

Entwicklung von Rekorden in der Leichtathletik

Mit mathematischen Mitteln gelingt es, echten Fortschritt und Zufall in ihrem Einfluss auf sportliche Höchstleistungen zu trennen.

Von Daniel Gembris

Warum werden sportliche Rekorde immer wieder übertrumpft? Gängige Antworten lauten: Die Sportler trainieren härter und geschickter, sie stärken sich mit erlaubten oder unerlaubten Mitteln, sie verwenden neue Techniken oder bessere Ausrüstung. Doch es gibt eine viel einfachere Erklärung: den Zufall. Wenn ein Hochleistungssportler gut vorbereitet an den Start geht, dann entscheiden über die letzten Zentimeter oder Zehntelsekunden, auf die es für eine neue Bestmarke ankommt, auch rein zufällige Einflüsse wie der Wind, die Temperatur und die Tagesform.

Sofern es also an der Technik, sagen wir, des Weitsprungs, nichts Entscheidendes mehr zu verbessern gibt, kann man mit Fug und Recht unterstellen, dass eine einzelne Sprungweite das Ergebnis eines Zufallsexperiments ist und alle solchen Experimente voneinander unabhängig sind. In diesem Fall sollte die Wahrscheinlichkeitsverteilung in guter Näherung einer gaußschen Glockenkurve entsprechen, und zwar für eine bestimmte Disziplin bei vergleichbarer Da-

tenerhebung stets derselben. Natürlich wird es dann immer schwieriger, einen neuen Rekord aufzustellen; denn je mehr Zeit vergeht, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine außergewöhnlich gute Leistung bereits erbracht wurde, und desto geringer die Chance, sie noch zu übertreffen.

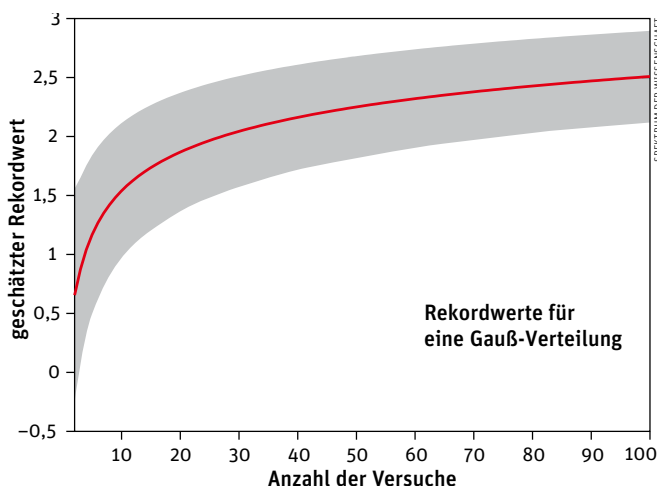
Bei unabhängigen Realisierungen einer und derselben Gauß-Verteilung entpuppt sich die jeweilige Bestmarke im Wesentlichen als Funktion von $\ln(\ln N)$, wobei N die Zahl der Jahre bezeichnet. Der natürliche Logarithmus $\ln$ macht aus einer linearen eine sehr langsame Zunahme, die extrem gering wird, wenn man ihn zweimal hintereinander anwendet. So ist $\ln 100 = 4,605$ und $\ln(\ln 100) = 1,527$, während der Logarithmus von einer Million auch nur 31,816 und dessen Logarithmus 2,626 beträgt.

Eine Gauß-Verteilung ist gekennzeichnet durch ihren Mittelwert μ , den Punkt, an dem die Glockenkurve ihr Maximum erreicht, und ihre Standardabweichung σ , die ein Maß für die Breite der Verteilung darstellt. Die zugehörige Rekordkurve lässt sich sehr präzise durch die Formel

$$x_{\max} = \mu + \sigma (a_0 + a_1 \ln(\ln N) + a_2 (\ln(\ln N))^2)$$

mit den Koeffizienten $a_0 = 0,818$, $a_1 = 0,574$ und $a_2 = 0,349$ wiedergeben (Bild unten links). Angenommen, der Mittelwert für den Weitsprung der Herren betrage 7,94 Meter und die Standardabweichung 12 Zentimeter (abgeschätzt aus den Rekorddaten für die Jahre 1973 bis 1984), dann läge die erwartete Bestmarke im zweiten Jahr bei 8,01 Metern und nach 50 Jahren bei 8,21 Metern. Nochmals 50 Jahre später wären nur noch lumpige drei Zentimeter dazugekommen.

Dieses theoretische Ergebnis liefert eine gute Messlatte, um zu bestimmen, ob die Entwicklung der tatsächlich beobachteten Rekordwerte allein durch den Zufall zu erklären ist. Zusammen mit meinen Kollegen John G. Taylor und Dieter Suter habe ich die Ergebnisse der Deutschen Meisterschaften in 22 Disziplinen aus dem Zeitraum 1973 bis 1996 ausgewertet; später kamen die Weltjahresbestleistungen und schließlich Resultate für afrikanische, asiatische und andere europäische Länder hinzu (*Journal of Applied Statistics*, Bd. 34, S. 529).



Links: Der Schätzwert (rot, mit grauem Fehlerintervall von einer Standardabweichung) für den Rekord eines »Wettkampfs«, der aus Zufallsexperimenten mit einer Gauß-Verteilung besteht, steigt mit der Zahl der Experimente zunächst rasch, später quälend langsam an. Die dieser Grafik zu Grunde liegende Gauß-Verteilung hat den Mittelwert 0 und die Standardabweichung 1.

Rechts: Der Weltrekord im 110-Meter-Hürdenlauf scheint sich rein stochastisch entwickelt zu haben. Dagegen zeigt der Zeitverlauf für den 5000-Meter-Lauf ab 1994 einen starken Trend, der nicht durch Zufall zu erklären ist. Die Parameter für die Schätzwerte (rot mit grauem Fehlerintervall) wurden aus den Ergebnissen für den Referenzzeitraum 1980 bis 1989 errechnet; die beobachteten Rekordwerte sind durch eine blaue Linie verbunden.



DPA / SVEN SIMON

Wir verwendeten die Jahre 1973 bis 1984 als Referenzzeitraum, um daraus die Parameter μ und σ zu bestimmen, und analysierten die Jahre 1985 bis 1996 mit den so ermittelten Größen.

Natürlich kann auch während des Referenzzeitraums ein nicht zufälliger Trend wirksam gewesen sein. Um ihn zu berücksichtigen, haben wir vor der Berechnung von μ und σ eine Ausgleichsgerade durch die entsprechenden Daten gelegt und deren Werte von den beobachteten

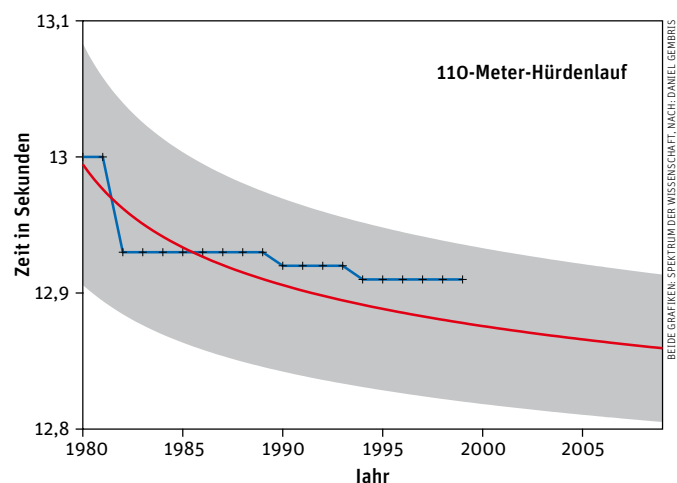
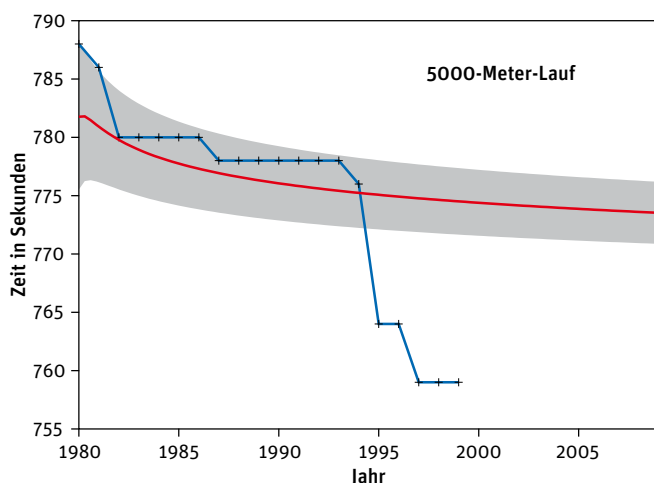
Rekorden subtrahiert. Für μ nahmen wir den Wert der Ausgleichsgeraden am Ende des Referenzintervalls.

Für die deutschen Meisterschaften zeigt sich nur in vier Fällen eine deutliche Abweichung von einer rein zufallsbedingten Entwicklung: 110-Meter-Hürdenlauf, 20 und 50 Kilometer Gehen sowie Stabhochsprung. Hier gab es also eine, wie auch immer begründbare Leistungssteigerung. Generell ist eine Abnahme systematischer Verbesserungen über

Die deutsche Ausnahmeathletin Heike Drechsler stellte in den 1980er Jahren Weltrekorde in drei Disziplinen auf: im Weitsprung, 200-Meter-Lauf und Siebenkampf (bei den Junioren).

den Analysezeitraum zu beobachten. Eine »Sättigung« ließ sich vor allem für Deutschland und England feststellen.

Die Auswertung der Weltjahresbestleistungen zeigte deutlichere Leistungs-



BEIDE GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH DANIEL GEMBRIS

steigerungen auf internationaler Ebene, weshalb wir nur die Resultate ab 1980 betrachteten. Als Referenzintervall wählten wir die Dekade von 1980 bis 1989 und wandten die Ergebnisse auf den Zeitraum von 1990 bis 1999 an. Diesmal waren 7 von 19 Schätzungen um mehr als drei Standardabweichungen vom tatsächlichen Bestwert entfernt, was sehr stark auf eine echte Verbesserung hinweist.

Für die Weltjahresbestleistungen haben wir nicht nur den wahrscheinlichen Rekordwert für ein längeres Zeitintervall, sondern für jedes Jahr einzeln berechnet und obendrein in die Zukunft extrapoliert. Die größten nicht zufälligen Leistungssteigerungen ergaben sich für die afrikanischen und asiatischen Länder, aber auch hier lässt das Wachstum allmählich nach.

Für unsere Rekordanalyse sind Phasen relativer Stagnation erforderlich. Da für Frauen deutliche Leistungssteigerungen bis in die 1980er Jahre vorliegen, wäre die Datenbasis zu klein gewesen. Daher haben wir nur die Ergebnisse für die männlichen Athleten betrachtet.

Zwei Einwände lassen sich gegen unser Verfahren erheben. Erstens ist auch eine Jahresbestleistung so etwas wie ein Rekord und muss deshalb nicht einer Gauß-Verteilung genügen, selbst wenn die Leistungen aller Athleten in diesem Jahr das tun. Es stellt sich jedoch heraus, dass der dadurch in die Analyse eingeführte Fehler klein ist und vor allem den Effekt hat, dass Rekorde eher unter- als überschätzt werden.

Zweitens ist ganz allgemein die Gauß-Verteilung unrealistisch, indem sie – zum Beispiel – selbst negativen oder physiologisch vollkommen unmöglichen Sprungweiten noch eine gewisse, wenn auch extrem geringe Wahrscheinlichkeit zuweist. Aber eine Kontrollrechnung mit einer »abgeschnittenen« Verteilung, in der die Wahrscheinlichkeiten für solche unmöglichen Werte auf null gesetzt wurden, zeigt, dass sich der Effekt dieses Fehlers vernachlässigen lässt.

Hinweise auf Doping

Generell liefert die oben genannte Formel eine einfache Erklärung für manchen positiven Trend im Sport: Maximalleistungen werden allein schon durch Zufall besser, indem man mehr Leute in die Talentsuche einbezieht. Man stelle sich vor, ein Talentsucher bitte einen Kandidaten nach dem anderen um eine Probe seiner Fähigkeiten und merke sich jeweils den bisher Besten und dessen Leistungen. Dann folgt dieser Rekord – im Rahmen der Fehlergrenzen – der Formel mit dem doppelten Logarithmus; nur ist die Variable N jetzt die Anzahl der bisher geprüften Kandidaten. Dass der Anstieg für sehr große N sehr langsam ist, erklärt, warum die deutschen Rekorde nach der Wiedervereinigung keinen nennenswerten Sprung nach oben machten: Die Zahl der Kandidaten wuchs zwar absolut gesehen erheblich an, aber N war schon vorher ziemlich groß.

Ebenso eignet sich die Formel, um aus der durchschnittlichen Körpergröße

und ihrer Streuung den aktuellen Weltrekord zu schätzen oder – völlig abseits vom Sport – aus verrauschten physikalischen Messdaten den interessanten Anteil herauszufiltern. Weil die Abhängigkeit von der Zahl der »Messwerte« sehr schwach ist, funktionieren Extrapolationen über mehrere Größenordnungen sehr zuverlässig.

Bei Rekorden, die innerhalb einer kurzen Zeitspanne deutlich über das Vorhersageintervall hinausschießen, bietet Doping eine mögliche Erklärung. Weiteren Aufschluss darüber erhielten wir mit einem zusätzlichen statistischen Verfahren, dem Chow-Test. Dabei teilt man eine Zeitreihe in zwei Intervalle auf und bestimmt für jedes eine Ausgleichsgerade. Starke Abweichungen zwischen den beiden Geraden weisen auf »strukturelle Brüche« hin.

Einer solchen Analyse zufolge gab es nach der Einführung eines neuen Dopingtests im Jahr 1988 in vielen Disziplinen einen deutlichen Knick in der Leistungsentwicklung, vor allem auf internationaler Ebene, aber auch bei den Deutschen Meisterschaften.

Mathematische Methoden eignen sich also zum Aufspüren von Unregelmäßigkeiten. Denen kann dann mit chemischen Nachweisverfahren weiter nachgegangen werden.

Daniel Gembris ist promovierter Physiker und arbeitet als Methodenentwickler beim Forschungsgerätehersteller Bruker BioSpin MRI GmbH in Ettlingen.

KREBSTHERAPIE ► Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Laserskalpell mit Tiefenwirkung

Bei der fotodynamischen Therapie macht ein Sensibilisator Zellen empfindlich gegenüber Laserstrahlung. Eine neue Lichtantenne verbessert die Präzision dieser Methode und erweitert ihre Einsatzmöglichkeiten.

Von Michael Groß

Mit Licht unerwünschtes Gewebe zu zerstören, ist in der Augenheilkunde schon seit Langem gängige Praxis. Bei der feuchten Form der altersbedingten Makuladegeneration, der häufigsten Ursache der Erblindung von Menschen über 55, beeinträchtigt die Bildung un-

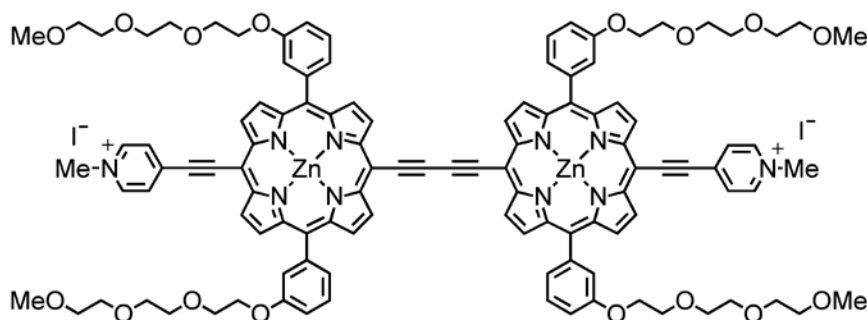
nötiger Blutgefäße das Sehvermögen. Die Ärzte zerstören diese Äderchen und verhindern ihre weitere Ausbreitung, indem sie einen scharf fokussierten Laserstrahl darauf richten, nachdem sie dem Patienten eine lichtempfindliche Chemikalie injiziert haben.

Wo das Laserlicht auf diesen Sensibilisator trifft, befördert es ihn – dank der

passend gewählten Wellenlänge – in einen angeregten Zustand. Der wiederum gibt die aufgenommene Energie an Sauerstoff weiter, der in den meisten Zellen reichlich vorhanden ist. Dabei entsteht die aggressive »Singulett«-Form des Gases, welche die umliegenden Zellen zerstört.

Das Auge eignet sich für eine solche Behandlung insofern besonders gut, als

Dieser neue Sensibilisator (Strukturbild) macht Krebszellen auch für Infrarotstrahlung empfindlich, die deutlich tiefer in Gewebe eindringen kann als sichtbares Licht. Er besteht aus zwei Porphin-Ringen, die durch einen leitfähigen molekularen »Draht« verbunden sind.



HAZEL A. COLLINS ET AL., NATURE PHOTONICS 2008, Bd. 2, S. 394

es durchsichtig ist und seine Linse einfaches Licht bündelt. Die fotodynamische Therapie (FDT) wird aber auch gegen leicht zugängliche Krebsgeschwüre eingesetzt – etwa auf der Haut. Bei tief sitzenden Tumoren – zum Beispiel in Leber oder Niere – ist sie dagegen nicht ohne Weiteres anwendbar. Hinderlich wirken hier die geringe Eindringtiefe des Lichts in den Körper und die Schwierigkeit, es innerhalb des stark streuenden Gewebes zu fokussieren.

Doch nun haben Chemiker an der University of Oxford ein Molekül entwickelt, das diese beiden Probleme auf ei-

nen Streich zu lösen verspricht. Der Arbeitsgruppe von Harry L. Anderson gelang die gezielte Synthese von Lichtantennen, für deren Aktivierung zwei Photonen auf einmal nötig sind (*Nature Photonics*, Bd. 2, S. 420). Bei einer solchen paarweisen Anregung braucht jedes Lichtquant nur halb so viel Energie. Der Laserstrahl hat folglich etwa die doppelte Wellenlänge. Langwelliges Licht aber kann tiefer in Gewebe eindringen.

Auch die Treffgenauigkeit ist bei dem neuen Sensibilisator deutlich höher. Damit er angeregt wird, müssen zwei Photonen gleichzeitig darauf stoßen. Die Wahrscheinlichkeit dafür sinkt jedoch drastisch – mit der vierten Potenz – mit dem Abstand vom Brennpunkt des Laserstrahls.

Auf der Suche nach einer solchen Lichtantenne synthetisierte das Team aus Oxford eine ganze Palette neuer Verbindungen, die sich vom Porphin ableiten. Das ist ein ringförmiges Molekül, das als zentraler Bestandteil im Häm des roten Blutfarbstoffs und im Chlorophyll der Pflanzen vorkommt. Als besonders viel versprechend erwies sich eine Gruppe von Substanzen, in denen zwei Porphin-Ringe über einen elektrisch leitfähigen molekularen »Draht« miteinander verbunden sind.

Mit einem dieser Moleküle, das für die FDT am besten geeignet schien (Bild oben), reiste Andersons Doktorandin Hazel A. Collins schließlich von Oxford nach Toronto (Kanada), um im Labor von Brian C. Wilson medizinische Tests durchzuführen.

Die Ergebnisse waren ermutigend. So ließ sich mit der neuen Lichtantenne im Tierversuch per Laserbestrahlung im Nah-Infrarot (bei einer Wellenlänge von 920 Nanometern) mit hoher Präzision eine feine Ader einen halben Millimeter unter der Haut veröden (Bild links). Zellen in der Umgebung wurden nicht beeinträchtigt; denn da sie in diesem Wel-

lenlängenbereich praktisch durchsichtig sind, absorbierten sie nur so wenig Laserlicht, dass sie sich nicht nennenswert erwärmten.

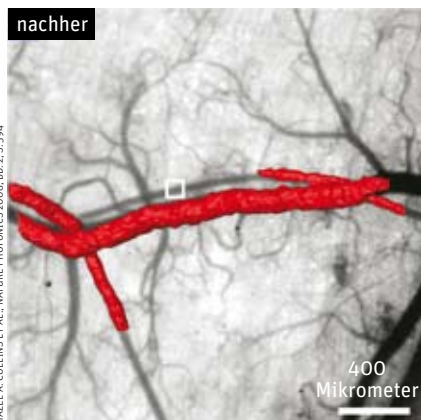
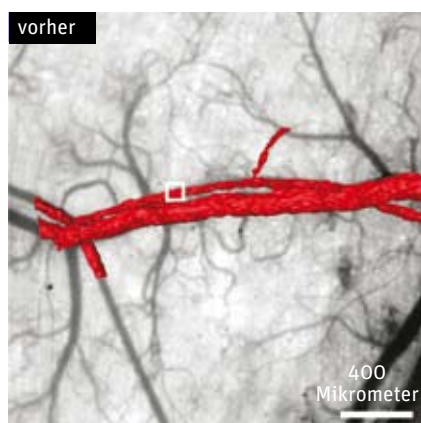
In Geweben aus vielen Zellschichten kommt es allerdings zu Streueffekten, welche die Durchlässigkeit verringern. Die Eindringtiefe ist deshalb auch für Nah-Infrarot-Licht begrenzt. Doch dürfte sie nach Einschätzung der Wissenschaftler immerhin bei mehr als einem Zentimeter liegen. Das entspricht dem 2,5-Fachen des Werts beim bisher verwendeten sichtbaren Licht. Charles Spangler von der Montana State University in Bozeman will deshalb die Zwei-Photonen-Methode zur nicht invasiven Behandlung von Brustkrebs einsetzen und hat zu diesem Zweck bereits die Spin-off-Firma Rasiris Inc. gegründet.

Bekämpfung tieferer Krebsherde möglich

Auch tiefere Krebsherde dürften in Verbindung mit endoskopischen und operativen Eingriffen leichter zugänglich werden. Das sollte vor allem die Lichtbehandlung kleiner Tumoren in empfindlicher Umgebung wie dem Gehirn ermöglichen.

Die fotodynamische Therapie ist in der Europäischen Union und Nordamerika schon zur Bekämpfung mehrerer Krebsarten zugelassen. Der seit den 1990er Jahren erhältliche Sensibilisator Porfimer kommt zum Beispiel bei Tumoren in der Speiseröhre, den Lungen, der Harnblase und dem Gebärmutterhals zum Einsatz. In all diesen Fällen werden zur Bestrahlung Lichtleiter durch Körperöffnungen eingeführt. Anderson ist überzeugt, dass auch hier die neuen Sensibilisatoren eine entscheidende Verbesserung bringen, indem sie die Eindringtiefe der Strahlung erhöhen.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).



HAZEL A. COLLINS ET AL., NATURE PHOTONICS 2008, Bd. 2, S. 394

Mit dem neuen Sensibilisator ließ sich gezielt ein feines Äderchen verschließen. Der weiße Kasten markiert die bestrahlte Stelle.

Superrechner mit Playstation-Chips

Der schnellste Computer der Welt vollführt eine Billion elementarer Rechenakte in der Sekunde – und wurde zu wesentlichen Teilen in Böblingen entworfen.

Von Christoph Pöppe

Hier ist der Platz, wo der technische Fortschritt noch immer in atemberaubendem Tempo stattfindet, und das seit mehr als 40 Jahren: das Hochleistungsrechnen. In diesem Frühsommer wurde wieder einmal eine psychologisch wichtige Messlatte übersprungen: Der nunmehr schnellste Computer der Welt schafft mehr als 10^{15} (eine Billion) Rechenoperationen pro Sekunde.

Noch 1997 war es eine Sensation, dass der Rechner ASCI Red von Intel die Billionengrenze durchstieß, und 1986 hatte der Vektorrechner Cray 2 Schlagzeilen gemacht, weil er eine Million Multiplikationen in der Sekunde schaffte. Alle elf Jahre muss man sich also wieder aufs Neue an eine der selten gebrauchten Vorsilben für große Vorfaktoren gewöhnen: Nach Giga- (10^9) und Tera- (10^{12}) sind jetzt Petaflops (10^{15} »floating point operations per second«, Gleitkommaoperationen pro Sekunde) das Maß der schnellsten Rechner. Ein Faktor 1000 in elf Jahren, das ist eine knappe Verdoppelung pro Jahr und damit noch deutlich mehr, als dem viel zitierten mooreschen Gesetz entspricht.

Dabei hatte dieser empirischen Regel schon mehrfach das Totenglöckchen geläutet. Unbestreitbar stößt die Miniaturisierung der elementaren Bauteile an natürliche Grenzen. Die Breite der kleinsten Strukturen mag in den kommenden Jahren von 45 Nanometern, dem gegenwärtigen Stand der Technik, auf 32 Nanometer sinken, aber nicht wesentlich tiefer: Ein Bit muss schließlich durch eine Mindestzahl von Atomen repräsentiert werden, wenn ein Schaltkreis zuverlässig funktionieren soll.

Da sich die Wege für die elektrischen Impulse nicht weiter verkürzen lassen, nimmt auch die Schaltgeschwindigkeit nicht mehr nennenswert zu. Nur höherer Energieeinsatz könnte die Bits noch schneller umspringen lassen, aber dann stellt sich die Frage, wohin mit der Energie. Die Zeiten, als ein Chip nur so viel



Wärme pro Quadratzentimeter abstrahlte wie ein Bügeleisen oder eine Herdplatte, sind schon lange vorbei. Inzwischen kann es das kleine Plättchen bei der Heizleistung pro Flächeneinheit mit einem Kernreaktor aufnehmen.

Um das absehbare Ende des mooreschen Gesetzes noch ein wenig hinauszuzögern, packten Computertechniker vor wenigen Jahren mehrere Prozessoren auf einen Chip (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 90), wo sie über einen gemeinsamen Zwischenspeicher (»Cache«) miteinander kommunizieren; dabei dürfen sie einander beim Rechnen nicht ins Gehege kommen.

Grafikkarte als Prozessor

Inzwischen ist aus der Not eine Tugend und »Multicore« der neue Standard geworden: Unter den Rechnern der »Top 500«, der halbjährlich aktualisierten Liste der 500 leistungsfähigsten Computer der Welt, überwiegen bereits die Geräte mit vier Prozessoren pro Chip, acht Stück sind Stand der Technik, über noch wesentlich mehr wird bereits intensiv nachgedacht. Und das mooresche Gesetz gilt in alter Frische weiter.

Die neue Rekordmaschine heißt »Roadrunner«, kommt aus dem Hause IBM und steht im Nationallaboratorium in Los Alamos (New Mexico). Bei der jüngsten Internationalen Supercompu-

Auffälligstes Merkmal des Bauteils namens QS22, das zu Tausenden in dem Rekordcomputer »Roadrunner« Verwendung findet, sind die großflächigen rötlichen Kühlrippen aus reinem Kupfer.

ter-Konferenz im Juni dieses Jahres in Dresden wurde ihr feierlich und offiziell Platz 1 der Top 500 zugesprochen. Damit hat »Roadrunner« den bisherigen Rekordhalter Blue Gene /L nach immerhin dreieinhalb Jahren Regentschaft vom Thron gestoßen.

Auch der nun übertrumpfte Rechner stammt von IBM. Überhaupt dominieren die Produkte dieser Firma die Top 500 mit einem Anteil von 48 Prozent der installierten Leistung. Und da IBM ebenso wie einige Konkurrenten vorzugsweise Prozessoren von Intel einsetzt, trägt dieser Chiphersteller drei Viertel zur Gesamtleistung der Top 500 bei.

Ein Kommen und Gehen herrscht auch auf den unteren Plätzen in der Liste. Allein im letzten halben Jahr sind 300 neue Maschinen hinzugekommen und haben ebenso viele alte verdrängt. Um überhaupt noch aufgeführt zu werden, muss ein Computer schon 9 Teraflops bieten, so viel wie 1997 alle 500 Computer der Liste zusammen.

Wie erreicht der »Roadrunner« seine spektakuläre Spitzenleistung? Durch Mas-

DER NAMENSPATE

Der Roadrunner (Großer Rennkuckuck) ist der Staatsvogel des US-Bundesstaates New Mexico. Er fliegt nicht gern, läuft jedoch ausdauernd und mit hoher Ge-



schwindigkeit und wird sogar offiziell als »komischer Vogel« bezeichnet. Ihm nachempfunden ist die gleichnamige Cartoonfigur von Chuck Jones, die nach dem Vorbild von »Tom und Jerry« ihren Verfolger, den Kojoten Wile E. Coyote, stets lächerlich aussehen lässt – Grund genug für die Forscher am Los Alamos National Laboratory (LANL), ihren Supercomputer mit diesem Namen mit Lokalkolorit zu versehen, zum Verdruss der Herstellerfirma IBM, die vergeblich die Verwendung des Namens zu unterbinden versuchte.

se und geschickte Verknüpfung von Standardteilen – das war bisher das Erfolgsrezept von IBM. Das trifft auch diesmal insofern zu, als die Maschine ungefähr 120 Millionen Dollar gekostet hat, 650 Quadratmeter Grundfläche bedeckt, reichlich 2000 Tonnen wiegt und aus 6480 gleichen Exemplaren desselben Bauteils besteht. Nur ist dieses so genannte TriBlade kaum als Standardteil zu bezeichnen. Es besteht aus einem eher gewöhnlichen Chip namens »Opteron« von AMD sowie zwei Platinen namens QS22, die eigentlich als Grafikkarten für eine Playstation von Sony entwickelt worden waren und für ihren neuen Zweck nur geringfügig modifiziert werden mussten.

Wie kommt eine Hardwarekomponente, die ursprünglich darauf ausgelegt war, möglichst realistische, schnell bewegte Bilder für das Spielen in einer Fantasiewelt zu erzeugen, zu der Ehre, am schnellsten Rechner der Welt mitzuwirken? Auch im gewöhnlichen PC verfügt die Grafikkarte über weit mehr Rechenkapazität als der eigentliche Prozessor, nutzt sie jedoch nur für ganz spezielle Zwecke (Spektrum der Wissenschaft 7/2008, S. 80). Das gilt für eine Playstation ebenso. Im Interesse der hohen Rechenleistung haben die Erbauer des »Roadrunner« sich auf gewisse Einschränkungen in der Programmierbarkeit eingelassen.

Dabei brachen sie mit einer hartnäckigen Tradition des Supercomputing, die schon mehrere Hardwaregenerationen überlebt hat: Um die viele bereits investierte Arbeit nicht wegwerfen zu müssen, pflegt man bislang in der uralten Sprache Fortran zu programmieren. Dabei tauschen die vielen Prozessoren eines Rechners ihre Daten mit

einer standardisierten Methode namens MPI (*message passing interface*) aus. Das tun die TriBlades untereinander zwar immer noch; aber die interne Kommunikation verläuft anders. Auf dem QS22 ist sogar der Cache abgeschafft worden. An die Stelle einer Hierarchie von immer kleineren, immer schneller zu erreichenden Zwischenspeichern, über deren Stufen die Daten treppauf zum Prozessor und treppab wieder weggeschafft werden – und möglichst oft auf den oberen Stufen schon kehrtmachen, weil sie wiederverwendet werden –, tritt ein so genannter Datenbus. Daten werden vom Absender in eine Ringleitung eingespeist und laufen dort, bis der Empfänger sie abgreift. Dieses altbacken anmutende Verkehrsmittel verbindet auch die Einzelteile jedes PCs; aber im QS22 übernimmt ein echter Schnellbus mit einer Taktrate von 196 Gigabit pro Sekunde die Kommunikation zwischen den neun Prozessoren eines Chips. Davon erledigen acht die eigentliche Arbeit, und der neunte ist der Aufpasser.

Was anfangen mit so viel Rechenleistung?

Wie üblich wurde die Leistung des Rekordrechners an der Standardaufgabe gemessen, ein voll besetztes lineares Gleichungssystem zu lösen (die »LINPACK benchmark«). Seine eigentliche Arbeit soll er dagegen mit vier großen Anwendungsprogrammen leisten. Die wiederum modellieren physikalische Prozesse wie die Dynamik eines Plasmas, bei denen sehr viele Teilchen Kräfte aufeinander ausüben, oder Strömungsprozesse mitsamt der gefürchteten Turbulenz. Die Experten in Los Alamos haben andert-halb Jahre gebraucht, um die Maschine

so zu programmieren, dass ihre Rechenleistung dabei voll oder zumindest zu einem erheblichen Anteil genutzt wird.

In der Podiumsdiskussion aus Anlass des neuen Weltrekords priesen alle Redner artig die große Errungenschaft – und beeilten sich dann, sie zu relativieren. Wie es aussieht, wird der »Roadrunner« in der Petaflops-Klasse nicht lange allein bleiben. Die Konkurrenz von Cray hofft im Herbst nachzuziehen; und anscheinend plant ein japanisches Team einen ähnlichen Überraschungscoup wie vor sechs Jahren, als der »Earth Simulator« mit damals sensationellen 35 Teraflops die Konkurrenz um den Faktor 5 hinter sich ließ und zweieinhalb Jahre lang den Spitzenplatz in der Liste halten konnte.

Die Europäer haben sich daran gewöhnen müssen, mit der maximalen Leistung ihrer größten Computer immer um einen Faktor 4 hinter den dominierenden Amerikanern zurückzuliegen (und wollen seit Kurzem mit einem Projekt namens PRACE diesen Rückstand verkürzen). Da ist es ein gewisser Trost, dass von der 120-köpfigen Arbeitsgruppe, die den »Roadrunner« entwickelt hat, zwei Drittel beim IBM-Forschungszentrum in Böblingen arbeiten.

Die nächste Vorsilbe nach Tera und Peta ist übrigens schon im Gespräch. Ein hochkarätig besetztes Gremium lotet bereits aus, wie man – bis 2019, um den Elfhahresrhythmus einzuhalten – zu einem »Exaflops«-Computer mit 10^{18} Rechenoperationen kommt.

Der elementare Rechenakt, das schlichte Multiplizieren, ist auf die Dauer kaum noch beschleunigungsfähig. Höhere Leistungen lassen sich nur dadurch erzielen, dass man eine ungeheure Anzahl von Prozessoren nebeneinanderstellt. Viel interessanter und schwieriger wird das Problem, viele Millionen von »Fäden« (*threads*, eigenständige Befehlsfolgen) in der Hand zu behalten und zu koordinieren. Nicht mehr das Rechnen selbst, sondern die Bereitstellung der Daten *just in time* wird den größten Teil der elektrischen Leistung verbrauchen.

Nach bisherigen Extrapolationen würde ein Exaflops-Computer ungefähr 120 Megawatt verbrauchen und damit bereits ein mittelgroßes Kraftwerk beschäftigen. (Der »Roadrunner« begnügt sich mit reichlich 2 Megawatt.) Nicht nur die Energie heranzuschaffen, sondern sie nach getaner Arbeit in Form von Wärme auch wieder abzuführen, droht das be-

herrschende Problem für die nächste Generation der Superrechner zu werden.

Lässt sich die viele Rechenleistung denn überhaupt sinnvoll nutzen? Aber sicher. In den USA pflegt man den Rechenbedarf – und den Antrag auf den nächstgrößeren Superrechner – gerne mit der Notwendigkeit zu begründen, das allmähliche Verrosten des Kernwaffenarsenals präzise zu simulieren; denn dessen Funktionsfähigkeit durch Ausprobieren zu überprüfen, verbietet der Atomteststoppvertrag. Aber es gibt auch zivile Anwendungen mit einleuchtenderem Nutzen.

Im Rahmen der großen Klimadebatte interessiert es neuerdings die Regierungen zahlreicher Länder, welche Auswirkungen der Klimawandel nicht nur global, sondern auf ihr eigenes Land haben wird. Solche Fragen können bisherige Klimamodelle nicht befriedigend beantworten, weil das gedachte Netz, das zum Rechnen über die Erde gelegt wird, dafür zu weitmaschig ist. Bei den heutigen Computerkapazitäten sind allenfalls zehn Kilometer Maschenweite in globalem Maßstab erreichbar. Maximal ein Kilometer wäre aber nötig, um kleinräumige Phänomene mit großer Wirkung korrekt aufzulösen. Ein Faktor 10 in der Maschenweite macht einen Faktor 10000 im Rechenaufwand; denn die Verfeinerung muss in drei Raum- und einer Zeitkoordinate zugleich stattfinden. Selbst in elf Jahren werden die Klimaforscher also noch unerfüllte Wünsche nach Rechenkapazität haben.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

HIRNFORSCHUNG  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Leuchtende Lügen

Herkömmliche Lügendetektortests sind nur bedingt verlässlich. Nun sollen Magnetresonanz-Hirnaufnahmen verraten, ob eine Person die Wahrheit sagt. Ist ihnen eher zu trauen?

Von Gary Stix

Vor einem Jahr erschien im britischen Fernsehen eine dreiteilige Serie namens »Lie Lab« (»Lügenlabor«). Sie berichtete über Versuche des Medizinprofessors Sean A. Spence von der University of Sheffield, durch Abbildungen der Hirnaktivität mittels funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT) zwischen wahren und erlogenen Behauptungen zu unterscheiden. Unter anderem nahm der Forscher Hirnscans einer Frau auf, die dafür verurteilt worden war, ein ihr anvertrautes Kind mit einer Überdosis Salz vergiftet zu haben. Das Resultat gab zu denken: Es legte nahe, dass die Unschuldsbeteuerungen der Frau der Wahrheit entsprachen. Spence veröffentlichte die betreffenden Untersuchungen später in der Fachzeitschrift »European Psychiatry«.

Herkömmliche Lügendetektoren, so genannte Polygraphen, messen äußerliche Zeichen für Ängstlichkeit wie einen Anstieg von Puls, Blutdruck, Atemfrequenz oder Schweißabsonderung. Die fMRT will die Lüge dagegen direkt an ihrer Quelle aufspüren: im Gehirn. Die Berichte über das Verfahren haben nicht

nur einige 100 000 Fernsehzuschauer fasziniert, sondern inzwischen auch geschäftstüchtige Unternehmer auf den Plan gerufen. Zwei US-Firmen – Cephus in Pepperell (Massachusetts) und No Lie MRI in Tarzana (Kalifornien) – behaupten, mit mindestens 90-prozentiger Sicherheit sagen zu können, ob jemand lügt. No Lie MRI schlägt das Verfahren sogar zur »Risikominderung bei Verabredungen« vor.

Viele Neurowissenschaftler und Gerichtssachverständige halten derlei Behauptungen allerdings für höchst fragwürdig. Einige bezweifeln sogar, dass Hirnscans jemals zur Lügendetektion taugen werden. Ihnen scheinen sie allenfalls geeignet, einen Beitrag zur Grundlagenforschung über das Wesen der Täuschung zu leisten.

Beim Flunkern muss sich das Gehirn anstrengen

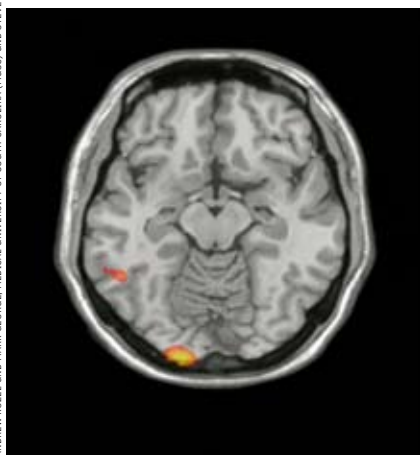
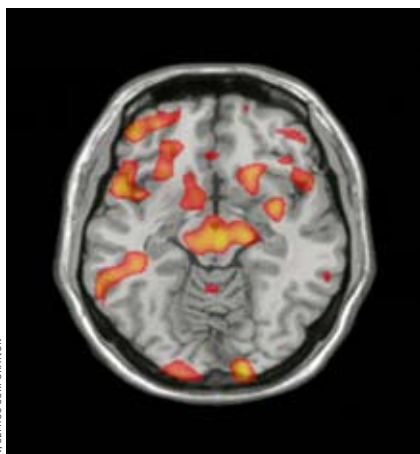
Bei der fMRT wird anhand der Durchblutung von Gehirnregionen deren Aktivität gemessen. Wie will man damit herausfinden, ob jemand die Wahrheit sagt? Forscher wie Spence glauben, dass sich das Gehirn anstrengen muss, um eine Lüge zu erfinden, und dafür Be-

Wertverlust

Wenn Ihre CO₂-Emissionen sinken, steigt der Unternehmenswert.

WENIGER REDEN. **MACHEN.** Mehr dazu unter ibm.com/green/de





Bei einer Frau, die fälschlich behauptete, eine Uhr gestohlen zu haben, leuchteten in der Magnetresonanzaufnahme des Gehirns viele Regionen auf (oben), die bei der korrekten Antwort auf die Frage nach dem Diebstahl eines Rings inaktiv blieben (unten).

reiche zusätzlich aktiviert. Die aber sollten sich entdecken lassen. Nach bisherigen Befunden sind es hauptsächlich Regionen, die mit dem Fällen von Entscheidungen zu tun haben.

Für eine zuverlässige Bewertung, inwieweit sich die fMRT und andere neurowissenschaftliche Methoden für die Strafverfolgung eignen, hat die MacArthur Foundation im vergangenen Jahr zehn Millionen Dollar bereitgestellt. Mit dem Geld finanziert die Stiftung das auf drei Jahre angelegte Projekt »Law and Neuroscience«. Ziel ist unter anderem, Kriterien für die genaue und verlässliche Lügendetektion mit fMRT oder anderen Hirnuntersuchungen zu erarbeiten.

»Beim jetzigen Stand der Technik kann man, glaube ich, den Ergebnissen noch nicht trauen«, meint Marcus Raichle von der Washington University School

of Medicine in St. Louis (Missouri), der im Rahmen des Projekts die Studiengruppe über Lügendetektion leitet. »Dennoch halte ich es für vertretbar, ein Forschungsprogramm ins Leben zu rufen, um zu prüfen, ob das überhaupt möglich ist.«

Zweifel an der Zuverlässigkeit

In einem Übersichtsartikel im »American Journal of Law and Medicine« vom vergangenen Jahr verwiesen Henry T. Greenly von der Stanford University (Kalifornien) und Judy Illes, inzwischen an der University of British Columbia bei Vancouver (Kanada), auf die großen noch bestehenden Forschungslücken und machten Vorschläge, wie sich die Methode verbessern ließe. Nach den Schlussfolgerungen der beiden Autoren bleiben die nicht einmal 20 bisher durchgeführten Untersuchungen jedenfalls den Beweis schuldig, dass die fMRT »in der realen Welt auf irgendeinem Zuverlässigkeitsniveau als Lügendetektor taugt«.

Die Liste der aufgeführten Mängel ist lang. In den meisten Fällen wurden Gruppen statt Einzelpersonen getestet. Für das Ergebnis vieler Untersuchungen gibt es keine unabhängige Bestätigung. Versuchsteilnehmer waren junge, gesunde Erwachsene. Niemand weiß daher, wie die Ergebnisse bei Personen aussehen würden, die Blutdrucktabletten einnehmen oder verengte Arterien haben. Die beiden Forscher stellten außerdem die Spezifität der aufleuchtenden Bereiche in Frage; wie sie anmerken, korrelieren die betreffenden Regionen mit einem breiten Spektrum kognitiver Vorgänge – etwa Sich-Erinnern, Selbstkontrolle und bewusste Eigenwahrnehmung.

Die größte Herausforderung – für die das Projekt »Law and Neuroscience« bereits neue Untersuchungen in die Wege geleitet hat – besteht darin, Möglichkeiten zu finden, das Testverfahren weniger künstlich zu gestalten. Fälschlich zu behaupten, eine Spielkarte sei nicht die Pik Sieben, aktiviert nicht unbedingt dieselben Hirnregionen wie eine Lüge auf die Frage, ob man den Laden an der Ecke ausgeraubt hat. Die realistischsten Untersuchungen bisher stammen wohl tatsächlich aus der »Lie Lab«-Serie.

Die zwei Firmen, die das Verfahren vermarkten, haben verständlicherweise nicht die Geduld, auf weitere Daten zu

warten. Um die gerichtliche Anerkennung seines Verfahrens zu erhalten, bietet Cephos Menschen, die behaupten, fälschlich angeklagt zu sein, kostenlose Scans an.

Die Zulassung von fMRT-Aufnahmen als juristische Beweismittel würde einen Riesensmarkt aufmun. »Gut möglich, dass wir viele Anläufe brauchen, bis wir es in den Gerichtssaal schaffen«, räumt Cephos-Chef Steven Laken ein. Zugleich aber versichert er, das Verfahren habe inzwischen eine Genauigkeit von 97 Prozent erreicht. Außerdem hätten nach dem Protokoll seiner Firma erstellte Hirnscans von mehr als 100 Personen Daten geliefert, die viele der von Greenly und Illes aufgelisteten Einwände entkräften.

Dagegen fordern die beiden Wissenschaftler, die Methode für Anwendungen außerhalb der Forschung zu verbieten, bis reguläre klinische Tests dokumentiert haben, dass sie Mindestanforderungen an Sicherheit und Verlässlichkeit genügt.

Vorschläge für die Gestaltung solcher Tests lassen freilich die damit verbundenen Schwierigkeiten erahnen. Neben Menschen wie du und ich sollten auch Schauspieler, Poker-Profis und Soziopathen daran teilnehmen. Überzeugte Anhänger der Methode kämen ebenso unter den Scanner wie Skeptiker. Auch der soziale Kontext wäre zu berücksichtigen. Höflichkeitslügen – »Also das Essen (würg!) war wirklich fantastisch« – müssten mit Prahlerien oder Ausflüchten verglichen werden, um festzustellen, ob das Gehirn in all diesen Fällen identisch reagiert.

Trotzdem hält Greenly strenge Prüfungen für unverzichtbar. »Es besteht doch die Gefahr, dass das Leben von Menschen durch Fehler der Methode ruiniert wird«, warnt er. »Aber auch die Reputation der Wissenschaft kann Schaden nehmen, wenn eine Anwendung des Neuroimagings schiefgeht, die derart im Rampenlicht der Öffentlichkeit steht.«

Auch angesichts der langen kontroversen Geschichte des Polygrafen scheint ein behutsames, schrittweises Vortasten ratsam. Immerhin handelt es sich um ein Prüfinstrument, das ein wesentliches Element sozialer Interaktionen unter die Lupe nimmt. Auch die Frage nach Möglichkeiten des Missbrauchs verdient eine genauere Betrachtung.

Gary Stix ist Redakteur bei »Scientific American«.

Springers Einwürfe

Ehrlich währt am längsten

Aber Wissenschaftler sind auch nur Menschen.

Da hat der Forscher eine originelle Hypothese formuliert, und nun sucht er die experimentelle Bestätigung. Heureka! Schon erfüllt sich seine Hoffnung, die Daten passen zur Erwartung, die Gutachter sind beeindruckt und stimmen einer Veröffentlichung zu.

So einfach geht das selten. Vor allem in den Biowissenschaften ist das Forschungsfeld ungeheuer komplex, viele Faktoren beeinflussen das Resultat. Oft fallen die Daten kein klares Urteil – manche sprechen für die Ausgangshypothese, einige dagegen. Das experimentelle Design muss geändert, die Frage an die Natur so zugespitzt werden, dass ihre Antwort nur Ja lauten kann, notfalls Nein, keinesfalls aber Jein.

Trotz redlicher Mühe gelangen derart lupenreine Erfolge nicht immer. Ein hartnäckig uneindeutiges Resultat weckt die Versuchung, passende Daten zu favorisieren und störende zu verwerfen. Das muss noch lange nicht bewussten Betrug bedeuten. Allein schon der starke Wunsch fördert die Wahrnehmung der »guten« Daten und unterdrückt die »schlechten«, vermeintlich irrelevanten. Doch damit gerät der Forscher in die Grauzone zwischen eindeutiger Verifikation, plausiblen Befund und Datenmanipulation.

In der Regel, das heißt im Rahmen dessen, was der Wissenschaftstheoretiker Thomas Kuhn Normalwissenschaft nannte, fallen solche Datenglättungen gar nicht auf, und die entsprechende Dunkelziffer lässt sich nicht einmal ahnen. Nur wenn die angeblich experimentell untermauerte Hypothese völlig aus dem Rahmen der Normalwissenschaft fällt, schreckt die Forschergilde auf und prüft die Experimente ungläubig nach.

So erging es dem französischen Immunologen Jacques Benveniste, als er 1988 in »Nature« ein Resultat veröffentlichte, das die biochemische Wirkung eines Enzyms bei praktisch unendlicher Verdünnung zu demonstrieren schien. Das wäre auf einen

wissenschaftlichen Beweis für die Homöopathie und ihre Behauptung hinausgelaufen, Wasser »erinnere sich«, wenn entsprechend geschüttelt und gerührt, an beliebig darin verdünnte Wirkstoffe. In diesem sensationellen Fall verwandte der damalige Herausgeber von »Nature«, John Maddox, große Mühe auf den Nachweis, dass Benvenistes Team die Daten geschönt hatte. Als Indiz für praktiziertes Wunschdenken der Pariser Forscher wertete er die ungewöhnlich geringe statistische Streuung der Daten. Hochmotivierte Labormitarbeiter gaben daraufhin zu, unerwünschte Befunde als »misslungen« aussortiert zu haben.

Wer weiß, wie oft so etwas – nennen wir es Selbstbetrug durch Wunschdenken – in weniger strittigen Fällen vorkommt. Viel seltener dagegen, aber dennoch erstaunlich oft verüben Wissenschaftler bewussten Betrug: Sie erfinden, fälschen oder plagiierten Daten. Nach einer diskreten Umfrage des Office of Research Integrity (ORI), der amerikanischen Behörde zur Überprüfung wissenschaftlichen Fehlverhaltens, kommen auf 100 Forscher schätzungsweise drei solche Betrugsfälle pro Jahr (*Nature*, Bd. 453, S. 980).

Die Autoren der Studie finden die Zahl alarmierend, denn sie steht in keinem Verhältnis zu den wenigen Fällen, die zu einer formellen ORI-Untersuchung führen. Ich sehe das anders. Nicht auszudenken, was aus der Forschung würde, wenn jeder Mitarbeiter, der Fehlverhalten eines Kollegen beobachtet, gleich zum Kadi liefe. In der Regel wird das Übel entweder im kleinen Kreis behoben oder stillschweigend übergangen. Dass trotz harter Konkurrenz um knappe Forschungsmittel nicht noch viel öfter manipuliert wird, beruhigt mich. Solange ehrliches Forschen die Regel bleibt, nimmt die Naturerkenntnis zu; denn schwarze Schafe geraten rasch ins Abseits.



Michael Springer

IBM hilft Ihnen, Ihre CO₂-Emissionen zu senken.

WENIGER REDEN. **MACHEN.** Mehr dazu unter ibm.com/green/de

