

TEILCHENPHYSIK

Zeitreise zum Anfang des Alls

Mit Kollisionen zwischen Gold-Atomkernen erkundeten Physiker eine ungewöhnliche Zustandsform der Materie: das Quark-Gluon-Plasma. Ihre Ergebnisse lieferten zugleich Informationen über die Frühzeit des Kosmos.

Von Markus Pössel

Einige Teilchenbeschleuniger sind letztlich Supermikroskope, mit denen Physiker unsere Welt auf immer kleineren Größenskalen erforschen. Für andere wäre der Begriff Zeitmaschine angebrachter. So gelang jüngst mit dem US-Schwerionenbeschleuniger RHIC gleichsam ein Blick in das Universum vor rund 14 Milliarden Jahren. Damals bestand der gesamte Kosmos noch aus einer höchst exotischen Materieform: einem so genannten Quark-Gluon-Plasma. In ihm liegen Elementarteilchen, die heute nur im Verbund innerhalb größerer Partikel auftreten, einzeln vor.

Die langjährigen Messungen am RHIC (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 21) erbrachten nun neue Hinweise auf die physikalischen Eigenschaften dieser ungewöhnlichen Erscheinungsform der Materie: Dachte man sie sich ursprünglich als eine Art Gas, so untermauern die neuen Befunde theoretische Ergebnisse, wonach sie eher einer Flüssigkeit ähnelt.

Das Universum expandiert. Lassen wir seine Entwicklung in Gedanken rückwärts laufen, rücken die Galaxien, die heute das All bevölkern, immer näher zusammen. Zu einem Zeitpunkt vor knapp 14 Milliarden Jahren gelangen wir auf diese Weise in eine Welt, die völlig verschieden von der unsrigen ist: Es gibt keine Sterne und Galaxien mehr; das Universum ist fast strukturlos und mit dichtem Gas gefüllt. Die Weiterreise in die Vergangenheit führt uns bei stetig steigender Temperatur und Dichte dann zunächst in ein Gewirr von Atombruchstücken und schließlich zu einer Suppe aus Elementarteilchen, deren mittlere Dichte die eines Atomkerns übersteigt.

Dass der beobachtbare Weltraum aus solch einem extrem kompakten Urzustand hervorgegangen ist, ergibt sich aus kosmologischen Modellen, die auf Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie fußen und durch zahlreiche astronomische Beobachtungen gestützt werden. An der Realität dieses »Urknalls« besteht deshalb kein Zweifel mehr. Im Detail sind Aussagen über die Verhältnisse im frühen Univer-

sum allerdings immer nur so sicher wie unser Wissen über das Verhalten von Materie unter solchen Extrembedingungen. Mit Beschleunigern wie dem bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt, dem Super-Protonen-Synchrotron des europäischen Kernforschungszentrums Cern in Genf und eben dem relativistischen Schwerionencollider RHIC auf Long Island (New York) bemühen sich die Physiker deshalb, die Temperatur- und Dichteverhältnisse des Kosmos in den ersten millionstel Sekunden des Urknalls experimentell nachzustellen.

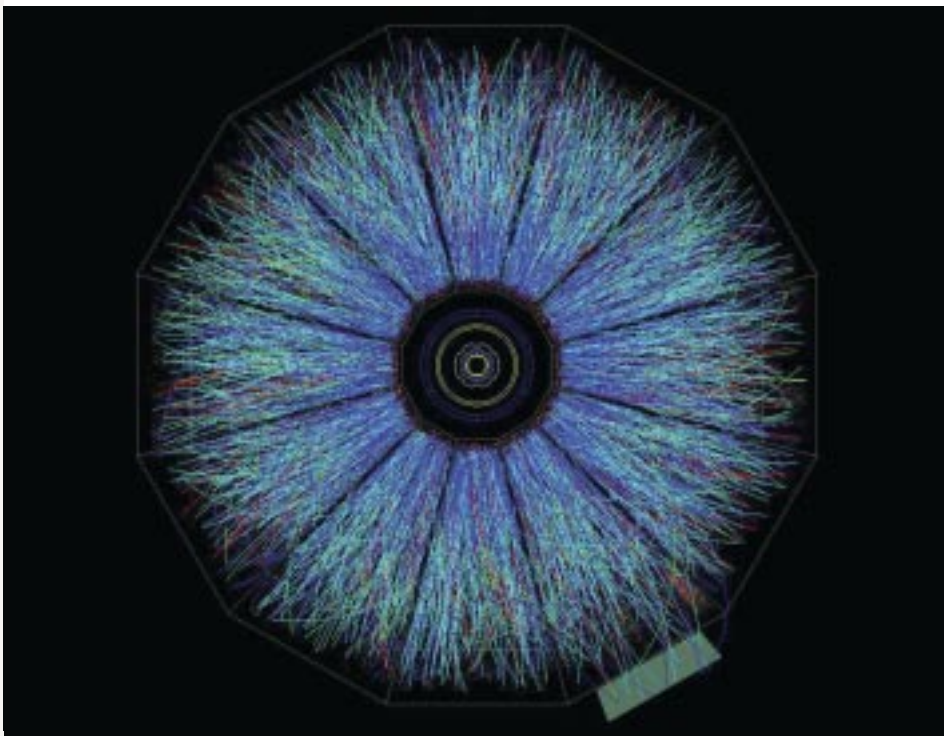
Von besonderem Interesse ist dabei ein so genannter Phasenübergang, bei dem sich die physikalischen Eigenschaften der Materie – ähnlich wie beim Schmelzen von Eis – schlagartig drastisch ändern. Diese Umwandlung hat mit besonderen Eigenschaften der starken Kernkraft und der Elementarteilchen zu tun, auf die sie wirken. Gemäß dem Standardmodell der Teilchenphysik bestehen die Protonen und Neutronen der Atomkerne ihrerseits aus noch »kleineren« Partikeln.

Auftritt nur im Kollektiv

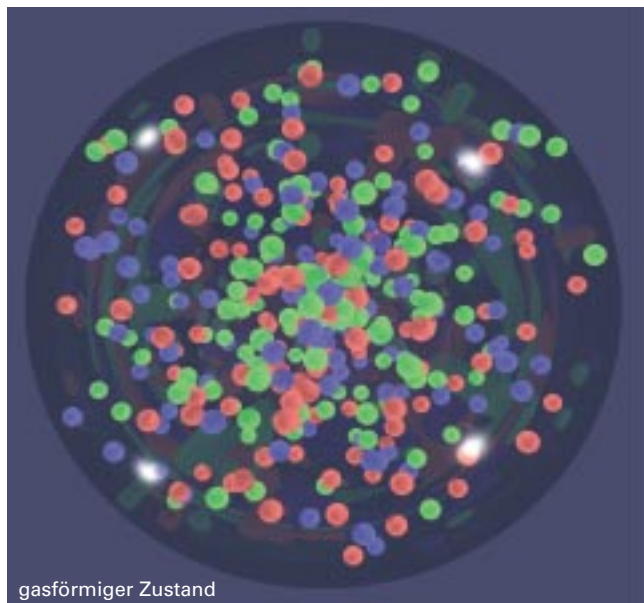
Diese so genannten Quarks trifft man freilich nie einzeln an: Die starke Kernkraft, eine der vier Grundkräfte der Physik, sorgt dafür, dass sie nur im Kollektiv auftreten können – zusammengehalten durch den Austausch spezieller Haftpartikel, der »Gluonen«. Ein einzelnes Quark aus dem Verbund zu lösen ist unmöglich: Je weiter es sich von seinen Partnern entfernt, desto stärker wird es zurückgezogen – als hinge es an einem Gummiband. Allenfalls entstehen aus der Energie, die man aufwendet, um ein Quark freizusetzen, neue Quarkverbände.

Seit Mitte der 1970er Jahre vermuten die Physiker allerdings, dass das nicht unter allen Umständen gilt. Oberhalb einer bestimmten Temperatur und Dichte sollten die Quarkverbände vielmehr in ein Gewirr einzelner Quarks und Gluo-

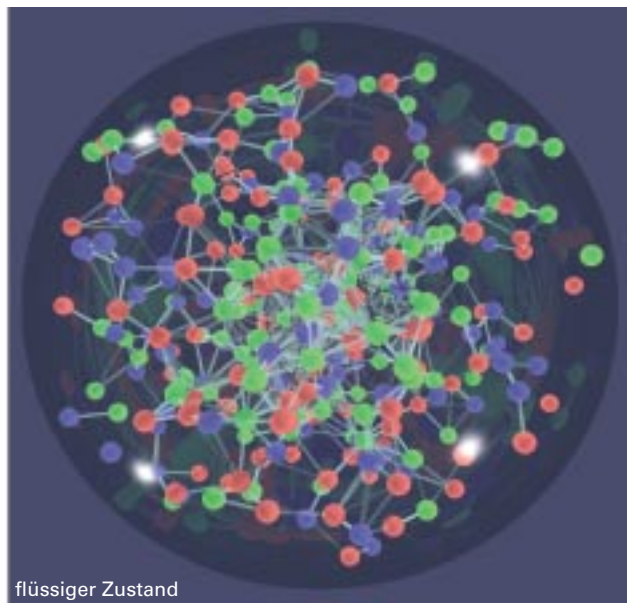
Die Kollision zweier fast lichtschneller Gold-Atomkerne hinterließ in dem Detektor Star – einem von vier Nachweisgeräten am Schwerionenbeschleuniger RHIC – jeweils Tausende von Teilchen Spuren. Deren genaue Analyse ergab Hinweise auf die kurzfristige Existenz eines stark wechselwirkenden Quark-Gluon-Plasmas.



STAR / RHIC



gasförmiger Zustand



flüssiger Zustand

BEIDE SIMULATIONEN: RHIC / BNL

nen zerfallen, die nicht mehr zu größeren Teilchen verknüpft sind, sondern direkt miteinander wechselwirken. Physiker nennen diesen Zustand Quark-Gluon-Plasma – in Analogie zu jenem Gemisch aus Atomkernen und Elektronen, in das sich Atome bei genügend hoher Energie auflösen. Einblicke in seine mutmaßlichen Eigenschaften ließen sich bisher nur am Computer gewinnen; mit Hilfe so genannter Gitterrechnungen.

Seit den 1990er Jahren ergaben sich dabei unter anderem Hinweise darauf, dass die ursprüngliche Vorstellung, wonach die Teilchen in einem Quark-Gluon-Plasma wie in einem Gas frei durcheinander fliegen, allzu vereinfacht war. Zumindest in der Grenzregion des Phasenübergangs sollte sich das Partikelgemisch vielmehr wie eine Art Flüssigkeit verhalten, in der die Quarks und Gluonen stark miteinander wechselwirken. Erst bei noch höheren Energien gewannen sie ihre volle Freiheit.

Ein Quark-Gluon-Plasma unter kontrollierten Bedingungen herzustellen ist ein lang gehegter Wunsch der Physiker. Am RHIC sind sie diesem Ziel jetzt so nahe gekommen wie nie zuvor. Dazu brachten sie in den beiden fast vier Kilometer langen Beschleunigerringen Gold-Atomkerne, die knapp 200 Protonen und Neutronen enthalten, auf über 99,9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. An vier Punkten ließen sie die zwei gegenläufigen Teilchenstrahlen aufeinander treffen. Die Detektoren Star, Phenix, Phobos und Brahm's maßen, was dabei geschah.

Wann immer zwei der superschnellen Goldkerne aufeinander prallten, wurde ein Großteil ihrer Energie – gemäß Einsteins berühmter Formel – in einen winzigen Feuerball aus bis zu zehntausend Materieteilchen umgewandelt. Er

hatte eine Temperatur von einigen Billionen Grad und etwa die hundertfache Dichte eines herkömmlichen Atomkerns – Verhältnisse, unter denen sich nach den Berechnungen der Theoretiker ein Quark-Gluon-Plasma bilden sollte.

Tatsächlich enthalten die Daten aller vier Experimente Indizien, dass dieser Zustand zumindest ansatzweise erreicht wurde. Demnach verhielt sich die Materie im Inneren des Feuerballs wie eine Art dichte Flüssigkeit – in Einklang mit den theoretischen Vorhersagen für ein stark wechselwirkendes Quark-Gluon-Plasma. Der Feuerball selbst war zwar nicht zu beobachten. Aber Rückschlüsse auf seine Beschaffenheit ließen sich aus den Tausenden von Sekundärteilchen ziehen, in die er bereits einige quadrillionstel (billionstel billionstel) Sekunden nach seiner Entstehung zerfiel (Bild links). Sie hinterließen Spuren in den Detektoren, aus denen sich ihre Flugbahn und Energie ergab. Die Auswertung dieser Daten legte nahe, dass der Feuerball auf die unvermeidlichen Druckunterschiede nach der Kollision mit einem kollektiven Fließen der Teilchen reagierte, wie man es von einer Flüssigkeit erwarten würde, nicht aber von einem Gas.

Tröpfchen der kosmischen Ursuppe?

Dafür sprach auch ein weiteres Indiz. Wenn bei der hochenergetischen Kollision von Protonen oder Neutronen zwei der enthaltenen Quarks oder Gluonen direkt aufeinander treffen, entsteht aus jedem nach dem Zusammenstoß typischerweise ein »Jet«: ein Pulk kegelförmig auseinander strebender Teilchen, die sich im Detektor nachweisen lassen. Bei den Gold-Gold-Kollisionen wurden allerdings deutlich weniger solcher Jets gemessen, als Quark-Gluon-Stöße zu erwarten wä-

▲ Ursprünglich dachte man sich das Quark-Gluon-Plasma als Gas aus sich völlig unabhängig bewegenden Teilchen (links). Die jüngsten Experimente bestätigen dagegen neuere theoretische Ergebnisse, wonach es zumindest in einem Übergangsbereich eher einer Flüssigkeit gleicht, in der wechselnde Gruppen von Teilchen kurzfristig größere Verbände bilden (rechts).

ren. Am einfachsten lässt sich das Defizit mit der Anwesenheit eines stark wechselwirkenden Quark-Gluon-Plasmas erklären. Fliegt etwa ein Quark nach dem Zusammenprall durch dieses dichte, hochreaktive Medium, verliert es dabei so viel Energie, dass sich am Ende kein nachweisbarer Jet mehr bilden kann.

Doch trotz dieser viel sagenden Indizien steht noch nicht mit letzter Sicherheit fest, ob in den RHIC-Experimenten wirklich ein Quark-Gluon-Plasma entstanden ist. Um aus den Eigenschaften der vielen tausend Teilchen, in die der Feuerball zerstiebt, dessen grundlegende Eigenschaften zu rekonstruieren, bedarf es einer komplexen Schlusskette. Einige ihrer Glieder aber müssen durch gezielte experimentelle wie theoretische Untersuchungen noch verstärkt werden, bevor sie als tragfest gelten können. So wird sich wohl erst in einigen Jahren erweisen, ob die Forscher am RHIC tatsächlich ein kleines Tröpfchen jener besonderen Suppe, die für eine winzig kurze Zeit nach dem Urknall in Erscheinung trat, auf die heutige Erde holen konnten.

Markus Pössel ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam.

PLANETOLOGIE

Eisvulkan auf Titan?

Der größte Saturnmond hält die Planetenforscher weiter in Atem: Auf Cassini-Fotos fanden sie jetzt eine Formation, die sie als exotischen Vulkan deuten. Unter der Titankruste soll sich zudem ein globaler Ozean verbergen.

Von Thorsten Dambeck

Schon zu Jahresbeginn hatte der Sinkflug von Huygens durch die Titan-Atmosphäre den Verdacht bestärkt, dass aus dem Boden des Saturn-Trabanten Methan entweichen könnte. Auf dem Weg abwärts waren den Sensoren der europäischen Raumsonde steigende Konzentrationen des Kohlenwasserstoffs aufgefallen. Mit einem Anteil von zwei bis sechs Prozent bildet Methan die zweithäufigste Komponente in der vom Stickstoff dominierten Gashölle des Eismonds. Da es durch photochemischen Abbau in der oberen Atmosphäre in geo-

logisch kurzer Zeit verschwinden würde, muss auf Titan folglich ein Mechanismus existieren, der für ergiebigen Nachschub an dem Gas sorgt.

Ist das Methan vielleicht vulkanischen Ursprungs? Seit Langem vermuten Planetenforscher, dass auf dem zweitgrößten Mond des Sonnensystems so genannte Cryovulkane aktiv sein könnten. Anders als die Feuerberge auf der Erde oder auf unseren Nachbarplaneten Venus und Mars speien sie keine glutflüssige Lava. Vielmehr fördern sie leicht schmelzbare Stoffe, die tief im Boden als »Eis« vorliegen. Durch Wärme aus dem Inneren des Monds aufgetaut, drängen

diese flüchtigen Substanzen in den Cryovulkanen zur Oberfläche.

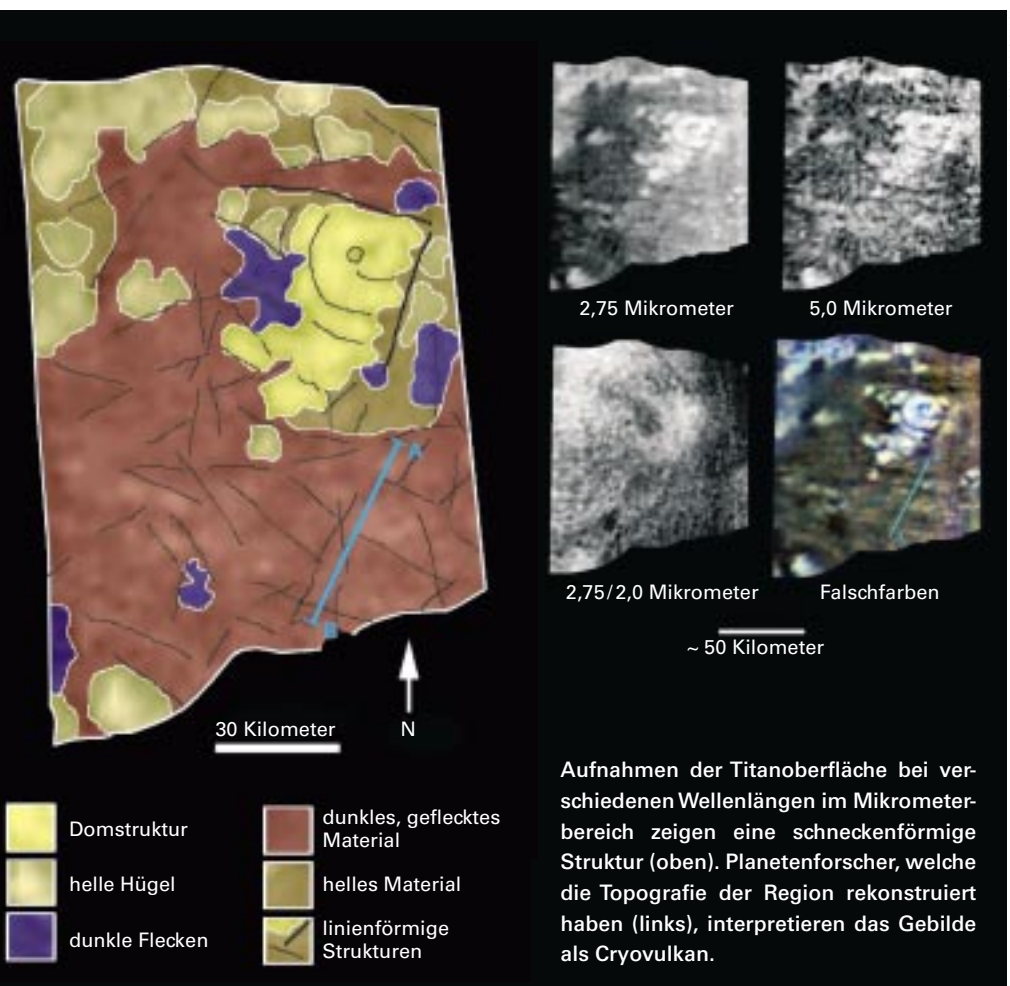
Schon vor sechzehn Jahren entdeckte Voyager 2 Hinweise auf geysirartige Ausbrüche auf Triton, als die Nasa-Sonde den größten Neptun-Mond fotografierte. Weitere Trabanten der äußeren Planeten, etwa Saturns Enceladus oder der Jupiter-Begleiter Europa, stehen im Verdacht dieser eisigen Spielart des Vulkanismus.

Nun scheint der US-Sonde Cassini, die seit Juli 2004 im Saturnsystem kreist, erstmals ein Porträt eines Cryovulkans auf Titan gelungen zu sein. Die Aufnahme schoss das Vims-Spektrometer an Bord des Raumfahrzeugs, als es im vergangenen Oktober dicht an dem Saturnmond vorbeiflog. Abgebildet ist ein Areal acht Breitengrade nördlich des Äquators, im Westen der hellen »Xanadu«-Region. Am Rand eines rund 3000 Kilometer langen Dunkelgebiets befindet sich dort eine gewundene Struktur mit etwa dreißig Kilometer Durchmesser, die aus der Vogelperspektive der Cassini-Sonde an ein Schneckenhaus erinnert.

Nach genauer Analyse der Daten kam ein Team um Christophe Sotin von der Universität Nantes und Ralf Jaumann vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zu dem Schluss, dass das einzigartige Gebilde ein Cryovulkan sein muss (*Nature*, 9. 6. 2005, S. 786). Schon im Frühjahr hatten Cassini-Wissenschaftler Strukturen auf Radarbildern anderer Titan-Regionen als Gegenstücke zu irdischen Lavaströmen interpretiert, die allerdings sicherlich kein erstarrtes Magma zeigen, sondern die gefrorenen Überreste einer niedriger schmelzenden Substanz.

Blick auf die dunstverhüllte Oberfläche

Das »Visual and Infrared Mapping Spectrometer« (Vims) ist eine Art Farbkamera, die ein Motiv gleichzeitig bei 352 Wellenlängen zwischen 300 und 5100 Nanometern aufnehmen kann. Damit erfasst sie einen deutlich größeren Bereich als den zwischen 380 bis 760 Nanometern, für den das menschliche Auge empfindlich ist. Bei diesen optischen Wellenlängen machen Dunstpartikel die Titanatmosphäre undurchsichtig; dagegen ist sie in einer Reihe schmaler »Fenster« im infraroten Spektralbereich, den Vims mit abdeckt, weitgehend transparent. Durch diese Fenster kann das in Italien und den USA gebaute Instrument



Aufnahmen der Titanoberfläche bei verschiedenen Wellenlängen im Mikrometerbereich zeigen eine schneckenförmige Struktur (oben). Planetenforscher, welche die Topografie der Region rekonstruiert haben (links), interpretieren das Gebilde als Cryovulkan.

Samenloser Sex stoppt Seitensprünge

Wie Hähne ihre Hennen bei der Stange halten

Ach, was muss man oft von bösen Frauen hören oder lesen, die, obwohl in festen Händen, fremden Herren sich zuwenden!

Und dies hat, Gott sei's geklagt, nicht selten schlimme Folgen. Nehmen wir nur einmal Madame Bovary: Ehe kaputt, Leben kaputt (dafür Aufnahme in den Literaturkanon). Oder machen wir ruhig einen Abstecher in die profane Alltagswelt: Wie viele gehörnte Ehemänner erfahren erst nach Jahren, dass ihr vermeintlicher Nachwuchs nicht von ihnen stammt und sie stattdessen Kuckuckskinder großgezogen haben. Die Folge: teure Gerichtsverfahren, zerstörte Familien ...

Schuld an allem ist natürlich Eva, die Urmutter, die Verführerin mit der Schlange ... man kennt das ja. Doch für Wissenschaftsgläubige hat auch die Biologie daran Anteil. Glaubt man den Soziobiologen, können Frauen vor allem zur Zeit des Eisprungs gar nicht anders, als in fremden Betten zu wildern. Schließlich bevorzugt genau dann ihre Nase die besonders männlichen Draufgängertypen ohne Brutpflegeambitionen gegenüber den sonst geschätzten braven Familienvätern.

Nun ist der Mensch zwar ein besonderes Tier, aber eben wahrscheinlich doch nicht viel anders gestrickt als seine weniger kopflastigen Mitgeschöpfe. Und wie lösen die das Problem? Werfen wir doch einfach einen Blick in den Hühnerstall. Auch Hennen sind nämlich keine Heiligen. Kaum guckt

der Gockel mal nicht richtig hin, hat sich die Glucke flugs mit einem anderen vergnügt.

Wie schützt sich der gefiederte Macho also vor Seitenflügen seines Harems? Ganz galant: Er hält seine Hennen bei Laune, indem er sie möglichst oft beglückt. Damit er sich dabei nicht zu sehr verausgabt – die Verschwendung wertvollen Spermas wäre nach biologischer Kosten-Nutzen-Rechnung nicht angeraten –, veranstaltet er meist ein kleines Täuschungsmanöver: Er bespringt die holden Damen nur, aber ejakuliert nicht.

Doch die Betrogenen nehmen den guten Willen offenbar für die Tat. Das haben Wissenschaftler um Tommaso Pizzari von der Universität Oxford und Hanne Lovlie aus Stockholm jetzt bewiesen. Sie verpassten einigen Hennen eine Art Keuschheitsgürtel, mit dem der Hahn sie zwar bespringen, nicht jedoch besamen konnte. Danach testeten sie das Sexualverhalten des weiblichen Federviehs. Und siehe da: Diejenigen Weibchen, die ohne Insemination häufig beglückt wurden, zeigten genauso wenig Interesse am Fremdsex wie ihre Kolleginnen, die in den Genuss des vollen Programms kamen. Vernachlässigte Hühner dagegen warfen gern auch mal ein Auge (oder mehr) auf den Nachbarshahn.

Und was schließen wir daraus, meine Herren? Auch samenloser Sex kann Frauen glücklich machen. Nur auf den Keuschheitsgürtel sollten sie besser verzichten ...

Stephanie Hügler

Die Autorin ist freie Journalistin in Heidelberg.

ANZEIGE

ANZEIGE

NACHGEHAKT

Auf der Spur der verlorenen Illusionen

Stellen Sie sich vor, Ihr Chef hat Sie zu sich gerufen und durchblicken lassen, er wolle Ihnen einen wichtigen Auftrag erteilen. Auf dem Weg zu seinem Büro malen Sie sich aus, dass es bestimmt darum geht, die Firma bei der bevorstehenden Konferenz in Florida zu vertreten. Und wenn Sie schon mal dort sind, können Sie gleich noch ein paar Urlaubstage anhängen. Sie erwachen aus dem Tagtraum, als Ihnen besagter Chef statt eines Flugscheins einen Stapel Aktenordner in die Hand drückt und Sie mit jener falschen Freundlichkeit, die Sie schon immer gehasst haben, darum bittet, diese Vorgänge doch bis Montag zu einem Bericht zusammenzufassen. Sechzig Seiten dürften reichen, meint er noch locker.

Was geht in dieser Situation in Ihrem Hirn vor? Und warum brauchen Sie für den sturzlangweiligen Bericht noch länger als für den vorherigen? Forscher an der medizinischen Universität im japanischen Kioto haben diese eminent wichtigen Fragen jetzt endlich im Tierversuch ergründet (*Science*, 17.6.2005, S. 1798). Sie brachten Affen bei, auf Kommando jeweils eine von zwei Aufgabenarten zu erledigen. Bei der einen war die Belohnung üppig (viel Wasser), bei der anderen mager (wenig Wasser). Anders als die unzähligen Forscher, die sich schon bis zum Erbrechen mit dem Belohnungssystem des Gehirns beschäftigt haben, interessierten sich die Japaner aber nicht für die Reaktion der Affen auf die großzügige Gratifikation, sondern für ihre Enttäuschung, wenn ihnen der weniger lukrative Job zugeteilt wurde.

Dabei stießen sie auf eine Hirnregion, in der rund die Hälfte aller Nervenzellen aktiv werden, wenn ein Affe sich derart um seine Hoffnungen betrogen sah – ein regelrechtes Enttäuschungszentrum des Gehirns. Eine seiner Aufgaben besteht offenbar darin, den Tatendrang der Tiere zu bremsen. Wenn sie mit der großzügigen Belohnung gerechnet hatten, führten die Affen die gering dotierte Tätigkeit deutlich langsamer und lustloser aus als sonst. Kommt Ihnen das bekannt vor?

Natürlich sollten wir dankbar sein, dass derartige Experimente, die ja letztendlich auf das Verständnis unseres eigenen Denkkorgans abzielen, nun der Alltagserfahrung ein großes Stück näher gerückt sind. Schließlich geht es nicht an, dass die Versuchstiere für die einfachsten Verrichtungen immer alle möglichen Leckerbissen bekommen, während beim *Homo sapiens* die undankbaren Aufgaben überwiegen und die Belohnungen meist kleiner ausfallen als erwartet. Auch wenn Tierschützer eine neue Art der Grausamkeit gegen Versuchskaninchen beklagen werden: Die Experimente sind auch nicht grausamer als das ganz normale Berufsleben.

Doch eigentlich interessiert mich etwas anderes noch viel mehr: Wie wirken sich die ständigen Enttäuschungen und herabgestuften Erwartungen langfristig auf das Gehirn aus? Nur den wenigsten von uns fallen ja die großen Belohnungen ständig in den Schoß, für die anderen 99,99 Prozent ist die Desillusionierung das tägliche Brot. Zuerst will man Astronaut oder Filmschauspieler werden, und dann fristet man sein Dasein als Busfahrer oder Frisörin (auch schöne Berufe, aber im Vergleich ...). Nicht auszudenken, wie viele Neurotransmitter die Nervenzellen im Enttäuschungszentrum abfeuern müssen, bevor sich ein Mensch mit einem solchen Schicksal abfindet.

Deshalb meine Anregung an die Forscher in Kioto: Führt eure Experimente noch viele Jahre fort und seht nach, ob die Abstumpfung, die Hoffnungslosigkeit und der zunehmende Zynismus der ausgebrannten Affen sich nicht in anatomischen Veränderungen im Umfeld des neu entdeckten Zentrums niederschlagen. Nachdem die Signale der Desillusionierung aufgespürt sind, steht die Neurowissenschaft vor der Herausforderung, auch noch den Friedhof der verlorenen Illusionen zu finden.

Michael Groß

www.michaelgross.co.uk



▷ einen Blick auf Titans dunstverhüllte Oberfläche werfen.

Doch auch dieser Blick ist nicht völlig ungetrüb: »Wir haben eine Bildkorrektur vorgenommen, um die restlichen Störungen der Gashülle auszugleichen«, erklärt Planetengeologe Jaumann. »Dadurch konnten wir auch in dem dunklen Gelände, in das die schneckenartige Struktur eingebettet ist, die Topografie enthüllen.« Sie entpuppte sich als eine Art titanisches Mittelgebirge mit Höhendifferenzen von einigen hundert Metern.

Mit der empirischen Atmosphärenkorrektur gelang es den Vims-Forschern zugleich, das Bodenrelief der »Schnecke« selbst zu ermitteln. »Offenbar ist es eine erhabene, kreisförmige Struktur, die in der Mitte eine Vertiefung hat«, meint Jaumann zum Ergebnis der Bildauswertung. Er vermutet, dass sich das Objekt in einer tektonischen Bruchzone befindet. Dort wurde geschmolzenes Material aus dem Untergrund nach oben gedrückt, wo es ausfloss und erstarrte. Im Lauf der Zeit türmte es sich so zu einem »Dom« auf.

In den haarfeinen, dunklen Linien, deren spiralförmiger Verlauf den Eindruck eines Schneckenhauses erweckt, sieht der Berliner Wissenschaftler Gräben oder Rillen, die beim Fließen entstanden sind. Jaumann: »Nur ein vulkanischer Dom mit einer zentralen Caldera, wie wir ihn von der Erde oder vom Mars kennen, kann diese Morphologie plausibel erklären.« Atmosphärische Vorgänge wie Winde oder Verwitterung könnten die eigentümliche Titan-Schnecke schwerlich geformt haben. Dagegen hält es Louise Prockter von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) für denkbar, dass sich das Gebilde bei besserer Auflösung doch noch als Einschlagkrater entpuppt.

Wenn es aber ein Vulkan ist, woraus besteht dann das ausgetretene Material? In Frage kommen Methan, Kohlendioxid, Wasser oder Ammoniak, sei es pur oder als Gemisch. Was die Energiequelle angeht, die für den Aufstieg aus den Tiefen Titans zur Oberfläche sorgt, verweist der Astrophysiker Sotin auf die Gezeitenkräfte, die der Saturn auf seinen Mond ausübt. Mit einer Exzentrizität von drei Prozent ist Titans Umlaufbahn nämlich ungewöhnlich elliptisch. Wegen der schwankenden Distanz zu Saturn wird der Mond wie ein Blasebalg periodisch zusammengedrückt und wieder ge-

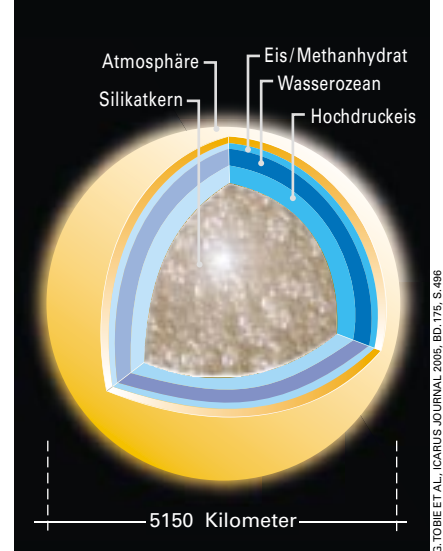
dehnt. Die wechselnde Verformung erzeugt Reibungswärme in seinem Innern. »Dies könnte helfen«, so Sotin, »das gefrorene Material zu schmelzen.« Als Flüssigkeit kann es dann unter der Wirkung von Auftriebskräften durch Risse und Spalten aufsteigen und an der Oberfläche austreten oder verdampfen.

Tiefenmeer mit Gefrierschutz

Einen Hinweis auf die innere Struktur und chemische Zusammensetzung Titans liefert auch eine Modellrechnung, mit der Gabriel Tobie und seine Kollegen in Nantes sowie an der Universität von Arizona in Tucson die Entwicklung des Riesenmonds in den vergangenen 3,5 Milliarden Jahren nachvollzogen haben (*Icarus* 6/2005, S. 496). Nach diesen Rechnungen verbirgt sich fünfzig bis hundert Kilometer unter der obersten festen Wassereisschicht ein globaler Ozean, wie ihn viele Forscher auch unter der Kruste von Jupiters Europa vermuten. Allerdings soll das Titanmeer deutlich mehr Ammoniak enthalten. Wie ein Frostschutzmittel würde das gelöste Gas den Gefrierpunkt des Wassers herabsetzen, sodass es flüssig bleibt.

Die Modellrechnung berücksichtigt die Wirkung der Gezeitenkräfte Saturns auf die Bahn des Monds und auf die Erzeugung von Reibungswärme in seinem Inneren sowie die Eigenschaften des Wasser-Ammoniak-Phasendiagramms. Ihren Ergebnissen zufolge kann nur ein in der Tiefe verborgenes Meer erklären, dass die Titanbahn immer noch die erstaunlich hohe Exzentrizität von drei Prozent hat. Zu diesem Ozean meint Astrophysiker Tobie: »Ich schätze den Ammoniakgehalt auf rund zehn Prozent, und die Temperatur dürfte heute bei etwas unter –20 Grad Celsius liegen.« Verglichen mit den –180 Grad Celsius an der Huygens-Landestelle kann man das nur als warm bezeichnen. Laut Tobie sei der Ammoniak schon bei der Zusammenballung Titans aus Planetesimalen in den Mond gelangt. Ein Teil des stickstoffhaltigen Gases bildete die ursprüngliche Atmosphäre, aus der die heutige, vom Stickstoff dominierte Gas-hülle hervorging.

Das Methan darin dürfte geologisch jüngeren Datums sein. Es stammt vermutlich aus so genannten Gashydraten in der obersten Eisschicht. Das sind ungewöhnliche Verbindungen, in denen



▲ Modellrechnungen ergaben diesen mutmaßlichen Aufbau des Saturnmonds Titan. Bemerkenswert ist ein globaler Ozean unter der Oberfläche, der durch gelöstes Ammoniakgas flüssig gehalten wird.

die Wassermoleküle eine Art Käfig bilden, der das Methan einschließt. Bei Wärmezufuhr – wenn etwa an einem Vulkan geschmolzenes Material aufsteigt – zerfallen sie und setzen das Gas frei. So gelangt es in die Atmosphäre und ►

▷ nimmt, ähnlich dem Wasser auf der Erde, am Wettergeschehen teil.

Ab Februar 2006 wollen Wissenschaftler das Schwerefeld von Titan vermessen, indem sie per Radar Bahnänderungen der Cassini-Sonde bei ihrem Vorbeiflug ermitteln. Die Daten sollten

Rückschlüsse auf die Verformbarkeit des Mondinneren erlauben und so Klarheit über die Existenz des geheimnisvollen Tiefenmeers schaffen.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und Wissenschaftsautor in Berlin.

VERHALTENSFORSCHUNG

Führerpersönlichkeit und Herdentrieb

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio



Ein Schwarm von Mücken oder Heringen zeigt ein einheitliches Verhalten, obwohl seine Mitglieder sich untereinander kaum verständigen können. Simulationsrechnungen zeigen, wie selbst unter diesen Umständen koordinierte, erfolgreiche Aktionen zu Stande kommen.

Von Christoph Pöppe

Was geht einem Hering durch den Kopf? Nicht viel, denn seine Geistesgaben sind beschränkt. Gehen wir davon aus, dass er seine Schwarmgenossen nicht persönlich kennt und sich mit ihnen bestenfalls minimal verständigen kann. Wenn er nicht sehr viel Erfahrung hat, ist er auch außer Stande, die besten

Futterplätze zu finden, es sei denn, der köstliche Duft von Nahrung – ein chemischer Gradient, wie die Biologen sagen – wiese ihm den Weg. Also hilft ihm nichts, als sich an einen erfahrenen Schwarmgenossen zu halten.

Aber woran erkennt man den, wenn man sich keine Fischgesichter merken kann? Vielleicht daran, dass er alt, dick oder aufgeblasen ist – sprich ein eindrucksvolles Imponiergehabe zeigt – oder alles zusammen. Aber diese Autoritätsmerkmale verfehlen ihre Wirkung, wenn man, mitten im Pulk steckend, nicht mehr sieht als die fünf bis sechs unmittelbaren Nachbarn.

Trotzdem gelingt es Schwärmen zusammenzubleiben und genügend Nahrung zu finden – wobei schon das Zu-

sammenbleiben hilfreich für das Überleben ist, weil ein Einzelfisch viel eher gefressen wird als einer in der Meute.

Wie das funktionieren kann, dafür hat eine britisch-amerikanische Forschergruppe jetzt eine plausible Theorie entwickelt. Die Verhaltensbiologen Iain D. Couzin und Simon A. Levin von der Universität Princeton (New Jersey), Jens Krause von der Universität Leeds und Nigel R. Franks von der Universität Bristol untersuchten allerdings nicht echte, sondern im Computer simulierte Schwarmtiere auf ihr Verhalten (*Nature*, Bd. 433, S. 513). Ihre Ergebnisse sind deshalb nicht nur auf Fische anwendbar, sondern beispielsweise auch auf schwärmende Insekten oder Zebraherden.

Verglichen mit den echten Vorbildern bewegen sich die nachgemachten Tiere etwas ruckelig, wie bei Computersimulationen üblich. Jeder Fisch schwimmt ein Stück, schaut sich um, was die anderen tun, ändert daraufhin seine Richtung, schwimmt wieder ein Stück und so weiter. Was in seine Richtungswahl eingeht, sind

- ▶ in erster Linie das Bedürfnis, mit niemandem zusammenzustoßen; wenn diese Bedingung erfüllt ist,
- ▶ das Bestreben, im Schwarm zu bleiben und sich der vorherrschenden Schwimmrichtung anzupassen (der »Herdentrieb«);
- ▶ Zufallseinflüsse – weil ein Fisch zum Beispiel nicht richtig hinschaut, von einer plötzlichen Strömung erfasst wird oder ein bisschen verspielt ist; und
- ▶ bei den wenigen Informierten das Bestreben, der als richtig erkannten Richtung zu folgen.

▼ Schwärme und Herden – gleich ob sie aus Fischen, Zebras oder Mücken bestehen – halten zusammen, weil die große Masse blind einigen wenigen Führern vertraut, die zu wissen glauben, wo es langgeht.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Durch die Wahl verschiedener Parameter können die Forscher die Eigenschaften ihrer Pseudotierchen variieren. So bestimmt ein Faktor namens ω , in welchem Verhältnis ein Fisch seine Überzeugung vom richtigen Weg einerseits und soziale Motive, das heißt die Anpassung an das allgemeine Schwarmverhalten, andererseits in seine Entscheidung eingehen lässt: Je höher der Wert von ω , desto sturer verfolgt er sein Ziel, während $\omega = 0$ die Ahnungslosen ohne Richtungspräferenz kennzeichnet.

Schwarmverhalten von kleiner Minderheit bestimmt

Wie zahlreiche Simulationsläufe ergaben, reichen schon die genannten Eigenschaften aus, um das Schwarmverhalten zu erklären. Bei geeigneter Wahl der Parameter bleibt der Pulk zusammen und bewegt sich mit ausreichender Genauigkeit in die von den Experimentatoren (willkürlich) als richtig definierte Richtung. Dabei genügt, dass eine Elite von fünf Prozent der Population weiß, wo es langgeht. Bei großen Schwärmen (mehr als hundert Individuen) darf dieser Anteil sogar noch kleiner sein. Ein Informierter muss auch nicht wissen, wie zuverlässig seine Information ist oder ob es außer ihm noch andere gibt, die sich auskennen. Eine Abstimmung findet nicht statt, und sei es in einem noch so übertragenen Sinn; der Konsens bildet sich nur über das Verhalten und dessen Beobachtung durch die Schwarmgenossen.

Spannend wird es, wenn die Informierten sich nicht einig sind. Bei kleinen Differenzen über den richtigen Weg stellt sich eine Kompromisslösung ein; die Allgemeinheit folgt dann einer Route, die einen Mittelwert zwischen den konkurrierenden Richtungen bildet. Sind die Ziele der führenden Persönlichkeiten aber wirklich unvereinbar, bricht der Schwarm entzwei, was im lebenden Vorbild für alle Beteiligten ungünstig ist.

Anhänger eines pessimistischen Menschenbilds finden durch Übertragung dieses Modells auf menschliche Gemeinschaften eine wohlfeile Bestätigung ihrer Überzeugung. Wer den Herdentrieb, dem Couzin und seine Kollegen eine mathematische Form gegeben haben, für die wesentliche Determinante unseres Verhaltens hält, kommt zu erstaunlichen Schlussfolgerungen. Der »Führer«, dem alle Herdenmenschen blindlings hinterherlaufen, muss keineswegs weiser ▷



Darf man sein Land lieben?

Wie weit sind die beiden Teile Deutschlands bis heute zusammengewachsen? Wie haben sich die Lebensbedingungen in Ost und West verändert? Sind die Bildungschancen überall gleich? Wie halten wir es mit Umwelt- und Naturschutz? Gibt es Gegenden, in denen die Menschen älter werden als in anderen? Die Antworten auf diese und viele weitere Fragen finden Sie im *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Unser Land in Karten, Texten und Bildern*

„Dieses Werk gehört in die Hand der politischen Entscheidungsträger. Seine Aussagen ersetzen nicht etwa Politik, aber sie ermöglichen bessere Entscheidungen.“
Südkurier

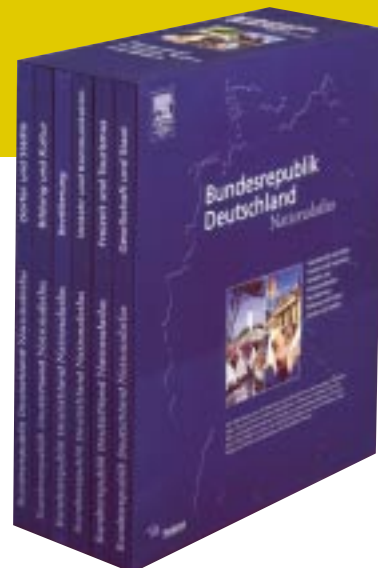
Sechs großformatige Bände mit den Themen „Gesellschaft und Staat“, „Bevölkerung“, „Dörfer und Städte“, „Bildung und Kultur“, „Verkehr und Kommunikation“ sowie „Freizeit und Tourismus“ sind hier zu einem einmaligen Infopaket zusammengefasst – mit Hunderten von informativen Beiträgen, deren thematische Bandbreite von Arbeitsmarkt bis Zuwanderung, von Alterspyramide bis Zuliefererindustrie, von Ausbildung bis Zahlungsbilanz reicht.

**Man kann nur lieben, was man kennt, heißt es.
Lernen Sie Ihr Land besser kennen!**

►► Leseproben u. v. m. unter www.nationalatlas.de ◀◀

Elsevier – Spektrum Akademischer Verlag
6 Bände, kart., im Schubler, pro Bd. ca. 180 S.,
Gesamtausgabe Buch:
€ 99,- / sFr 159,-; ISBN 3-8274-1523-3
Gesamtausgabe CD-ROM:
€ 99,- / sFr 159,-; ISBN 3-8274-1576-4
Gesamtausgabe Buch + CD-ROM:
€ 149,- / sFr 239,-; ISBN 3-8274-1577-2

In jeder Buchhandlung erhältlich oder direkt
► Tel. 07071/935369 ► Fax 07071/935393
► bestellung@elsevier.de



Selten haben wir die Fragen an unser Land so anschaulich formuliert gefunden wie in diesem Werk.

Süddeutsche Zeitung



Kardinalsünde

Unheilige Allianz des Heiligen Stuhls mit Kreationisten?

Im schönen Niederösterreich liegt die idyllische Kartause Gaming, Sitz mehrerer Bildungseinrichtungen, die sich der Mehrung des christlichen Glaubens in Amerika und Europa widmen. Neben den Europa-Außenstellen der Franziskanischen Universität von Steubenville (Ohio) und der Ave-Maria-Universität von Naples (Florida) findet sich hier ein Internationales Theologisches Institut für Studien zu Ehe und Familie (ITI), das unter anderem vierwöchige Theologie-Schnupperkurse in englischer Sprache anbietet.

Bisher wirkte diese mit dem Segen des verstorbenen Papstes Johannes Paul II. gegründete Stätte eher im Verborgenen. Doch seit ihr »Kanzler«, der österreichische Kardinal Schönborn, in »New York Times« und »International Herald Tribune« eine Breitseite gegen den Darwinismus abfeuerte, fragen sich Gläubige wie Ungläubige, ob hier ein katholischer Brückenkopf für amerikanische Kreationisten und »Intelligent Design«-Propagandisten etabliert wurde.

Umfragen in den USA zeigen seit einem Jahrzehnt eine stabile Mehrheit von knapp fünfzig Prozent für die kreationistische Aussage »Gott schuf die Menschen mehr oder weniger in ihrer heutigen Gestalt zu einem Zeitpunkt innerhalb der letzten 10 000 Jahre«. Hinzu kommen knapp vierzig Prozent für die »Intelligent-Design«-Aussage »Die Menschen haben sich über Millionen Jahre hinweg aus weniger fortgeschrittenen Lebensformen entwickelt, aber Gott lenkte diesen Prozess«. Nur etwas mehr als zehn Prozent – Tendenz leicht steigend – stimmen für »Die Menschen haben sich über Millionen Jahre hinweg aus weniger fortgeschrittenen Lebensformen entwickelt, und Gott hatte an diesem Prozess keinen Anteil«.

In seinem Artikel geißelt der Kardinal dieses »neo-Darwin'sche Dogma« – und verdammt im gleichen Aufwasch die »Multiversum-Hypothese in der Kosmologie«. All dies sei »erfunden worden, um die überwältigende Evidenz für Zweck und Planung (design) in der modernen Naturwissenschaft zu vermeiden«.

Das skurrile Plädoyer für Gott als intelligenten Designer ist kein Zufall. Dem Gaming ITI gehört auch Mark Ryland als Vorstandsmitglied an, Vizepräsident des Discovery Institute in Seattle, das Intelligent Design propagiert. Schönborns »New York Times«-Artikel wurde durch die Public-Relations-Firma Creative Response Concepts lanciert, die unter anderem das Discovery Institute vertritt.

Nun fragen sich vor allem christlich geprägte Naturforscher entsetzt: Welcher Teufel mag den Kardinal geritten haben, sich mit Intelligent-Design-Sektierern gemein zu machen und mit den Naturwissenschaften anzulegen? Der populistische Appell an die »überwältigende Evidenz für Design in der Biologie« schielt vielleicht auf die erwähnten günstigen Umfrageergebnisse für Kreationismus und Intelligent Design – aber das wäre ziemlich kurzfristig. Auch für die Meinung, über der ruhenden Erde gehe die Sonne täglich auf und unter, spricht die »überwältigende Evidenz« des Augenscheins, und doch ließ sie sich nicht einmal durch die Androhung von Folter halten.

Kurz vor seiner Wahl zum Papst predigte Kardinal Ratzinger im Konklave gegen die »Diktatur des Relativismus« – den modischen Wechsel von Meinungen, das Kommen und Gehen von Sekten. Nun aber relativiert Kardinal Schönborn, offenbar mit dem Segen Benedikts XVI., den Erklärungsanspruch von Darwins Evolutionslehre, indem er sie als Dogma beschimpft und die abstrusen Behauptungen der Intelligent-Design-Sekte verfißt. Der Relativismus hat sich mitten im Vatikan eingenistet. Weiche, Satan!



▷ sein als diese selbst, obgleich die Autoren des Modells ihn durchweg als »Informierten« bezeichnen. Es kommt nicht darauf an, ob er über die Umwelt des Schwarms besser Bescheid weiß oder in ihr erfolgreicher agiert als die anderen, denn die Umwelt geht in das mathematische Modell überhaupt nicht ein. Es ist auch belanglos, ob seine Anhänger ihn als weise oder vorbildlich wahrnehmen, denn nach den Vorgaben des Modells können sie irgendwelche Anzeichen dafür – Alter, weiße Haare, Imponiergehabe – gar nicht sehen. Es ist einzig die Überzeugung des Führers selbst, im Besitz der Wahrheit zu sein, die ihn von allen anderen unterscheidet; und je rücksichtsloser er diese Überzeugung vertritt, desto erfolgreicher setzt er sich gegen Vertreter anderer Ansichten durch, bis hin zur Spaltung der Gemeinschaft.

Allerdings ist diese Übertragung auf unsere Spezies fragwürdig; denn anders als im Modell unterstellt, können Menschen ausgiebig kommunizieren. Außerdem halten die Ergebnisse der Simulation auch für demokratisch gesinnte Gemüter einen Trost bereit: Ein gewisses Maß an Selbstzweifel und Lernfähigkeit auf Seiten der führenden Persönlichkeiten ist gut für das Überleben des Schwarms. In einigen Durchläufen ließen Couzin und seine Kollegen den »Sturheitsfaktor« ω in dem Maße zu- oder abnehmen, wie die für richtig gehaltene Richtung mit der Durchschnittsrichtung des Schwarms übereinstimmt. Wer also bemerkt, dass er als Einziger gegen den Strom schwimmt, wird mit der Zeit etwas unsicherer.

Diese Modifikation des Modells genügte, um eine Mehrheitsentscheidung zu garantieren und die Ansätze jeder Spaltung im Keim zu ersticken: Der Schwarm blieb zusammen und schwamm dorthin, wo die meisten »Informierten« die besten Jagdgründe wähten – immer noch ohne irgendeine Kommunikation der Mitglieder untereinander.

Zu fragen, ob diese Richtung wirklich die richtige ist, macht keinen Sinn; denn die Umwelt geht, wie gesagt, in die Simulation gar nicht ein. Und so erklärt das Modell auch, wie es kommen kann, dass sich manchmal Herden von Lemmings einmütig in den Tod stürzen – oder ganze Völker einem verblendeten Führer ins Verderben folgen.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.