

**WAFFENTECHNIK**  Diesen Artikel können sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## Kims nuklearer Blindgänger

Mit seinem Atomtest Anfang Oktober wollte Nordkorea beweisen, dass es über Mittel und Know-how zur Zündung eigener Atombomben verfügt. Doch die Demonstration entpuppte sich als halber Fehlschlag.

Von Graham P. Collins

Schon kurz nach der Behauptung Nordkoreas, einen unterirdischen Atomtest durchgeführt zu haben, stellten Experten fest, dass die Detonation ungewöhnlich schwach war. Die Sprengkraft von Nuklearexplosionen wird in Kilo- oder Megatonnen angegeben – dem Äquivalent der Energie, die bei der Explosion der entsprechenden Menge TNT freigesetzt würde. Typischerweise erreichen die ersten Atomversuche eines Landes Stärken zwischen fünf und zwanzig Kilotonnen. So betrug die Sprengkraft beim »Trinity«-Test der USA 1945 fast zwanzig Kilotonnen. Die Schätzwerte für den nordkoreanischen Versuch bewegten sich dagegen im Bereich von gerade einmal einer halben Kilotonne. Angeblich hatten offizielle nordkoreanische Stellen den Chinesen einen Vier-Kilotonnen-Test angekündigt.

Einige Kommentatoren argwöhnten sofort, es habe sich vielleicht gar nicht

um eine Nuklearexplosion gehandelt. 500 Tonnen konventionellen Sprengstoff in einer Weise zu zünden, dass die Erschütterung so abrupt einsetzt, wie es die seismischen Signale anzeigten, wäre allerdings gleichfalls eine enorme technische Leistung gewesen.

In jedem Fall bestätigten Luftproben zwei Tage nach dem Ereignis den nuklearen Charakter der Explosion. Zu den verräterischen Spuren gehörten insbesondere radioaktive Isotope des Edelgases Xenon, das bei der Kernspaltung entsteht. Auch bei einem unterirdischen Test diffundiert es binnen kurzem bis zur Erdoberfläche.

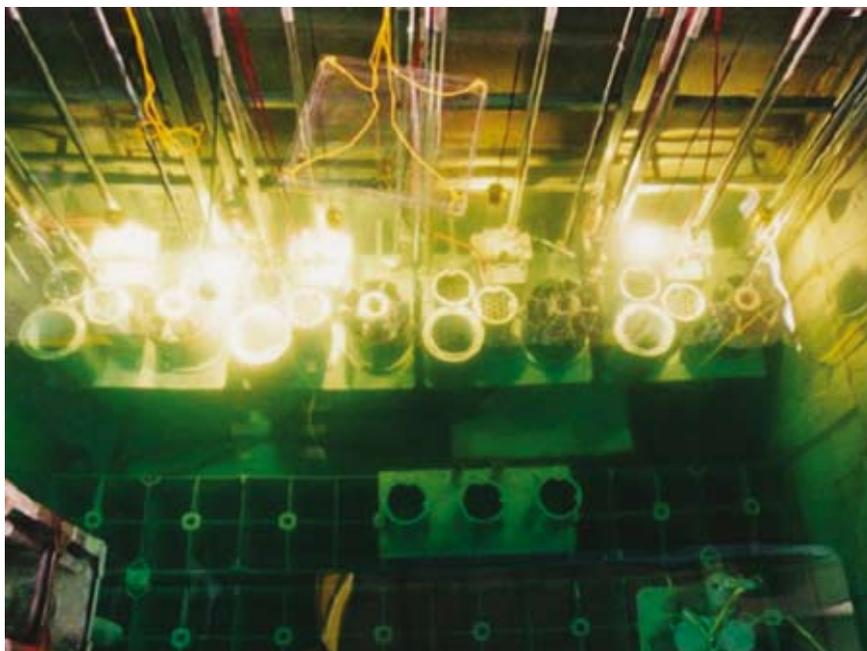
### Nur ein Knallfrosch

Demnach hat Nordkorea tatsächlich eine Atombombe gezündet. Das Ergebnis war allerdings nur eine Art nuklearer Knallfrosch statt des beabsichtigten Böllers. Irgend etwas muss am 9. Oktober schief gelaufen sein. Aber was? Die Antwort hängt von der Art des verwendeten Spalt-

materials ab. Höchstwahrscheinlich handelte es sich um Plutonium (wie bei Trinity und der Nagasaki-Bombe) und nicht um Uran (wie in Hiroshima). Nordkorea verfügt über reichlich Plutonium. Von der Fähigkeit, größere Mengen nuklearwaffentaugliches Uran anzureichern, scheint es dagegen noch weit entfernt.

Vermutlich verfügte Nordkorea schon 1989 über genug Plutonium für eine Atombombe. Damals fuhr es seinen Forschungskernreaktor in Yongbyon für einige Monate herunter. In dieser Zeit könnte der kommunistische Staat die Brennstäbe entnommen haben, um das Plutonium zu extrahieren und aufzuarbeiten. Ein Abkommen zwischen der Clinton-Regierung und Nordkorea beendete 1994 die Gewinnung des waffenfähigen Materials und sah Vor-Ort-Inspektionen vor. Trotzdem startete das Regime von Kim Jong Il 1998 ein Programm zur Anreicherung von Uran. Vier Jahre später kündigte Nordkorea das Abkommen mit den USA einseitig auf und begann erneut damit, aus Brennstäben in Yongbyon Plutonium zu gewinnen.

Plutoniumbomben können auf verschiedene Arten versagen. Die erste hängt damit zusammen, dass zum Zünden eine Implosion nötig ist. Diese muss extrem symmetrisch erfolgen, um eine optimale Detonation zu erreichen. Typischerweise umgibt man eine Plutoniumkugel (den »Kern«) mit einer Mischung aus schnellen und langsamen konventionellen Sprengstoffen. Diese Mischung müssen die Ingenieure so komponieren, formen und anordnen, dass bei ihrer Zündung eine exakt kugelförmige Stoßwelle entsteht, die das Plutonium auf das



AP PHOTO

◀ Abgebrannte Brennstäbe aus dem Kernreaktor in Yongbyon lieferten wahrscheinlich das Plutonium für Nordkoreas ersten Atomtest.



AP PHOTO: KATSUNORI KASAHARA

◀ **Möchtegern-Nuklearkrieger: Für Nordkoreas Diktator Kim Jong Il war der erste Atomtest seines Landes trotz offensichtlicher technischer Probleme ein propagandistischer Erfolg.**

Doppelte bis Fünffache seiner normalen Dichte zusammenpresst. Als Folge davon wird das Spaltmaterial überkritisch, wodurch eine nukleare Kettenreaktion in Gang kommt, die zur Explosion führt. Je höher die Dichte des Plutoniums, desto heftiger die Detonation.

Selbst kleinste Abweichungen von der Kugelsymmetrie – etwa wenn die Stoß-

front auf einer Seite um nur 0,1 Millisekunden nachhinkt – beeinträchtigen die Sprengkraft bereits erheblich. Der Plutoniumkern weicht dann dorthin aus, wo die Druckwelle schwächer ist oder später ankommt. Selbst wenn er immer noch zum größten Teil superkritisch wird, verformt er sich und expandiert so schnell wieder, dass die Kettenreaktion vorzeitig abbricht.

Eine andere denkbare Ursache für den Fehlschlag könnte sein, dass das Spaltmaterial mit einigen Prozent des Isotops Plutonium-240 verunreinigt war. In den Brennstäben von Kernreaktoren

entsteht zwar zunächst das gewünschte Plutonium-239, aber je länger sie im Reaktor bleiben, desto mehr davon wandelt sich in das schwerere Isotop um. Dieses emittiert pro Zeiteinheit 10000mal so viele Neutronen. Letztere sind zwar entscheidend für das Zustandekommen einer nuklearen Kettenreaktion. Zu viele von ihnen zu Beginn der Implosion lassen den Plutoniumkern jedoch explodieren, bevor er genügend komprimiert ist. Die Explosion fällt entsprechend schwächer aus.

Was genau am 9. Oktober nahe P'unggye geschah, wissen vermutlich nur die Wissenschaftler von Kim Jong Il. Der politischen Wirkung des Atomtests hat seine mangelnde Sprengkraft ohnehin nicht geschadet.

---

**GRAHAM P. COLLINS** ist Redakteur bei Scientific American.

## SEISMOLOGIE

# Erdbeben der anderen Art

Der Fall Nordkorea bewies: Selbst schwache unterirdische Atomtests lassen sich heute sicher nachweisen.

Von Sarah Simpson

Am 9. Oktober 2006 registrierten Seismometer weltweit eine Erschütterung der Magnitude 4,2 im nordöstlichen Nordkorea. Eigentlich nichts Besonderes: Im Mittel ereignen sich auf der Erde pro Tag zwanzig Erdbeben dieser oder höherer Stärke. Ohne die Ankündigung eines Nukleartests durch Nordkorea hätten die Seismologen den Ursprung des Ereignisses deshalb wohl nicht so schnell erkannt.

Obwohl den Seismogrammen Art und Stärke der Explosion nicht eindeutig zu entnehmen war, ging daraus doch eines klar hervor: Es war mehr ein Pups als ein Knall. Vielleicht noch wichtiger – der Vorfall demonstrierte, dass sich bei bekannter Geologie der Region mit lokalen Seismometern selbst schwache Detonationen eindeutig von Erdbeben unterscheiden lassen.

Der Theorie nach sollten Explosionen ein deutlich anderes Wellenmuster erzeugen als seismische Erschütterungen. Der

plötzliche Druckstoß in alle Richtungen, der von ihnen ausgeht, verursacht longitudinale Wellen, die als Primär- oder kurz P-Wellen bezeichnet werden. Wenn sie am Seismometer ankommen, rufen sie heftige Ausschläge hervor, die allmählich abklingen. Nach einiger Zeit folgen die transversalen Sekundär- oder S-Wellen, die von Scherbewegungen herrühren. Sie lassen die Nadel zwar wieder stärker zittern, doch erreicht das neuerliche Auf und Ab nicht mehr die ursprüngliche Intensität.

## Seismische Signaturen

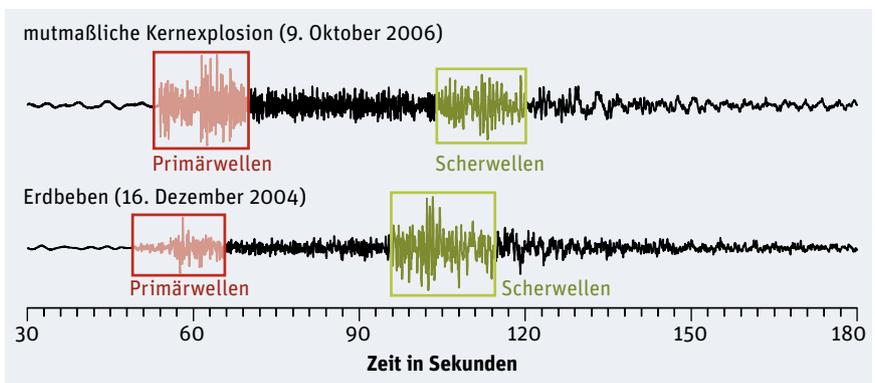
Nicht so bei Erdbeben. Auch hier kommen zwar zunächst P-Wellen an. Sie sind jedoch vergleichsweise schwach. Die stärkeren Ausschläge verursachen in diesem Fall die langsameren S-Wellen. Das liegt daran, dass bei Erdstößen zwei Krustenblöcke ruckartig aneinander entlanggleiten, wobei sich wesentlich größere Scher- als Druckkräfte entwickeln.

Explosionen würden von sich aus sogar überhaupt keine S-Wellen hervorru-

fen. Unterirdische Detonationen können jedoch Verschiebungen im umgebenden Gestein auslösen, die ihrerseits Rutschungen gleichen, wie sie bei Erdbeben auftreten. Laut Francis T. Wu von der Universität Binghamton (US-Bundesstaat New York) geschieht das vor allem in Regionen, wo sich bereits Spannungen in der Erdkruste aufgebaut haben.

Außerdem können sich P- in S-Wellen verwandeln, wenn sie auf Verwerfungen stoßen oder die Grenzfläche zwischen weichem Sediment und hartem Felsuntergrund passieren. Einige geologische Strukturen – etwa solche aus vulkanischem Tuff oder teilweise geschmolzenem Gestein – dämpfen die normalerweise intensiven S-Wellen eines Erdbebens oder blockieren sie völlig. So kann fälschlich der Eindruck einer Explosion entstehen.

Um solche Irrtümer zu vermeiden, müssen Geophysiker gewöhnlich die Aufzeichnungen von Seismografen an vielen verschiedenen Orten vergleichen, zu denen die Wellen auf jeweils anderen ▶



Das Seismogramm einer Kernexplosion unterscheidet sich deutlich von dem eines Erdbebens. Es setzt mit starken longitudinalen Primärwellen ein, die vom Druckstoß herrühren. Die nachfolgenden Sekundärwellen, die mit Scherbewegungen einhergehen, sind dagegen vergleichsweise schwach. Bei Erdbeben verhält es sich genau umgekehrt.

▷ Wegen gelangt sind. »Man braucht Erfahrungen darüber, wie die Erschütterungen eines bestimmten Bebenherds an den einzelnen Stationen in Erscheinung treten«, sagt Paul G. Richards vom Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia-Universität in New York.

Um Nordkoreas behaupteten Atomtest zu verifizieren, stützten sich viele Ex-

perten auf die Messungen einer seismischen Messstelle in Mudanjiang in China. Etwa 330 Kilometer nordöstlich des Explosionsorts gelegen, empfing sie unter den 128 Stationen des globalen seismografischen Netzwerks das klarste Signal. Richards und sein Kollege Won-Young Kim verglichen Aufzeichnungen der Detonation vom 9. Oktober und

früherer Explosionen aus derselben Gegend mit den Seismogrammen ähnlich starker lokaler Erdbeben. Dabei erkannten sie systematische Unterschiede. Demnach kann zum Nachweis einer Explosion das Seismogramm einer einzigen Station im Umkreis von einigen hundert Kilometern genügen, sofern man genau weiß, wie sich die verschiedenen Arten ▷

KRISTALLOGRAFIE Diesen Artikel können sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## Computer entdeckt neue Welten

Die Struktur von Materialien verrät viel über deren Eigenschaften. Wenn Experimente versagen, lässt sie sich mit einem neuen Programm auch per Computer ermitteln. Dadurch wissen wir jetzt, welche ausgefallene Strukturen manche Feststoffe unter hohem Druck annehmen.

Von Colin W. Glass

Verhalten ändert sich unter Druck – auch bei Materialien. Man denke nur an Graphit, der sich bei einigen Gigapascal (zehntausend Bar) in Diamant umwandelt. Beide Stoffe bestehen aus reinem Kohlenstoff, haben aber völlig verschiedene Eigenschaften.

Das Verhalten von Materialien unter Druck zu ermitteln kann also ausgesprochen spannend sein. Bestimmt wird dieses Verhalten letztendlich von den Grundbausteinen unserer Welt, also den Atomen. Im festen Aggregatzustand ordnen sie sich – mit wenigen Ausnahmen – in einem ganz bestimmten, periodischen Muster an und bilden somit eine Struktur. Wie diese genau aussieht, hängt von der Art und dem Mischungsverhältnis der Atome sowie den äußeren Bedingungen wie Druck und Temperatur ab.

Weil die Struktur periodisch ist, reicht zu ihrer Beschreibung – wie bei einem Fliesenboden – ein winziger Teil, der sich in allen Richtungen identisch wiederholt. Materialforscher sprechen von einem Gitter. Sehr viele Eigenschaften eines Materials lassen sich eindeutig aus seiner inneren Struktur bestimmen. Sie ist der Informationsträger schlechthin in der Materialwissenschaft.

Es gibt eine Reihe von Methoden, um Strukturen zu bestimmen. Beim bekanntesten und erfolgreichsten Verfahren wird Röntgenstrahlung an einem Kristall gestreut. Anhand des Beugungsmusters lässt sich dann das Gitter erschließen. Diese experimentelle Methode setzt aber voraus, dass eine kristalline Probe des zu untersuchenden Materials bestrahlt werden kann. Unter sehr hohem Druck ist das schwierig. Deshalb erreichen Streuveruche hier oft nicht die nötige Präzision. Und manchmal interessieren sich Forscher

auch für das Verhalten von Materialien unter Bedingungen, wie sie etwa im Innern von Riesenplaneten herrschen. Die extremen Druckverhältnisse dort aber sind in keinem irdischen Labor realisierbar.

### Suche nach dem tiefsten Tal

In solchen Fällen sollte der Computer weiterhelfen können, indem er berechnet, zu welchem Gitter sich die Atome höchstwahrscheinlich zusammenlagern werden. Die in der Natur zu erwartenden Strukturen sind thermodynamisch stabil, haben also die geringstmögliche »freie Energie« – eine Größe, die auch Entropieeffekte einschließt, in denen sich eine Tendenz zur Zunahme der Unordnung ausdrückt. Die Aufgabe lautet folglich, unter den jeweiligen Bedingungen die Struktur zu finden, deren freie Energie minimal ist.

Das klingt nach einem einfachen Optimierungproblem, ist in Wahrheit je-

▷ von Bodenerschütterungen dort manifestieren. »Bisher war das nur eine Vermutung«, sagt Richards. »Jetzt haben wir einen direkten Beleg.«

Um einiges schwieriger ist es allerdings, anhand von Seismogrammen die von einer Bombe freigesetzte Energie zu messen. Je nach den geologischen Verhältnissen sind im Extremfall Abweichungen um das Zehnfache möglich. Eine Explosion am früheren sowjetischen Atomtestgelände in Zentralasien, die eine Erschütterung der Magnitude 4,2 auslöst, hätte eine Sprengkraft von einer halben Kilotonne. Im Westen der USA, wo die von Störungen durchsetzten Gesteine die Wellen sehr stark dämpfen, entspräche der gleichen Erschütterung dagegen eine Stärke von 2,2 Kilotonnen.

Dennoch ist sich Richards sicher, dass die Sprengkraft von Nordkoreas Nukle-

arexpllosion weniger als eine Kilotonne betrug. Die Geologen kennen den Untergrund des Landes nämlich ziemlich genau und wissen so, dass er großenteils aus sehr hartem Gestein wie Granitgneiss besteht, das seismische Wellen effizient leitet.

### Heimlicher Atomtest im Iran?

Anders verhält es sich laut Richards beim nach Atomwaffen strebenden Iran. Wie im Westen der USA gibt es hier auch intensive tektonische Aktivität. Dadurch breiten sich seismische Wellen in dem Land deutlich schlechter aus als in Nordkorea. Hinzu kommen die viel häufigeren Erdbeben. Bei Bodenerschütterungen im Iran dürfte es deshalb erheblich schwerer fallen, die Seismogramme richtig zu deuten.

Im Kalten Krieg entgingen den Vereinigten Staaten immerhin 26 der 366 un-

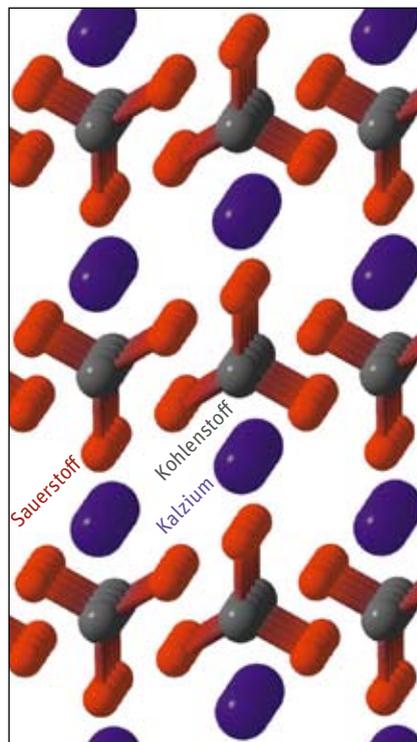
terirdischen Atomtests, welche die Sowjetunion in Zentralasien durchführte. Bei den meisten davon lag die Sprengkraft unter einer Kilotonne, sodass sie nur von lokalen Stationen identifizierbar waren. Im Nahen Osten würden solche Explosionen heute dagegen nicht mehr unbemerkt bleiben. Dafür sorgt das dichte Seismometernetz, das dort zum Nachweis von Erdbeben installiert wurde. Hinzu kommen weltweit mehr als 170 Stationen, welche die Organisation zur Überwachung des Vertrags über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen betreibt. All das dürfte den Iran und andere Kernwaffenaspiranten zwar nicht abschrecken, macht einen heimlichen Atomtest aber äußerst unwahrscheinlich.

**SARAH SIMPSON** ist Redakteurin bei Scientific American.

Bei einem Druck von 42 bis 137 Gigapascal im Erdinneren hat Kalk eine besondere Struktur (links). Sie konnte kürzlich per Computer berechnet werden – mit einem Programm namens Uspex, das Prinzipien der Evolution nachahmt. Bei noch höherem Druck sitzt der Kohlenstoff der Karbonatgruppe nicht mehr, wie üblich, im Zentrum eines Dreiecks, sondern inmitten eines Tetraeders aus Sauerstoffatomen (rechts).

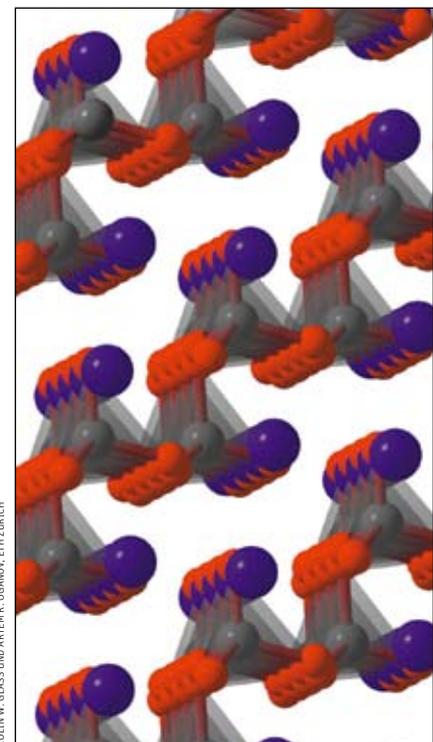
doch äußerst kompliziert. Denn gesucht wird das globale Minimum einer Energielandschaft, die sich über so viele Dimensionen erstreckt, wie Variable zur Beschreibung eines Gitters benötigt werden. Das sind jeweils drei Koordinaten pro Atom und sechs so genannte Formparameter für das Gitter selbst. Außerdem ist das globale Minimum nicht etwa der Boden eines von den Rändern der Energielandschaft gleichförmig abfallenden Trichters, sondern der tiefste Punkt in einem verschlungenen Gebirge mit vielen Anhöhen und Tälern, das unzählige lokale Minima enthält. Deshalb hatten alle Versuche, Strukturen von Festkörpern per Computer zu berechnen, bisher nur wenig Erfolg.

Zusammen mit Artem R. Oganov habe ich am Laboratorium für Kristallografie der ETH Zürich nun jedoch eine neue Optimierungsmethode namens Uspex (*universal structure predictor*:



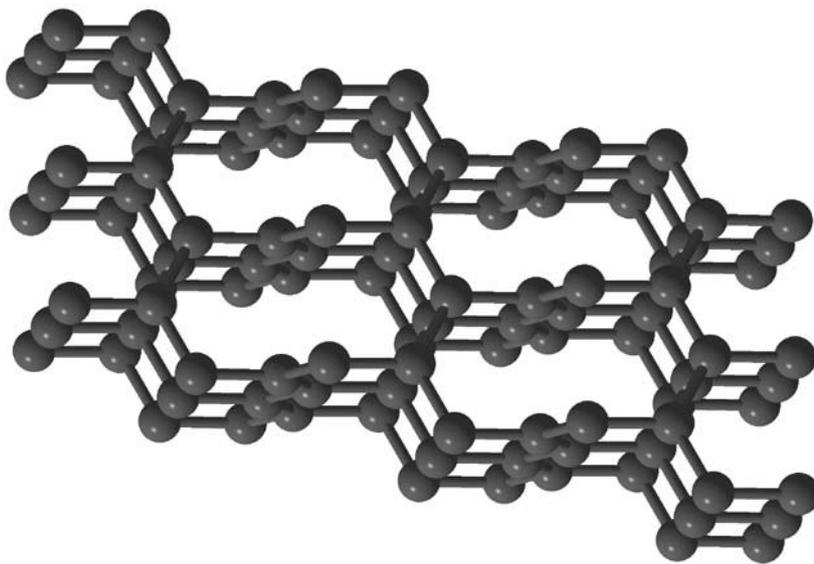
*evolutionary xtallography*) entwickelt, welche an die genannten Schwierigkeiten angepasst ist. Sie basiert auf einem evolutionären Algorithmus, ahmt also den biologischen Evolutionsprozess nach.

Als Ausgangspunkt dient eine zunächst frei gewählte »Population« von Gittern. Für jedes Einzelne ermittelt der Computer die »Fitness«, indem er quantenmechanisch seine freie Energie be-



rechnet. Dabei handelt es sich um die potenzielle Energie, die sich aus den Wechselwirkungen der beteiligten Atome und Elektronen ergibt.

Dann folgt die Selektion. Das Drittel der Gitter mit den schlechtesten Werten wird verworfen. Der Rest dient als Grundlage zur Erzeugung einer neuen Population. Dabei wird eine Struktur umso stärker berücksichtigt, je niedriger ▷



COLIN W. GLASS UND ARTEM R. OGANOV, ETH ZÜRICH

▷ ihre freie Energie ist. Die Konstruktion neuer Gitter erfolgt durch Mutation oder Vererbung. Im ersten Fall verzerrt das Programm die Form des Gitters und verschiebt dadurch auch die Atome oder es tauscht Atome gegeneinander aus. Bei der Vererbung wird von zwei Gittern je ein Teil genommen und zu einem »Zwitzer« zusammengefügt.

Mit der jeweils neuen Population als Ausgangspunkt wiederholt der Algorithmus diese Schritte in einem Kreisprozess so lange, bis sich keine Verbesserung mehr ergibt. Er zoomt sich so gleichsam an das globale Minimum heran. In zahlreichen Tests mit bekannten Strukturen erwies sich, dass Uspex ein nie da gewesenes Maß an Zuverlässigkeit und Effizienz erreicht.

Mit diesem Instrument an der Hand konnten wir nun also beginnen, das Verhalten verschiedenster Materialien – da-

runter Elemente und Minerale – unter hohem Druck zu erforschen. Teilweise bekräftigten unsere Resultate bisherige Vermutungen. Zum Teil fanden wir aber auch völlig neue Strukturen, mit denen niemand gerechnet hatte. Hier möchte ich einige besonders interessante Entdeckungen vorstellen.

### Kohlenstoff im Erdinneren

Kalk oder chemisch Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ist einer der Hauptträger von Kohlenstoff im Inneren der Erde. Welche Struktur er unter dem hohen Druck in der Tiefe annimmt, war bisher allerdings unbekannt. Shigeaki Ono vom Institut für die Erforschung der Erdevolution in Kanagawa (Japan) hatte zwar das Röntgenbeugungsmuster des Gitters aufgenommen, das sich bei einem Druck von 42 bis 137 Gigapascal bildet. Es war ihm jedoch nicht gelungen, daraus die

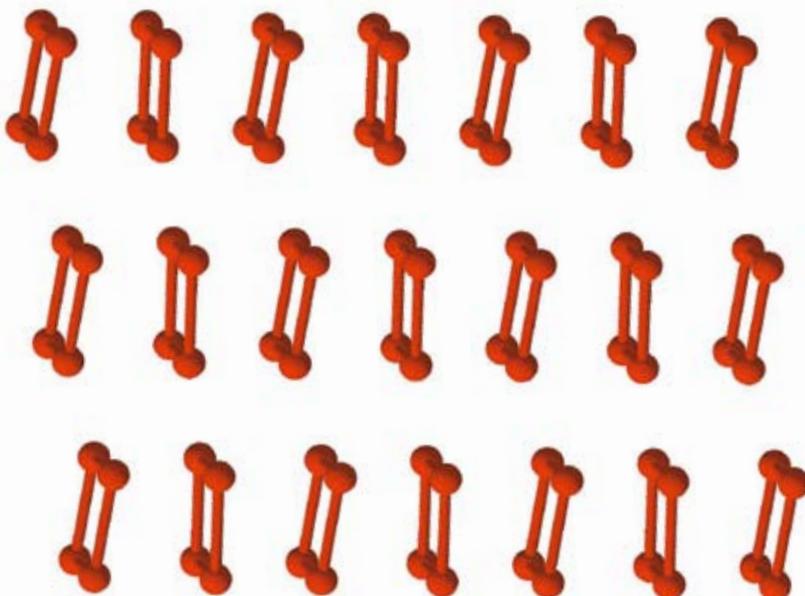
◀ Diese neue Kohlenstoffmodifikation sollte bei Atmosphärendruck synthetisierbar sein. Die Kohlenstoffatome sitzen darin in der Mitte von Dreiecken wie auch von Tetradern. Charakteristische Strukturmerkmale von Graphit und Diamant sind demnach miteinander vereint.

genaue Anordnung der Atome abzuleiten. Die Lösung fand unser Programm: Es errechnete eine Struktur, die hervorragend zu den Beugungsdaten passte. Außerdem fanden wir eine weitere stabile Modifikation, die bei einem Druck von mehr als 137 Gigapascal auftritt. Ono konnte sie nachträglich durch Röntgenbeugung verifizieren.

Momentan arbeiten wir an den Hochdruckstrukturen von Magnesiumkarbonat und glauben, sie gefunden zu haben. Magnesium- und Kalziumkarbonat bergen zusammen den weitaus größten Teil des Kohlenstoffs im Erdinneren. Die Kenntnis ihres Verhaltens unter hohem Druck sollte deshalb zu einem besseren Verständnis des globalen Kohlenstoffzyklus beitragen.

Außerdem wirft das Kristallgitter von Kalziumkarbonat bei mehr als 137 Gigapascal ein neues Licht auf das chemische Verhalten von Kohlenstoff: Üblicherweise bildet er mit drei Sauerstoffatomen einen Mercedes-Stern; hier sitzt er dagegen im Zentrum eines Tetraeders.

Astronomen schreiben die Magnetfelder von Jupiter und Saturn dem Wasserstoff zu, aus dem die beiden Planeten hauptsächlich bestehen. Unter dem gewaltigen Druck im Innern dieser Himmelskörper liegt dieses Element in metallischer Form vor. Welche Struktur es dabei hat, ist unklar. Davon hängt jedoch die elektrische Leitfähigkeit und somit das magnetische Feld ab. Es wird vermutet, dass metallischer Wasserstoff bis zu einem Druck von 500 Gigapascal noch aus denselben zweiatomigen Molekülen besteht wie im gasförmigen und flüssigen Zustand und erst danach eine



COLIN W. GLASS UND ARTEM R. OGANOV, ETH ZÜRICH

◀ Unter hohem Druck geht Sauerstoff in einen roten Festkörper über. Röntgenbeugungsdaten deuten darauf hin, dass darin Paare von  $\text{O}_2$ -Molekülen vorliegen. Berechnungen mit Uspex ergaben eine dazu passende Struktur. Sie reproduziert die experimentellen Daten besser als alle früher vorgeschlagenen Modelle.

Modifikation annimmt, die nur noch Einzelatome enthält. Unseren ersten Resultaten zufolge bleiben die Moleküle jedoch bis mindestens 600 Gigapascal erhalten – und wahrscheinlich noch einiges darüber hinaus.

Auch Sauerstoff, der im Gaszustand in Form von O<sub>2</sub>-Molekülen vorliegt, durchläuft unter Druck einige interessante, experimentell beobachtete Phasenumwandlungen. Dabei treten eine rote und eine supraleitende Modifikation auf. Deren Strukturen waren trotz jahrzehntelanger Untersuchungen bisher nicht bekannt. Bei rotem Sauerstoff wurde vermutet, dass er aus Zickzackketten von zweiatomigen Sauerstoffmolekülen besteht. Das deckt sich mit dem, was wir als stabilstes Kristallgitter beim absoluten Temperatur-Nullpunkt (–273,16 Grad Celsius) gefunden haben.

Allerdings ist es nicht mit dem gemessenen Röntgenbeugungsmuster vereinbar. Aus ihm schließen Kristallographen vielmehr auf eine Struktur, die auf Paaren von O<sub>2</sub>-Molekülen basiert. Solch ein Kristallgitter hat auch unser Programm errechnet. Beim absoluten Temperatur-Nullpunkt ist es zwar geringfügig weniger stabil als das mit den Zickzackketten,

reproduziert die bei Raumtemperatur gemessenen Beugungsdaten jedoch wesentlich besser. Dieses Gitter ist bislang einzigartig.

Bei einem Druck von mehr als 96 Gigapascal wird Sauerstoff schließlich supraleitend. Unsere Berechnungen mit Uspex bestätigten die bisherige Vermutung, dass er dabei molekular bleibt. Allerdings zeichnet sich die gefundene Struktur durch eine dreidimensionale Vernetzung der O<sub>2</sub>-Moleküle aus.

### Fundgrube für neue Werkstoffe

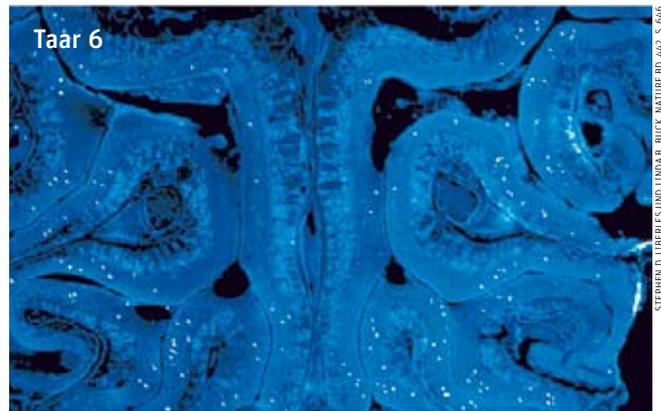
Doch nicht nur stabile Strukturen sind von Interesse. Als Beleg kann der eingangs erwähnte Diamant dienen. Thermodynamisch ist er unter Atmosphärendruck nicht beständig, sondern lediglich »metastabil«. Er sollte sich in Graphit umwandeln, tut das aber nur mit äußerst geringer Geschwindigkeit, weil er dazu erst eine sehr hohe Energiebarriere überwinden muss. Da Uspex bei der Erkundung der Energielandschaft zahlreiche Täler findet und durchsucht, entdeckt das Programm auch viele gute, metastabile Strukturen. Ist deren freie Energie – wie beim Diamant unter Atmosphärendruck – gering genug und

sind die Barrieren zu energetisch günstigeren Atomanordnungen hinreichend hoch, sollten solche Materialien eine für die technische Anwendung ausreichende Lebensdauer haben.

Da wir aus den theoretisch ermittelten Strukturen viele Eigenschaften des zugehörigen Materials ableiten können, eröffnet sich die Möglichkeit, gezielt Systeme bestimmter chemischer Zusammensetzung per Computer nach technologisch interessanten Materialien zu durchforsten. Das haben wir etwa beim Kohlenstoff getan. Zu unserer großen Überraschung entdeckten wir dabei eine Modifikation mit sehr geringer freier Energie, die unter normalem Atmosphärendruck metastabil ist und Strukturelemente von Graphit und Diamant in sich vereint. Für diesen Zwitter sind einzigartige Kombinationen physikalischer Eigenschaften zu erwarten. Die Herausforderung an die experimentellen Chemiker ist nun, einen Weg zu finden, das bislang nur virtuell existierende Material auch real herzustellen.

---

**COLIN W. GLASS** ist Doktorand am Laboratorium für Kristallographie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.



STEPHEN D. LIBERLES UND LINDA R. BUCK, NATURE BD. 442, S. 646

WAHRNEHMUNG  Diesen Artikel können sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## Ein neuer Geruchssinn

Mäuse haben eine »zweite Nase«. Damit riechen sie Signalstoffe im Urin ihrer Artgenossen.

Von Michael Groß

Die Wissenschaft weiß erstaunlich viel über unsere visuelle Wahrnehmung, aber ziemlich wenig über den Geruchs- und Geschmackssinn. Während das Auge der Wirbeltiere bis in seinen letzten Winkel ausgeleuchtet ist, können Forscher im Mund- und Nasenbereich noch grundlegende Entdeckungen machen – Überraschungen eingeschlossen.

So ist das System der molekularen Geruchsrezeptoren, ursprünglich am Beispiel der Maus untersucht, erst seit 15 Jahren bekannt. Entscheidenden Anteil an dieser grundlegenden Entdeckung hatte Linda S. Buck, die dafür 2004 den Medizin-Nobelpreis erhielt (Spektrum der Wissenschaft 12/2004, S. 22). Jetzt wartet die US-Forscherin erneut mit einer kleinen Sensation auf. Wie sie und ihr Mitarbeiter Stephen Liberles am Howard Hughes Me-

dical Institute in Seattle (Washington) herausgefunden haben, existiert in der Nase der Nagetiere eine zweite, unabhängig operierende Familie von Duftrezeptoren (*Nature*, Bd. 442, S. 645).

Das klassische Geruchssystem, das inzwischen auch bei vielen anderen Wirbeltieren untersucht ist, besteht aus den so genannten Riechzellen. Diese spezialisierten Neuronen befinden sich in der Riechschleimhaut im oberen Bereich des Nasendachs. Sobald sich ein passender Geruchsstoff anlagert, senden sie ein Signal an das Gehirn.

Auf molekularer Ebene gibt es – je nach Tierart – bis zu tausend verschiedene Rezeptormoleküle für duftende Substanzen. Jede einzelne Riechzelle verfügt jedoch nur über eine einzige Sorte davon und registriert folglich ausschließlich Moleküle, die sich daran binden. Durch kombinatorische Verknüpfung dieser speziali-

sierten Sensoren können Tiere zwischen Millionen von Gerüchen unterscheiden. Beim Menschen, der sich in den letzten Jahrmillionen auf andere Kommunikationskanäle spezialisiert hat, ist diese Fähigkeit allerdings stark verkümmert.

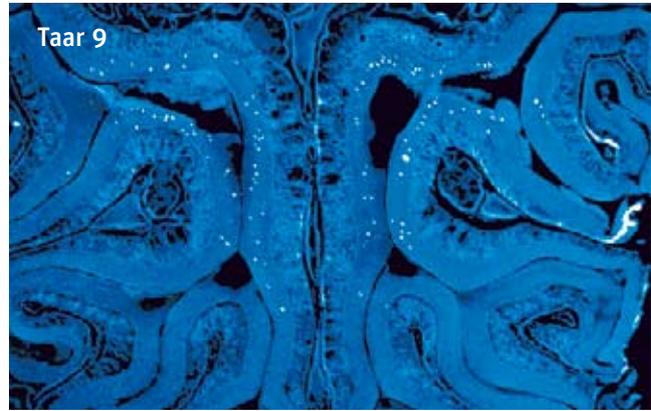
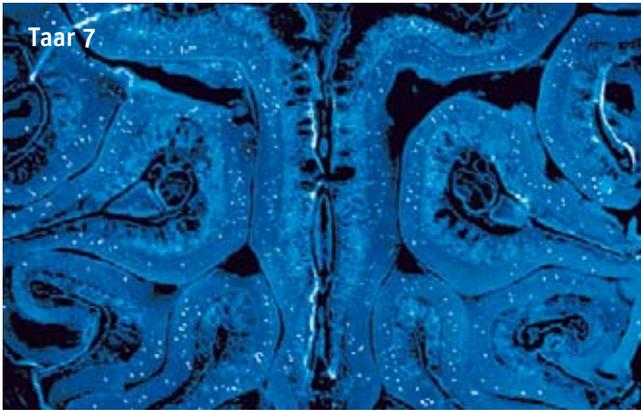
Die Rezeptormoleküle gehören zu einer riesigen Stofffamilie, die auch das Sehpigment Rhodopsin und alle bisher bekannten Geschmackssensoren umfasst. Sie leiten die empfangene Botschaft in biochemischer Form an ein an derselben Zellmembran angesiedeltes G-Protein weiter, weshalb sie G-Protein-gekoppelte Rezeptoren heißen. Über eine Kaskadenreaktion wird das Signal dann um mehrere Größenordnungen verstärkt.

Im Endeffekt öffnen oder schließen sich unzählige Ionenkanäle – was die charakteristische Spannungsänderung erzeugt, die einen Nervenimpuls ausmacht. Dieser Vorgang ist vor allem am Beispiel des Sehprozesses und der Hormonantwort im Detail untersucht worden. Er erklärt, warum schon ein einziges Lichtquant (Photon) oder Hormonmolekül jene synchronen Schaltvorgänge in Tausenden von molekularen Schleusen auslösen kann, die eine Nervenzelle zum Feuern veranlassen.



MONELL CHEMICAL SENSES CENTER, JAMES KILKELY

◀ Aus Dressurversuchen ist schon länger bekannt, dass Mäuse Signalstoffe im Urin von Artgenossen erschnüffeln können. Nun wurden Geruchsrezeptoren entdeckt, die an diesem Wahrnehmungsvorgang beteiligt sind.



Die Mitglieder der einzigen bis vor Kurzem bekannten Familie von Geruchsrezeptoren sind alle auf flüchtige Duftstoffe spezialisiert und leiten ihr Signal an das für den Geruchssinn spezifische G-Protein namens  $G_{\alpha_{olf}}$  weiter. Eine Reihe von Beobachtungen und Überlegungen ließen Buck und Liberles jedoch vermuten, dass dies noch nicht die vollständige Inventarliste des Geruchssinns sein kann. Zum Beispiel gibt es Riechzellen, die kein  $G_{\alpha_{olf}}$  herstellen. Damit sie ihre Aufgabe erfüllen können, müssen sie also mit Geruchssensoren aus einer anderen Familie arbeiten. Des Weiteren sprach einiges dafür, dass Riechzellen

außer den flüchtigen Duftstoffen weitere Substanzen wahrnehmen können: etwa die für die immunbiologische Identität eines Individuums charakteristischen Peptide sowie Pheromone (Sexuallockstoffe). Für Letztere ist eigentlich das in der Nasenscheidewand angesiedelte vomeronasale Organ (VNO) zuständig, doch zumindest bei einigen Pheromonen scheinen beide Teile der Nase an der Wahrnehmung beteiligt zu sein.

Deshalb fahndeten die US-Forscher nach weiteren Sinnesrezeptoren in Mäuse-Riechzellen. Dazu separierten sie diese zunächst mit einem neu entwickelten Sortierverfahren von den anderen Zellen

▲ Diese vier Schnitte durch die Riechschleimhaut der Maus illustrieren die Verteilung von vier der fünfzehn neu entdeckten Geruchsrezeptoren (Taar). Zellen, in denen sie vorliegen, leuchten weiß.

der Nasenschleimhaut. Dann suchten sie in den Riechzellen nach Abschriften von Genen für Sensormoleküle, von denen nicht schon bekannt war, dass sie an der Wahrnehmung von Gerüchen oder Pheromonen beteiligt sind.

Liberles und Buck entdeckten auf diese Weise zunächst zwei neue Typen. Beide gehören zur Familie der mit Spuren- ▷

# Die Chancen früher begreifen.

## Testen Sie Technology Review – 3 Hefte für 12 Euro!

- Lieferung bequem und pünktlich nach Hause
- Sie verpassen keine Ausgabe
- Sie sparen fast 15% gegenüber dem Kauf im Einzelhandel
- Bestellen Sie Ihr Schnupperabo unter [www.technologyreview.de/abo](http://www.technologyreview.de/abo)

Möchten Sie Technology Review zum günstigen Abo-Preis (12 Hefte pro Jahr, für nur 4,96 Euro pro Ausgabe inkl. Versandkosten statt 5,80 Euro im Einzelverkauf) weiterlesen? Dann unternehmen Sie nichts. Sollten Sie das Magazin nicht weiter beziehen wollen, teilen Sie uns dies bitte spätestens 10 Tage nach Erhalt des 2. Heftes schriftlich mit.



**3 x**  
Technology Review  
lesen und  
**Geschenk sichern!**

▷ aminen assoziierten Rezeptoren (Taar für *trace amine-associated receptor*), die erst seit 2001 bekannt ist. Sie umfasst nach Erkenntnissen aus der Genomforschung bei der Maus 15, beim Zebrafisch 57 und beim Menschen nur sechs Mitglieder. Ihre nächsten Verwandten sind die Rezeptoren für Botenstoffe des Gehirns wie Serotonin und Dopamin. Deshalb hatte man diese Familie, deren genaue Funktion im Dunkeln lag, bisher der internen Kommunikation zugeordnet.

Nach den ersten Hinweisen auf die Beteiligung von Taars am Geruchssinn knöpften sich die Forscher die 15 Exemplare bei der Maus einzeln vor. Wie sich zeigte, kommen tatsächlich mindestens 14 von ihnen in Riechzellen vor. In anderen Geweben fand sich dagegen keine Spur davon – auch nicht im Gehirn, wo man sie bisher vermutet hatte.

Als Nächstes versuchten die Forscher daraufhin zu ermitteln, welche Duftstoffe die Mäuse mit ihren Taars erschnüffeln können. Nicht bei allen 15 Exemplaren hatten sie Erfolg, doch bei fünf konnten sie geeignete Geruchsmoleküle aufspüren, die sich nicht nur an den spezifischen Rezeptor binden, sondern auch in der lebenden Riechzelle die zugehörige Signalkette auslösen. Alle gehören zu den Aminen, also Molekülen, die eine bestimmte Stickstoff-Wasserstoff-Gruppe ( $-NH_2$ ) enthalten.

Interessant ist, dass mindestens drei dieser Amine im Urin der Mäuse vorkommen, wo ihre Konzentration von dem Geschlecht und der sexuellen Reife des Tiers abhängt. Demnach dürfte die Funktion der neu aufgefundenen Geruchssensoren primär im Bereich des Sozial- und Sexualverhaltens liegen.

Die neue Entdeckung von Linda Buck erschließt, wie ein Kommentator in »Nature« schrieb, eine neue Dimension in der Welt der Geruchswahrnehmung. Aber es muss noch andere Dimensionen geben. Denn die Ausgangsfragen der Forscher haben die Taar-Moleküle nicht beantwortet. Auch sie senden ihre Signale an  $G\alpha_{olf}$ , genauso wie die traditionellen Riechmoleküle, und sie erkennen weder Pheromone noch immunologisch relevante Peptide. Die Suche nach weiteren molekularen Antennen des Geruchssinns bleibt also ein lohnendes Ziel.

**MICHAEL GROSS** ist promovierter Biochemiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

## Springers Einwüfze

### Beim Geld hört die Freundschaft auf

Schon der Gedanke an Zaster weckt den Dagobert Duck in uns.

**KNETE, KIES, KOHLE, KRÖTEN, PIEPEN, SCHOTTER, ZASTER:** Die gängigen Umschreibungen für das universelle Tauschmittel zeugen nicht eben von hoher Wertschätzung. Ganz anders der Thron, auf den es die moderne Wirtschaftswissenschaft setzt. Da ist Geld der oberste Regulator, der über den Marktpreis Ressourcen optimal zuweist, Angebot und Nachfrage perfekt regelt. Nach der reinen Lehre soll Geld die Welt möglichst allein regieren: Sobald Politiker dem freien Markt ins unsichtbare Handwerk pfuschen, verschulden sie bloß Inflation, Wirtschaftskrisen und Arbeitslosigkeit.

Erstaunlich, wie selten erforscht wurde, was die Allgegenwart dieser Substanz in den Köpfen ihrer Benutzer anrichtet, das heißt in jedem einzelnen von uns. Drei Marketing-Psychologinnen um Kathleen D. Vohs von der Universität von Minnesota in Minneapolis haben jetzt die Frage in neun ausgeklügelten Experimenten gründlich untersucht (*Science*, Bd. 314, S. 1154).

Beispielsweise mussten die Teilnehmer zunächst zur Einstimmung Texte vorlesen; in der einen Probandengruppe handelte die Geschichte von einer Kindheit in finanziellem Überfluss, in der anderen vom Heranwachsen in Armut. Dann wurde den Probanden eine geometrische Aufgabe gestellt, die nicht nur schwierig, sondern – was sie nicht wussten – gar nicht zu lösen war. Nach zwei Minuten wurde Hilfe angeboten: Jemand trat ins Zimmer, der angeblich die Lösung wusste. Testpersonen, die zuvor mit der Reichtumsgeschichte konfrontiert worden waren, nahmen das Hilfsangebot deutlich später in Anspruch als jene, die über ein Oliver-Twist-Schicksal gelesen hatten. Letztere suchten nicht nur erheblich rascher Rat und Tat, sondern waren in einem ähnlichen Test auch eher bereit, anderen zu helfen.

**IN EINEM WEITEREN VERSUCH** saßen die Teilnehmer vor Computern und beantworteten Fragebögen. Nach sechs Minuten erschienen Bildschirmschoner – im einen Fall Fische unter Wasser, im anderen langsam vorbeitreibende Geldscheine. Anschließend wurde ein Gruppengespräch angekündigt, für das die Probanden Stühle aufstellen sollten. Wer zuvor Geld auf dem Bildschirm gesehen hatte, stellte die Stühle merklich weiter auseinander. Solche Teilnehmer suchten buchstäblich mehr soziale Distanz.

Für die Psychologinnen lautet die Quintessenz ihrer Ergebnisse: Geld macht tendenziell eigenbrötlerisch und weniger kooperativ. Schon beim bloßen Gedanken daran werden Menschen weniger bereit, Hilfe in Anspruch zu nehmen und anderen beizustehen.

Die Resultate lassen das Image des Geldes in recht zwiespältigem Licht erscheinen. Geld verbindet nicht nur, sondern es trennt auch; es sozialisiert und individualisiert zugleich. Einerseits ist es seit mehreren tausend Jahren zum allgemeinsten Mittel des sozialen Austauschs geworden. Geldverkehr übergreift Kulturen, Traditionen und gesellschaftliche Schichten. In der modernen Weltgesellschaft wirkt Geld als kostbares, von den Währungshütern der Nationalbanken sorgsam gepflegtes Schmiermittel zum reibungslosen Interessenausgleich; bekanntlich wird sogar in halblegalen Weise gern »geschmiert«, um Transaktionen zu erleichtern.

Doch auf der anderen Seite macht das soziale Gleitmittel offenbar nicht automatisch großzügig, kooperativ und spendabel, sondern fördert im Gegenteil eine egoistische Einstellung nach dem Motto: Jeder ist sich selbst der Nächste. Die antisoziale Kehrseite der Geldidee wirkt, wie die Experimente plastisch vorführen, hinterrücks und unbewusst. Der Glanz des Geldes wirft einen heimlichen Schatten, der den Gedanken an die Mitmenschen verdunkelt.



Michael Springer