Computermodellen all das, was auf dem Papier zu kompliziert wäre: die Bahnkurve einer Mondrakete ebenso wie das Wetter des nächsten Tages. Doch nicht nur reale Vorgänge lassen sich simulieren: Auf den Bildschirmen von Computerkünstlern spielen Schreibtischlampen Fußball oder jonglieren Teddybären mit gläsernen Bällen. Ohne Computermodelle wäre auch die Erforschung des Chaos nicht möglich: Erst die Rechner können etwa chaotische Attrak-

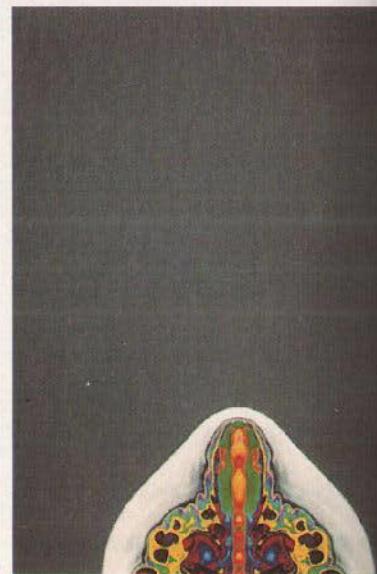
toren oder die komplexen, ästhetisch faszinierenden Apfelmännchen-Strukturen sichtbar machen. Im Rahmen der Chaos-Forschung ist eine regelrechte „experimentelle Geometrie“ entstanden: Aus den computererzeugten Bildern selbst gewinnen Mathematiker Erkenntnisse.

Dendritisches Wachstum

Baumartig verzweigt wachsen beispielsweise Dendriten (griech: dendron = Baum) von Nervenzellen – Fortsätze, über die sie Erregungen empfangen: Von den Hauptsträngen spalten sich kleinere Äste ab, daraus sprühen Zweige, aus diesen Zweiglein und so fort. Nicht nur biologische Gebilde, sondern auch anorganische wie Blitze oder Schneeflocken „wachsen“ dendritisch. Ein Wechselspiel von mikroskopischen und makroskopischen Kräften bestimmt, in welche Richtung die weitere Ausdehnung gerade am günstigsten ist. Bei der Schneeflocke wirkt beispielsweise auch die winzige Menge Wärme, die entsteht, wenn ein Wassermolekül „festtrifft“. Auch die Wind- und Temperaturverhältnisse beim Fall aus den Wolken beeinflussen die Form der Flocke. Schließlich gleicht keine der anderen (siehe *Fraktale*).

Determinismus

Philosophische Auffassung, daß alle Geschehnisse vorherbestimmt sind. Der Determinismus erlebte einen Aufschwung in der Zeit der klassischen Physik, als das Weltgeschehen mit Hilfe der *Newton-Mechanik* zumindest im Prinzip berechenbar zu sein schien. Zugespitzt formulierte der Mathematiker Pierre Simon de Laplace diese Weltansicht im 18.



Eine Cantor-Menge entsteht

blieb. Mandelbrot fand in den sechziger Jahren eine Anwendung für die Cantor-Menge: Mit ihr ließ sich die Häufigkeit von Störungen bei der Fernübertragung von Computerdaten beschreiben (siehe Seite 54). Die Fehler treten gehäuft auf, unterbrochen durch Phasen störungsfreier Übertragung. In jeder „Fehlerphase“ finden sich wiederum Pausen und Häufungen. Die fraktale Dimension der Cantor-Menge beträgt $D=0,6309$.

Jahrhundert (Laplacescher Dämon). Erst Anfang unseres Jahrhunderts erkannte der französische Mathematiker Henri Poincaré, daß das Verhalten *nichtlinearer Systeme* unvorhersehbar sein kann – auch wenn die physikalischen Gesetze bekannt sind, nach denen es sich entwickelt (siehe Seite 54).

Differentialgleichungen

Mathematische Gleichungen, mit denen dynamische Vorgänge wie das Schwingen eines *Pendels*, das Kreisen eines Planeten um die Sonne oder Veränderungen von Tierpopulationen über die Jahre hin zu beschreiben sind. Dabei wird eine Variable mit der Rate ihrer eigenen Veränderung, der sogenannten Ableitung verknüpft. So ist die momentane Auslenkung A eines Gewichtes, das auf- und abschwingend an einer Feder hängt, proportional zu ihrer eigenen zweiten Ableitung nach der Zeit: $cA = d^2A/dt^2$ (c ist eine Konstante). Die Lösungen von Differentialgleichungen können mathematische Funktionen sein. So ergibt die Lösung der „Feder-Gleichung“ die Bahn des Gewichtes: eine sinusförmige Schwingung $A = f(t) = B \sin(\Omega t)$ (B und Ω sind Konstanten). Lösungen mancher Differentialgleichungen lassen sich durch die mathematische Umkehroperation finden: durch „Integration“. Das ist jedoch die Ausnahme: Viele Lösungen sind nur durch Ausprobieren zu ermitteln, wobei auf bekannte Lösungen ähnlicher Probleme zurückgegriffen wird. Oft helfen Computerprogramme, die sich durch „numerische Integration“ schrittweise an das Ergebnis herantasten (siehe *Mathematik*).

Dimension

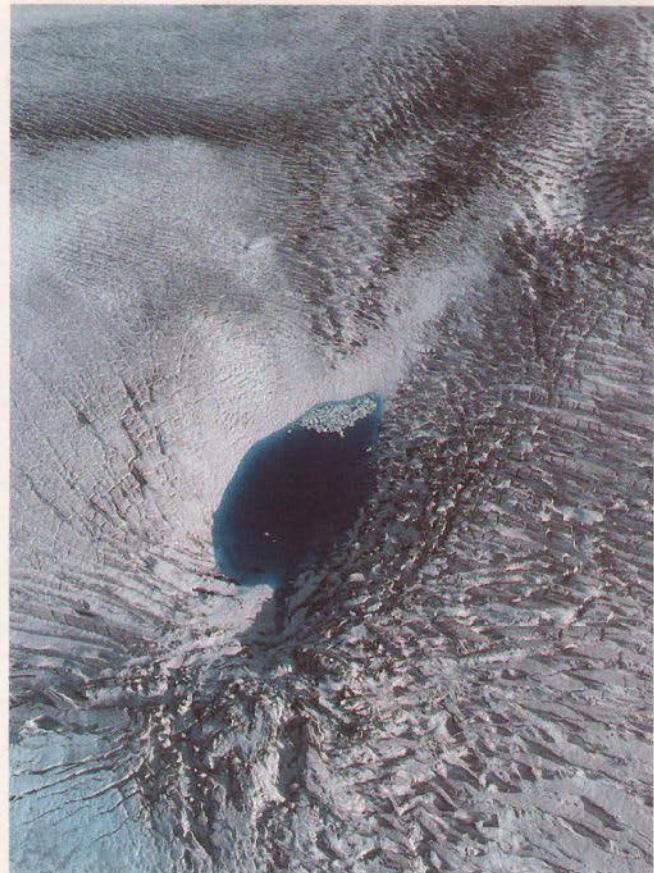
Zur allgemeinsten Beschreibung einer geometrischen Figur gehört die Angabe ihrer Dimension. Eine Strecke hat eine Dimension, ein Dreieck zwei, ein Würfel drei. *Fraktale* Gebilde haben, wie Benoit Mandelbrot herausarbeitete, meist gebrochene Dimensionen, etwa $D=1,45$. Hier ist die Dimensionszahl ein Maß dafür, wie „zerklüftet“ das Fraktal ist. Ein Beispiel für ein fraktales Gebilde ist die *Kochsche Schneeflockenkurve*: Nicht mehr recht Linie, aber noch nicht Fläche; sie besitzt eine Dimension von 1,26.. Auch *Attraktoren* wird eine Dimension zugeordnet. Sie ist ein Maß dafür, wie viele unabhängige Variablen das Verhalten des *Systems* bestimmen, das sich auf dem Attraktor bewegt.

Dissipative Systeme

(lat: dissipare = zerstreuen) siehe *Thermodynamik*

Eigenfrequenz

Pendel und andere schwingungsfähige *Systeme* schwingen, wenn sie weder gebremst noch gestört werden, periodisch mit ihrer Eigenfrequenz. Beim Pendel bestimmt nur seine Länge die Eigenfrequenz: Je länger es ist, desto langsamer schwingt es. Daher ist die Ganggenauigkeit von Standuhren durch Verschiebung des Pendelgewichtes regulierbar. Eine Schwingung kann chaotisch werden, wenn das System von außen dauernd mit einer anderen Frequenz „angestochen“ wird. Auch biologische Prozesse laufen mit ausgeprägter Eigenfrequenz ab („innere Uhr“) und können auf äußere Störungen mit chaotischen Schwankungen reagieren.



Nichtlineare Effekte bestimmen das Klima: isländischer Gletschersee

Eiszeiten

Vor etwa 14 000 Jahren begannen nicht nur im eiszeitlichen Nordeuropa und -amerika die Inlandgletscher zu schmelzen, sondern auch in Patagonien und in der Antarktis. Durch einen *nichtlinearen* Effekt, sagen Kli-

ma-Forscher, sei das gesamte System von Atmosphäre und Ozeanen plötzlich von einem Kaltzeit- in einen Warmzeit-Zustand „umgekippt“. Obwohl sich astronomische Ursachen wie periodische Veränderungen der Erdachsen-Neigung auf beide Erdhalbkugeln unterschiedlich auswirken, gab es auf dem ganzen Globus Veränderungen in die gleiche Richtung.

Eine Erklärung könnte sein, daß es zwei stabile Zustände für das Atmosphäre-Ozean-System gibt. Beim Umkippen verändern sich gleichzeitig die Klima-Indikatoren auf der ganzen Erde: Schneefallgrenzen, Vegetation, Staub- und Kohlendioxidgehalt (CO_2) der Luft. Die Zivilisation hat zum Beispiel die Konzentration des CO_2 und anderer Treibhausgase seit Beginn der industriellen Revolution ständig erhöht. Niemand kann ausschließen, daß menschliche Beeinflussung einen abrupten Sprung in einen völlig neuen Klima-Zustand auslöst.

Entropie

(griech: entrepein = verändern) siehe *Thermodynamik*

Feigenbaum-Szenario

und Feigenbaum-Zahlen siehe *Mathematik*



Computermodelle ersetzen unmögliche oder kostspielige Experimente: Sequenzen eines simulierten überschallschnellen Gasstroms

Fließgleichgewicht

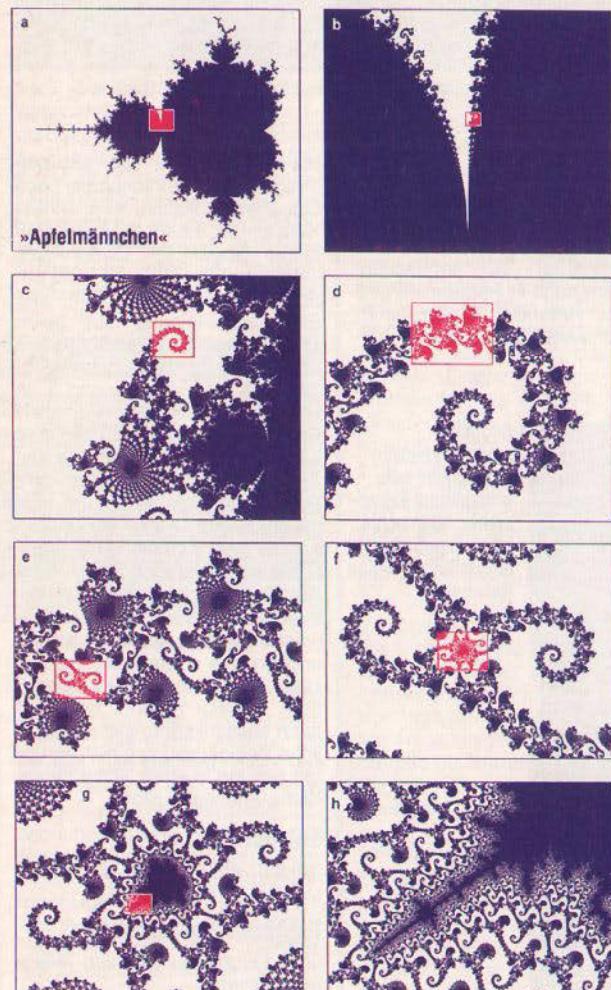
Ein vereinfachtes Bild dieses Zustandes liefern Traglufthallen: Nur wenn ständig genauso viel Luft und Wärme ins Innere gepumpt wird, wie verloren geht, halten die labilen Gebäude ihre Form. Ein Gleichgewicht ohne solchen dauernden Durchfluß ist „statisch“. Fließgleichgewichte sind „dynamisch“: Erst permanenter Materie- und Energiefluß macht sie möglich. Aber auch in Fließgleichgewichten können stabile Strukturen bestehen. Ein Beispiel ist die Kerzenflamme. Und auch Lebewesen befinden sich in Fließgleichgewichten. Reißt der Nahrungsfluß ab, geraten Lebewesen in ein „echtes“ Gleichgewicht: den Tod.

Fraktal

(lat: fractum = gebrochen). Die fraktale Geometrie ist eine der „Sprachen“, mit deren Hilfe sich Ordnungsprinzipien im Chaos zeigen lassen. Der Begriff wurde 1975 von Benoit Mandelbrot geprägt (siehe Seite 54). Beispiele für Objekte mit gebrochener Dimension, etwa 1,26 oder 0,63, sind die Kochsche Schneeflocke

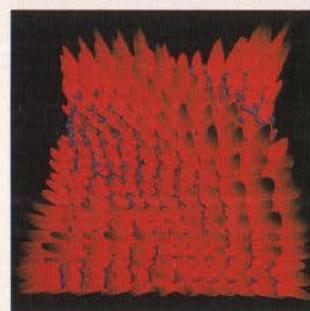
und die Cantor-Menge. Fraktale sind oft *selbstähnlich*: Ausschnitte einer Struktur gleichen ihr selbst. Ein Ast ähnelt dem ganzen Baum, ein Zweig dem Ast, die Veränderung im Blatt dem Zweig. Die meisten natürlichen Formen, wie Pflanzen, Wolken oder Gebirge haben im Unterschied zu geometrischen Gebilden wie Kegeln oder Kugeln fraktale Eigenschaften.

Anders als etwa die Begrenzungslinien eines Dreiecks oder eines Kreises sind die Ränder fraktaler Strukturen nicht glatt, sondern unendlich rauh – jede Vergrößerung zeigt wiederum neue Strukturen. Bekanntes Beispiel für ein Fraktal ist das *Apfelmännchen*. Auch viele *nichtlineare Systeme* verhalten sich fraktal: Beim Wetter zeigt etwa eine Kurve der Luftdruckschwankungen in jedem Zeitmaßstab wieder neue Schwankungen. Das *Feigenbaum-Szenario*, das für eine Gleichung den Weg ins Chaos beschreibt, ist fraktal aufgebaut, ebenso ein chaotischer Attraktor. Computerkünstler setzen heute Fraktale ein, um besonders natürlich wirkende Kunstlandschaften zu erzeugen.



Freiheitsgrad

Damit bezeichnen Naturwissenschaftler die Vielzahl unterschiedlicher Entwicklungsmöglichkeiten eines Systems. Ein bewegter Körper hat beispielsweise mindestens so viele Freiheitsgrade, wie ihm Raumrichtungen zugänglich sind: Grob gerechnet hat ein Clown auf dem Drahtseil einen Freiheitsgrad, eine Schnecke auf der Tischoberfläche hat zwei Freiheitsgrade, eine im Zimmer umherschwirrende Mücke dagegen drei (siehe auch *Phasenraum*).



Herzschlag ist leicht chaotisch

Herzflimmern

Chaotisches Verhalten des Herzmuskel, das zum „Sekundenherztod“ führen kann: Während sich beim normalen Schlag des Herzens die einzelnen Muskel-Fasern – gesteuert durch eine elektrische Erregungswelle, die über den ganzen Muskel läuft – koordiniert zusammenziehen, kontrahieren sie sich beim Herzflimmern regellos (siehe Seite 139). Das Herz zuckt plötzlich 200- bis 300mal pro Minute und kann kein Blut mehr in die Arterien pumpen. Mit Hilfe eines Stromstoßes gelingt es den Ärzten oft, das Herz wieder in den normalen Rhythmus zu bringen. Bei Tierversuchen glauben Mediziner entdeckt zu haben, daß sich das Chaos des Sekundenherztones über eine Periodenverdopplung (siehe *Mathematik*) ankündigt. Mit diesem Wissen hoffen sie, in Aufzeichnungen der Herzaktivität frühzeitig Anzeichen für drohendes Herzflimmern entdecken und Patienten retten zu können.

Impuls

In der klassischen Mechanik wird der Impuls eines bewegten Objekts als Produkt aus dessen Masse und Geschwindigkeit definiert. Ein 1000 Kilogramm schweres Auto, das mit 100 Kilometer pro Stunde fährt, hat einen Impuls von 100 000 Kilogramm mal Kilometer pro Stunde, oder – in der korrekten Maßeinheit – 27 778 kg · m/sec.

Gesellschaft Wo Soziologen fragen, wissen Physiker die Antwort

Ungebeten erteilen der Physiker und der Chemiker den Kollegen Sozialwissenschaftlern einen Rat. „Es gibt in den Naturwissenschaften eine ganze Literatur über chaotisches Verhalten“, empfiehlt der Stuttgarter Physik-Professor Hermann Haken, „und Wirtschaftsfachleute werden gut daran tun, sich mit dieser Problematik zu befassen.“ Und Ilya Prigogine, Chemie-Nobelpreisträger von 1977, beobachtet: „Die Ideen von Instabilität, von Fluktuationen dringen in die Sozialwissenschaften.“ Der Anspruch der beiden Naturwissenschaftler, die Begriffe und Methoden ihrer Disziplinen könnten auch auf die Gesellschaftsforschung übertragen werden, gründet sich auf einer generellen Einsicht: Menschliche Gesellschaften seien schließlich ebenfalls „*nichtlineare dynamische Systeme*“. Doch viele der so beglückten Soziologen, Ökonomen und anderen Sozialwissenschaftler empfinden diese Herausforderung eher als den unerwünschten Versuch, einen Brückenkopf auf ihrem Gebiet zu etablieren. Jedenfalls warnte Renate Mayntz, Direktorin am Kölner Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, im Herbst 1987 vor der Gefahr, „semantische Innovationen mit echtem Erkenntnisgewinn zu verwechseln“. Der Unwillen steigt noch, wenn es Naturwissenschaftler nicht nur bei Ratschlägen belassen, sondern auch Regeln verkünden. Zwei von Hakens Kollegen, Wolfgang Weidlich und Günter Haag, veröffentlichten

Iteration

(lat: iterare = wiederholen). Wiederholte Anwendung derselben Rechenvorschrift, wobei jedes Ergebnis der Rechnung wiederum als Ausgangswert dient (siehe *Apfelmännchen* und *Mathematik*).

Julia-Menge

Fraktale Menge von Zahlen, die eng mit der Mandelbrot-Menge (siehe *Apfelmännchen*) verknüpft ist. Der französische Mathematiker Gaston Julia hat sie



Panik ist ein »nichtlineares Phänomen«: Flugschau-Katastrophe in Ramstein 1988

ten 1983 ein Buch über „quantitative Soziologie“. Darin stellen sie das Modell einer Gesellschaft vor, in der zwei politische Meinungen miteinander im Wettstreit liegen, wobei menschliches Verhalten durch wenige „Tendenz-Parameter“ simuliert wird: Steigt etwa die „Anpassungsbereitschaft“ über einen bestimmten Wert, dann schlägt eine „liberale Gesellschaft“ in einen „totalitären Staat“ um. Mit dieser Deutung mathematischer Gleichungen haben sich die beiden Physiker weit von ihrem Fach entfernt.

Dennoch herrscht nicht nur Konfrontation zwischen den Natur- und Sozialwissenschaftlern. Renate Mayntz lässt zum Beispiel ihrer Warnung sogleich den Versuch folgen, das neue Konzept vom sprunghaften Übergang zwischen Organisationzuständen zu nutzen. Solche Diskontinuitäten im sozia-

len Bereich illustriert die Professorin mit einem Gedankenspiel über Ausbrechen von Panik in einer brennenden Diskothek: Einige „Angsthassen“ laufen sofort zur Tür, während die meisten Gäste gebremst durch eine Verhaltenschwelle – erst zu rennen anfangen, wenn sie mindestens 50 Leute zum Ausgang stürzen sehen. Ob Panik ausbricht, hängt demnach in besonderer Weise von der Zahl der „Angsthassen“ ab. Nur wenn es weniger als 50 sind, bewahrt die überwiegende Mehrheit der Gäste in der brenzligen Situation Ruhe und verlässt den Raum geordnet.

Positive Rückkopplung, Selbstverstärkung, empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen: Hermann Haken, der Erfinder des Begriffes „Synergetik“ (siehe Seite 175), wird seine Freude an dem soziologischen Gedankenspiel ha-

ben. Die Übernahme naturwissenschaftlicher Ansätze geht sogar noch einen entscheidenden Schritt weiter. Die sprunghafte Veränderung eines gesellschaftlichen Systems lasse sich, argumentiert Renate Mayntz, nur analysieren, wenn auch bekannt sei, worauf die vorherige Stabilität beruht habe: „Beides verweist aufeinander und lässt sich nur im Zusammenhang verstehen.“ Nichts anderes sagt der Ansatz der Naturwissenschaftler: Ordnung beruht auf bestimmten äußeren Bedingungen. Aber schon bei einer leichten Änderung dieser Parameter kann das System umkippen.

Solche Ideen locken auch Wirtschaftswissenschaftler. In der klassischen Ökonomie galt das Gesetz von Angebot und Nachfrage. Auf dem Markt setzt sich das beste Produkt zum besten Preis durch –

es gibt also nur eine stabile Lösung. Doch am Beispiel der Video-Recorder zeigt der amerikanische Ökonomie-Professor Brian Arthur von der Stanford University, daß dieses Gesetz nicht immer gilt: Zwar kamen die konkurrierenden VHS- und Beta-Systeme etwa zur selben Zeit auf den Markt – zu vergleichbaren Preisen und mit ähnlichen Bedienungskomforten. Aber schon ein kleiner, glücklicher Vorsprung reichte für den Sieg: Je mehr Geräte des VHS-Typs verkauft wurden, desto mehr Videotheken hatten die neuesten Kinofilme auf VHS-Kassetten, was wiederum die Attraktivität der VHS-Geräte erhöhte – eine positive Rückkopplung. Nach den gleichen Regeln hätte auch Beta gewinnen können, das viele Experten für technisch überlegen halten. Letztlich entschieden kleine Anfangsvorteile, die heute nicht mehr festzustellen sind, den Kampf zugunsten von VHS und nicht etwa die bessere Qualität.

Die Erkenntnis, daß nicht alle wirtschaftlichen Abläufe jeweils nur eine einzige mögliche Lösung haben, keimte – so Arthur – schon in den vierziger und fünfziger Jahren. Doch orthodoxe Ökonomen hätten solche Sicht der Dinge für unwissenschaftlich gehalten. Nach ihrer Vorstellung war in der Wirtschaft, ähnlich wie in der Newtonschen Mechanik, auf lange Sicht nur ein Gleichgewichtszustand möglich. Inzwischen lassen sich Soziologen und Ökonomen längst durch die Denkanstöße der Physiker, durch die Ideen der nichtlinearen Dynamik anregen.

Eine direkte Übertragung naturwissenschaftlicher Konzepte auf die Sozialwissenschaften würde allerdings, das geben auch die Physiker Weidlich und Haag zu, höchstens zu einer oberflächlichen Ähnlichkeit führen. Begriffe, Annahmen und Resultate mathematischer Modelle müssen hier, im Wortsinn, mit „wirklichem Leben“ gefüllt werden.

Christopher Schrader

Eine Julia-Menge, auf dem Monitor sichtbar gemacht

während des Ersten Weltkriegs als Kriegsverletzter in einem Lazarett beschrieben – ohne die heutigen Begriffe wie Fraktal zu kennen und ohne die Hilfe von Computersimulationen.

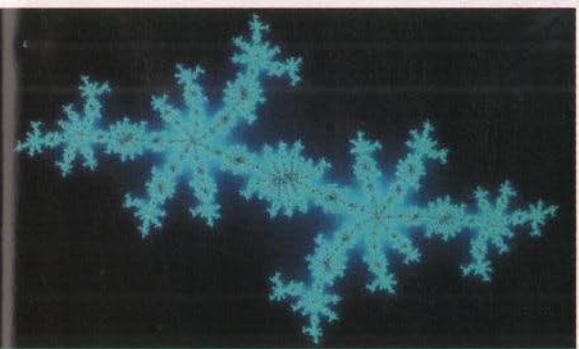
Kochsche Schneeflocke

Fraktales Gebilde, das nach einem einfachen Rezept entsteht: Bei einem gleichseitigen Dreieck wird auf das mittlere Drittel jeder Seite wieder ein gleichseitiges Dreieck gezeichnet, für das die gleiche Regel wieder gilt: So ent-



Eine Kochsche Schneeflocke entsteht

wickelt sich nach unendlich vielen Wiederholungen ein mathematisches Monster – ein schneeflockenähnliches Gebilde, das von einer unendlich langen Kurve umgrenzt wird (siehe Dimension).

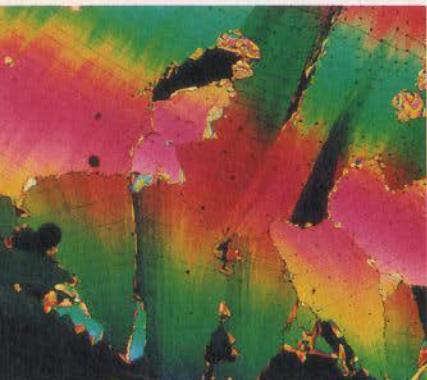


Komplexe Zahl

Komplexe Zahlen können die Lösung bestimmter mathematischer Probleme vereinfachen. Sie haben die Form $z = a + b \cdot i$ und bestehen aus zwei Komponenten: dem Realteil a und dem Imaginärteil $b \cdot i$, einem Vielfachen der „imaginären“ Zahl i . Die Zahl heißt imaginär, weil sie in der Realität keine Entsprechung hat. Denn sie ist definiert als das Ergebnis der „unerlaubten“ Rechenvorschrift „Ziehe die Wurzel aus minus 1“. Mit diesem Trick lassen sich etwa periodische Bewegungen mathematisch einfach formulieren. Komplexe Zahlen werden graphisch gewöhnlich als Punkt auf der zweidimensionalen „komplexen Ebene“ gezeigt (je eine Achse für Real- und für Imaginärteil). Das *Apfelmännchen* etwa ist eine Darstellung der Mandelbrot-Menge in der komplexen Ebene.

Kristalle

Salz, Sand, Diamanten und viele andere Formen unbelebter Materie kommen in der Natur als Kristalle vor. Ihre Bausteine, Atome und Moleküle, sind an einem gedachten räumlichen Gitter befestigt. Daher können aus den Or-



Kristalle in polarisiertem Licht

ten weniger Bausteine die Positionen aller anderen berechnet werden. Die chemischen Bindungen zwischen den Bausteinen geben Kristallen große Festigkeit. Bei vielen Kristallen ist die Symmetrie des Gitters auch an der äußeren Form zu erkennen, zum Beispiel beim Bergkristall.

Laminare Strömung

(lat: *lamina* = dünne Schicht). In einem sehr langsam fließenden Bach kann jeder laminare Strömungen beobachten: Das Wasser fließt ruhig, vorhersagbar und ohne Wirbel auch um Hindernisse herum. Was nicht zu sehen ist: Benachbarte Wasserteilchen bleiben einander nahe. Schnellerer Fluss erzeugt dagegen *Turbulenzen* (siehe Seite 60), in denen

Mathematik Wenn die Gleichungen verrückt spielen

Chaos – mit diesem Begriff arbeiten heute Wissenschaftler aller möglichen Fachrichtungen: Physiker und Mediziner, Soziologen und Wetterkundler, Biologen und Informatiker, Ökonomen und Ökologen, Chemiker und Astronomen. Die Phänomene, die sie mit dem Begriff beschreiben, sind so unterschiedlich wie die einzelnen Disziplinen; aber die Beschreibung erfolgt in der gleichen Sprache: der Mathematik.

Chaos ermöglichen nur nichtlineare Gleichungen – die überwältigende Mehrzahl aller denkbaren Gleichungen $y = f(x)$. f bezeichnet eine Rechenvorschrift, die nur die Variable x als Eingabe hat und die Variable y als Ergebnis produziert. Einfache Beispiele für nichtlineare Gleichungen sind höhere Potenzen von x , wie $y = x^2$, $y = x^3$ etc., oder trigonometrische Funktionen wie Sinus und Tangens. Lineare Gleichungen sind dagegen ziemlich langweilig, sie enthalten außer x nur Konstanten.

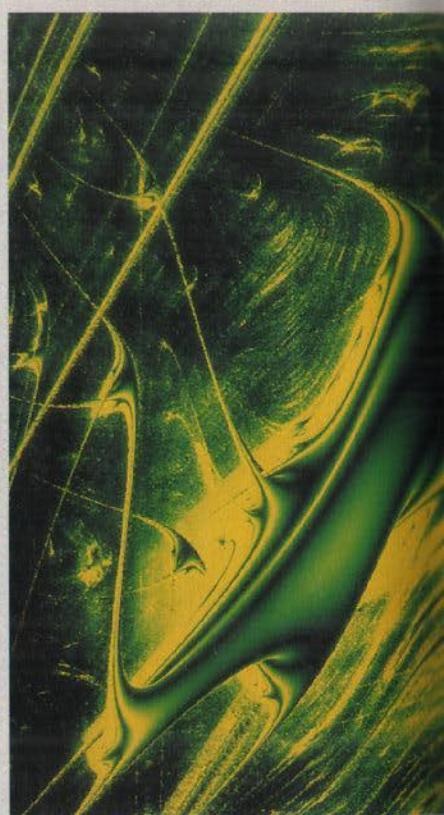
Viele Systeme lassen sich auf ihrem Weg durch die Zeit mit nur einer einzigen Funktion $f(x_t)$ beschreiben. Wenn der Index t den aktuellen Zeitpunkt kennzeichnet, dann entsteht der jeweils „aktuelle Wert“ x_t durch Rekursion: Die Rechenvorschrift wird erneut auf das Ergebnis der letzten Rechnung angewandt (siehe Beispiel). Und nur der aktuelle Wert x_t bestimmt – einen Zeitschritt später – das Ergebnis bei $t+1$: $x_{t+1} = f(x_t)$. Es liegt eine Rückkopplung vor: Die Veränderung, die sich mit dem nächsten Zeitschritt vollzieht, hängt vom aktuellen Wert ab.

Die logistische Gleichung $x_{t+1} = rx_t(1-x_t)$ erfüllt beide Bedingungen, sie ist eine „nichtlineare rekursive Glei-

chung“. Der Faktor $(1-x_t)$ kann zum Beispiel bei der Berechnung der Entwicklung einer Tierpopulation die begrenzte Versorgung mit Nahrung – die „Logistik“ – berücksichtigen. $(1-x_t)$ hält das Wachstum in Grenzen, weil dieser Term abnimmt, wenn x_t zunimmt. r kennzeichnet einen sogenannten *Kontroll-Parameter*. Weil x_t der Bequemlichkeit halber eine Zahl nur zwischen 0 und 1 sein soll, darf r nicht größer sein als 4. Der Weg ins Chaos ist bei der logistischen Gleichung besonders genau erforscht. Der Parameter r steuert die Entwicklung von x_t , wenn t sehr groß wird. In vielen Fällen wird x_t einem stationären Wert, einem Punktattraktor oder Fixpunkt F entgegenstreben, der nur von r abhängt – aber nicht vom Startwert x_0 . Ist r kleiner als 1, dann ist $F = 0$ der einzige Fixpunkt; mit anderen Worten: Eine Tierpopulation verhungert. Steigt r über 1, dann errechnet sich der Wert des Fixpunktes zu $F = 1 - 1/r$. Zum Beispiel erreicht x_t für $r = 2.7$ irgendwann den Wert 0.62963...

Überschreitet r die Grenze $r_1 = 3$ (siehe Bild „Feigenbaum-Szenario“), passiert etwas Erstaunliches: Der Wert x_t springt für alle Zeiten zwischen zwei festen Werten hin und her. Die erste Teilung – Bifurcation – ist aufgetreten. Wird r noch größer, nimmt der Abstand zwischen den beiden Fixpunkten langsam zu, bis bei $r_2 = 3.44865...$ auf einmal vier Fixpunkte auftreten. Bei $r_3 = 3.54413...$ sind es acht, bei $r_4 = 3.56445...$ sechzehn; allgemein sind es zwischen r_n und r_{n+1} 2^n Fixpunkte (n ist eine beliebige Zahl). Werden die jeweiligen Fixpunkt-Werte gegen r aufgetragen, so ergibt sich eine Art „liegender Baum“, dessen Äste sich in immer kürzeren Abständen aufspalten: die Bifurkationskaskade (siehe Feigenbaum-Szenario).

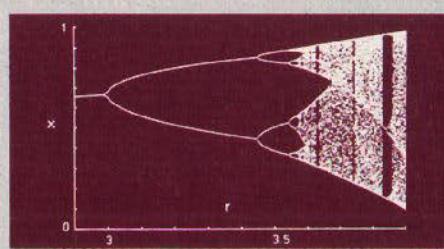
Bei $r = R = 3.56994...$ ist Schluß mit den seltsamen Ordnungszuständen, also auch mit der Vorhersagbarkeit. Von nun an herrscht Chaos: Der schöne Bifurkationsbaum zerfließt in ein regelloses Punktmuster. R ist der Grenzwert der r_n -Folge, wenn n unendlich groß wird – der Akkumulationspunkt. Ein Stück dahinter ist aus je-

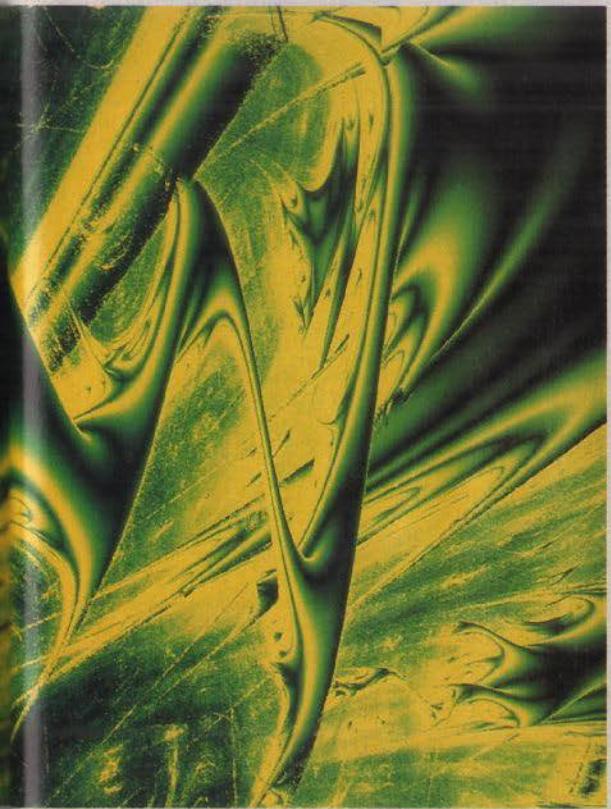


dem der beiden Äste, deren erste Gabelung bei $r = 3$ begonnen hatte, ein kontinuierliches Band geworden. Zunächst bleibt ein Rest Vorhersagbarkeit erhalten, weil immer abwechselnd ein x -Wert aus jedem der beiden Bänder dran ist; innerhalb des Bandes ist der Wert aber unvorhersagbar. Doch die Bänder werden breiter und verschmelzen zu einem einzigen, das bei $r = 4$ den ganzen Bereich von 0 bis 1 ausfüllt – das Chaos ist total, weil überhaupt keine Vorhersage mehr möglich ist. Von zwei ursprünglich „benachbarten“ Startwerten x_0 kann der eine eine zur Zeit t sehr groß, der andere sehr klein sein, und bei $t+1$ könnten sie wieder nahe beieinander liegen.

Der Weg ins Chaos verläuft nicht nur für die logistische Gleichung über die Bifurkationskaskade. Viele weitere nichtlineare Systeme zeigen das gleiche Verhalten; wichtig ist lediglich, daß ihre beherrschende Funktion $f(x)$ nur ein einziges „parabolisches“ Maximum hat. Die Werte des Kontrollparameters, bei denen Bifurkationen auftreten, folgen einem übergeordneten Gesetz: Der Abstand der Bifurkationen vom Akkumulationspunkt wird rasant kleiner, aber der Quotient zweier aufeinanderfolgender Abstände ist konstant. Die Bifurkationskaskade ist *selbstähnlich*. Wie

Feigenbaum-Szenario: Vergrößere „r“, und du landest im Chaos





Ein Computer-Bild aus dem Dortmunder Max-Planck-Institut für Ernährungsphysiologie zeigt, wie bizarre Ljapunow-Exponenten sich mit den Parametern der logistischen Gleichung verändern können

unendlich viele ineinander verschachtelte russische Puppen enthält das Feigenbaumdiagramm unendlich oft sich selbst. Die „Schachtel“-Vorschrift ist präzise: Bei der logistischen Gleichung gehen die kleineren Bilder aus den größeren hervor, indem diese waa- gerecht um $\delta = 4,69920\ldots$ und

senkrecht um $\alpha = 2,50290\ldots$ ge- staucht werden. δ und α sind universelle Konstanten, die sogenannten Feigenbaumzahlen, benannt nach dem US-Physiker Mitchell Feigenbaum (siehe Seite 54). Jetzt trägt der Rechenaufwand Früchte: Denn mit Hilfe der Feigenbaumzahlen sind Vorhersagen für

Jeder kann ins Chaos reisen

Zur Expedition ins Chaos brauchen wir keinen Computer, ein programmierbarer Taschenrechner reicht. Wir formen zunächst die logistische Gleichung

$$x_{t+1} = rx_t(1-x_t) \quad x_{t+1} = r(x_t - x_t^2)$$

um und füttern ihn damit. Dabei soll x_t zwischen 0 und 1 bleiben. Zunächst machen wir einen kleinen Spaziergang in „normalen“ Gefilden: Wir setzen $r = 2$, und beginnen mit irgendeinem Ausgangswert, etwa $x_0 = 0,4$. Dann folgt:

$$x_1 = 2(x_0 - x_0^2) = 2(0,4 - 0,4^2) = 0,48.$$

Nun weiter zum nächsten x -Wert:

$$x_2 = 2(x_1 - x_1^2) = 0,4992.$$

Der nächste Wert der Folge ist

$$x_3 \sim 0,4999, x_4 = 0,5$$

und dann wird es langweilig: Alle weiteren x -Werte – etwa x_{12} oder x_{351652} – sind exakt gleich 0,5, auch wenn wir mit anderen x -Wer-

ten beginnen, etwa $x_0 = 0,2$ oder $x_0 = 0,9$. Fixpunkt ist $F = 0,5$. Jetzt auf ins Chaos: Zum Start genügt eine kleine Veränderung unserer Gleichung. Stattd $r = 2$ setzen wir $r = 4$. Beginnen wir wieder mit $x_0 = 0,4$. Einsetzen in die Gleichung ergibt

$$x_1 = 0,96, x_2 = 0,1536, x_3 \sim 0,52003, x_4 \sim 0,99840, x_5 \sim 0,00641, x_6 \sim 0,02547.$$

Eine verrückte Folge: Solange wir auch rechnen – die x -Werte schwanken scheinbar ohne Regel zwischen 0 und 1. Und eine minimale Veränderung des Ausgangswertes, ein Beginn etwa mit $x_0' = 0,40001$, ergibt schon nach wenigen Schritten eine völlig andere, ebenfalls regellos schwankende Folge; nach sechs Schritten ist die Differenz schon 20mal so groß wie zu Beginn:

$$x_6' \sim 0,02526.$$

Mit einer einfachen Rechenvorschrift sind wir also mitten im „deterministischen Chaos“ gelandet.

den Weg ins Chaos möglich. Ohne die ursprüngliche Gleichung genau zu kennen, erlaubt die Beobachtung von nur zwei Bifurkationen r_n und r_{n+1} die Vorhersage aller weiteren Aufspaltungen, der Fixpunkte für jedes r und sogar des Punktes R , an dem das Chaos einsetzt.

Die Kenntnisse über den Weg ins Chaos können auch zur Analyse unbekannter Systeme benutzt werden. Denn bei der logistischen Gleichung und ihren „Verwandten“ kündigt sich das Chaos gewissermaßen an: „Periodenverdopplung“ ist das Zauberwort. Ein System hat die Periode 2, wenn es zwischen zwei Fixpunkten hin- und herspringt. Verdoppelt sich bei einer Erhöhung des Parameters r die Periode unendlich oft, führt der Weg ins Chaos. Für dessen Existenz gibt es auch ein sicheres Kriterium: Im Bereich des Chaos zwischen den Akkumulationspunkt und $r = 4$ fügen sich „Inseln der Stabilität“, wo wieder Fixpunkte existieren und neue Bifurkationen auftreten. Einige dieser Inseln haben die Grundperiode 3 – für Mathematiker ein sicheres Zeichen dafür, daß eine Veränderung von r das Chaos auslösen kann.

Verwickelter wird die Analyse, wenn während der Beobachtung keine regelmäßige Wiederholung von Meßwerten zu erkennen ist. Dann ist nicht zu entscheiden, ob eine extrem lange Periode vorliegt oder ob Chaos herrscht. Wenn die Rechenvorschrift $f(x)$ bekannt ist, dann hilft die Berechnung des „Ljapunow-Exponenten“ weiter. Er ist ein Maß dafür, wie weit sich eng benachbarte x -Werte bei einem Rechenschritt voneinander entfernen können. Bei negativen Exponenten rücken sie zusammen, und das System ist periodisch. Bei positiven streben die Nachbarn exponentiell auseinander – Chaos. Dabei geht Information verloren, nämlich das „Wissen“ über die Nachbarschaft. Wo das Feigenbaum-Szenario versagt, hilft immer noch der Ljapunow-Exponent – auch dann, wenn das System nicht über Periodenverdopplung, sondern einen anderen Weg ins Chaos gelangt.

Die Ergebnisse der mathematischen Chaos-Forschung haben großen Einfluß auf viele Wissenschaften. Sie erklären Beobachtungen, die vorher nicht deutbar waren oder als „zu kompliziert“ galten. Erst durch die mathematische Formulierung, die gemeinsame Sprache der empirischen Wissenschaften, werden solche Phänomene verständlich und über die Disziplinen hinweg vergleichbar. Mathematik erhellt die scheinbare Reglosigkeit des Chaos. Chr. Schrader

das *deterministische Chaos* herrscht: Nachbarschaften zerfallen und entstehen scheinbar regellos neu. Die Bahn der Wasserstrudel ist langfristig nicht mehr berechenbar.

Laplacescher Dämon

Fiktives Wesen, erdacht von dem französischen Mathematiker Pierre Simon de Laplace im Jah-



Pierre Simon de Laplace (1749–1827)

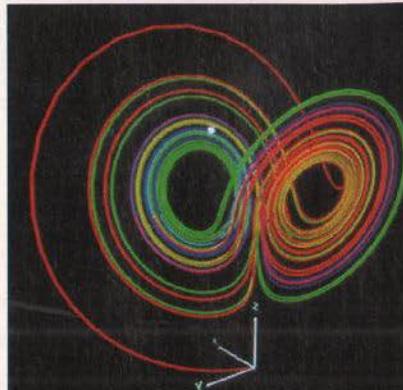
re 1776 als radikale Konsequenz des *Determinismus*. Der Dämon braucht nur zu einer Zeit Ort und Geschwindigkeit aller Materieteile im Universum genau zu kennen, um – als allwissender Historiker und Prophet zugleich – Vergangenheit und Zukunft berechnen zu können. Der freie Willen wäre damit eine Illusion.

Logistische Gleichung

siehe *Mathematik*

Lorenz-Attraktor

Chaos-Attraktor, benannt nach seinem Entdecker, dem US-Meteorologen Edward Lorenz, und berühmt wegen seiner an ein Eulengesicht erinnernden Form.



Die Bahn schließt sich nie: Lorenz-Attraktor

Mandelbrot-Menge

siehe *Apfelmännchen*

Neuronale Netze

Neuronen sind Hirnzellen. Über ihre Fortsätze, die Signale empfangenden Dendriten und die Signale weiterleitenden Axone,

Von Raum und Zeit

Suche nach der Dunklen Materie

«Stellen Sie sich bitte vor, wie Sie Ihren Sessel verlassen und mit mir zu den äußersten Grenzen menschlicher Erkenntnis und Vorstellungskraft reisen. Unser Ziel ist nichts Geringeres als das Wissen um Ursprung, Struktur und Schicksal des Universums.» Der Physikprofessor James Trefil führt in das wohl bedeutendste Forschungsprojekt der modernen Astrophysik: die Suche nach der geheimnisvollen Dunklen Materie, die mehr als 90 Prozent des Alls ausmacht. Spannend und in witziger, bildhafter Sprache hält James Trefil den Leser genauso in Atem wie Stephen Hawkings Bestseller «Eine kurze Geschichte der Zeit».



James Trefil
Fünf Gründe, warum es die Welt nicht geben kann
Die Astrophysik der Dunklen Materie
Deutsch von Hubert Mania
256 S. inkl. Abb.
Geb. DM 36,-



Wie starben die Saurier?

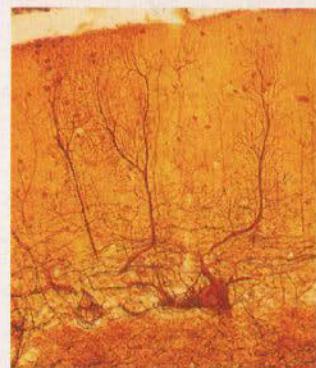
Alle 26 Millionen Jahre kam es zu einem massenhaften Tier- und Pflanzensterben. Die Ursache dafür vermuten Wissenschaftler in einem unsichtbaren Begleitstern des Sonnensystems, dem «Nemesis». Der Paläontologe David M. Raup erläutert allgemeinverständlich die Debatte um die «Nemesis-Hypothese» und stellt den aktuellen Forschungsstand der wissenschaftlichen Auseinandersetzung dar.

David M. Raup
Der schwarze Stern
Wie die Saurier starben
Der Streit um die Nemesis-Hypothese
Deutsch von Kurt Neff
288 S. Geb. DM 36,-

Alles über die neuen Bücher im Frühjahr in der Rowohlt Revue. Kostenlos in Ihrer Buchhandlung.

Rowohlt

sind diese Nervenzellen im Gehirn zu einem verzweigten Netzwerk verschaltet. Es enthält alles Wissen und alle Erfahrung seines Besitzers und entsteht durch *Selbstorganisation*: Neuronale Verbindungen verstärken sich oder schwächen sich ab – je nach Aufgabe des Netzes, von der die einzelnen Nervenzellen nichts „wissen“. Die Arbeitsprinzipien der neuronalen Netze des Gehirns unterscheiden sich prinzipiell von denen herkömmlicher Computer.



Nervenzellen der Kleinhirnrinde

Newton-Mechanik

Die universellen Gesetze der Bewegung, die der englische Mathematiker, Physiker und Astronom Isaac Newton 1687 in seinem Buch „Philosophiae naturalis principia mathematica“ veröffentlichte, begründeten die klassische Mechanik. Newtons Gesetze beschreiben Zusammenhänge zwischen Größen wie Kraft, Beschleunigung und Geschwindigkeit. Sie ermöglichen beispielsweise, die Zeit zu berechnen, die ein fallender Stein bis zum Aufprall braucht (siehe *Determinismus*).

Nichtlineare Systeme

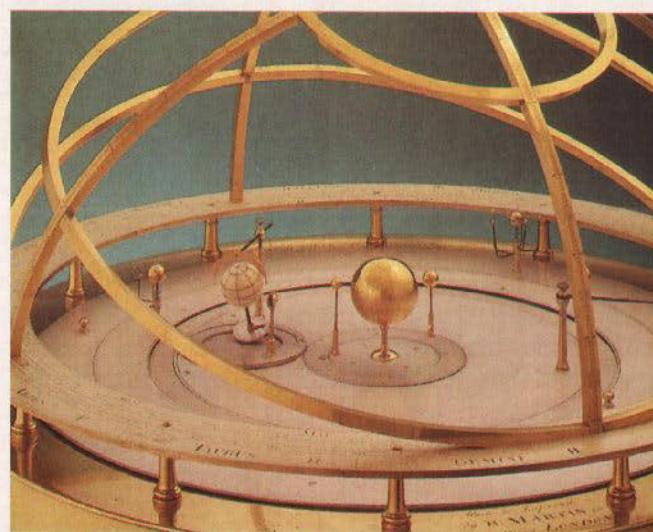
Systeme, deren Entwicklung durch nichtlineare Gleichungen beschreibbar sind. Wenn die Elemente eines Systems nichtlinear wechselwirken, kann das Ganze mehr sein als die Summe seiner Teile. Nur in nichtlinearen Systemen ist *Chaos* möglich (siehe *Mathematik*).

Ordnung

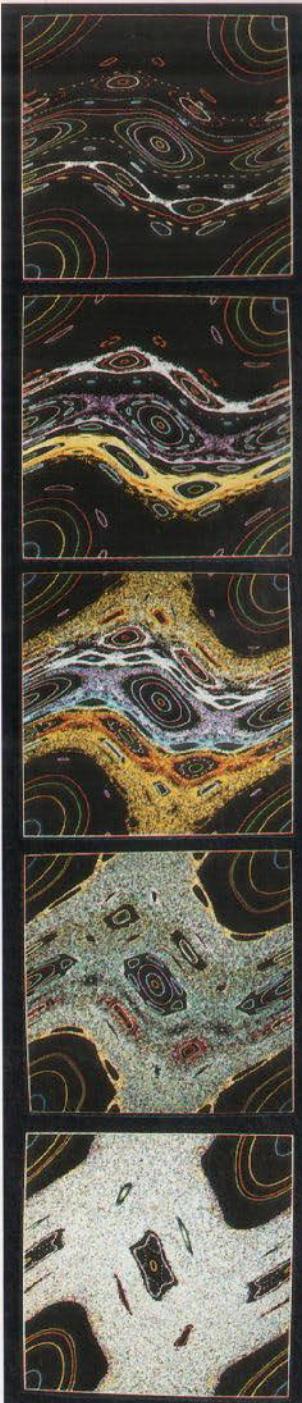
Kristalle sind geordnet, und auch der menschliche Körper weist Ordnung auf. Doch diese Ordnungen haben völlig unterschiedliche Qualitäten: Die regelmäßige Struktur des Kristalls entsteht, wenn sich jedes Atom in eine durch das Kristallgitter vorgegebene Position gegenüber seinen Nachbarn einfügt. Der menschliche Körper ist dagegen eine komplexe „dynamische Struktur“ im *Fließgleichgewicht*. Während sich beim Kristall aus einer kleinen „Elementarzelle“ der Aufbau des Ganzen ermitteln lässt, verrät die Kenntnis einer Zelle oder auch eines Organs sehr wenig über den Rest etwa des menschlichen Körpers: Die geordnete Struktur sorgt für Qualitäten des Ganzen, welche die Einzelteile nicht besitzen (siehe *Synergetik*).

Paradigma

In seinem Buch „Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen“ bezeichnet der Wissenschaftshistoriker Thomas Kuhn den theoretischen Hintergrund und die praktischen Gewohnheiten einer Wissenschaft als „Paradigma“. In Zeiten „normaler“ Entwicklung einer Wissenschaft ist das Paradigma unbezweifelte Basis aller Forschungsaktivität. So war die *Newton-Mechanik* lange Zeit das bestimmende Paradigma der Physik. Grundlegende Zweifel



Ein mechanisches Planetarium führt Newtons Weltsystem vor



Poincaré-Schnitte zeigen »Inseln der Ordnung« im Inneren chaotischer Attraktoren

am Paradigma können zu einer „Krise“ der Wissenschaft führen, seine Ablösung durch ein anderes heißt „wissenschaftliche Revolution“. Ein Beispiel ist die teilweise Ablösung der Newton-Mechanik durch Relativitätstheorie und Quantenmechanik. Auch das Aufkommen der Chaos-Forschung hat viele Merkmale eines solchen Paradigmen-Wechsels (siehe Seite 28).

Parameter

Die Beweglichkeit einer Feder wird mitbestimmt von ihrer Festigkeit und Elastizität. Solche physikalischen Eigenschaften liegen in der Bewegungsgleichung für jede Feder den Wert einer „Federkonstanten“ fest. Die Federkonstante ist ein typischer „Parameter“: eine im Prinzip veränderliche Größe, die für ein bestimmtes Federpendel aber einen ganz konkreten Wert einnimmt. Parameter kommen in den Systemgleichungen zunächst als Konstanten vor. Wie stark die Veränderung eines Parameters ein System beeinflussen kann, zeigt die *logistische Gleichung*, die je nach Systembedingungen konstante, periodische oder chaotische Lösungen hat (siehe *Mathematik*).

Pendel

gelten als überaus zuverlässig: Sie steuern bekanntlich viele mechanische Uhren. Sie schwingen aber nur dann gleichmäßig, wenn eine sinnreiche Mechanik sie im richtigen Takt anstößt und so die nötige Energie zuführt, um die Reibungsverluste wettzumachen. Ganz anders kann es sich verhalten, wenn das Pendel plötzlich nicht mehr mit seiner *Eigenfrequenz*, sondern im „falschen“ Takt angetrieben wird. Mal kommt die Energiezufuhr im richtigen Moment: Das Pendel schlägt weiter aus. Dann wieder geht der Stoß gegen seine Laufrichtung: Es wird kräftig gebremst. Dadurch kann die Bewegung völlig unvorhersehbar werden: Phasen unruhigen Zuckens treten ebenso auf wie wilde Überschläge – mithin *Chaos*.

Phasenraum

Im dreidimensionalen Raum lässt sich die Spitze eines frei in alle Richtungen beweglichen *Pendels* genau lokalisieren: Drei Angaben – „Koordinaten“ – reichen dazu aus. Um neben dem jeweiligen Ort auch die Bewegung der Pendelspitze zu erfassen, benötigt ein Physiker drei weitere Koordinaten: für die Komponenten der Geschwindigkeit beziehungsweise der *Impulse* in die verschiedenen Raumrichtungen. Alle sechs Achsen spannen den „Phasenraum“ auf. Allgemein sind für den Phasenraum doppelt so viele Koordinaten nötig, wie das System *Freiheitsgrade* hat. So hat ein Uhrenpendel nur einen Freiheitsgrad (den Auslenkwinkel): Der Phasenraum ist zweidimensional. Phasenräume erlauben es, Bewegungen graphisch darzustellen, etwa die gleichmäßige Pendelbewegung als Kreis. *Attraktoren* sind stets Bahnen im Phasenraum.

Phasenübergang

Wer durchnässt im Platzregen steht, erlebt die Auswirkung eines Phasenübergangs: Wasserdampf ist in die flüssige Phase übergetreten. Allgemein wird jeder neue Ordnungszustand als Phasenübergang bezeichnet: Ein schmelzender Eiszwölfe verliert seine kristalline *Ordnung*, ein nichtmagnetischer Stoff wird plötzlich magnetisch, supraleitende Stoffe verlieren ihren elektrischen Widerstand.

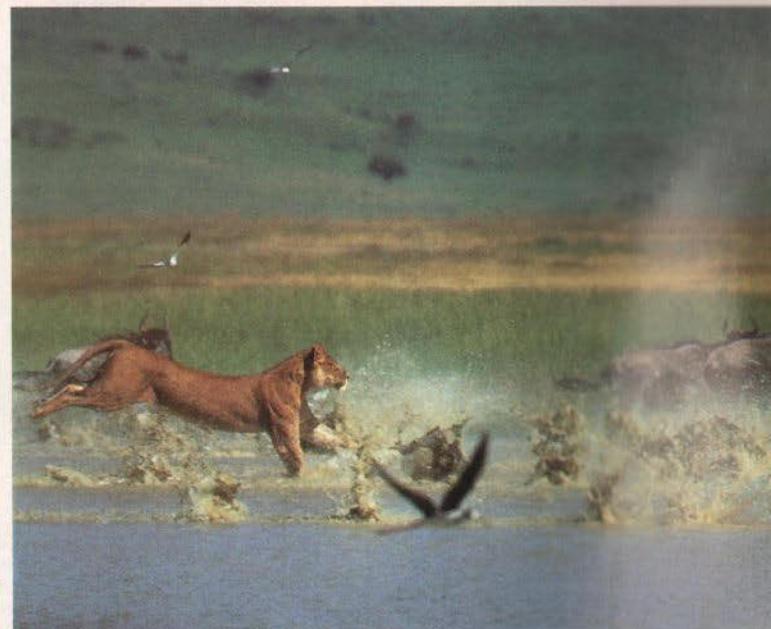
Poincaré-Schnitt

Ein nach dem französischen Mathematiker Henri Poincaré (siehe Seite 54) benannter Schnitt durch einen *Attraktor*. Er wird zum Beispiel sichtbar, wenn ein Computer alle Schnittpunkte eines drei-

dimensionalen Systems berechnet. Wiederkehr eines solch komplizierten Musters jedoch extrem unwahrscheinlich.

Populationsdynamik

Ein Begriff aus der Erkenntnis, daß die Bevölkerungszahlen von Lebewesen meistens schwanken. Mathematische Modelle suchen das Auf und Ab von Tier- und Pflanzenpopulationen zu simulieren. Wichtige populationsdynamische Modelle sind neben der *logistischen Gleichung* mathematisch simulierte Räuber-Beute-Systeme (siehe Seite 88). Bevölkerungszahlen können sich auch chaotisch entwickeln: Die Arten in Ökosystemen sind auf vielfältige Weise *nichtlinear* und rückgekoppelt miteinander vernetzt (siehe *Mathematik*).



Ein verwickeltes Wechselspiel: Räuber und Beute

dimensionalen Attraktors mit einer Ebene berechnet.

Poincarésche Wiederkehr

Dieser Begriff aus der statistischen Mechanik bezeichnet das erneute Durchlaufen eines Zustandes, in dem sich ein dynamisches System bereits einmal befunden hat. In der auf Seite 190 gezeigten Sequenz hat der US-Forscher James Crutchfield das Portrait des französischen Mathematikers Henri Poincaré immer wieder durch eine Abbildung verändert, die auf der diagonalen Streckung basiert. Nach 18 Transformationsschritten ist eine fast einiformig grüne Fläche entstanden, die scheinbar keine Information mehr enthält. Doch mit der 241sten Umwandlung erscheint das Bild erneut. In wirkli-

Quantenchaos

Viele physikalische Systeme, deren Entwicklung den Gesetzen der *Newton-Mechanik* gehorcht, können sich chaotisch verhalten – etwa *Pendel*. Derzeit gibt es noch keine endgültige Klarheit darüber, ob auch in Systemen atomarer Größe *Chaos* vorkommt. Dort gelten nicht Newtons Gesetze, sondern die der Quantenmechanik, der Lehre vom Verhalten kleinstter physikalischer Einheiten („Quanten“).

Quasiperiodisch

heißt eine Bewegung, die sich aus mehreren periodischen Teilbewegungen zusammensetzt, ohne selbst periodisch zu sein. Quasiperiodisch tritt auf, wenn die Perioden der einzelnen Bewegungen kein gemeinsames Viel-

tiptel. A busy girl's best friend. //



An mehreren Orten zugleich sein. Kann man das? Zum Beispiel im Büro und trotzdem zu Hause keinen wichtigen Anruf verpassen? Kein Problem, tiptel ist ein schöner Beweis dafür, wie hilfreich modernste Technologie sein kann. Dieser Anrufbeantworter kann nicht nur alles, was Sie von einem guten Gerät erwarten. Er hat einiges, das ihn zum echten Spitzengerät macht. Und das zu einem überraschend günstigen Preis.

Sie benötigen z.B. zunächst keine Fernabfrage? Gut. Bei tiptel können Sie problemlos Ihre Meinung ändern. Sie können die Fernabfrage einfach selbst nachrüsten. Zweites Komfort-Erlebnis: Per eingebauter Sprache sagt Ihnen tiptel während der Fernabfrage die Anzahl der Gespräche und die Abhördauer. Dazu Datum und Uhrzeit der Aufzeichnung.

tiptel kommt aus gutem Hause und ist Qualität made in Germany mit 12 Monaten Garantie. Noch mehr gute Gründe für eine enge Freundschaft erfahren Sie in führenden Fachgeschäften oder direkt bei Tiptel Electronic GmbH, Halskestraße 14, D-4030 Ratingen, Telefon 02102/45010.

A 02 22/894 2774 B 011/52 36 47 CH 01/7 32 15 11

E 03/232 9167 NL 030/43 44 84

tiptel®

Der Anrufbeantworter

faches haben, so daß eine exakte *Poincarésche Wiederkehr* ausgeschlossen ist.

Rauschen

nennen Wissenschaftler eine Abfolge zufälliger Schwankungen, wie sie etwa aus einem Radio zu hören sind, wenn kein Sender eingestellt ist. Sogenanntes "weißes Rauschen" ist völlig unregelmäßig: Es enthält sämtliche Schallfrequenzen. In der Natur kommt das sogenannte $1/f$ -Rauschen am häufigsten vor, das mehr tiefe als hohe Frequenzen enthält: In den Aufzeichnungen altägyptischer Gelehrter, die den Wasserstand des Nils über lange Zeit beobachteten, zeigt sich Rauschen ebenso wie in der Verkehrsdichte auf Stadtautobahnen. Auch wohlklingende Musik ist – statistisch gesehen – nichts anderes als $1/f$ -Rauschen.

Rekursionsgleichungen

modellieren Rückkopplungen mathematisch (siehe *Mathematik*).

Schmetterlingseffekt

Sinnbild für die Unvorhersagbarkeit des Wettergeschehens. Da die Atmosphäre ein *nichtlineares System* ist, können auch kleinste Störungen (siehe *Anfangsbedingungen*) den Wetterverlauf grundlegend ändern: Die Luftwirbel, die ein Schmetterling in China verursacht, können Auslöser eines Hurrikans sein, der Wochen später über der Karibik tobt (siehe Seite 132).

Ränder wiederum kleine Apfelmännchen enthalten – bis ins Unendliche. An Selbstähnlichkeit scheitert auch der Versuch, die exakte Länge von Küstenlinien zu bestimmen: Auf jedem feineren Kartenausschnitt werden immer neue Buchten und Vorsprünge sichtbar, deren Kanten zu der Länge addiert werden müssen – die Länge wächst mit schrumpfendem Maßstab im Prinzip gegen unendlich.

Selbstorganisation

Woher kennt eine Nervenzelle im wachsenden Gehirn des Embryos ihr Ziel? Woher ein Atom seinen Platz im *Kristall*? Die Antwort lautet jeweils: Sie wissen es nicht – und sie müssen es nicht wissen. Kristalle, aber auch kom-

eigenen Bestimmungsort zu kennen.

Ein solcher selbstorganisierter Prozeß ist die Evolution des Lebens (siehe Seite 72): Atome haben sich zu Molekülen zusammengefunden, einige Moleküle haben unter bestimmten Umweltbedingungen einen Vorteil gegenüber anderen Molekülen gewonnen. Aus Molekülen wurden Zellen, aus Einzellern Mehrzeller; schließlich entstanden Pflanzen, Tiere und Menschen. Am Ende des Prozesses kann eine globale *Ordnung* stehen, auch wenn keines der Bauteile vorher von deren Vorteilen „gewußt“ hat.

Selektion

Systeme, deren Bestandteile rückgekoppelt aufeinander wirken, können aus einem Angebot mehrerer Entwicklungsmöglichkeiten die gegenwärtig „beste“ auswählen – „selektieren“ – und durch Ausscheidung anderer, weniger tauglicher Varianten stabilisieren. In der Natur hat dieses Wechselspiel zwischen – genetisch bedingter – Vielfalt und Auslese die *Selbstorganisation* des Lebens ermöglicht (siehe S. 72).

Skalen-Invarianz

bezeichnet die *Selbstähnlichkeit* in *fraktalen* Gebilden auf verschiedenen Zeitskalen oder räumlichen Maßstäben. Dabei liegt die Betonung auf einer exakten Symmetrie gegenüber dem angelegten Maßstab. Beispiel für



»Selbstähnliche« Formen sind häufig – in der Kunst wie in der Natur: Die Rückseite eines kelischen Spiegels zeigt kleine Formen in den großen. Gleiches gilt für die Küste von Eng-



Selbstähnlichkeit

ist eine Eigenschaft, die viele *Fraktale* zeigen: Verschieden starke Vergrößerungen der Objekte ähneln einander. So werden am Rand der *Apfelmännchen*-Figur unter einer Lupe wieder Apfelmännchen sichtbar, deren

komplexe Strukturen in physikalischen, biologischen oder sozialen Systemen können ohne expliziten Bauplan entstehen – durch Selbstorganisation: Weder muß ein übergeordneter Schöpfer die Einzelteile zusammenfügen, noch brauchen diese ihren

Skalen-Invarianz ist ein unendliches Obertonspektrum (siehe Seite 142).

Sprachliche Synergetik

Bezeichnung für den Versuch, mit Methoden der *Synergetik* auch menschliche Sprache als

Synergetik **Wenn**

Ordnung entsteht, sind versklavte Teilchen gemeinsam stark

Mit der Geburt beginnt die Versklavung des Kindes. So drastisch benennt Hermann Haken das Erlernen von Sprache. „Die Sprache eines Volkes“, erklärt der Stuttgarter Physikprofessor, „ist ein Ordnungsparameter“ – etwas, das Kleinkinder zur Anpassung zwingt oder, in der Sprache seiner Wissenschaft, „versklavt“. Ende der sechziger Jahre hat Haken die „Synergetik“ erfunden – die mathematische Lehre vom Zusammenwirken. Sie liefert im nachhinein die Grundlage für ein Weltbild, das die Geheimnisse der Natur nicht in kleinsten Teilchen sucht, sondern in Ganzheiten, im Zusammenhang zwischen den Teilen. Vertreter dieses „Holismus“ betonen, daß sich die Welt in einer Hierarchie wachsender Komplexität organisiert, etwa nach dem Muster: Atome bilden Moleküle bilden Membranen bilden Zellen bilden Organe bilden Menschen bilden Gesellschaften. Durch das Zusammenwirken von Elementen entsteht auf jeder Stufe der Hierarchie ein Ganzes, das seinen grundlegenden Elementen gegenüber neue Qualitäten besitzt: Es ist mehr als nur die Summe seiner Teile.

Diese Vorstellung haben Hermann Haken und seine Mitarbeiter in der Synergetik mathematisch konkretisiert: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile, wenn die Beziehungen zwischen diesen *nichtlinearen* sind; Nichtlinearität ist auch eine Voraussetzung für das *deterministische Chaos*. Außerdem beschäftigt sich die Synergetik nur mit „offenen“ Wirkungszusammenhängen, wie sie vor allem der belgische Nobelpreisträger Ilya Prigogine erforscht hat. Solche Systeme nehmen fortwährend Materie oder Energie – bei Lebewesen: Nahrung – auf und halten sich in einem *Fließgleichgewicht*. Sie können Strukturen oder Muster bilden, also sich „selbst organisieren“.

Der Gedanke, daß selbstorganisierende Systeme mathematisch faßbare Gemeinsamkeiten haben, kam Haken durch seine Arbeit an der Theorie des Lasers: Die energetisch angeregten Atome oder Moleküle in einem solchen längli-

chen Kasten senden Photonen – Lichtquanten – in alle möglichen Richtungen. Nur ein kleiner Anteil des Lichts wird durch eingebaute Spiegel wieder ins Innere reflektiert: In Richtung der Laser-Achse leuchtet es zurück auf Moleküle,

umgekehrt wissen, wie aus dem Durcheinander Muster entstehen können. Der Weg, der hinab ins deterministische Chaos führt, steigt in Gegenrichtung daraus empor. Meilensteine säumen ihn, auf denen immer eine Größe, ein Parameter steht, der den Zustand des ganzen Wirkungszusammenhangs festlegt. Er heißt für die Moleküle im Laser „Zufuhr von Energie“ und für Kleinkinder „Zufuhr von Sprache“. Je komplexer ein System, desto größer wird freilich die Anzahl der Parameter, die es regieren. In einem Lebewesen und erst recht in der menschlichen Gesellschaft existieren Ordnung und Chaos nebeneinander. Und Cha-

System zu erkennen, das sich selbst organisiert. Manche Linguisten betrachten etwa Veränderungen von Wörtern oder Lauten als Ergebnisse von Mutationsprozessen. Das Verb „geben“ lautete im Mittelhochdeutschen noch „geban“, und das frühneuhochdeutsche „güetec“ wurde zum heutigen „gütig“ abgeschliffen. Ursache sind nach Ansicht der Sprachsynergetiker individuelle Variationen der Aussprache. Von den entstehenden Varianten überleben ihrer Theorie zufolge am Ende nur solche, die für den Sprecher den geringsten Aufwand bedeuten und gleichzeitig dem Zuhörer höchste Verständlichkeit garantieren (siehe *Selektion*).

Stochastisch

werden rein zufällige Schwankungen genannt.

System

Physikalische Systeme sind etwa *Pendel*, bewegte Körper im Raum oder Wasserströmungen. Ein System besteht aus Elementen, die durch Wechselwirkungen miteinander verbunden sind. *Lineare* werden Systeme genannt, deren Entwicklung durch lineare *Differentialgleichungen* beschrieben werden können. *Nichtlineare Systeme* gehorchen nichtlinearen Gleichungen. Nur in nichtlinearen Systemen ist *Chaos* möglich (siehe *Mathematik*).

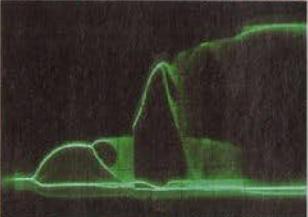
Thermodynamik

Gebiet der Physik, das physikalische *Systeme* mit vielen Elementen und vielen *Freiheitsgraden* untersucht. Was in einem Topf Wasser auf dem Herd geschieht, läßt sich nicht mehr mit den mechanischen Gesetzen für jedes einzelne Wasser-Molekül beschreiben. Statt dessen benutzt die Thermodynamik sogenannte „Zustandsgrößen“ wie Temperatur, Druck, Volumen und „Entropie“, um das Gesamtsystem zu charakterisieren. Entropie kann als Maß der Unordnung verstanden werden.

Der „Zweite Hauptsatz der Thermodynamik“ besagt, daß in einem „geschlossenen System“ die Entropie nicht abnehmen kann. Ein Alltagsbeispiel: Es ist sehr unwahrscheinlich, daß sich die Scherben einer zerbrochenen Glasscheibe durch Schütteln von selbst wieder zusammensetzen. Aus Unordnung kann – ohne Nachhilfe von außen – keine *Ordnung* entstehen. Geordnete Strukturen können nur in offenen „dissipativen“ Systemen entstehen: Sie nehmen Energie und meist auch Materie aus der Umgebung auf und geben sie in anderer Form wieder ab (siehe *Fließgleichgewicht*). Der Ener-



Der Westen als »Ordner« des Ostens? Öffnung der Mauer



Ordnung und Chaos beim Laser

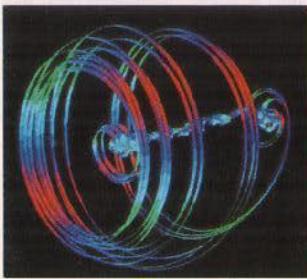
die durch Energiezufuhr von außen immer wieder angeregt werden. Sie strahlen nun – von den auftreffenden Photonen zur „stimulierten Emission“ animiert – selbst parallel zur Achse, und zwar gewissermaßen im Takt mit den sie anregenden Lichtquanten. So kann eine Licht-Lawine losbrechen – der Laserstrahl.

Allerdings strahlt ein Laser nur, wenn von außen schnell genug Energie zufließt, um immer wieder genügend Moleküle anzuregen. Erst wenn dieser Zufluß eine bestimmte Marke überschreitet, „versklaven“ die im Gleichtakt schwingenden Lichtwellen als „Ordner“ die einzelnen Moleküle – verdammen sie dazu, immer nur in einer Raumrichtung und im Takt mit allen anderen gleichgeschaltet zu oszillieren: „Aus Chaos“, sagt Hermann Haken, „entsteht Ordnung.“

Chaosforscher und Synergetiker arbeiten auf dem gleichen Gebiet – sie untersuchen nichtlineare Systeme. Die einen interessieren sich für das Zerbrechen von Ordnung, den Fall ins Chaos. Die anderen wollen

Barnabas Thwaites

giefuß durch ein dissipatives System hält dieses in einem Zustand weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht. Ein Lebewesen kann sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befinden – solange es lebt.



Turbulenz-Studie im Rechner

Turbulenz

„Turbulente Strömung ist ein komplexes, nichtlineares, chaotisches Geschehen“, schreibt der Marburger Physiker Siegfried Großmann über die mehr oder weniger chaotischen Verwirbelungen.

gen, die etwa in der Rauchfahne einer Zigarette entstehen. Wie aber, fragt er, kann man ihre „selbstähnliche Vielskaligkeit verstehen und quantitativ berechnen?“

Wie Turbulenz entsteht, ist ein altes Problem der Physik. In den fünfziger Jahren hatten Strömungswissenschaftler weitgehend die Theorie des russischen Physikers Lew Landau akzeptiert, wonach Turbulenz durch konkurrierende, miteinander unvereinbare Wellenmuster entsteht. Später bestätigte sich jedoch die Behauptung von David Ruelle und Floris Takens, daß Turbulenzen chaotische Strömungen sind. Sie lassen sich, wie Siegfried Großmann kürzlich skizzierte, mit Hilfe des Konzepts der *Skalen-Invarianz* auch mathematisch korrekt beschreiben (siehe Seite 60).

Unschärfe-Relation

Werner Heisenberg formulierte im Jahre 1927 sein berühmtes Prinzip, demzufolge Ort und Geschwindigkeit eines jeden Kör-

pers grundsätzlich nicht gleichzeitig beliebig genau gemessen werden können. Dieser Effekt ist in makroskopischen Systemen vernachlässigbar klein, spielt jedoch eine wichtige Rolle im mikroskopischen Bereich: Wollte man die Geschwindigkeit eines im Zimmer umherschwirrenden Heliumatoms auf ein Prozent genau messen, so wäre die Ungenauigkeit der gleichzeitigen Ortsmessung neun Milliardstelmeter – 90mal größer als der Durchmesser des Atoms.

Vorhersagbarkeit

siehe *Determinismus*

Wolken

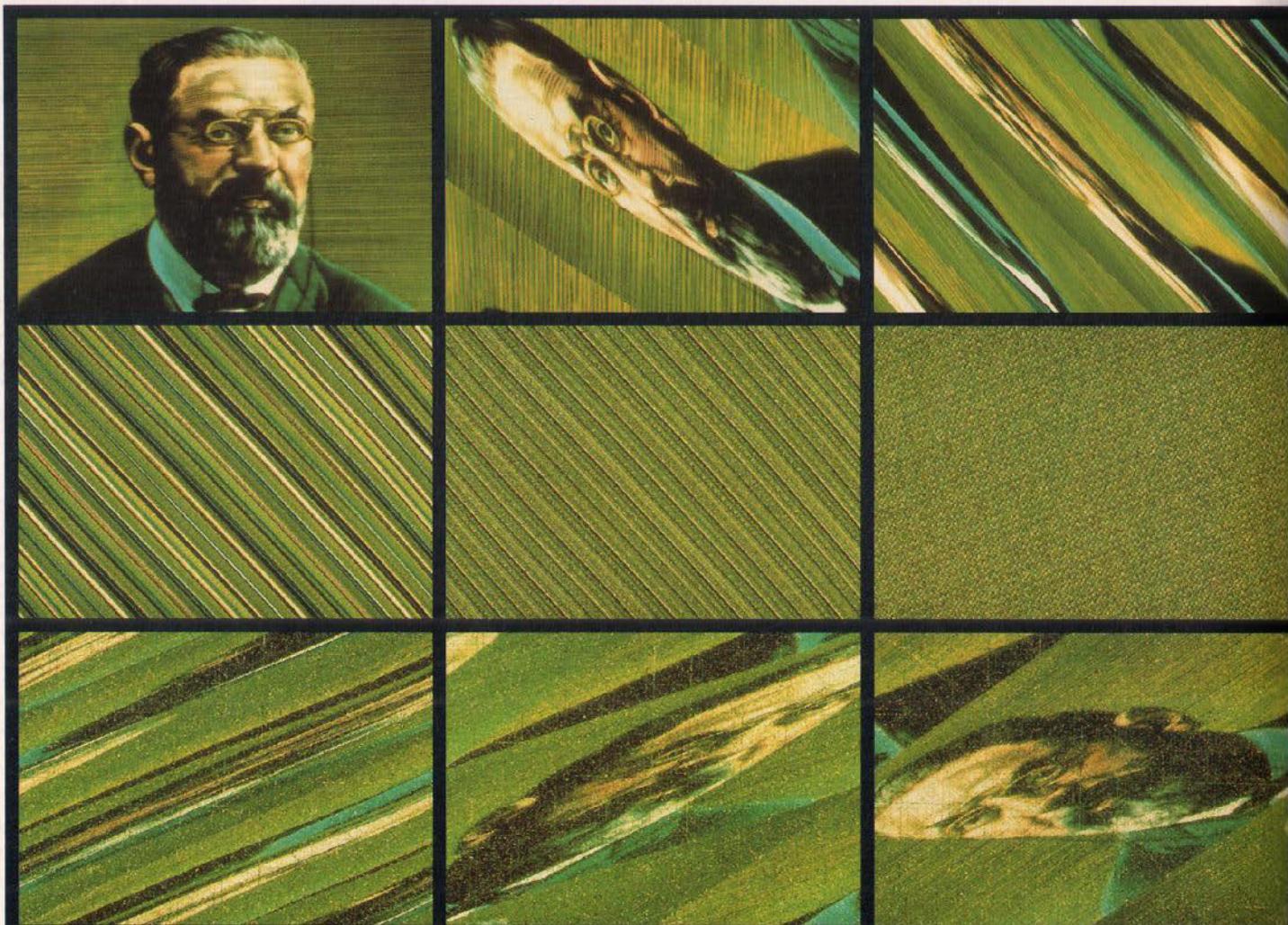
Wasserdampf-Wolken, Staub-Wolken aus Vulkaneruptionen oder Atompilze sind nach Meinung von Benoit Mandelbrot sämtlich *Fraktale*. Die Geometrie der wabernden Gebilde regt die Phantasie an: In den vorüberziehenden Wolkensetzen erkennen wir Gnome, wilde Tiere und was immer wir sehen wollen.



Wolkenfelder im Satellitenbild

Zelluläre Automaten

Methode der Computersimulation von komplexen Systemen. Eine geometrische Fläche oder ein Körper wird in identische „Zellen“ aufgeteilt, deren Zustand und Entwicklung vom Geschehen in den Nachbarzellen abhängt. Ein populäres Programm dieser Art ist das „Game of Life“, das auf einem Gittermuster ge-

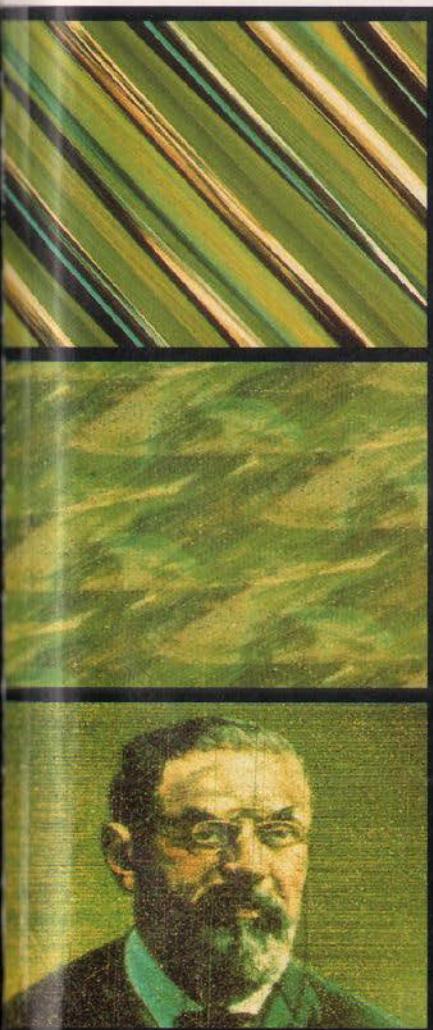


spielt werden kann: Ausgefüllte Quadrate auf dem Bildschirm symbolisieren „Lebewesen“. Einfache Regeln legen die Anzahl von Nachbarn fest, bei denen ein Lebewesen an Einsamkeit oder Überbevölkerung „stirbt“, einfach „überlebt“ oder neu „geboren“ wird. Die Wechselwirkung zwischen den „Lebewesen“ erzeugt im Programmablauf komplexes Verhalten – stabile „Dörfer“, rotierende „Reihen“, plötzliche „Bevölkerungsexplosionen“ und schlagartiges „Austerben“.

Zufall

Zufällige Vorgänge lassen sich prinzipiell nicht vorausberechnen, während für *deterministisches Chaos* wenigstens kurzfristige Vorhersagen möglich sind. Oft ist es schwer zu entscheiden, ob echter Zufall vorliegt. So gibt es Glücksspielautomaten mit elektronisch gespeicherten Listen von „Zufallszahlen“, die sämtliche Spielergebnisse vorherbestimmen. □

Henri Poincaré (1854–1912) kehrt aus dem Chaos diagonaler Streckungen wieder: nicht ganz der gleiche, aber doch sich selbst ähnlich (siehe auch Seite 187)



LITERATUR

Übersichten

Friedrich Cramer: „Chaos und Ordnung. Die komplexe Struktur des Lebendigen“; Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1989. **Paul Davies:** „Prinzip Chaos. Die neue Ordnung des Kosmos“; C. Bertelsmann, München 1988. **Werner Ebeling:** „Chaos – Ordnung – Information“; Verlag Harri Deutsch, Frankfurt 1989. **James Gleick:** „Chaos – die Ordnung des Universums“; Droemer Knaur, München 1988. **Hermann Haken:** „Information and Self-Organization“; Springer, Berlin Heidelberg 1988. **Arun V. Holden (Hrsg.):** „Chaos“; Princeton University Press, 1986. **Bernd-Olaf Küppers (Hrsg.):** „Ordnung aus dem Chaos. Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution des Lebens“; Piper, München 1987. **Ilya Prigogine, Isabelle Stengers:** „Order out of Chaos. Man's New Dialogue With Nature“; Bantam, New York 1984. **Spektrum der Wissenschaft:** „Chaos und Fraktale“; Reihe Verständliche Forschung, Heidelberg 1989. **Steirischer Herbst:** „Chaos“; Graz 1989. **Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, 115. Versammlung, Freiburg i. Br. 1988:** „Ordnung und Chaos in der unbelebten und belebten Natur“; Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1989.

Astronomie

Gerhard Börner: „The Early Universe“; Springer, Berlin Heidelberg 1988. **Reinhard Breuer:** „Die Pfeile der Zeit. Über das Fundamentale in der Natur“; Ullstein, Frankfurt 1987. **Reinhard Breuer:** „Mensch und Kosmos. Expedition an die Grenzen von Raum und Zeit“; Buch von GEO, Hamburg 1990. **John Briggs, S. David Peat:** „Turbulenz im Kosmos“; Hanser, München Herbst 1990. **Iain Nicolson, Patrick Moore:** „Das Universum“; Mosaik, München 1987. **Philip und Phylis Morrison, Studio Charles und Ray Eames:** „Zehn-Hoch – Dimensionen zwischen Quarks und Galaxien“; Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1984.

Biologie/Evolution

John Tyler Bonner: „The Evolution of Complexity By Means of Natural Selection“; Princeton University Press, 1988. **Leo W. Buss:** „The Evolution of Individuality“; Princeton University Press, 1987. **Gerald M. Edelman:** „Topobiology“; Basic Books, New York 1988. **Manfred Eigen:** „Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie“; Piper, München 1987. **Leon Glass, Michael C. Mackey:** „From Clocks to Chaos. The Rhythms of Life“; Princeton University Press, 1988. **Stephen J. Gould:** „Der Daumen des Panda. Betrachtungen zur Naturgeschichte“; Birkhäuser, Basel 1987. **Hermann Haken, Maria Haken-Krell:** „Entstehung von biologischer Information und Ordnung“; Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1989. **Humberto R. Maturana, Francisco J. Varela:** „Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens – wie wir die Welt durch unsere Wahrnehmung erschaffen“; Scherz, München 1987. **D'Arcy Thompson:** „Über

Wachstum und Form“; Suhrkamp, Frankfurt 1983.

Fraktale

Benoit B. Mandelbrot: „Die fraktale Geometrie der Natur“; Birkhäuser, Basel 1987. **Heinz-Otto Peitgen, Peter H. Richter:** „The Beauty of Fractals“; Springer, Berlin Heidelberg 1986. **Heinz-Otto Peitgen, Dietmar Saupe (Hrsg.):** „The Science of Fractal Images“; Springer, Berlin Heidelberg 1988.

Gehirn

William F. Allmann: „Menschliches Denken, Künstliche Intelligenz“; Droemer Knaur, München 1990. **Gerald M. Edelman:** „Neural Darwinism. The Theory of Neuronal Group Selection“; Basic Books, New York 1987. **Ernst Pöppel (Hrsg.):** „Gehirn und Bewußtsein“; VCH, Weinheim 1989. **Christine A. Skarda, Walter J. Freeman:** „How brains make Chaos in order to make sense of the world“ in: „Behavioral and Brain Sciences, Band 10, Nr. 2, Juni 1987“; Cambridge University Press, New York 1987.

Physik/Mathematik

Gert Eilenberger: „Komplexität“ in: „Mannheimer Forum 89/90“; Piper, München 1990. **Henning Genz:** „Symmetrie. Bauplan der Natur“; Piper, München 1987. **Hermann Haken:** „Synergetics. An Introduction“; Springer, Berlin Heidelberg 1978. **Heinz-Georg Schuster:** „Deterministic Chaos. An Introduction“; VCH, Weinheim 1989.

Sozial- und Wirtschaftswissenschaften

Walter L. Bühl: „Krisentheorien. Politik, Wirtschaft und Gesellschaft im Übergang“; Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1988. **John Kenneth Galbraith:** „The Great Crash 1929“; Houghton Mifflin Company, Boston 1988. **Niklas Luhmann:** „Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie“; Suhrkamp, Frankfurt 1984. **Niklas Luhmann:** „Die Wirtschaft der Gesellschaft“; Suhrkamp, Frankfurt 1988.

Weltbild/Philosophie

Jürgen Audretsch, Klaus Mainzer (Hrsg.): „Vom Anfang der Welt – Wissenschaft, Philosophie, Religion, Mythos“; Beck, München 1989. **Manfred Eigen, Ruthild Winkler:** „Das Spiel. Naturgesetze steuern den Zufall“; Piper, München 1975. **Alfred Gierer:** „Die Physik, das Leben und die Seele“; Piper, München 1988. **Bernd-Olaf Küppers:** „Der Ursprung biologischer Information“; Piper, Neuauflage Herbst 1990. **Grégoire Nicolis, Ilya Prigogine:** „Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften“; Piper, München 1987. **Ilya Prigogine:** „Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften“; Piper, München 1979. **Rupert Riedl:** „Biologie der Erkenntnis. Die stammbeschichtlichen Grundlagen der Vernunft“; dtv, München 1988.

SUCHT



Nicht nur Schmerzen

unterdrückt der Extrakt aus Mohnpflanzen – er treibt auch, aufbereitet als Opium oder Heroin – Menschen in zerstörerische Abhängigkeit. Alkohol hebt die Stimmung – und vernebelt den Alltag. Raffinierte neurochemische Verfahren zeigen, was dabei im Gehirn passiert

Seit je versuchen Menschen, der Realität im Rausch zu entfliehen. Versuche, Rauschmittel zu bannen, blieben meist erfolglos. Heute setzen Verbrecher-Kartelle mit »harten« Drogen Milliarden um und sind wirtschaftliche und politische Macht-

faktoren. Große gesundheitliche und soziale Probleme werden auch von Drogen verursacht, die als legale Genussmittel gelten – von Alkohol und Nikotin. Süchtig ist auch, wer über sein Vermögen arbeitet oder spielt, wer die Vielfalt des Lebens einem einzigen Lustgewinn opfert. Ist Suchtanfälligkeit ein individueller Defekt oder unser aller biologisches Erbe? Wissenschaftler unterschiedlichster Disziplinen sind dabei, ihre Hypothesen zur Suchtentstehung auf einen Nenner zu bringen

Fotovermerke nach Seiten. Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts, o. = oben, m. = Mitte, u. = unten

Titel

M. Oshima & T. Yoshimi/Electrotechnical Laboratory/MIT – N. Miki/Newton

Seite 4:

Georg Gerster: o.; Michael Freeman/ANA: m. l. o.; Jean-Luc Manaud/Enguerrand: m. l. u.; H. Jürgens, H.-O. Peitgen, D. Saupe/Universität Bremen: u.; Wolfgang Volz/Bilderberg: o. und u.; Yann Arthus-Bertrand: m. r. o.; P. Dayanandan/Photo Researchers: m. r.

Seite 5: Raghbir Singh: o.; Thomas Mayfield: m.; Peter Ginter: u. l.; Philippe Plailly: u. r.

SELBST ORGANISIERT SICH DIE WELT

John Reader 6/7; H. Jürgens, H.-O. Peitgen, D. Saupe/Universität Bremen: 6 o.; Jan Riehoff: 8/9; Folger Shakespeare Library, Washington: 8 o.; Robert B. Wilhelmsen & Team/NCSA/U. of Illinois: 10/11; Georg Gerster: 12/13, 23 u.; Steven Fuller: 12 o.; Kraft/Explorer: 12 u.; Mario Markus, Benno Hess/ MPI für Ernährungsphysiologie: 14/15 Carsten Peter: 14 u.; Cotton Coulson/ Woodfin Camp/Focus: 16/17; S. C. Müller, Th. Plessier, B. Hess/ MPI für Ernährungsphysiologie: 17 o.; Christopher Newbert: 18/19; Tommaso Toffoli, Norman Margoliash/MIT: 19 o.; T. Toffoli, N. Margoliash/T. Pantagis/MIT: 19 u.; J. Hurban: 20/21; James Kilkelly/Focus: 21 u.; Sandia National Laboratories: 22/23; Paul Meakin/DuPont Inc.: 23 o.; Richard F. Voss/IBM Watson Research Center: 24/25; Pixar: 25 u.

WENN DAS GANZE MEHR IST ...

W. Volz/Bilderberg: 28

EIN ORDENTLICHES CHAOS

Astrophoto: 32/33; National Solar Observatory: 34/35; Erich Lessing: 36; NASA: 36 u. (JPL); 45, 46, 53 u. l.; George Lange/Discover: 37; „Zehn-Hoch“/P. & P. Morrison-Ch. & R. Eames/Spektrum der Wissenschaft: 38–43; M. Norman/NCSA & J. Burns, M. Sulkanen/U. of New Mexico: 44; Joan Centrella/Drexel Univ.; 47; Science Photo Ltd: 48 u.; Adrian L. Melott/U. of Kansas & NCSA: 48/49; G. J. F. van Heijst & J. B. Flir/Rijksuniversiteit Utrecht: 50/51; C. W. Leong, J. M. Ottino/U. of Massachusetts: 52/53 o. (6); Ronald E. Taam/Lick Observatory: 52 u. (3); Yoav Levy/Phototake: 53 m. r., 55 o. r.; R. Wood/Discover: 54 o. r.; Archiv f. Kunst u. Geschichte: 54 u.; James Crutchfield: 55 o. l.; Courtesy I. Prigogine: 55 m. r.; Courtesy B. Mandelbrot/IBM: 55 m. l.; W. Coupon: 55 u.; D. Hobill/M. Bajuk/NCSA: 56/57 o.; C. Grebogi, E. Ott, F. Varosi & J. A. Yorke/U. of Maryland: 56/57 u.; David Griffeath/U. of Wisconsin-Madison: 58/59; Kevin Fleming: 60 o. l.; Lawrence Berkeley Lab/SPL/Focus: 60 o. r.; Peter Ginter: 60 u.

DER KREATIVE PFEIL

Mitsuki Iwago Photo Office: 63; E. Muybridge: 62

DAS SCHÖPFERISCHE SPIEL

R. & S. Michaud: 64, 68/69 o., 70 u.; Pepita Seth/Pugmarks: 85; Metropolitan Museum of Art/Lehmann Collection: 66; David Gillison/Peter Arnold: 67; Dilip Mehta/Contact/Focus: 68 u.; Brigitte Eller/Photo Researchers: 77 o.

IM ANFANG WAR DER HYPERZYKLUS

Wolfgang Volz/Bilderberg: 72–86

WENN RÄUBER OPFER IHRER BEUTE WERDEN

Mitsuki Iwago Photo Office: 88/89; Photo Researchers: 90/91 (Lowell Gorgia), 92 l. (Alvin Staffan); Yann Arthus-Bertrand: 92/93, 94/95; Mario Markus & Benno Hess/ MPI, Dortmund: 94 l.

DER GEZÄHMTE ZUFALL

Manfred Kage: 98/99; Ruhde/G+J Syndication: 99 r.; L. Lee Rue III/Photo Researchers: 100/101; Heinz Teufel: 100 o.; Peter Arnold Inc: 100 m., 110 u. und u. (D. Caviglino), 103 u. l. (K. Schäfer); Frans Lanting/Minden Pictures: 100 u.; D. Fowler, J. Hanan, P. Prusinkiewicz/U. of Regina, Canada: 101 u.; Jacana: 102/103 (Varin-Visage), 102 u. r. (J. Soler); Bruce Coleman Ltd: 102 u. (P. Davy), 103 u. r. (H. Reinhard); Christopher Newbert: 104/105, 116/117; Clifford A. Pickover/IBM Watson Research Center: 104 u.; Lennart Nilsson/Bonnier Fakta: 106 o.; SPL/Focus: 107 o. (J. Burgess), 107 u.; (A. Winfree), 108 o. (G. Murti); W. Volz/Bilderberg: 108 u.; Carsten Pe-

ter: 110/111; Charles M. Vest, Y. Xu/U. of Michigan: 112 u.; P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, J. Hanan/Regina, Canada: 113 u.; Ch. Arntz: 115; J. A. Kaandorp/U. of Amsterdam: 116 o.

KANN DAS HIRN DAS CHAOS BÄNDIGEN?

Manfred Kage: 118, 121; J. B. Mandel/ SPL/Focus: 119; Neuroscience Institute/Rockefeller U.: 120; Wolfgang Volz/Bilderberg: 122

EXPEDITION INS REICH DER FRAKTALE

H. Jürgens, H.-O. Peitgen, D. Saupe/Universität Bremen: 124/125 (aus „Science of Fractal Images“/Springer-Verlag), 126–129, 130/131 („The Beauty of Fractals“/Springer-Verlag), 146

J. Wieschmann: 132 l.; Peter Ginter: r.; ECMWF: 133; NASA/Source/Photo Researchers: 134

Alain Tannenbaum/SYGMa: 136

Winfree/SPL/Focus: 137 o.; MPI für Ernährungsphysiologie, Dortmund: 1

(S. C. Müller, Th. Plessier, B. Hess): 1

(M. Markus, S. C. Müller, Th. Plessier, B. Hess): 138 u. (S. C. Müller, Th. Plessier, B. Hess): 140 m. (M. Markus, B. Hess): 141

Lennart Nilsson/Bonnier Fakta: 140 u.; A. gel/U. of Pennsylvania: 141 o.; M. K. Voss/SPL/Focus: 145; Wolfgang Volz/Bilderberg: 146 r., 151

DIE UNVERNORDIGE GESELLSCHAFT

Yuri Ivanov: 152/153; Peter Mayfield: 154/155; Thomas Höpker/Annemann: 156/157; Steve Lehmann/SPL/Focus: 158/159; H. Müller-Erlberg: 160; Georg Gerster: 161

RÜSTEN BIS DAS CHAOS HERRSCHT

Robert McCall/Discover: 162/163; Gottfried Mayer-Kress/Los Alamos National Lab: 163 o. r.

CHAOS REGIERT DIE WELT

Thomas Mayfield: 164–167, 170; Holger Scheibe: 168/169

GLOSSAR

A. Ehrhard: 176 u.; C. A. Pickover: 176 Aus „Computers, Pattern, Chaos and Beauty“ St. Martin's Press: 178 u. (L. Grebogi, E. Ott, F. Varosi, J. A. Yorke/U. of Maryland): 178/179; MPI für Ernährungsphysiologie, Dortmund: 179 (C. Grebogi, Th. Plessier, B. Hess): 184/185 (M. Markus, B. Hess): B. B. Photo Researchers: 179 r. (L. Hurban): 180 o.; Peter Arnold Inc.: 180/181 (H. Winkler/Los Alamos): 186 o. (L. sin): 187 l. (J. B. Kadrik/DCSD): G. Gerster: 181 o.; G. Mayer-Kress: 182 o.; H. Jürgens, H.-O. Peitgen/ D. Saupe/Universität Bremen: 182 o.; M. McNamee/Sipa-Press: 183 o.; W. Voss/IBM Watson Research Center: 184 o.; M. McNamee/Sipa-Press: 184; J. H. Kuhn/NIDA: 185 o.; D. Hobill, M. Ge, D. Simkins/NCSA: 185 u.; C. A. Cowley Coll. of Historical Scientific Instruments, Harvard U.: 186 u.; Mitsuki Iwago Photo Office: 187 r.; Enrich Lessing: 188 m.; Eric Bouvet/Gamma: 189; Pierre Glorieux/Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne, Lille: 189 u.; T. M. Clarendon Lab/U. of Oxford: 190; NASA/Courtesy K. W. Kelly, Aus „Heimatplanet“, Zweitausendeins: 191; r. James P. Crutchfield/UC Berkeley: 190/191

SEITE 192: Ph. J. Griffiths/Magnus: o.; A. Reiser/Bilderberg: u.; Kuhn/NIDA, Baltimore: u.

ZEICHNUNGEN/ILLUSTRATIONEN

Sidney Harris: 3; Holger Everling: 190; Wissenschaft: 96 („Computerwell“ 1988), 112 o. (Mai 88); Arthur C. C. Liu: 134, 136, 142, 175, 177; SPL/Focus: 135 (A. Dudzinski), 139 o. (G. H. Wolfgang Gerok/Universität Freiburg): 139 u.; Gunther Edelmann: Grafik: 188 u.

uren
nkie-
U of
eson:
dam:

ories/
ances
ter J.

Uni-
The
inger
beauty
m. I.;
132
ence
I. u.;
J. A.
f. Er-
37 u.
, 198
sser,
Ples-
0/141
nnart
Sie-
kolyk/
ilder-

Frey:
Ha-
n/Vi-
sner:

ions:
s Ala-

0-73;

IBM.
and
2); C.
ke/U.
mäh-
o. (W.
, 180
less),
rake/
urban:
u. (K.
Les-
Georg
I. Ba-
tgen.
u. I.;
R.F.
183
Bett-
Wel-
route-
instru-
Iwa-
sing:
9 o.;
etros-
fullin/
o. I.;
,Der
90 o.
keley:

m/Fo-
M. J.

EN
GEO
n der
Kurz-
Win-
Ren-
ocus:
djid);
ung.
GEO

