

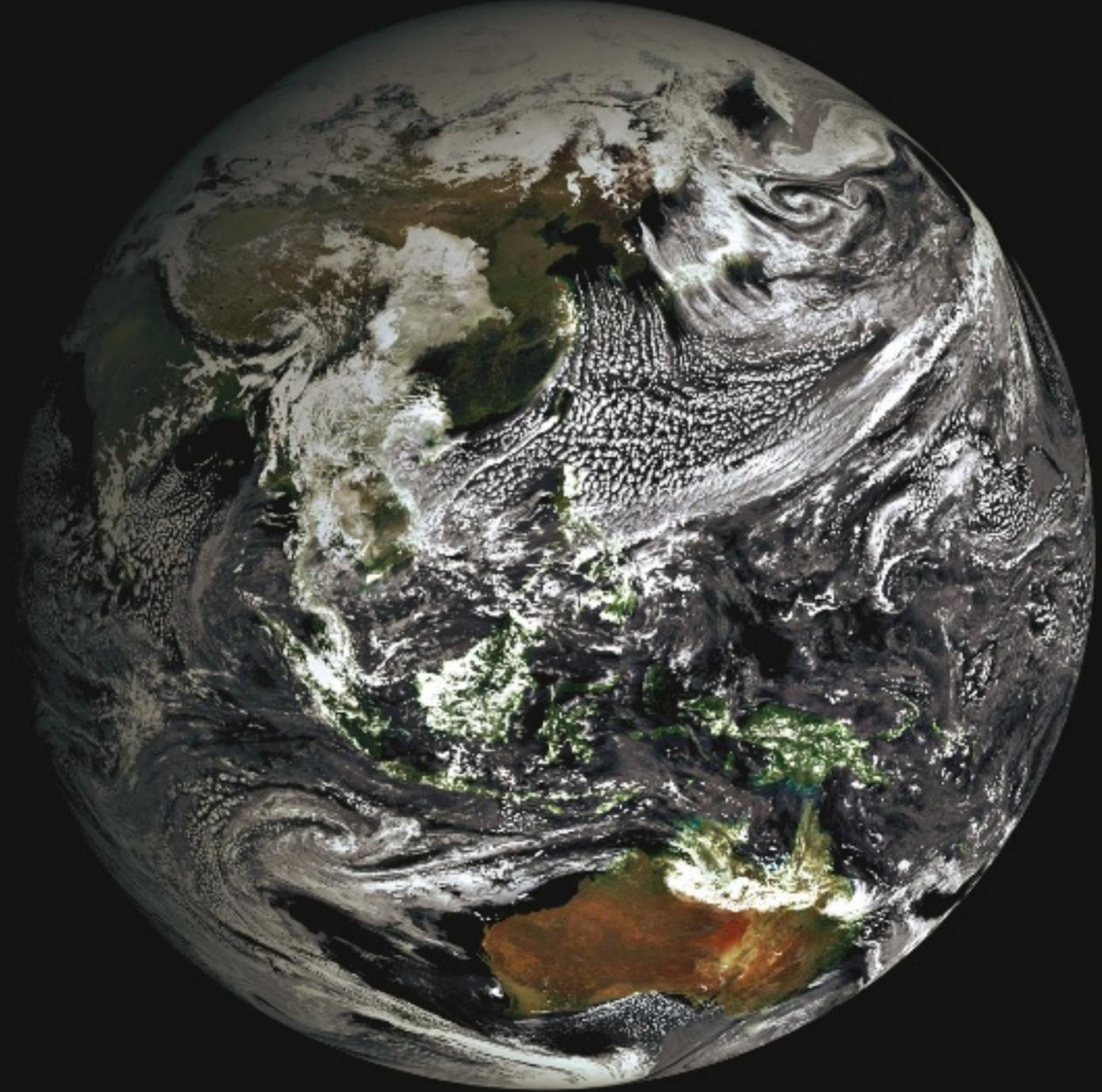
Eine Welt steht Modell

Das Wachstum des Waldes, der Wirbel der Wolken – oder der Preisverlauf einer Aktie: Mit Simulationen bilden Forscher alles nach, was sich bewegt. Sie glauben, so die Zukunft errechnen zu können. Ist das visionär? Oder größtenwahnsinnig?

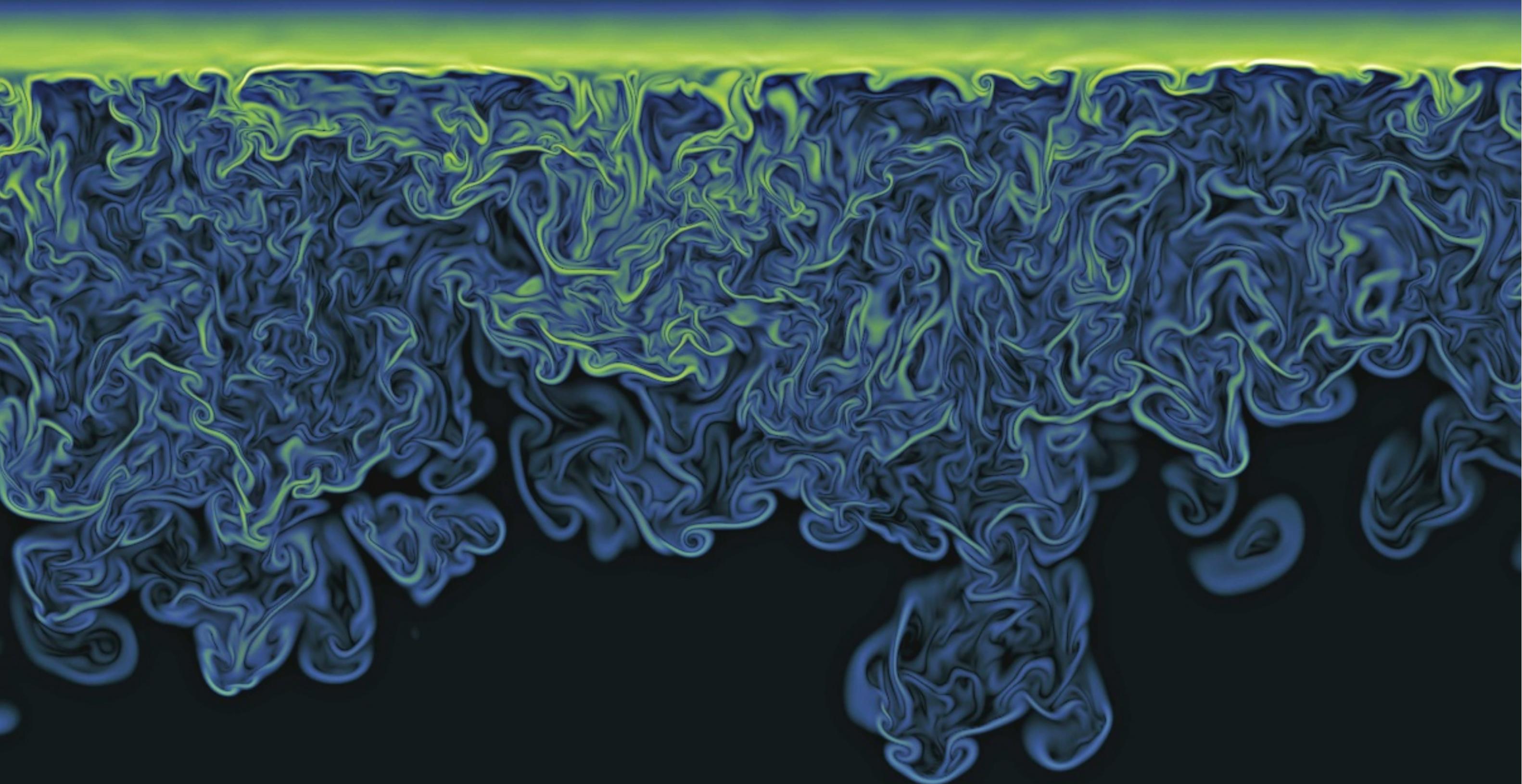
Von Carsten Jasner (TEXT)



Ähnlichkeiten beabsichtigt: Satellitenbilder zeigen die Welt, wie sie ist



Simulationen zeigen, was ihr geschehen könnte. Zum Beispiel im digitalen Wolkenmodell



Die Wirklichkeit ist, genau betrachtet, kompliziert: Meteorologen des Hamburger Max-Planck-Instituts simulieren die Turbulenzen am Rand einer Wolke. Kühle, trockene Luft (gelb) fällt in die Wolke hinein und verwirbelt deren Saum. Dadurch vermischt sich trockene mit feuchter Luft, was Einfluss darauf hat, ob sich eine Wolke zur Regenwolke verdichtet

aM TAG NACH der Katastrophe schaut sich Dirk Helbing die Filmschnipsel an, die Besucher der Love Parade ins Internet gestellt haben. Und er erkennt Muster: Die Bewegungen der Menge auf der Rampe in Duisburg gleichen jenen während der Tragödie in Mina bei Mekka im Januar 2006. Wo sich Pilger zur rituellen Steinigung des Teufels treffen, wurden damals über 350 Menschen zu Tode getrampelt. Hier wie dort entstand das Gedränge vor einem Engpass, bis sich „erdbebenartige Schockwellen“ ausbreiteten. „Sie bewegen sich sehr langsam“, sagt Helbing, „aber mit großer Energie.“ Der Einzelne ist zu schwach, sich gegen sie zu stemmen. Stürzt er, schließt sich die Welle über ihm.

Helbing, Professor für „Modeling and Simulation“ an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich, ist überzeugt: Würde man Massenveranstaltungen wie die Love Parade vorher im Computer durchspielen, ließen sich Unglücke verhindern. Jedenfalls dann, wenn man die wichtigsten Regeln programmiert hätte, nach denen solche dynamischen Prozesse ablaufen.

Von seinem Arbeitsplatz aus sieht Helbing sowohl das Treiben am Zürcher Bahnhof als auch das Flüsschen Limmat. Das Verhalten von Flüssigkeiten und Menschenströmen ähnele sich, sagt er. Als Mathematiker, Physiker, Verkehrsforscher und Soziologe beschäftigt er sich seit über 15 Jahren mit Ähnlichkeiten im Verhalten von angetriebenen Teilchen und Individuen und mit Gesetzmäßigkeiten menschlicher Gesellschaften. Die Erkenntnisse sollen in ein gigantisches Projekt namens „FuturICT“

einfließen, von dem der Zwei-Meter-Mann glaubt, es werde „zum Wohle der Menschheit“ reichen.

Eine der Komponenten des Projektes, der „Living Earth Simulator“, soll die Dynamik menschlicher Gesellschaften rund um den Globus simulieren: wie Rohstoffe um die Welt fließen, wie Finanzmärkte funktionieren; wie Kooperationen und Konflikte entstehen; wie sich Krankheiten ausbreiten und wie sich Naturkatastrophen auswirken. Computerprogramme sollen diese Prozesse nachbilden, damit wir sie in Zukunft besser verstehen.

Dazu müssten die Rechner nicht nur Gesetzmäßigkeiten und Wechselwirkungen lernen, sondern auch mit einer ungeheuren Menge aktueller Daten gespeist werden. Beides geht, glaubt Helbing. Das World Wide Web halte eine Fülle an Informationen bereit. Die Lichtabstrahlung der Städte etwa spiegele den Arbeitseinsatz und die Vergnügungslust der Bewohner und gebe so Auskunft über die Wirtschaftskonjunktur. Ein Bild über den Verlauf von Epidemien erhalte man, wenn man messe, wo und wie viele Menschen das Wort „Grippe“ bei Google eingeben.

Die Rechner sollen Alarm schlagen, wenn bestimmte Muster im Datenfluss auf „Störungen“ hindeuten. Bisher, sagt Helbing, erfahre die Weltöffentlichkeit von Hungersnöten oder Konflikten erst, wenn Zehntausende flüchten und sterben. Beobachte man jedoch – virtuell, aber in Echtzeit – den Weg etwa von Lebensmitteln oder Öl von der Quelle bis zum Verbrauch, so könne man Krisen vorhersehen.

Die Ergebnisse seiner Erdsimulation will Helbing in Arenen nach dem Vorbild von 3-D-Kinos projizieren. Und so soll der Living Earth Simulator einst erlauben, „mögliche Zukünfte“ zu erkunden – und jedermann helfen, die Folgen von Entscheidungen besser abzuschätzen.

Zukunftsmusik – noch. Für sein Projekt koordiniert der 47-jährige Professor europaweit Hunderte

Immer seltener betrachten Forscher noch die reale Welt. Und immer häufiger jene, die sie sich im Rechner geschaffen haben

von Wissenschaftlergruppen. Sie haben gute Chancen auf eine Milliarde Euro von der EU und weiteren Geldgebern. Helbings Plan klingt wahnwitzig, aber das galt Anfang der 1960er Jahre auch für die Idee, Menschen zum Mond zu schießen.

Doch geht es hier eigentlich noch um exakte Wissenschaft – oder doch eher um Utopien? Womöglich ist das eine vom anderen bald kaum noch zu unterscheiden.

Der Living Earth Simulator ist nur die Zuspitzung eines Trends, der alle Wissenschaften erfasst: die Nachahmung der Realität im Computer. Immer mehr Forscher arbeiten weder draußen „im Feld“ noch im Labor. Statt die Welt zu beobachten, bilden sie sie künstlich nach, um auszuprobieren: Was wird morgen passieren, wenn wir heute diese oder jene Weiche stellen? Klimaforscher wissen schon jetzt, dass die Erdtemperatur in den nächsten 100 Jahren um zwei bis sechs Grad steigen wird. Astrophysiker sehen am Bildschirm zu, wie sich in ein paar Milliarden Jahren unsere Sonne zu einem Roten Riesen aufblähen wird. Werden bald auch Lebenswissenschaftler nach vorn schauen? Werden sie simulieren, ob und wann eine Erbkrankheit ausbricht? Werden sie die Wirkungsweise von Genen so weit vorhersehen, dass sie beliebige Wesen erschaffen können?

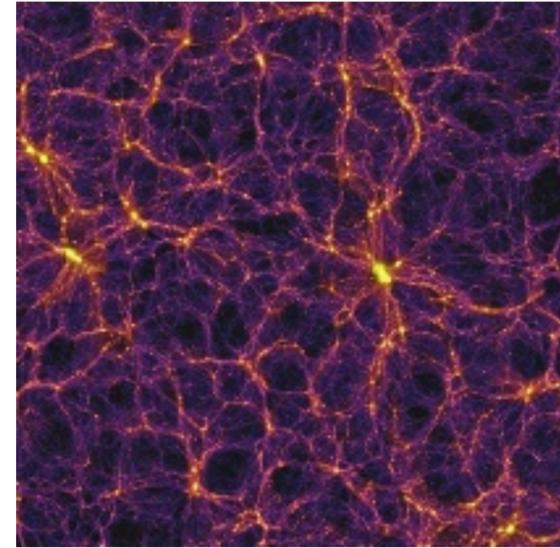
DER TRAUM, einen Blick auf das zu erhaschen, was es noch gar nicht gibt, ist uralte. Schamanen riefen zu diesem Zweck die Geister, Astrologen deuten Sterne, Wahrsager legen Karten oder lesen im Kaffeesatz. Und am gründlichsten nähren ausgerechnet die Propagandisten der exakten Wissenschaft diesen Traum: Physiker.

Ermuntert durch die Entdeckung von Naturgesetzen seit Beginn der Neuzeit, durch die berechenbare Abfolge von Ursache und Wirkung, haben sie es im Prinzip schon immer für möglich gehalten, nicht nur den Lauf der Planeten am Himmel, sondern auch den Lauf des Lebens auf der Erde voraussagen zu können*.

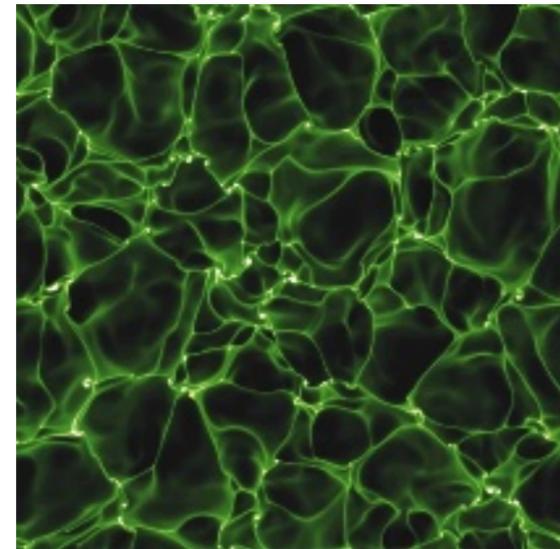
Der Urvater dieser Allmachtsfantasie war um 1800 der geniale Mathematiker und Astronom Pierre-Simon Laplace. Der Philosophierte: „Eine Intelligenz, die in einem gegebenen Augenblick alle Kräfte kennt, mit denen die Welt begabt ist, und die gegenwärtige Lage der Gebilde, die sie zusammensetzen, und die überdies umfassend genug wäre, diese Kenntnisse der Analyse zu unterwerfen, würde in der gleichen Formel die Bewegungen der größten Himmelskörper und die des leichtesten Atoms einbegreifen. Nichts wäre für sie ungewiss, Zukunft und Vergangenheit lägen klar vor ihren Augen.“ Der „Laplace’sche Dämon“, wie diese Intelligenz bald genannt wurde, werde wohl nie in einem menschlichen Gehirn wohnen, räumte selbst Laplace ein.

Heute erkunden Forscher am Rechner jene Kräfte, „mit denen die Welt begabt ist“, und die „Gebilde, die sie zusammensetzen“. Die Modelle bilden längst eine dritte Säule zwischen Experiment und Theorie, sagt die Berliner Wissenschaftsphilosophin Gabriele Gramelsberger.

Denn die Wissenschaftler sammeln immer größere Massen von Daten. Sie zu deuten und darin Zusammenhänge zu erkennen ist unser Gehirn kaum mehr in der Lage. Der elektronische Assistent aber sucht automatisch nach Verknüpfungen zwischen Fakten und bietet Erklärungen an.



Wie Nervenstränge durchziehen Fäden aus Materie das Weltall (o.) – und haben erstaunliche Ähnlichkeit mit Turbulenzen im Wasser (u.), die durch aufsteigendes heißes Wasser hervorgerufen werden. Nur eine Simulation kann diese Strukturen sichtbar machen



Dabei bringt es nichts, den Computer bloß mit möglichst vielen Informationen zu stopfen. Ein Forscher muss sich zunächst überlegen, welche Prozesse in einem Ausschnitt der Natur die Hauptrolle spielen. Dann weiß er, welche Daten wichtig sind.

Dieser Ansatz bedeutet eine neue Sicht auf die Welt. Bislang haben Naturwissenschaftler meist nur gewagt, das Treiben unbelebter Materie auf relativ einfache Gleichungen wie das Gravitationsgesetz oder die Formeln der Elektrodynamik zurückzuführen. Jetzt versuchen sie, auch die viel komplexere, belebte

Natur auf wenige Hauptkräfte zu verdichten – etwa konkurrierendes oder kooperierendes Verhalten bei Tieren, Herdentrieb oder Anstandsregeln unter Menschen.

Oder die Vorgänge im Inneren einer Raucherlunge.

WENN SABINE ATTINGER die Simulation startet, wühlt sich auf ihrem Bildschirm ein virtueller Schadstoff als roter Punkt durch eine virtuelle Zellwand, wird auf der anderen Seite von grünen Molekülen empfangen und zur „Zentrale“ geleitet, zur DNS im Zellkern. Wie die Zellen dann mit dem Eindringling verfahren, welche Gene und Proteine sie mobilisieren, ob sie ihn rausschmeißen oder vor ihm kapitulieren – all das möchten Attinger und ihre Kollegen herausfinden.

Am Umweltforschungszentrum (UFZ) in Leipzig wollen sie anhand eines Modells verstehen, wie genau der Schadstoff Benzoopyren, der in Zigaretten beim Rauchen entsteht, auf Lungen- und Leberzellen wirkt. Dazu entwickeln sie Gleichungen, die beschreiben, nach welchem Muster sich die Giftmoleküle in der Zelle verbreiten und an die DNS andocken. Dann spielen sie ihr Modell durch, wieder und wieder, tausendfach, unter verschiedenen Bedingungen. Vergleichen es mit experimentell gewonnenen Daten aus dem Labor, bessern die Gleichungen und Annahmen nach – und nähern so die virtuelle einer realen Zelle an.

Bisher linsten Biologen immer durch das Mikroskop, auf Vorgänge im Gewebe. Doch die Ebene der Moleküle blieb ihnen verborgen – und auch das große Ganze verloren sie aus dem Blick. Jetzt, sagt Attinger, simulieren Forscher im Computermodell das große Gan-

* Seit Entdeckung der Quantenphysik ist klar, dass das Verhalten kleinster Teilchen prinzipiell nicht vorhersagbar ist. Physiker können jedoch genau berechnen, wie groß die Wahrscheinlichkeiten für das zufällige Auftreten verschiedener möglicher Verhaltensweisen sind.

ze – und folgern daraus unsichtbare Vorgänge im Allerkleinsten.

Diese Forscher haben die Scheu vor der Komplexität der Natur verloren, ihr Motto könnte lauten: „Vereinfache das Leben“. Angetrieben werden sie von einer Idee: der Theorie komplexer Systeme. Sie teilt das Universum in beliebig viele Untersysteme, die nach ähnlichen Prinzipien funktionieren. Unser Sonnensystem oder ein Biotoptop am Weiher, eine Fabrik, ein Gehirn oder eine Zelle: All diese Systeme sind offen, immer fließt Energie oder Materie hinein oder heraus. Sie bestehen aus Teilen, die miteinander wechselwirken und auf ein Gleichgewicht zustreben. Und sie zeugen mit vereinten Kräften etwas Neues, Höherwertiges. Pflanzen bilden einen Wald, Wölfe ein Rudel, Nervenzellen vernetzen sich zu einem Bewusstsein. Immer ist dabei das Ganze mehr als die Summe seiner Teile.

Wie werden Wertpapierhändler nach Einführung einer Transaktionssteuer entscheiden? Wie werden sich Flora und Fauna durch genmanipulierte Samen verändern? Wie bekämpfen Zellen Schadstoffe? Das Regelgerüst der Systemtheorie soll Wissenschaftler in die Lage versetzen, vereinfachte Kopien von Natur und Gesellschaft zu schaffen: ein digitales Immunsystem, ein virtuelles Ökosystem, eine künstliche Börse. Der Computer setzt vielfältige Wechselwirkungen der Elemente innerhalb eines Systems in Gang und protokolliert die Ergebnisse. So kann der Forscher die dynamischen Prozesse gründlicher studieren, als es beim verwirrend komplizierten Original je möglich wäre. In der Hoffnung, auf die Spur von immergültigen Gesetzen zu stoßen, mit denen er die Zukunft voraussagen kann.

Die Wissenschaft verliert ihre Scheu vor der Komplexität des Lebens: Sie presst es in Formeln – und macht es berechenbar

Der Laplace'sche Dämon könnte damit eine neue Chance bekommen. Denn die Systemtheorie nimmt ihm viel Arbeit ab: Er muss nicht mehr „alle“ Kräfte kennen. Nur noch die wichtigsten.

DER BOOM DER SIMULATOREN wird befördert von drei Faktoren. Da ist erstens die Rechenkraft der Computer, die sich seit den 1960er Jahren alle zwei Jahre verdoppelt. Punkt zwei: die Systemtheorie, die das mutmaßlich Wesentliche aus der Detailfülle der Welt extrahiert und zu Portionen verdichtet, die der Computer verdauen kann. Und zwar, Punkt drei, mithilfe spezieller mathematischer Gleichungen.

Diese Grundgleichungen für viele Simulationen sind bereits vor gut 150 Jahren aufgestellt worden; sogenannte Strömungsgleichungen, deren Geschichte die Bemühungen der Menschheit dokumentiert, den Fluss der Natur mit Formeln festzuhalten. Noch früher, 1755, war es dem Mathematiker Leonhard Euler gelungen, die Strömung von Flüssigkeiten zu berechnen – doch nur, wenn diese sich stur geradeaus bewegten, ohne je auf Widerstand zu stoßen. Völlig unrealistisch: Wasser zum Beispiel reibt sich an den Innenseiten eines Rohrs, gluckert um Krümmungen, verwirbelt, ändert so seine Geschwindigkeit.

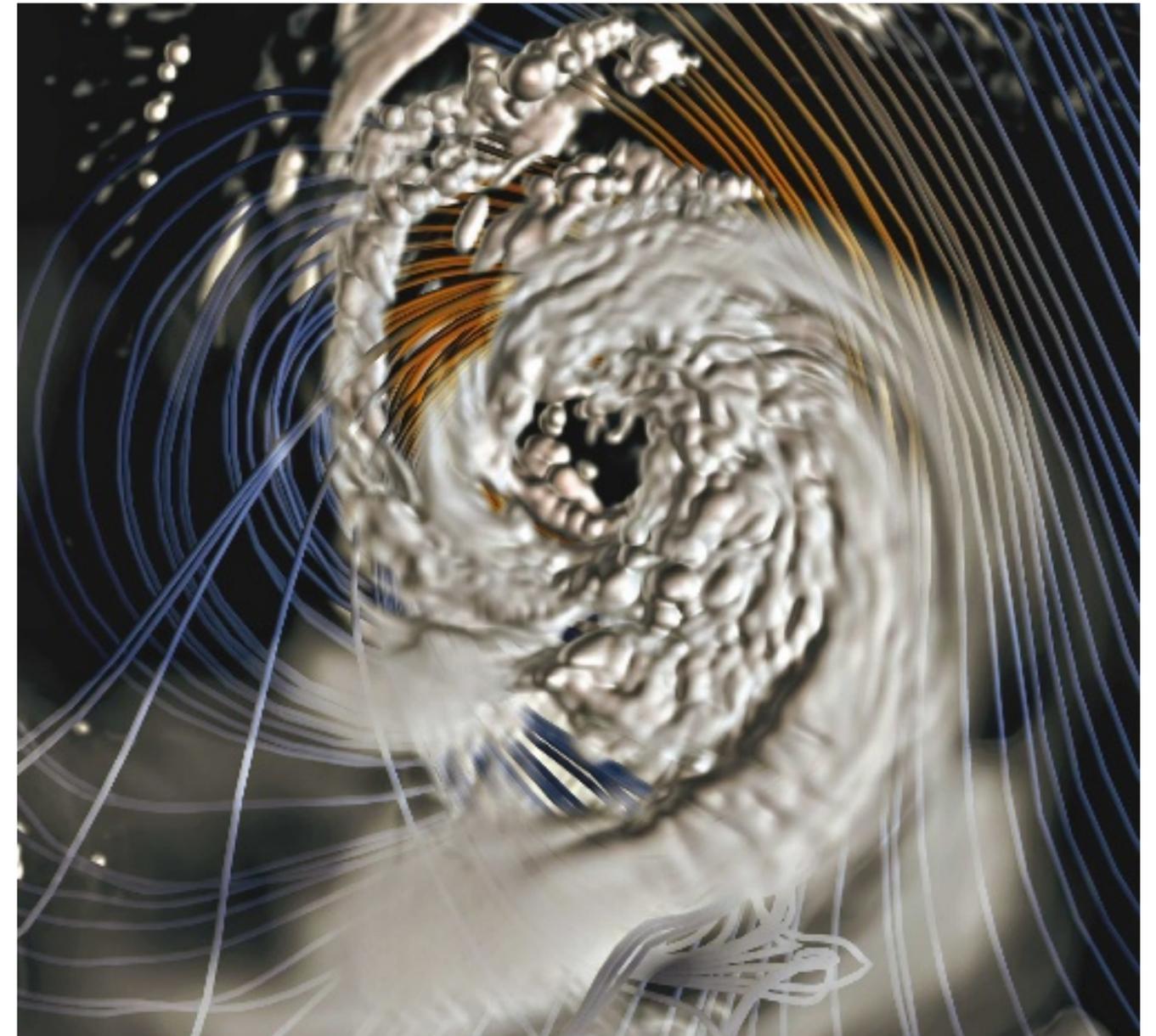
Knapp 100 Jahre später kreierte der Franzose Claude Louis Navier und der Ire George Gabriel Stokes dann Gleichungen, die auch „Störungen“ eines idealen Flusses berücksichtigten. Doch warfen diese Formeln ein neues Problem auf: Die Navier-Stokes-Gleichungen sind prinzipiell unlösbar.

Allerdings konnten geduldige Mathematiker mit Strömungsgleichungen arbeiten, indem sie Anfangswerte, die meist aus Messungen stammten, in das Gleichungssystem einsetzen und davon ausgehend in vielen Einzelschritten Lösungen für weitere konkrete Fälle ausrechnen. In Fachkreisen gilt dieses Verfahren

nicht gerade als elegant – es bedeutet stumpfsinnige Fließbandarbeit und liefert am Ende immer nur eine immer nähere Annäherung an eine Lösung – und niemals ein „echtes“, allgemeingültiges Ergebnis. Dennoch setzten um 1900 Unternehmen und Forschungsanstalten Hundertschaften von Angestellten in Rechenäle und ließen sie endlose Serien von Zahlen in mechanische Kalkulatoren hacken, um etwa die Flussbewegungen in Wasserkraftwerken oder die Preisentwicklung von Versicherungspolice zu berechnen. Im Zweiten Weltkrieg nutzten die Forscher des „Manhattan-Projekts“ ähnliche Näherungsverfahren, um die Zerstörungskraft einer Atombombe zu kalkulieren.

Doch erst die Kombination von nichtlinearen Gleichungen und Computern brachte nach dem Zweiten Weltkrieg den Durchbruch. Nahezu jede Simulation beruht heute auf dieser Verbindung von menschlicher Rechenkunst und technischer Rechenleistung. Die Maschine dekliniert die Formeln millionenfach durch, die Lösung rückt immer näher. So gelingt es ausgerechnet künstlichen Modellen, neue Einblicke in reale Naturprozesse zu eröffnen. Und das Nicht-Sehbare endlich darstellbar zu machen.

NUR EIN PAAR HUNDERT Meter entfernt von den Labors der Leipziger Systembiologen um Sabine Attinger liegt ein umzäuntes Gelände, auf dem früher Panzerfäuste gefertigt wurden und später Angela Merkel ihre Diplomarbeit schrieb. Wer dort im Erdgeschoss eines unscheinbaren Neubaus eine 3-D-Brille aufsetzt, glaubt sich in einem Lampenladen: Virtuelle alarmrote und pirolgelbe, blatt-



Hurrikan »Ike« aus dem Jahr 2008, simuliert an der Universität von Oklahoma. Das Sturmmodell zeigt Verteilung und Verdichtung des in der Wolke kondensierten Wassers sowie, als Linien, die sich ändernden Luftströmungen und Windgeschwindigkeiten

grüne und turmalinblaue Ballons stecken auf orangefarbenen Ständern in verschiedenen Höhen. „Das“, sagt Andreas Huth, „ist ein Bergwald in Ecuador.“

Der Vorführraum des Umweltforschungszentrums ist ausgestattet mit einer dreiteiligen, 15 Meter breiten und 2,70 Meter hohen milchigen Glaswand um einen weißen Bodenbelag, der ebenfalls als

Projektionsfläche dient. Der Filmvorführer sitzt in der Mitte des Raums, steuert 13 Projektoren, lädt gewaltige Simulationsprogramme hoch und drückt den Kinobesuchern einen „Flystick“ in die Hand. Wenn sie auf dessen Knöpfe drücken, fühlen sie bald ein Kitzeln im Bauch wie in der Achterbahn – ohne sich von der Stelle zu bewegen. Optisch tauchen sie ein in grundwasserführende Gesteinsschichten in 4000 Meter Tiefe, fliegen über täuschend echte Landschaften und um bislang nur geplante Windräder herum, und stürzen dann hinab in deutsche Eichenwälder.

Allerdings sind nur wenige Simulationen derart naturgetreu und mit Liebe zum Detail gestaltet. „Wir fangen mit der Visualisierung erst an“, sagt Huth und lächelt entschuldigend. 3-D-Darstellungen seien sehr aufwendig. Bislang dienten sie vor allem dazu, Öffentlichkeit oder Geldgeber von der Kraft einer Simulation zu überzeugen. Den Wissenschaft-

Im Modellwald geschieht
auf Knopfdruck sofort,
wofür die Natur Hunderte
Jahre brauchen würde



Ein Regenwald aus 10 000 Bäumen wurde von
den Leipziger Umweltforschern um Andreas Huth (l.)
für die Simulation auf farbige Symbole reduziert.
Die Brillen machen daraus ein 3-D-Bild

lern selbst genügen zumeist zwei-
dimensionale Visualisierungen.

Zum Beispiel beim Regenwald-
Modell: Die Forscher Andreas
Huth und Thorsten Wiegand klap-
pen ihre Laptops auf. Per Tasten-
druck zeigen sie blitzschnell, was
in den ecuadorianischen, tansa-
nischen oder malaysischen Tropen
mehrere Hundert Jahre dauert:
Aus einer rechteckigen Fläche
wachsen stilisierte Bäume binnen
Sekunden zur vollen Reife. Rote
und violette Kringle bleiben eher
bodennah, türkisfarbene Ovale
verharren auf halber Höhe, dun-
kelgrüne Kreise überragen am
Ende alles. Die Symbole stellen
Baumgruppen dar – Pioniergat-
tungen wie *Macaranga*, die bis zu
25 Meter groß werden, oder Flüg-
elfruchtgewächse, die Höhen bis
50 Meter erreichen.

Hunderte Baumarten haben die
Forscher zu fünf Farbkategorien
gebündelt – für konventionelle
Biologen ein Affront! Denn die
Artenvielfalt der Regenwälder ist
legendär; viele Forscher vermuten,
dass einzelne Spezies nur in ganz
bestimmten Nischen gedeihen. Da
wirkt es holzschnittartig, wie Huth
und Wiegand den Wald vereinfach-
en, im Fachjargon „parametrisie-
ren“. Für sie ist besonders relevant,
wie schnell und wie hoch die Bäu-
me wachsen und wie viel Licht sie
dabei brauchen. Diese und einige
weitere Kriterien bilden nach ihrer
Ansicht den Schlüssel zur der kom-
plexen Dynamik der Regenwälder.

Also haben sie Durchschnitts-
werte ermittelt, die angeben, in
welcher Wachstumsphase des Wal-
des wie viel Licht durch das Blät-
terdach fällt und damit bestimm-
ten Arten eine Lebenschance
einräumt und andere ausbremst –
Zahlenfutter für jene Gleichun-
gen, mit denen der Computer
die vielfältigen Wechselwirkun-

gen der mutmaßlich wichtigsten Vorgänge berechnet: Wachstum, Konkurrenz um Licht, Sterblichkeit und Regeneration. Damit sind die „denkbaren Zukünfte“ eines Waldes unter verschiedenen Bedingungen simulierbar.

„Manche Biologen tun sich mit solchen Vereinfachungen traditionell schwer“, sagt Huth. Aber so wie man nicht jedes Molekül eines Gases beachten müsse, um dessen Eigenschaften zu beschreiben, ergänzt Wiegand, „müssen wir auch nicht jedes Detail des Regenwaldes in unser Modell packen“. Huth: „Oft genügen nur wenige Merkmale. Wundersam, aber es geht.“

Was sich mit einem solchen Modell zum Beispiel für Malaysia abzeichnet, ist erschreckend. Bisher gehen viele Ökologen davon aus, dass der Urwald eine gemäßigte Holznutzung überleben kann, bei der große Bäume alle 20 bis 30 Jahre geschlagen werden. „Unsere Simulation zeigt aber, dass der Wald dabei stirbt“, sagt Huth. Man dürfe demnach höchstens alle 60 bis 80 Jahre fällen.

DER ABGLEICH mit der Wirklichkeit – das ist die Feuerprobe für jede Simulation. Besteht sie die, ruft der Forscher „Heureka“ – auch wenn die Prognosen wenig Grund zur Freude bieten.

Klimaforscher etwa haben ihre Modelle mit Daten aus frühen Wetterberichten und Analysen von Gletscherkernen gespeist, in denen das Klima der Vergangenheit „gespeichert“ ist. Auf dieser Basis ließen sie die Entwicklung bis heute errechnen. Wo die Ergebnisse mit den aktuellen Messwerten übereinstimmen, ist das Modell gewissermaßen geeicht, „validiert“. Es kann nun mithilfe derselben Regeln und Parameter die Zukunft ins Visier nehmen.



Einen Blick tief unter die Oberfläche einer Sonne erlaubt diese Simulation amerikanischer Wissenschaftler. Sie zeigt jene Wirbel und Ströme des gasförmigen Plasmas, die um den Stern herum gewaltige Magnetfelder entstehen lassen

Etwa das Szenario, dass der durchschnittliche Kohlendioxidausstoß eines Weltbürgers im Jahr 2050 doppelt so hoch wie heute sein könnte. Mit den geeichten Regeln lassen sich für diesen Fall die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und deren entsprechende Erwärmung errechnen. Und die Prognosen lassen sich sogar herunterbrechen auf einzelne Gegenden. Weil die Prozessoren immer schneller immer mehr Gleichungen bearbeiten, werden Klimaforscher bald auch Voraussagen für einzelne Städte treffen können: etwa wie sich der Tidenhub in Hamburg verändern wird und der Monsun in Mumbai. Oder wie die durchschnittliche Porengröße von Laubbaumblättern im Schwarzwald den dortigen Wasserhaushalt bei steigender Temperatur beeinflussen wird.

Doch so emsig die Forscher auch rechnen lassen – ein ganz reales Phänomen wird ihnen wohl noch für lange Zeit durch die Maschen ihres virtuellen Netzes flutschen: die Wolkenbildung. Dabei wird deren Einfluss zunehmen, weil mit steigender Erderwärmung mehr Wasser verdunstet. Wolken gelten als Unsicherheitsfaktor im Klimamodell. Und als Beispiel für die Grenzen der Simulation.

Denn Wolke ist nicht gleich Wolke: Zirkus trägt zur Erwärmung bei, Stratokumulus zur Abkühlung – tagsüber jedenfalls, nachts kann sich das umkehren. Und welche Wolken sich wo bilden, lässt

sich für mehr als einen Tag im Voraus kaum ermitteln, wie der tägliche Wetterbericht demonstriert. „Wie sich Wolken entwickeln und wieder auflösen, hängt von turbulenten Strömungen an ihren Rändern ab“, sagt Juan Pedro Mellado vom Max-Planck-Institut für Meteorologie. „Und turbulente Strömungen gehören zu den ungelösten Problemen der Physik.“

Kennzeichnend für eine Turbulenz ist der Schmetterlingseffekt: Kleine Veränderungen in den Ausgangsbedingungen führen zu großen im Ergebnis. Turbulenzen verhalten sich in einem Computermodell wie wilde Kinder in einer aufgeräumten Wohnung. Von ihrer im Wortsinn unberechenbaren Laune hängt es ab, ob sie das gesamte System ins Chaos stürzen – und das Modell in die Bedeutungslosigkeit.

TURBULENZEN SIND ÜBERALL: die Strudel in einem Gebirgsbach, die Schäfchenwolken am sommerlichen Himmel, das Menschengewimmel in einer Fußgängerzone, wo Passanten spontan Bahnen bilden, um aneinander vorbeizugelen. Entstehen solche chaotischen Muster zufällig, oder folgen sie einem mysteriösen Gesetz? Die Regelmäßigkeit des Unregelmäßigen ist eines der großen Rätsel der Natur.

Simulierende Forscher weichen diesem Problem mit zwei Strategien aus. Entweder sie tun, was sie immer tun, wenn sie ein Phänomen nicht durchschauen: Sie „parametrisieren“ es, reduzieren es also auf einige wenige Einflussgrößen. Oder sie behaupten, ihr Modell sei so „großskalig“ angelegt, dass kleinere Turbulenzen nicht weiter stört.

Aber wie will man ausschließen, dass ein Wirkstoff in einer

2012



1979

Zeit für neue Dachfenster – und mehr Tageslicht.

Jetzt mit VELUX Dachfenster modernisieren – Ideen & Lösungen unter velux.de/neu



Auf Wunsch zeitgesteuertes Lüften mit automatischen Fenstern.



Bessere Wärmedämmung mit moderner Verglasung.



Inspiration, Video-Beratung, Planungshilfen und mehr ...

VELUX®
www.velux.de

Zelle auf einen zweiten trifft und sich die Wirkungen der beiden in einem chaotischen Prozess wechselseitig extrem verstärken? Dass Waldarbeiter Parasiten einschleppen, die eine Tierart dahinraffen, die dann keine Samenkörner mehr verteilen kann? Dass ein neu konstruiertes Flugzeug in einer bestimmten Art von Gewitterwolke instabil wird? Dass ein neuer Faktor wie die Enthüllungsplattform Wikileaks das System Diplomatie in eine unvorhersehbare Schiefelage bringt? Oder dass viel mehr Menschen als geplant zu einer Love Parade drängen?

Wir lieben die Vorstellung, wir hätten alles im Griff. Wir ordnen die Welt mit Erklärungen, in denen Turbulenzen nur eine Nebenrolle spielen. Doch diese Neigung, sagt Klaus Mainzer, Professor für Philosophie und Wissenschaftstheorie an der Technischen Universität München, habe jüngst erst zu einer der größten Turbulenzen der vergangenen 100 Jahre geführt: zur Weltfinanzkrise.

Seit Jahrzehnten mühen sich Banken, die Preisentwicklung von Wertpapieren zu berechnen. Sie ziehen dazu abgewandelte Navier-Stokes-Gleichungen für Strömungsturbulenzen zu Rate, also jene Formeln, die auch das Verhalten von Wasser in einer Turbine oder eines Flugzeugs im Sturm vorhersagen können.

„Aber diese Abwandlungen sind wahnsinnig vereinfacht“, sagt Mainzer. Sie entsprängen der naiven Vorstellung, Preisausschläge nach oben und nach unten würden sich um eine Mitte herum bewegen – wie der Pegel eines Flusses je nach Jahreszeit und Niederschlag variiert.

„In ruhigen Zeiten“, sagt Mainzer, „funktionieren diese Küchenrezepte der Wahrscheinlichkeits-

Die Zukunft als Programm

Klima, Flugzeuge, Körperteile – für fast alles gibt es eine Simulation

Berechnen kann man theoretisch alles – sogar die Folgen eines regionalen **Atomkrieges** zwischen Indien und Pakistan. Mittels Simulation ermittelten amerikanische Klimatologen, dass in einem solchen Fall der Ruß brennender Städte weltweit die Temperaturen sinken lassen und die Ozonschicht zerstören würde – mit katastrophalen Folgen für das Leben auf der Erde.

Auch der menschliche Körper ist Gegenstand der neuen Simulationsfreude unter Wissenschaftlern: In Deutschland etwa arbeiten Forscher am Projekt „**Virtuelle Leber**“, der ersten Simulation eines kompletten menschlichen Organs. Das Modell soll aufwendige Experimente ersetzen. Noch ambitionierter ist das „**Human Brain Project**“: Europäische Wissenschaftler wollen auf einem Supercomputer ein menschliches Gehirn mit 100 Milliarden Nervenzellen vollständig nachbilden. Sie hoffen, damit dem Geheimnis des Denkens und des Bewusstseins auf die Spur zu kommen.

Zur Regel geworden sind Modellierungen schon bei Entwicklungen etwa in der **Luftfahrtindustrie**. Welche Luftverwirbelungen entstehen an Querrudern eines geplanten Flugzeugs? Welcher Druck lastet bei welcher Geschwindigkeit auf welchem Quadratzentimeter Rumpf? In naher Zukunft, schätzt Norbert Kroll vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, werden die Flugzeugbauer selbst Landemanöver, bei denen sich Luftwiderstand und Auftrieb sekundlich ändern, im Computer simulieren – und zwar lange, bevor ein erster Prototyp die Produktionshalle verlässt.

theorie.“ Doch die Zeiten seien nicht ruhig: „Seit den 1980er Jahren häufen sich an den Finanzmärkten die extremen Ausreißer.“ Und wenn ein kritischer Punkt überschritten werde, regiere nicht mehr das durchaus berechenbare Zufallsprinzip, sondern der Herdentrieb. Bis die Blase platzt. Ursache solcher Kollapse sei eine fatale „Modellgläubigkeit“, sagt Mainzer: Die vereinfachte Strömungsdynamik beruhige den Banker und ermutige ihn zu immer riskanteren Wetten. Damit aber bildet das Modell nicht mehr neutral eine mögliche Zukunft ab, sondern beeinflusst selbst den Akteur. Der Banker ändert aufgrund der eigenen Prognose sein Verhalten auf den

Finanzmärkten, deren Entwicklung sich daraufhin von der Prognose entfernt.

Vielleicht liegt das größte Problem von Computersimulationen ausgerechnet in ihrer Glaubwürdigkeit. Je überzeugender ein Modell die Welt simuliert, desto eher sind die Beteiligten bereit, sich danach zu richten – und desto schneller führen sie es genau damit ad absurdum.

DAS BILD von den drei Säulen – hier Theorie, dort Experiment, dazwischen die Simulation – sei nicht ganz korrekt, sagt die Wissenschaftsphilosophin Gabriele Gramelsberger. „In der Simulation gilt die Trennung zwischen Theorie und Experiment nicht mehr.“ Denn die Simulation ist beides zugleich: Die Konstruktion des Modells stellt ein Experiment dar und fußt auf einer Theorie über die Struktur eines Systems. „In der Simulation“, so Gramelsberger, „experimentiert der Forscher sozusagen mit einer Theorie.“

Eine bedenkliche Verquickung. Naturwissenschaft gründet seit jeher auf kritischer Distanz, auf der Überprüfung einer Hypothese durch messbare Fakten. Simulierende Forscher betonen zwar, wie unverzichtbar reale Experimente immer noch seien, um Modelle mit der Wirklichkeit abzugleichen. Sie weisen aber im gleichen Atemzug darauf hin, dass immer aufwendigere Hightech-Messungen im Labor auf Dauer kaum noch zu bezahlen seien.

Verlockend die Aussicht, vom Schreibtisch aus mit Blick auf den Bildschirm in die Zukunft zu linsen, verführerisch die Macht der Bilder. Aufwendige, dreidimensionale Darstellungen können den Betrachter so beeindrucken, dass sie sich ihm als unverrückbare

HOLEN SIE SICH INTELLIGENTE ENERGIE NACH HAUSE!

Machen Sie Ihr Zuhause zum intelligenten Zuhause! Wenn Sie zum 5-teiligen Starterpaket der RWE SmartHome Haussteuerung den cleveren Stromtarif SmartLine dazu bestellen, erhalten Sie das Starterpaket für nur **279 €** statt 379 €! Selbstverständlich erhalten Sie RWE SmartHome auch unabhängig vom Stromvertrag.

INTELLIGENTE STEUERUNG VON WÄRME, LICHT UND HAUSGERÄTEN!

EINFACHE INSTALLATION PER PLUG 'N' PLAY!

KOMFORTABLE BEDIENUNG VON ÜBERALL AUS!

SIE ZAHLEN KEINEN GRUNDPREIS!*

SIE ZAHLEN NUR, WAS SIE TATSÄCHLICH VERBRAUCHEN!

MÖGLICHKEIT ZUR JÄHRLICHEN KÜNDIGUNG!

*Bei einem Jahresverbrauch bis 1000 kWh zahlen Sie nichts für Grundpreis.

MACHEN SIE SICH SCHLAU IM ENERGIEKAUFHAUS

> www.vorweggehen.de

f > www.facebook.com/vorweggehen

t > www.twitter.com/vorweg_gehen

VORWEG GEHEN MIT INTELLIGENTER ENERGIE

Weitere intelligente Angebote und Ideen finden Sie auch ganz in Ihrer Nähe:

RWE www.rwe.de

envia www.envia.de

KEVAG www.kevag.de

LEW www.lew.de

Süwag www.suwag.de

energis www.energis.de

Wahrheit einprägen. Und je überzeugender die Visualisierung, desto eher traut man dem Modell Antworten zu auf Fragen, für die es gar nicht programmiert wurde.

Um der Verführung durch die Simulation vorzubeugen, so Sabine Attinger vom Leipziger Umweltforschungszentrum, sei es wichtig, Ergebnisse von Computersimulationen fortlaufend mit den Biologen zu diskutieren. So stelle man sicher, dass die Resultate auch die Realität nachbilden.

Attingers Modell soll die Reaktion einer Zelle auf einen bestimmten Schadstoff simulieren – wie sie auf andere Chemikalien reagiert, kann das Modell nicht „wissen“. Der Regenwald von Andreas Huth, so wirklichkeitsnah er auch wächst, erlaubt keine Rückschlüsse auf Bodenbeschaffenheit oder Wasserkreislauf. Klimaforscher können nicht vorhersehen, wie der nächste Sommer in Berlin oder Bern wird. Auch wenn mancher glauben mag, selbst dieses aus den Modellen ableiten zu können. Und wenn die Logistik des geplanten Stuttgarter Bahnhofs einer simulierten Belastungsprobe unterzogen wird, sagt das Ergebnis nichts aus über die ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit des Projekts.

Wenn schon die Forscher Gefahr laufen, in den Bann ihrer „Kreaturen“ gezogen zu werden, so darf man gespannt sein, wie das Publikum auf die gigantomanischen Vorführungen in den geplanten 3-D-Arenen des Living Earth Simulators reagieren wird. Für wie wahrhaftig wird es die Simulationen halten?

Dirk Helbing jedenfalls tut wenig, um die Erwartungen zu zügeln. Im Gegenteil: Hätte man etwa nach den Anschlägen vom 11. September 2001 den Simulator

Das Problem: Die Ergebnisse von Simulationen wirken sehr überzeugend. Auch wenn sie auf falschen Annahmen beruhen

gehabt, sagt er, wäre manches anders gelaufen. Wenn Bürger und Politiker hätten sehen können, was die Kriege in Afghanistan und im Irak anzurichten vermögen – die Angriffe wären kaum durchsetzbar gewesen, glaubt Helbing.

Aber: Wie wollen Wissenschaftler nach einem Ereignis wie dem Attentat in New York Simulationen schaffen, die das Weltgefüge der kommenden Jahre, die Wechselwirkungen zwischen Staaten, Bürgerkriegsparteien, fanatisierten Ethnien, religiösen Gruppen und Wirtschaftsakteuren vorhersehen? Noch dazu in der dann gebotenen Eile? Welche Formel könnten sie aus dem Hut zaubern, die all diese Turbulenzen beschreibt? Und ist so ein Versuch überhaupt wünschenswert?

Das Interesse wäre jedenfalls riesig. Das Spektakel wissenschaftlich fundierter Ausblicke in die Zukunft würde sich niemand entgehen lassen. Am wenigsten jene, die damit eigene Interessen verfolgen können. Unternehmer und Politiker lieben Planspiele. Generäle blasen seit jeher im Sandkasten zum Manöver, Konzernführer planen Firmenübernahmen generalstabsmäßig.

Während des Vietnamkriegs glaubte US-Verteidigungsminister Robert McNamara, man könne mit einem System von Gleichungen, die etwa Truppenstärken, Bevölkerungsgrößen und geographische Besonderheiten abbilden, jeden Krieg gewinnen. Heute bedient sich das US-Militär eines Programms namens SEAS, das ursprünglich für unternehmerische Planspiele entwickelt wurde. Mit SEAS spielen Kommandeure Kriegsszenarien im Bagdad des Jahres 2015 durch; kürzlich wogen sie in einem virtuellen Afghanistan ab, wie eine Offensive mit 44 000 zusätzlichen Soldaten wirken würde. Ergebnis? Geheim.

„Solche Modelle suggerieren“, sagt Klaus Mainzer, der Wissenschaftstheoretiker, „man könne komplexe

Probleme allein mit technischen Mitteln in den Griff bekommen.“ Das sei eine Fehleinschätzung: „Ähnlich wie Banken müssen auch Modelle Stresstests unterzogen werden. Zudem reichen Modelle bei Menschen nicht aus. Wir müssen Mathematik mit Erfahrung und Beobachtung von tatsächlichem menschlichem Verhalten verbinden.“

DIRK HELBING IST PHYSIKER. Wie die Zellforscherin Susanne Attinger, wie der Regenwaldmodellierer Andreas Huth. Physiker sind die treibende Kraft hinter Computersimulationen aller Art, weil sie an die Reduzierbarkeit der Natur auf Formeln glauben. Wie Pierre-Simon Laplace vor 200 Jahren. Doch während der von einer Superintelligenz nur träumte, halten es heute einige Forscher für eine Frage von 20, vielleicht 50 Jahren, bis sie eine alles beschreibende Superformel gefunden haben. Nach der Devise Albert Einsteins: Man soll alles so einfach wie möglich machen. Aber nicht einfacher.

Doch nicht einmal für die unbelebte Materie – für die kleinsten Grundbausteine der Welt und für die größten Strukturen im Universum – konnte bis heute eine allgemeingültige Gleichung gefunden werden. Wie soll es da für die viel komplexeren Wechselwirkungen des Lebens gelingen? In jedem Fall wäre es die Verwirklichung eines metaphysischen Urtraums. Der Laplace'sche Dämon in Silizium. Irgendwie teuflisch jedenfalls. □

Schon etwas seltsam fühlte sich der Berliner Autor CARSTEN JASNER, 48, als er am Umweltforschungszentrum in Leipzig per Joystick durch eine 3-D-Simulation „flog“. Und bekam zugleich eine Ahnung von den nicht immer ungefährlichen Verlockungen, die diese Methodik für Wissenschaftler darstellt.