



ERDE 3.0

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Sind von Menschen beeinflusste Ökosysteme besser als unberührte Wildnis?

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

02/10

FEBRUAR 2010

AUTOMATEN

Roboter mit Entdeckerlust

MEDIZIN

Warum Impfstoffverstärker mehr nützen als schaden

STATISTIK

Haben schöne Eltern mehr Töchter?

## Schwarze Sterne

Quanteneffekte könnten statt eines Schwarzen Lochs einen superschweren Stern entstehen lassen

7,40 € (D/A) · 8,- € (L) · 14,- sFr.  
D6179E



www.spektrum.de





Reinhard Breuer  
Chefredakteur



## Wer sich impfen lässt, hat mehr vom Leben

**Schweinegrippe – war da was?** Nachdem die größte Welle der Schweinegrippe-Epidemie vorbei ist, wird man sich ja wenigstens hinterher mal über die Hysterie wundern dürfen, welche die dazugehörige Impfaktion im letzten Herbst erregt hat. Zur Erinnerung: Anfangs dilettierte die Bundesregierung mit »zweierlei Impfstoff« für Regierungsmitglieder einerseits und den gemeinen Rest des Volks andererseits.

Das diente als Weckalarm für notorische Impfgegner, die prompt die Verschwörungstheoretiker vom Dienst mit sich rissen und selbst manche niedergelassenen Ärzte impfabstinent stimmten. Die Aufregung war groß, nach anfänglichem Impfstoffmangel blieben die Länder auf milliardenschweren Seren sitzen. Da eine zweite, gefährlichere Erkrankungswelle ausblieb, verlief alles im Sand.

Ein Hauptpunkt der Kritiker waren angeblich bedrohliche Wirkverstärker (Adjuvantien) in den Impfstoffen. Sie hätten bei Golfkriegsveteranen gesundheitliche Schäden hinterlassen. Dabei handelt es sich jedoch um eine Falschinformation: Die betreffenden Soldaten waren ohne solche Zusatzmittel geimpft worden. Die Dämonisierung dieser Substanzen scheint in jedem Fall deplatziert; denn deren Chancen überwiegen mögliche Gefahren deutlich. Mit den innovativen Wirkverstärkern lassen sich nämlich nicht nur rasch – etwa in Zeiten von Pandemiekrisen – große Mengen an Vakzinen herstellen. Sie helfen auch, Impfstoffe zu entwickeln, die zielgenauer gegen bestimmte Erreger wirken (S. 40).

**Roboter sind Hauptakteure fast jeder Sciencefiction.** Als ich mir vor Jahren die Romane von Isaac Asimov oder Stanislaw Lem zu Gemüte führte, konnte ich kaum umhin, von dem fiktional fast übernatürlichen Wirken superintelligenter, hilfsbereiter Kunstwesen und manchmal auch mörderischer Terminatoren beeindruckt zu sein.

Dass sich unsere Wirklichkeit auf diesem Gebiet etwas schlichter darstellt, muss einen nicht grundsätzlich enttäuschen. Immerhin rackern ja längst clevere Automaten in der Autoproduktion, Medizintechnik, im Haushalt oder demnächst in der Altenhilfe. Längst rasen Computermäuse durch Labyrinth, kämpfen RoboCob-Fußballer jährlich um die Weltmeisterschaft. Ob japanische Roboterspielhunde einmal in allen Kinderzimmern herumpurzeln werden, bleibt abzuwarten.

Aber eigentlich sind alle diese Systeme weit von den euphorischen Utopien zur künstlichen Intelligenz der 1960er Jahre entfernt. Ein Grund dafür liegt im alten Paradigma der KI-Forschung: Den Automaten wurden stets möglichst umfassende Verhaltensregeln per Software mitgegeben. Das reicht zwar für Schachspielcomputer und viele Industrieroboter, aber für die freie Wildbahn des wirklichen Lebens ist das Verfahren zu unflexibel.

Um diesen Mischstand zu beheben, haben **Ralf Der** und **Nihat Ay** ein, wie ich finde, revolutionäres Gegenkonzept entwickelt. Die Informatiker in Leipzig sprechen von *embodied artificial intelligence* (etwa: verkörperte künstliche Intelligenz). Gemeint ist, dass sich die Steuerung von Kunstwesen die Eigenschaften zu Nutze macht, die bereits in ihren Körpern selbst angelegt ist. Sie lernen von allein und entwickeln dabei in gewissem Grad eine eigene Persönlichkeit.

Das ist sicher noch meilenweit von Asimovs Supermaschinen entfernt, aber es scheint immerhin eine neue Dimension der Automatensteuerung zu eröffnen (S. 86).

Die Roboterforscher Nihat Ay (links) und Ralf Der vor einer Simulation ihrer Kunstwesen



MIT FRIEDRICH-AUGUST-VON-LEIBNIZ-UNIVERSITÄT LEIPZIG

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



32

ASTRONOMIE & PHYSIK  
Laserdioden schließen die »grüne Lücke«

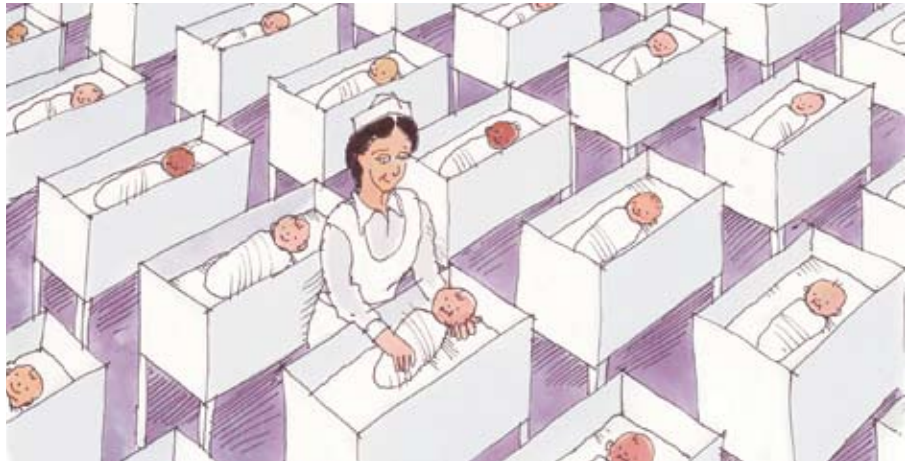


40

MEDIZIN & BIOLOGIE  
Wirkverstärker für neuartige Impfstoffe

MENSCH & GEIST  
Schönheit und Statistik – ein Feld für Fehldeutungen

52



## AKTUELL

### 12 Spektrogramm

Sauer macht manche stark ·  
Mediterrane Sintflut · Fruchtbar trotz  
Fastenkur · Fair durch Testosteron u. a.

### 15 Bild des Monats

Äpfelmännchen in 3-D

### 16 Auf Quantenpfaden durch das Heliumatom

Hologramme inneratomarer Strukturen  
mit ultrakurzen Laserblitzen

### 18 Boten vom Rand der Heliosphäre

Der Satellit IBEX registriert Teilchen von  
der Grenze des Sonnensystems

### 20 Herzen von Fötus und Mutter im Gleichtakt

Das Ungeborene versucht, seinen Herz-  
schlag an den der Mutter anzupassen

### 22 Ethisch unbedenkliche Stammzellen in Reichweite?

Fortschritte bei der Suche nach Ersatz für  
embryonale Stammzellen

### 23 Springers Einwürfe

Wie funktioniert ein Aufstand?

## ASTRONOMIE & PHYSIK

### TITEL

### 24 ► Schwarze Sterne statt Schwarzer Löcher?

Beim Kollaps massereicher Sterne  
entsteht meist ein Schwarzes Loch.  
Doch Quanteneffekte könnten den  
Zusammenbruch vorher stoppen

### 32 Pioniere unter den grünen Minilasern

Halbleiterlaser, die reines grünes Licht  
ausstrahlen, stellen Forscher noch immer  
vor Herausforderungen. Doch jetzt gibt  
es Fortschritte zu vermelden

SCHLICHTING!

### 39 Eisige Blumenpracht

Beim Wachsen von Eisblumen am  
Fenster wirken Zufall und Notwendigkeit  
zusammen

## MEDIZIN & BIOLOGIE

### 40 ► Wirkverstärker für Impfstoffe

Mit speziellen Zusatzstoffen, die das  
Immunsystem aktivieren, lässt sich die  
Wirkung existierender Impfstoffe ver-  
stärken. Neuartige Vakzine werden dank  
solcher Adjuvanzen überhaupt erst  
möglich

Titelmotiv: ESA, NASA und Felix Mirabel (The French  
Atomic Energy Commission & The Institute for Astronomy  
and Space Physics / Conicet of Argentina)

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind  
mit ► gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel  
finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses  
Magazins, zu beziehen unter: [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)



TITEL

## Schwarze Sterne

24

## MENSCH & GEIST

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

### 49 Der hyperbolische Topflappen

Mathematikerinnen erfassen abstrakte Flächen mit negativer Krümmung – durch Häkeln

### 52 ► Haben schöne Eltern mehr Töchter?

Oft kursieren in den Medien waghalsige Nachrichten aus der Wissenschaft. Nicht selten basieren sie auf einer marginalen statistischen Signifikanz

### 60 Amazoniens Tropenwälder – eine alte Kulturlandschaft?

Wo heute Dschungel wächst, so glauben amerikanische Archäologen, blühten einst Cluster von »Gartenstädten«

## ERDE & UMWELT

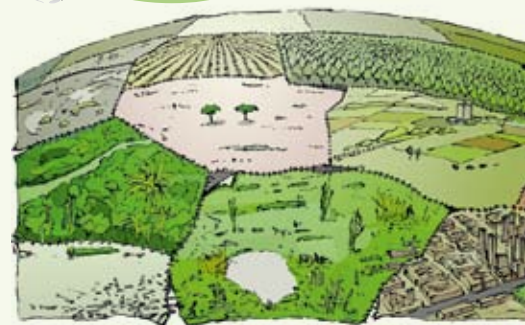
 ERDE 3.0

### 68 ► Die neuen Ökosysteme

Zählt im Naturschutz letztlich nur unberührte Wildnis? Forscher betonen jetzt den Wert von sich selbst überlassenen, aber durch Menschen veränderten Lebensräumen

Seite 105  
**naturejobs**

 ERDE 3.0



ERDE & UMWELT  
Neue Ökosysteme

68



TECHNIK & COMPUTER  
Roboter mit Eigeninitiative

86

## TECHNIK & COMPUTER

### 74 Computer zum Einspritzen

DNA-Moleküle sollen einst in unserem Blut die richtige Therapie errechnen

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

### 84 Wegweiser im All

Vom militärischen System zum Alltagsprodukt: die Satellitennavigation GPS

### 86 ► Roboter mit Entdeckerlust

Um Robotern ein kreatives Eigenleben mit spontanem Neugierverhalten zu ermöglichen, bedarf es neuer Paradigmen

WISSENSCHAFT & KARRIERE

### 104 Partner für Patente

Das Technologie-Lizenz-Büro in Karlsruhe hilft Forschern, ihre Entwicklungen zu schützen und zu vermarkten

## WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Wer sich impfen lässt, hat mehr vom Leben
- 6 Onlineangebote
- 8 Leserbriefe/Impressum
- 83 Im Rückblick
- 106 Vorschau

99 Rezensionen:

- Alexander von Humboldt *Mein vielbewegtes Leben*
- M. Pauen, G. Roth *Freiheit, Schuld und Verantwortung*
- E.-J. Lampe, M. Pauen, G. Roth (Hg.) *Willensfreiheit und rechtliche Ordnung*
- K.-J. Grün, M. Friedman, G. Roth (Hg.) *Entmoralisierung des Rechts*
- Peter Winkler *Mathematische Rätsel für Liebhaber*
- Heinz Häfner *Ein König wird beseitigt*

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de). Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!



PETER MARENFIELD, NOAO, AURA, NSF

**SPEKTRUM DIREKT** Dunkle Geheimnisse  
[www.spektrumdirekt.de/schwarzeloecher](http://www.spektrumdirekt.de/schwarzeloecher)

**spektrumdirekt.de**

Die Wissenschaftszeitung im Internet

## Von Symmetrien, Präferenzen und Rollenverteilungen

Liebe ist nur ein Aspekt unter vielen. Wie suchen und finden Menschen den Partner fürs Leben oder für einige Zeit? Und welche Kriterien sprechen für Elternschaftsqualitäten? Hier hat »spektrumdirekt« alle Nachrichten zum Thema zusammengestellt

[www.spektrumdirekt.de/partnerwahl](http://www.spektrumdirekt.de/partnerwahl)

## Dunkle Geheimnisse

Schwarze Löcher bergen noch viele Rätsel, und selbst die Frage, ob sie nicht doch eher »Schwarze Sterne« sind (S. 24 in dieser Ausgabe), ist unbeantwortet. Doch Forscher bleiben ihnen dicht auf der Spur und analysieren Gammastrahlenausbrüche, Röntgenpulse aus supermassereichen Schwarzen Löchern und mögliche Doppelsysteme. Lesen Sie unser Nachrichtendossier

[www.spektrumdirekt.de/schwarzeloecher](http://www.spektrumdirekt.de/schwarzeloecher)

## TIPPS

Nur einen Klick entfernt

## Die erste Mathematikprofessorin

Ihre Begeisterung für Mathematik ließ sie alles andere vernachlässigen, so dass der Vater ihr schon früh die Beschäftigung damit verbot. Dies war aber nur die erste der Hürden, die Sofia Kowalewskaja auf dem Weg zur ersten Mathematikprofessorin der jüngeren Wissenschaftsgeschichte überwinden musste – nachzulesen im Mathematischen Monatskalender von Heinz Klaus Strick

[www.spektrum.de/monatskalender](http://www.spektrum.de/monatskalender)

## Brücke zwischen Geist und Gehirn

Sein jüngstes Buch ist schlicht eine Sammlung von Beiträgen aus der »Zeitschrift für Neuroheilkunde«. Doch erneut finde der Ulmer Psychiater und Hirnforscher Manfred Spitzer allgemein verständliche Worte für eine schwierige Materie, schreibt die promovierte Neurobiologin Tagrid Yousef in ihrer Rezension von »Das Wahre, Schöne, Gute«

[www.spektrumdirekt.de/artikel/1018051](http://www.spektrumdirekt.de/artikel/1018051)

## INTERAKTIV

Machen Sie mit!

## Umfrage:

## »Spielerei oder digitaler Mehrwert?«

Videos, Audiodateien, Animationen: Im Vergleich mit dem gedruckten Magazin bietet das Internet mehr Möglichkeiten, Inhalte zu vermitteln. Doch ist das wirklich eine Bereicherung – oder alles nur Spielerei? »Scientific American« hat einen Artikel, der auch in »Spektrum« erschienen ist, zusätzlich als interaktive Onlineversion veröffentlicht. Machen Sie den Test und teilen Sie uns Ihre Meinung mit

[www.spektrum.de/artikel/1017754](http://www.spektrum.de/artikel/1017754)



**INTERAKTIV** Umfrage: »Spielerei oder digitaler Mehrwert?«  
[www.spektrum.de/artikel/1017754](http://www.spektrum.de/artikel/1017754)

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich



FREIGESCHALTET

»Zeugnisschutzprogramm«

[www.epoc.de/artikel/1018048](http://www.epoc.de/artikel/1018048)

Spektrum in den sozialen Netzwerken



[www.spektrum.de/studivz](http://www.spektrum.de/studivz)

facebook

[www.spektrum.de/facebook](http://www.spektrum.de/facebook)

twitter

[www.spektrum.de/twitter](http://www.spektrum.de/twitter)

FÜR ABONNENTEN »Von Würmern und Fliegen, Mäusen und Menschen«

[www.spektrum-plus.de](http://www.spektrum-plus.de)

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel  
zum Download

»Von Würmern und Fliegen,  
Mäusen und Menschen«

Die genbasierte Schlafforschung profitiert von neuen molekularbiologischen Methoden – und einer Reihe tierischer Modellorganismen. So gelingt es, das Phänomen Schlaf, sein Entstehen und seine Funktionen zu untersuchen. Das Fernziel: eine personalisierte Schlafmedizin für jeden Patienten

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN  
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

[www.spektrum-plus.de](http://www.spektrum-plus.de)

FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **epoc** und  
**Gehirn&Geist** kostenlos online lesen

»Zeugnisschutzprogramm«

Buchrestauratoren versuchen, historisch wertvolle Schriften vor dem schleichenden Zerfall zu retten. Welche Methode dafür die richtige ist, darüber sind sie sich allerdings nicht immer einig

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE  
LESEPROBE VON **EPOC** UNTER

[www.epoc.de/artikel/1018048](http://www.epoc.de/artikel/1018048)

»Gedanken auf Abwegen«

Sie können sich schlecht konzentrieren, sind impulsiv, haben Probleme am Arbeitsplatz und in ihrer Beziehung: Erwachsene mit ADHS. Zwei Psychiaterinnen vom Mannheimer Zentralinstitut für Seelische Gesundheit erläutern, wie sich die Störung im Alltag äußert und welche Behandlung Abhilfe schafft

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE  
LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

[www.gehirn-und-geist.de/artikel/1015462](http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/1015462)

**WISSENSlogs**

Die Wissenschaftsblogs

Arktische Tagebücher

Manchem sind schon die Kälteeinbrüche in Deutschland zu viel. Ein Blick in die Wissenslogs, wo derzeit gleich zwei Polarforscherteams bloggen, zeigt jedoch, dass es auch ganz anders geht. Tore Hattermann etwa, Gastautor in der »KlimaLounge«, verbrachte Weihnachten und Neujahr mit Bohrungen in minus 25 Grad kaltem antarktischen Schelfeis. Das Forschungsschiff »Polarstern« ist ebenfalls wieder unterwegs und sucht auf seiner Reise von Chile nach Neuseeland unter anderem nach Spuren eines Meteoriteneinschlags. Aus dem Süden zurückgemeldet hat sich derweil die Biologin und Journalistin Stefanie Reinberger: Nach zwei Jahren Pause betreibt sie jetzt wieder »Science in the City«

[www.wissenslogs.de](http://www.wissenslogs.de)

[www.spektrum.com](http://www.spektrum.com)  
[service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
Telefon 06221 9126-743

## Quantenphysikalische Verschränkung

Leserbriefe, Dezember 2009, zu:

Bedroht die Quantenverschränkung Einsteins Theorie?, September 2009

### Keine Fernwirkung?

Herr Dr. Brewig schreibt in seinem Leserbrief zum Thema quantenphysikalische Verschränkung, dass es keiner Fernwirkung bedürfe, um die beobachtete Koinzidenz der Messergebnisse zu erklären, weil ja die verschränkten Wellenfunktionen denselben Zustand beschreiben würden und daher die beobachtete Kopplung der Messergebnisse ganz natürlich sei. Dies wäre auch so, wenn die Wellenfunktion das Ergebnis der Messung bereits in sich tragen würde.

Diese Vermutung ist als die Theorie der verborgenen Parameter lange bekannt, konnte aber nie bestätigt wer-

den. Tatsächlich erlaubt die Wellenfunktion nur eine Vorhersage des Erwartungswerts, also des statistischen Mittelwerts bei sehr vielen Messungen, der Ausgang der Einzelmessung ist hingegen in der Regel völlig unbestimmt. Unter dieser Prämisse ist die heute wohl am weitesten verbreitete Folgerung aus den experimentellen Befunden, dass unsere Welt nicht »lokal-realistisch« ist.

Prof. Dr. A. Kilian, Merseburg

### Nur die halbe Miete

Herr Dr. Brewig scheint mir das Wesen der EPR-Paare nicht ganz verstanden zu

haben, wenn er »keine Fernwirkung benötigt«. Die verschränkte Wellenfunktion ist nämlich nur die halbe Miete der ganzen Sache, so richtig seltsam wird die Sache erst durch den Kollaps der Wellenfunktion durch eine Messung.

Vielleicht ein Beispiel, das das Rätsel der »spukhaften Fernwirkung« (O-Ton Einstein) etwas klarer macht: Sie erzeugen Photonenpaare, die sich im selben Polarisationszustand alpha befinden. Sie stellen auf der Erde und auf Sirius zwei Polfilter auf, deren Stellung Sie kurz vor dem Eintreffen der Photonen (durch einen Zufallsgenerator) einstellen, und zwar so, dass das Photon eine Trillionstelsekunde vor dem auf Beteigeuze gemessen wird. Der gemessene Polarisationszustand auf der Erde beeinflusst also den Polarisationszustand auf Beteigeuze. Greifen wir eine Messreihe heraus: Auf der Erde be-

## Fantastisches Vakuum

Vorsicht, heiß!, Wissenschaft im Alltag, Dezember 2009

Im Artikel ist von einem Vakuum bis zu  $10^{-14}$  Millibar in einer Thermoskanne die Rede, das wäre fantastisch, da so niedrige Drücke bisher selbst in den besten Vakuumkammern nicht erreicht werden! Ich glaube eher, es handelt sich um einen Druckfehler und es sind  $10^{-4}$  Millibar gemeint.

Iver Lauer mann, Berlin

### Antwort der Autorin Katja Bammel:

Das Vakuum im doppelwandigen Innengefäß liegt tatsächlich zwischen  $10^{-4}$  und  $10^{-6}$  Millibar. In einzelnen Fällen kann es sicher besser sein, genaue Angaben wollten die Hersteller auf Grund des Betriebsgeheimnisses nicht machen.

Im Artikel stand, dass die Innenseite des Glasgefäßes beschichtet ist. Diese unklare Ausdrucksweise hat berechtigterweise zu Kritik geführt und bedarf einer Richtigstellung: Gemeint war natürlich, dass die innere, zum Vakuum hin-

zeigende Oberfläche des (doppelwandigen) Gefäßes beschichtet ist und nicht die (äußere) Fläche, die in Kontakt mit der Flüssigkeit steht.

Kritisiert wurde in diesem Zusammenhang auch der Ausdruck, dass die metallische Beschichtung die Wärme reflektiert. Physikalisch korrekt müsste es heißen: Die Verspiegelung besitzt eine sehr geringe thermische Abstrahlung und unterbindet somit den Wärmeaustausch nach außen. Eine spiegelnde Edelstahloberfläche verhält sich ähnlich.

## Spektrum

DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)  
**Stellvertretende Chefredakteure:** Dr. Inge Hoefler (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser  
**Redaktion:** Thilo Körkel (Online Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com  
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer  
**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**Art Direction:** Karsten Kramarczik  
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Redaktionsassistent:** Britta Feuerstein  
**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729  
**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114  
**Verlagsleiter:** Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)  
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733  
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com  
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744  
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Andrea Kamphuis, Dr. Rainer Kayser, Dr. Ursula Loos, Dr. Andreas Nestke, Christian Prager, Michael Springer.  
**Leser- und Bestellservice:** Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn  
**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,40/sFr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.  
**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenvertretung:** Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 61696-145; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6, OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24  
**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 31 vom 01. 01. 2010.  
**Gesamtherstellung:** L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG Marktweg 42-50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.  
 Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2010 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.  
 Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandene Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

### SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917  
 Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Bradford



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.





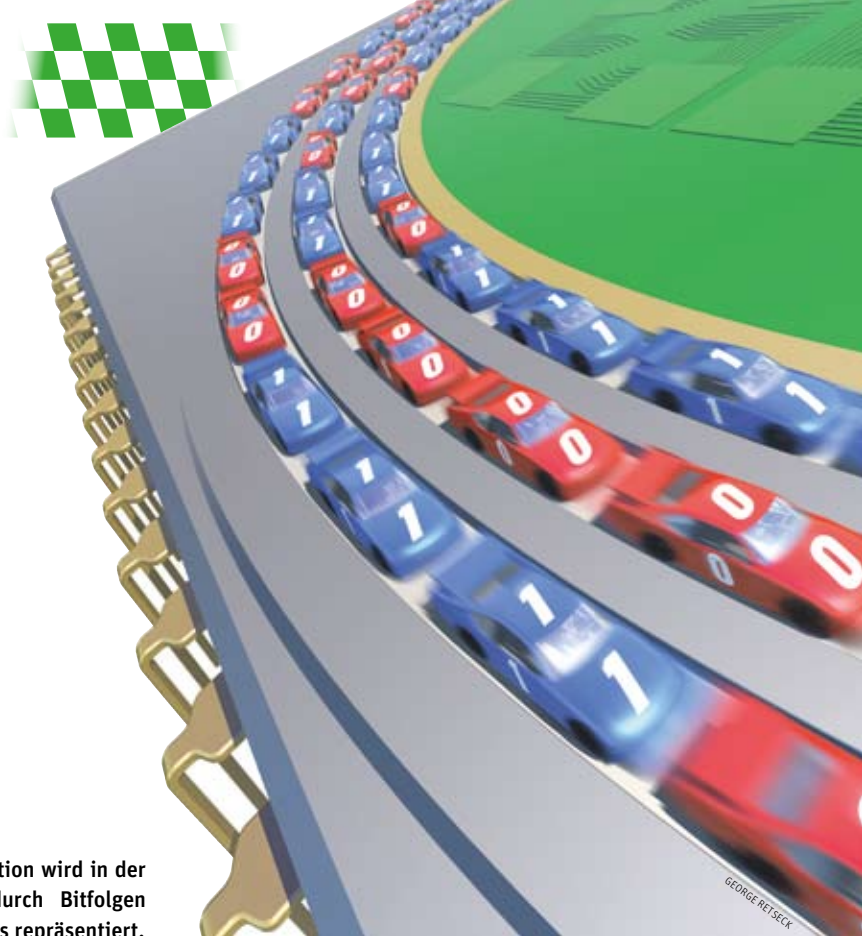
findet sich der Polfilter in Durchlassrichtung beta.

Dann haben wir den Salat: Die Durchlasswahrscheinlichkeit auf Beiteigeuze hängt für gewisse Photonen vom Einstellungswinkel beta auf der Erde ab. Und noch besser: Herr Bell hat bewiesen, dass sich dieses Verhalten nicht mit verborgenen, inhärenten Eigenschaften der Photonen verträgt.

In der obigen Betrachtung kommen Begriffe früher oder später vor, Begriffe, die in der Relativitätstheorie als relativ gedeutet werden (zumindest wenn die Ereignisse im selben Lichtkegel liegen) und daher keine absolute Gültigkeit haben dürften. Beide Theorien sind aber experimentell gut abgesichert. Also das wird noch spannend!

Johann Angsüsser, Perg, Österreich

Jegliche Information wird in der Digitaltechnik durch Bitfolgen mit Null oder Eins repräsentiert.



## Korrigendum

Null CO<sub>2</sub>-Emission bis 2030?  
Dezember 2009

Beim Lesen dieses Artikels fiel mir auf, dass auf S. 86 steht: »1 Dollar entspricht momentan etwa 1,5 Euro.« Dies ist aber leider genau andersherum: 1 Euro entspricht nämlich momentan etwa 1,5 Dollar.

Helge Böttcher, Suurhusen

## Emissionshandel

Last Exit Copenhagen  
Dezember 2009

Herr Rahmstorf stellt den Emissionshandel als einfache Lösung aller Klimaprobleme dar. Doch wie kann sichergestellt werden, dass mit den von den Industriestaaten zur Verfügung gestellten Geldern tatsächlich in den Schwellen- und Entwicklungsländern »ein klimafreundliches Energiesystem« aufgebaut wird?

Seit Jahrzehnten versickern EU-Milliarden zum Bau von Kläranlagen und Müllverbrennungsanlagen in Südtalien in dunkle Kanäle; mit den Afghanistan-Hilfsgeldern der UN war es ähnlich. Es

gibt wenig Grund anzunehmen, dass die Verwendung der Emissionszertifikats-erlöse in Ländern wie Indien, Pakistan oder dem Kongo besser kontrollierbar wäre. Gut kontrollierbar wären nur direkte Maßnahmen bei uns, die höchstwahrscheinlich aber teurer und/oder entbehrungsreicher wären als die 20 bis 60 Euro »Klimaspende« pro Person und Jahr, die Herr Rahmstorf nennt.

Führt die Möglichkeit, von Entwicklungsländern Emissionszertifikate zu erwerben, nicht dazu, dass hoch entwickelte Länder die eigene harte Umstellung auf den Sankt Nimmerleinstag verschieben?

Ruth Berger, Frankfurt am Main

## Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe) oder direkt am Artikel: Klicken Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) auf das aktuelle Heft oder auf »Magazin«, »Magazinarchiv«, das Heft und dann auf den Artikel. Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an: Spektrum der Wissenschaft  
Redaktion Leserbriefe  
Postfach 104840  
69038 Heidelberg  
E-Mail: [leserbriefe@spektrum.com](mailto:leserbriefe@spektrum.com)

## Magnetisch beeinflussbar

Bits auf der Überholspur  
November 2009

Der Autor hat wohl etwas ältere Daten der Hard Disk Drives (HDDs) verwendet. 7200 Umdrehungen pro Minute ist die Standardgeschwindigkeit seit ein bis zwei Jahren in normalen Heim-PCs bei 3,5-Zoll-Festplatten. Echte Serverplatten (und dort braucht man sehr viel mehr Tempo) laufen schon seit Längerem mit 15000 Umdrehungen pro Minute. Diese SCSI- oder SAS-Platten sind noch dazu dauerbetriebsfest, was bei den Heim-PC-Platten ja nicht der Fall ist.

Ein großes Problem der derzeitigen HDDs werden aber die Nanodrahtspeicher nicht lösen können: die magnetische Beeinflussbarkeit. Wer auf eine Notebook-Platte schon mal ein Handy gelegt hat, das dann angerufen wurde, kennt das Problem. Damit hat man ganz schnell mal die Daten unbrauchbar gemacht. Das ist aber bei jeder magnetischen Datenspeicherung so, und im Prinzip ist's ja auch eine, sonst gäbe es etwa keinen Kernspintomografen.

Harald Schmidt, St. Andrä-Wördern



DEUTSCHES INSTITUT FÜR ERNÄHRUNGSFORSCHUNG (DIFE) / AL-HASANI

## ERNÄHRUNG I

### Nicht das Fett macht Dicke zuckerkrank

■ Fettreiche Ernährung macht dick, verursacht aber keinen Diabetes. Nur wenn zusätzlich Kohlenhydrate aufgenommen werden, kommt es zur Schädigung der Insulin produzierenden Betazellen in der Bauchspeicheldrüse. Das haben Forscher um Hadi Al-Hasani vom Deutschen Institut für Ernährungsforschung in Potsdam-Rehbrücke herausgefunden.

Das Team gab New-Zealand-Mäusen, die zu Übergewicht neigen, fettreiches Futter – einem Teil der Tiere zusammen mit Kohlenhydraten, dem anderen ohne. In der 17. Woche waren beide Gruppen wohlbeleibt. Doch nur bei den Mäusen, die gleichzeitig Fett und Kohlenhydrate gefressen hatten,

**Die braune New-Zealand-Maus wurde kohlenhydrat- und fettreich ernährt. Ihr Übergewicht zeigt sich beim Vergleich mit einer normal ernährten weißen Maus.**

litten etwa zwei Drittel unter Diabetes. Die kohlenhydratfrei ernährten korpulenten Nager erfreuten sich bester Gesundheit.

Um den Unterschied genauer zu ergründen, untersuchten die Forscher Betazellen in den Bauchspeicheldrüsen der Mäuse und ermittelten, welche Gene darin gerade abgelesen und in Proteine übersetzt wurden. Dabei zeigte sich ein auffälliger Zusammenhang mit 39 Erbfaktoren, die einer anderen Untersuchung zufolge mit der Entstehung von Diabetes in Verbindung stehen. Etwa 80 Prozent von ihnen wurden in den Betazellen der Mäuse, die Fett mit Kohlenhydraten erhalten hatten, verstärkt abgelesen. Dabei handelte es sich vor allem um solche, die den Energiestoffwechsel in den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zelle, ankurbeln. Diese Stimulation führt zu »oxidativem« Stress, der die Zellen schneller altern und früher sterben lässt.

*Diabetologia, Online-Vorabveröffentlichung*

## GEOLOGIE

### Mediterrane Sintflut

■ Vor 5,6 Millionen Jahren wurde das Mittelmeer vom Atlantik getrennt und trocknete fast vollständig aus. Dann aber senkte sich die Straße von Gibraltar allmählich ab, und vor 5,33 Millionen Jahren begann wieder Wasser aus dem Atlantischen Ozean in das Meeresbecken zu fließen. Zunächst blieb der Zustrom gering, doch dann schwoll er zu einer wahren Sintflut an: Der Meeresspiegel stieg um bis zu zehn Meter am Tag. Das ermittelte nun ein Team um Daniel García-Castellanos vom Jaume-Almera-Institut für Geowissenschaften in Barcelona.

Die Forscher entdeckten anhand von Bohrungen und seismischen Sondierungen einen über 200 Kilometer langen und 250 Meter tiefen, u-förmigen Einschnitt entlang der Straße von Gibraltar, den eine Wasserflut geformt haben muss. Er entstand vor etwa fünf Millionen Jahren; denn die Rinne ist in älteres Gestein gegraben und mit

jüngeren Sedimenten gefüllt. Allmählich schnitt das hindurchströmende Wasser diesen Graben immer tiefer ein.

Mittels eines Erosionsmodells errechneten die Forscher, in welcher Zeitspanne sich welche Wassermassen ins Mittelmeerbecken ergossen. Über mehrere tausend Jahre hinweg floss demnach nur ein kleiner Strom. Dann aber schossen 90 Prozent des

Wassers in wenigen Monaten bis höchstens zwei Jahren ins Mittelmeer. Dabei stürzten sie aber nicht, wie bisher gedacht, in einem riesigen Wasserfall über die Schwelle bei Gibraltar, sondern ergossen sich über eine gewaltige, mehrere Kilometer breite Rampe, die mit ein bis vier Prozent Neigung vom Atlantik ins Mittelmeer abfiel.

*Nature, Bd. 462, S. 778*



ROGER PIBERNAT

**Rekonstruktion der Gibraltarschwelle und des partiell ausgetrockneten Mittelmeers vor der Riesenflut, mit der vor 5,33 Millionen Jahren Wasser aus dem Atlantik einströmte.**

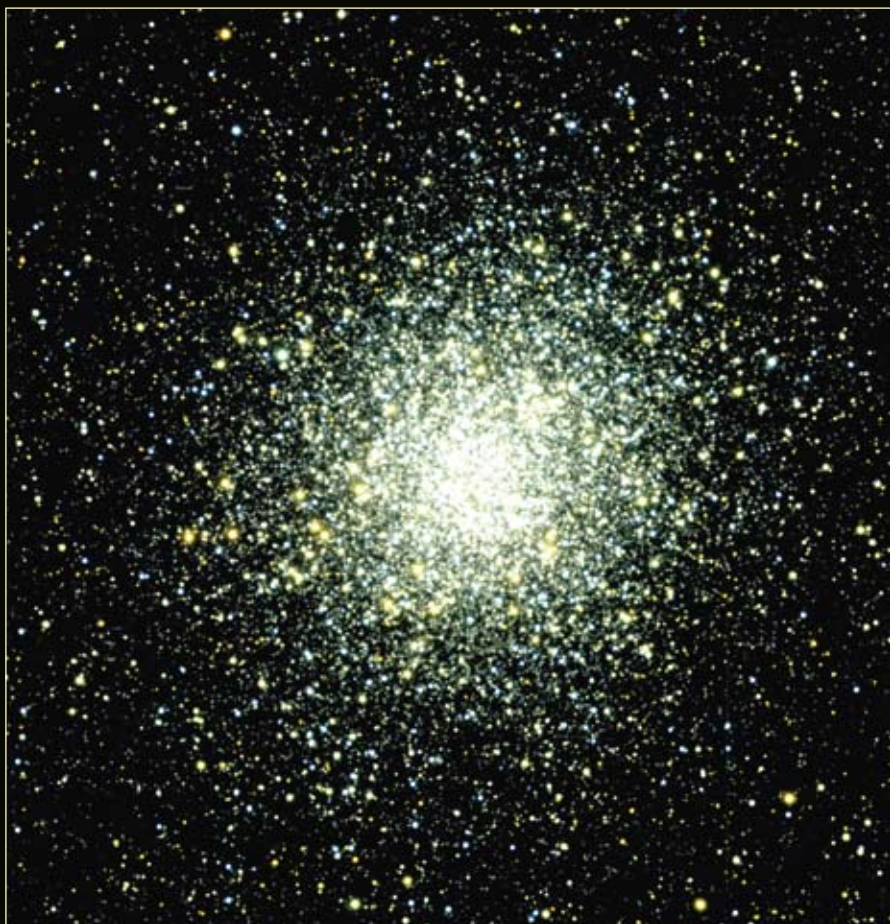
## Blick in die galaktische Frühzeit

■ In Kugelsternhaufen ballen sich Millionen von Sternen auf engstem Raum. Die Milchstraße beherbergt etwa 150 davon. Man vermutet, dass sie in der Frühzeit der Galaxis aus einer einzigen Gas- und Staubwolke entstanden sind; denn die Sterne darin haben fast alle das gleiche sehr hohe Alter. Allerdings fällt, wie bisher schon bekannt war, der größte solche Haufen namens Omega Centauri aus dem Rahmen: Er enthält Sternpopulationen, die sich in Alter und Zusammensetzung unterscheiden. Astronomen sehen in ihm deshalb den Überrest einer von der Milchstraße verschluckten Zwerggalaxie.

Nun zeigt sich, dass das kein Einzelfall ist. So handelt es sich bei Terzan 5 offenbar auch um das Relikt einer Zwerggalaxie. Das einem Kugelsternhaufen ähnliche System befindet sich in der Verdickung im Zentrum unserer Galaxis. Dort ist der interstellare Staub so dicht, dass sich nur schwer genaue Messungen durchführen lassen. Trotzdem konnten Francesco Ferraro von der Università di Bologna und Kollegen in Terzan 5 nun zwei Sternpopulationen ausmachen, die unterschiedlich alt sind und verschiedene Zusammensetzungen haben, was einen gemeinsamen Ursprung ausschließt.

Außerdem fanden Forscher um Jae-Woo Lee von der Sejong University in Seoul (Korea) bei sieben von 37 Kugelsternhaufen unerwartet große Mengen an Kalzium und anderen schweren Elementen, die von einer Supernova-Explosion stammen müssen: Sie wurden beim Kollaps des Vorläufersterns gebildet und davongeschleudert. Solche Auswürfe können jedoch nur von Systemen festgehalten werden, die schwerer sind als Kugelsternhaufen – beispielsweise Zwerggalaxien.

*Nature, Bd. 462, S. 480 und S. 483*



JAE-WOO LEE, SEJONG UNIVERSITY, KOREA / IAU

**Etlche Kugelsternhaufen – darunter der drittgrößte namens M22 – sind vermutlich Kerne einstiger Zwerggalaxien, welche die Milchstraße verschluckt hat.**

## ERNÄHRUNG II

### Fruchtbar trotz Fastenkur

■ Fasten verlängert das Leben, beeinträchtigt jedoch die Fruchtbarkeit – zumindest bei Tauflieden. Nun hat ein Forscherteam um Richard Grandison vom University College London herausgefunden, wie man es schafft, dass sich die Insekten einer hohen Lebenserwartung und vieler Nachkommen zugleich erfreuen können.

Die Wissenschaftler verpassten ihren Versuchsfliegen eine kalorienarme Diät, deren Zusammensetzung sie in getrennten Experimenten systematisch variierten. Dabei zeigte sich, dass ein hoher Anteil von Zucker, Vitaminen und Fetten keine Rolle spielte. Er beeinflusste weder die Lebensspanne noch die Fertilität: Die Fliegen blieben langlebig und wenig fruchtbar.

Allein die Anreicherung mit Aminosäuren hatte überhaupt einen Effekt. Entscheidend war aber, welche verwendet wurden. Nichtessenzielle Aminosäuren wirkten sich ebenso wenig aus wie Zucker und Fette, nur die essenziellen erhöhten die Zahl der Nachkommen – freilich in der Regel auf Kosten der Lebensspanne.

Eine Ausnahme bildete jedoch das Methionin. Als einziger untersuchter Stoff machte es fruchtbar, ohne die Lebensdauer zu verkürzen. Wenn die Ergebnisse auf den Menschen übertragbar wären, müsste man Frauen, die lange leben und dabei viele Kinder haben wollen, also den Rat geben: Esst wenig und hauptsächlich Fisch, da er viel Methionin enthält.

*Nature, Online-Vorabveröffentlichung*



**In diesen Glasröhrchen wurden die Tauflieden für die Versuche über Langlebigkeit und Fertilität aufgezogen.**

## PSYCHOLOGIE

## Fair durch Testosteron

■ Testosteron führt zu aggressivem und riskantem Verhalten – so ein weit verbreiteter Glaube. Nach Ansicht mancher Forscher weckt das männliche Sexualhormon allerdings nur das Bestreben, den eigenen Status zu verbessern, wobei Draufgängertum durchaus nützlich sein kann. Doch auch Fairness eignet sich dazu, mehr Ansehen und damit eine höhere soziale Stellung zu gewinnen.

In einem Verhaltensexperiment ließen Christoph Eisenegger von der Universität Zürich und Kollegen 121 weibliche Testpersonen um Geld feilschen. Der Hälfte von ihnen verabreichten sie 0,5 Milligramm Testosteron, den anderen Placebos. An dem Versuch nahmen nur Frauen teil, weil der Zeitverlauf der neurophysiologischen Effekte des Hormons bei ihnen sehr viel besser bekannt ist als bei Männern.

Jede Probandin durfte mehrmals entscheiden, wie viel von einem ihr geliebten Geldbetrag sie an eine jeweils



CHRISTOPH EISENEGGER, UNIVERSITÄT ZÜRICH

**Testosteron oder Placebo? Die Versuchspersonen konnten es den Tabletten nicht ansehen.**

wechselnde zweite Versuchsperson abgab. Nur wenn diese das Angebot annahm, erhielten beide das Geld. Im Fall einer Ablehnung drohte außerdem ein sozialer Konflikt mit Statusverlust.

Überraschend zeigten sich jene Frauen, die Testosteron erhalten hatten, im Durchschnitt großzügiger. Sie riskierten es offenbar nicht, durch unfaire, egoistische Angebote ihren Status zu gefährden. Unsozial verhielten sich stattdessen die Personen, die glaubten, ihnen sei das Hormon verabreicht worden, ohne dass dies wirklich der Fall war. Sie bestätigten das Vorurteil gegenüber Testosteron voll und ganz. Nicht die Substanz selbst ist also der Übeltäter, sondern ihr schlechter Ruf.

*Nature, Online-Vorabveröffentlichung*

## MEERESBIOLOGIE

## Sauer macht manche stark

■ Bislang dachte man, dass der steigende Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre den Schalen tragenden Tieren im Meer durchweg schadet. CO<sub>2</sub> reagiert mit Wasser zu Kohlensäure und führt so zur Versauerung der Ozeane. Dadurch sollten sich kalkhaltige Schalen von Meerestieren wie etwa Muscheln auflösen oder gar nicht erst bilden können. Wie nun eine detaillierte Untersuchung ergab, stimmt diese pauschale Aussage jedoch nicht: Die zusätzliche Kohlensäure beeinträchtigt nur manche Meerestiere, andere macht sie groß und kräftig.



JUSTIN RIES, UNC CHAPEL HILL

Eine bei siebenfach erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft aufgewachsene Blaukrabbe (rechts) war nach 60 Tagen viel größer als ihre unter Normalbedingungen aufgezogene Artgenossin.

Justin Ries von der University of North Carolina in Chapel Hill und Kollegen zogen 18 Spezies bei unterschiedlich stark erhöhten Kohlendioxidkonzentrationen auf. Sieben Arten, darunter Krabben, Hummer und Schrimps, reagierten auf die Versauerung unerwartet positiv: Sie wuchsen und verkalkten schneller. Demnach können diese Organismen den zusätzlich im Wasser gelösten Kohlenstoff trotz der sauren Bedingungen zum Aufbau der Schalen nutzen.

Zehn Arten, darunter Austern und Jakobsmuscheln, verkalkten bei erhöhter Kohlendioxidkonzentration jedoch langsamer. Manche wie Venusmuschel und einige Schnecken verloren ihre Schale sogar ganz. Als einzige untersuchte Spezies reagierte die Miesmuschel weder positiv noch negativ auf die veränderten Bedingungen. In jedem Fall wird die zu erwartende Versauerung des Meerwassers also das ozeanische Nahrungsnetz und damit den Markt für Schalen- und Krustentiere tief greifend beeinflussen.

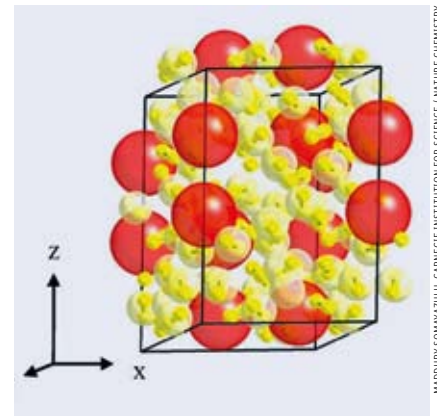
*Geology, Bd. 37, S. 1131*

## CHEMIE

## Wasserstoffspeicherung mit Xenon

■ Bei der Energieversorgung der Zukunft rangieren Brennstoffzellen weit vorne. Die Speicher für den benötigten Wasserstoff sind bislang jedoch zu groß, zu schwer oder zu ineffizient. Neue Hoffnungen weckt nun eine Entdeckung von Forschern der Carnegie Institution of Washington: Das Edelgas Xenon bildet bei mehr als 40 000-fachem Atmosphärendruck (4,1 Gigapascal) feste Verbindungen mit Wasserstoff, der darin äußerst kompakt gespeichert ist.

Die Forscher füllten Xenon und Wasserstoff in verschiedenen Mischungsverhältnissen in Diamantstempelzellen, in denen hoher Druck erzeugt werden kann. Ab 4,1 Gigapascal entstanden Festkörper definierter Zusammensetzung und Kristallstruktur:



MAADURY SOMMAZULU, CARNEGIE INSTITUTION FOR SCIENCE / NATURE CHEMISTRY

**Das Modell zeigt die Struktur des neuen Materials, Xe(H<sub>2</sub>)<sub>7</sub>. Frei rotierende Wasserstoffmoleküle (gelb) umgeben darin regelmäßig angeordnete Xenonpaare (rot).**

Die Gasatome rückten zu einer möglichst platzsparenden Anordnung zusammen.

Bei einem Festkörper der Zusammensetzung Xe(H<sub>2</sub>)<sub>7</sub> ließ sich röntgenografisch die Kristallstruktur ermitteln. Demnach waren darin zwischen dicht gepackten Wasserstoffmolekülen lose gepaarte Xenonpaare angeordnet. Bei über 255 Gigapascal nahm der Festkörper sogar metallische Eigenschaften an.


Wirtschaftlich rechnet sich die Speicherung von Wasserstoff mit Xenon zwar nicht, weil das Edelgas zu schwer und zu teuer ist. Doch auf Grundlage der Ergebnisse kann nun nach günstigeren Alternativen gesucht werden.

*Nature Chemistry, Bd. 2, S. 50*

# Apfelmännchen in 3-D

Vor 30 Jahren verhalf der Mathematiker Benoît Mandelbrot der nach ihm benannten Menge zu großer Popularität. Ihre grafische Darstellung ist das berühmte Apfelmännchen, das mit seinem unerschöpflichen Detailreichtum auch mathematische Laien fasziniert. Allerdings bleibt das Objekt auf zwei Dimensionen beschränkt, weil es in der Ebene der komplexen Zahlen liegt. Nun ist es dem Computerexperten Daniel White zusammen mit dem Mathematiker Paul Nylander gelungen, Gebilde zu erzeugen, die in drei Dimensionen einen ähnlich hohen Formenreichtum an den Tag legen wie die Mandelbrotmenge. Sie beruhen auf drei-

dimensionalen Gegenstücken der komplexen Zahlen, die nicht wie bei der Formel für das Apfelmännchen zum Quadrat, sondern zu höheren Potenzen genommen werden. Das schönste Objekt, das sich bei der achten Potenz ergibt, bezeichnet White als Mandelknollen, weil es aus Knospen besteht, die sich in fraktaler Weise aus immer kleineren Knospen zusammensetzen. Eine leichte Abwandlung der Formel liefert das hier im Ausschnitt gezeigte, nicht weniger ansprechende Gebilde, das statt der Knollen Spitzen enthält und an unendlich fein ziselierte gotische Ornamente erinnert.

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

## Auf Quantenpfaden durch das Heliumatom

Ultrakurze Laserimpulse ermöglichen holografische Aufnahmen atomarer Strukturen, indem sie Elektronen in definierter Weise aus dem Atomverband reißen und zur Überlagerung mit sich selbst bringen. Am Heliumatom ließ sich das nun demonstrieren.

Von Helga Rietz und Bernold Feuerstein

Wie bewegen sich die Elektronen in einem Atom, und was genau spielt sich ab, wenn diese Bewegung gestört wird? Das zeitaufgelöst und detailliert zu erfassen, ist ein alter Wunschtraum der Physiker, dem sie bisher meist nur auf theoretischem Weg näher kamen; denn es gab einfach keine experimentellen Methoden zur direkten Abbildung solcher Vorgänge. Doch nun eröffnet die Attosekundenphysik neue Möglichkeiten, tiefer in die faszinierende Quantenwelt der Atome zu schauen. Dieses junge Forschungsgebiet macht jene extrem kurzen Zeitspannen zwischen zehn und einigen hundert trillionstel ( $10^{-18}$ ) Sekunden zugänglich, innerhalb derer beispielsweise ein Elektron im Wasserstoffatom, klassisch gedacht, dessen Kern umkreist.

Das elektrische Feld (gelbe Kurve) eines Laserimpulses, der auf ein Heliumatom trifft, setzt zu den Zeitpunkten  $t_1$  oder  $t_2$  ein Elektron aus dem Atompotenzial (blauer Trichter) frei. Die beiden Wellenpakete, von denen einer das Rumpffion abtastet, interferieren schließlich.

Auf so kleinen Längen- und Zeitskalen kommen die quantenmechanischen Eigenschaften der Materie zum Tragen. So können Elektronen mit sich selbst interferieren: Schickt man sie einzeln durch einen Doppelspalt, zeigen ihre Auftreffpunkte dahinter eine Häufigkeitsverteilung, die der Abfolge heller und dunkler Streifen beim selben Versuch mit Licht entspricht. Dies wird möglich, weil Teilchen in der Quantenwelt gleichzeitig Wellennatur haben: Als Welle durchquert das Elektron beide Spalte gleichzeitig und überlagert sich dahinter mit sich selbst.

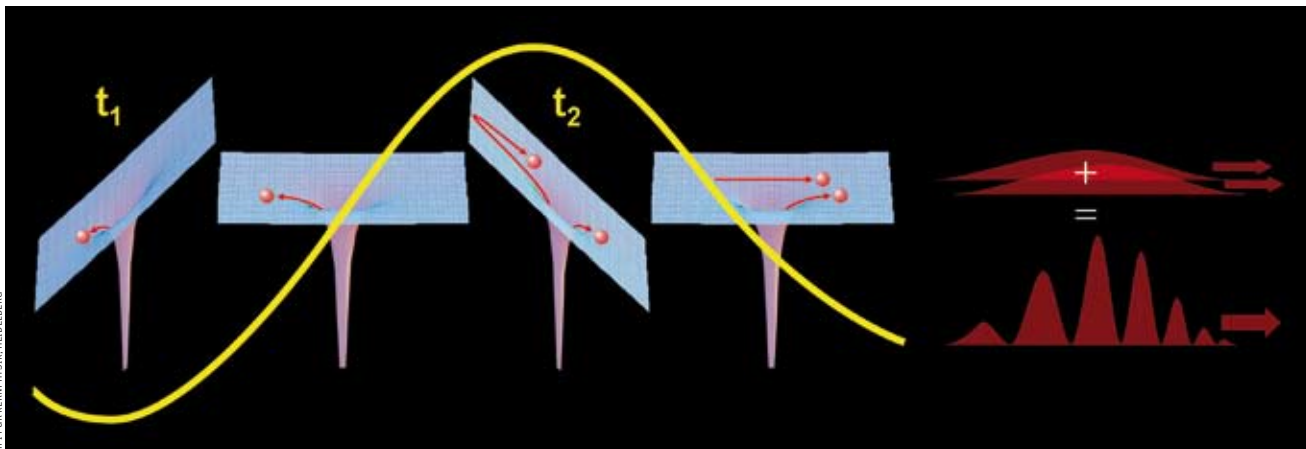
Entsprechend beschreiben Physiker Quantenteilchen nicht durch ihren Ort und Impuls, sondern mit einer so genannten Wellenfunktion. Das ist eine komplexe Größe, deren Quadrat die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des betreffenden Teilchens angibt.

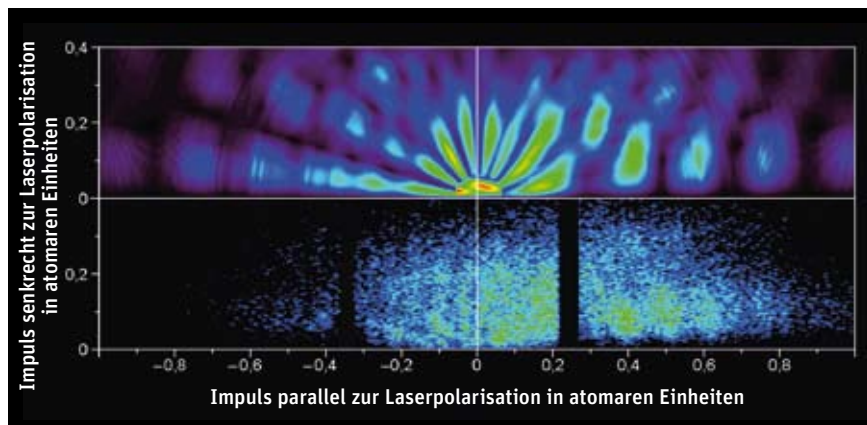
Wegen der Wellennatur von Quantenobjekten liegt in der Analyse von Interferenzstrukturen oft ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis experimenteller Daten. Informationen über das erforschte System können darin ähnlich kodiert sein wie in einem Hologramm, das ja auch die Welleneigenschaften des

Lichts nutzt, um einen Gegenstand dreidimensional abzubilden.

Bei der optischen Holografie durchlaufen Lichtwellen zunächst einen Strahlteiler. Einer der beiden Teilstrahlen wird an dem zu untersuchenden Objekt gestreut und dann wieder mit dem anderen überlagert. Dabei entsteht ein Interferenzmuster, das die vollständige räumliche Information über den abgetasteten Gegenstand enthält und dessen Rekonstruktion ermöglicht. Ursache der Interferenz ist, dass wegen der unterschiedlichen optischen Lichtwege beider Teilstrahlen – der eine wird bei der Streuung am zu untersuchenden Objekt verzögert – ihre Wellenberge und -täler nicht mehr zusammenfallen. Physiker sprechen von Phasenverschiebung.

Forscher aus der Arbeitsgruppe von Joachim Ullrich am Max-Planck Institut für Kernphysik in Heidelberg haben jetzt in Zusammenarbeit mit dem Team um Matthias Kling am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und Artem Rudenko von der Max Planck Advanced Study Group in Hamburg nachgewiesen, dass Elektronen aus der Ionisation von Heliumatomen eine der Holografie analoge Interferenz zeigen





MPI FÜR KERNPHYSIK, HEIDELBERG

Das simulierte (oben) und das gemessene (unten) Interferenzmuster in der Impulsverteilung eines Elektrons, das einem Heliumatom mit einem ultrakurzen Laserimpuls entrisen wurde, stimmen qualitativ überein.

und damit Informationen über die innere Struktur ihrer Mutteratome preisgeben können (*Physical Review Letters*, Bd. 103, S. 053001). Bei dem Experiment spielt ein extrem kurzer Laserimpuls gewissermaßen die Rolle des Strahlteilers.

Dieser Impuls kann eines der beiden Elektronen des Heliumatoms herausreißen (Bild links unten), wann immer sein sinusförmig variierendes elektrisches Feld ein Maximum erreicht. Wegen seiner Kürze enthält er allerdings nur zwei solche Maxima. Deshalb gibt es auch nur zwei Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_2$  für die Freisetzung des Elektrons.

Wird es zur Zeit  $t_1$  herausgerissen, zwingt das oszillierende Laserfeld das Teilchen zur Kehrtwende, so dass es sein Mutterion noch einmal passiert, bevor es das Atom endgültig verlässt. Dabei prägt der Ionenrumpf dem Elektronen-Wellenpaket seine Eigenheiten auf. Erfolgt die Freisetzung dagegen zur Zeit  $t_2$ , was unter den vorliegenden experimentellen Bedingungen genauso wahrscheinlich ist, gelangt das Elektron ohne den Umweg über das Heliumion direkt zum Detektor.

Wenn das Teilchen auf beiden möglichen Routen am Ende dieselbe Richtung und Geschwindigkeit besitzt, so dass unklar bleibt, welchen Quantenpfad es genommen hat, tritt Interferenz auf. Analog zur optischen Holografie wird das Mutterion, bestehend aus dem Atomkern und dem in der Atomhülle verbliebenen zweiten Elektron, gewissermaßen von dem ersten Elektronen-Wellenpaket abgebildet. Den Referenzstrahl bildet das zur Zeit  $t_2$  freigesetzte direkte Elektron. Die Phasenverschiebung der beiden Wellenpakete zueinander wird insbesondere vom Potenzial des Heliumkerns sowie dem zeitabhängigen Potenzial des zweiten, im Atom verbliebenen Elektrons bestimmt.

Als Versuchsausrüstung diente ein in Heidelberg entwickeltes und gebautes Re-

aktionsmikroskop, das für das gemeinsame Experiment an der von Matthias Kling am Max-Planck-Institut für Quantenoptik betriebenen AS-1-Beamline installiert wurde. In einer Ultrahochvakuumkammer treffen dabei linear polarisierte Laserimpulse von fünf Femtosekunden (billiardstel Sekunden) Dauer auf einen Überschall-Gasjet aus Heliumatomen.

Schwache elektrische und magnetische Felder lenken die Reaktionsprodukte – die freigesetzten Elektronen sowie die Heliumionen – auf zwei ortsempfindliche Detektoren. Aus der Flugzeit und der Position des Aufpralls lassen sich Richtung und Geschwindigkeit der geladenen Teilchen bestimmen. Die Gesamtheit aller Einzelergebnisse für den Impuls der Elektronen ergibt schließlich eine Häufigkeitsverteilung, in der sich die Interferenzmuster zeigen.

### Visualisierung der inneren Dynamik von Atomen

Die erhaltenen Messwerte verglichen die Forscher zunächst mit einfachen Simulationen von Ram Gopal aus der Heidelberger Gruppe und dann mit Resultaten einer von Dieter Bauer am Max-Planck-Institut für Kernphysik durchgeführten Modellrechnung (Bild oben). Beide Theoretiker gingen von einem stark vereinfachten Heliumatom aus, wobei sie annahmen, dass sich nur eines der beiden Elektronen im Potenzial des Atomkerns bewegt und vom anderen statisch abgeschirmt wird. Das freigesetzte Elektron interferiert mit sich selbst, nachdem es zu den Zeiten  $t_1$  und  $t_2$  freigesetzt worden ist und die verschiedenen Quantenpfade durchlaufen hat.

Die experimentellen Daten passen qualitativ sehr gut zu den theoretischen Vorhersagen dieses Modells, auch wenn es bei Weitem nicht die gesamte Komplexität des Heliumatoms berücksichtigt.

Das erlaubt zunächst einmal den nicht unwichtigen Schluss, dass die beobachteten Interferenzmuster tatsächlich wie in einem Doppelspaltexperiment entstehen.

Die Spalte sind dabei die beiden Zeitfenster, in denen das Elektron freigesetzt werden kann. Aus den gemessenen Strukturen lässt sich auch ihre Breite – also die Dauer der Zeitfenster für  $t_1$  und  $t_2$  – abschätzen. Sie beträgt demnach nur etwa 20 Attosekunden. Die mit dem Reaktionsmikroskop gemessene dreidimensionale Geschwindigkeitsverteilung des Elektrons einschließlich der darin enthaltenen Interferenzmuster lässt sich somit als vollständiges Hologramm des Helumions auffassen.

Anders als bisher vereinfachend dargestellt, liegen die Zeiten  $t_1$  und  $t_2$  aber nicht genau fest, weil die Freisetzung des Elektrons mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch kurz vor oder nach dem Maximum der elektrischen Feldstärke des Laserpulses stattfinden kann. Streng genommen erhält man dadurch ein zeitabhängiges Hologramm, in dem die korrelierte Bewegung der beiden Elektronen auf einer Attosekunden-Zeitskala kodiert sein sollte – und damit erstmals direkt sichtbar gemacht werden könnte.

Für diese Visualisierung muss man freilich die Umkehrabbildung zum Hologramm kennen, die alles andere als leicht zu ermitteln und im hier betrachteten Fall leider noch unbekannt ist. Entsprechende Rechnungen, in denen die Zweielektronen-Wellenfunktion gespalten und mit sich selbst zur Interferenz gebracht wird, liegen an der Grenze des Machbaren. Theoretiker arbeiten intensiv daran.

Im Prinzip jedoch zeigt das Experiment erstmals einen direkten Weg hin zur zeitabhängigen Elektronenholografie von Atomen, Molekülen oder anderen kleinen Quantensystemen auf. Die dabei erzielbare Zeitauflösung von wenigen At-

tosekunden reicht aus, um äußere Elektronen, die zum Beispiel die Bindung der Atome in Molekülen vermitteln, auf ihren Bahnen zu verfolgen.

Noch sind solche Messungen an der Grenze der Möglichkeiten heutiger Lasertechnologie und nur in einer Hand voll Labors weltweit durchführbar – ab-

gesehen von der enormen Schwierigkeit, die Umkehrabbildung zu ermitteln. In Anbetracht der rasanten Fortschritte bei Kurzzeitalasern birgt diese neue Methode langfristig jedoch ein großes Potenzial. Vielleicht macht sie schon bald die innere elektronische Dynamik von Atomen und Molekülen zum Beispiel beim Auf-

brechen einer chemischen Bindung zugänglich.

**Helga Rietz** ist Doktorandin bei Joachim Ullrich am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. Dort arbeitet auch **Bernold Feuerstein** als promovierter Physiker. Außerdem ist er Privatdozent an der Universität Heidelberg.

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

## Erkundung der Grenze des Sonnensystems

Der NASA-Satellit »Interstellar Boundary Explorer« fängt neutrale Atome auf, die vom Rand des Sonnensystems bis zur Umlaufbahn der Erde vordringen und von der Grenzregion zum interstellaren Raum künden.

Von Thorsten Dambeck

Der Rand des Sonnensystems ist etwa 100-mal so weit von unserem Zentralstern entfernt wie die Erde. In dieser abgelegenen Region trifft der Sonnenwind auf das interstellare Gas. Der ständig von der Sonne ausgehende überschallschnelle Strom elektrisch geladener Teilchen enthält hauptsächlich die beiden Bestandteile des Wasserstoffatoms: Protonen und Elektronen. Weitere Komponenten sind bis zu vier Prozent Heliumkerne und geringe Mengen an Ionen schwerer Elemente. Physikalisch betrach-

tet, handelt es sich um ein sehr dünnes Plasma.

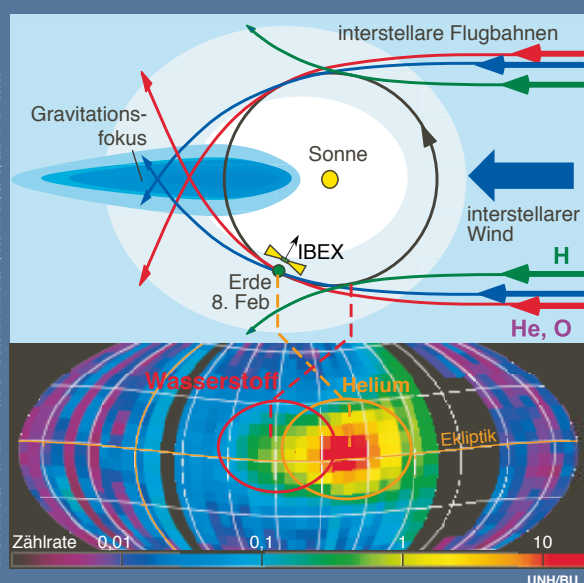
Typischerweise weht der Sonnenwind mit 400 bis 800 Kilometern pro Sekunde – 10 000-mal so schnell wie irdische Orkane. Die dahinrasenden ionisierten Teilchen verdrängen das interstellare Plasma und fegen eine ausgedehnte Blase rund um die Sonne frei: die so genannte Heliosphäre. Neutrale Atome aus dem fernen Weltraum können allerdings in diese Blase vordringen und so auch bis zur Erde gelangen.

Nach rund drei Jahrzehnten Flugzeit sind die US-Raumsonden Voyager 1 und

2 jüngst bis an den Rand der Heliosphäre vorgestoßen. Sie erlaubten damit erstmals, diese Grenzregion vor Ort zu erkunden. Dort hat sich der Sonnenwind so weit abgeschwächt, dass er durch den Kontakt mit dem interstellaren Medium auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst wird. Die Physiker nennen das »Termination Shock«. Der Name rührt daher, dass sich beim Unterschreiten der Schallgeschwindigkeit eine Stoßwelle (englisch *shock wave*) bildet, die den Sonnenwind verdichtet und stark aufheizt.

Während die Interpretation der Voyager-Daten noch nicht abgeschlossen ist,

### Messung des interstellaren Windes



Beim interstellaren Wind fand der Satellit IBEX ausgeprägte Richtungseffekte, die mit der Gravitation und dem Strahlungsdruck der Sonne zusammenhängen. Helium- (He) und Sauerstoffatome (O) werden fast ausschließlich von der solaren Schwerkraft beeinflusst und entsprechend abgelenkt, schnelle Atome (blau) wenig, langsame (rot) stark. Sie bewegen sich dadurch auf gekrümmten Bahnen, die sie in eine Zone entgegen der Anströmung fokussieren (hier dunkelblau dargestellt). Diesen »Gravitationsfokus«, den andere Sonden früher schon beobachtet hatten, durchfliegt IBEX Anfang Dezember. Sein Bordsensor fängt dort jedoch nur relativ wenige Teilchen auf, weil er in dieser Umlaufphase schräg zur Windrichtung zeigt. Die meisten Heliumatome im Jahresverlauf registriert das Instrument erst am 8. Februar; denn dann läuft die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne dem Wind genau entgegen. Die Bewegung des interstellaren Wasserstoffs (H, grün) wird hauptsächlich vom Strahlungsdruck der Sonne bestimmt. Er überwiegt bei ihm den Einfluss der Schwerkraft, so dass die Atome von der Sonne weggelenkt werden. Deshalb registriert IBEX Wasserstoff gehäuft erst gegen Ende März. Im unteren Teilbild sind die Zählraten für Helium und Wasserstoff – in Teilchen pro Sekunde – auf eine Himmelskarte projiziert.



hat der NASA-Satellit Interstellar Boundary Explorer (IBEX) nun überraschende zusätzliche Informationen über die Grenze des Sonnensystems geliefert. Anders als die weit gereisten Voyager-Sonden erforscht IBEX diese ferne Region von unserem Heimatplaneten aus. Der nur knapp 80 Kilogramm schwere Satellit umrundet die Erde auf einer lang gestreckten Bahn in bis zu 320 000 Kilometer Abstand. Seit dem Start im Oktober 2008 registriert er dort energiereiche Atome, hauptsächlich Wasserstoff.

Bei diesen Teilchen handelt es sich vorwiegend um Protonen aus dem Sonnenwind, die am Rand der Heliosphäre von Atomen des interstellaren Gases Elektronen übernommen und sich dadurch von der Gängelung durch das Magnetfeld des Sonnenwinds befreit haben. Bewegten sie sich vorher in einer Spiralbewegung an dessen Feldlinien entlang, fliegen sie nun tangential von ihrer ursprünglichen Bahn weg und bewegen sich geradlinig weiter. Einige von ihnen kommen so zurück ins innere Sonnensystem und erreichen die Erde mit Ge-

schwindigkeiten bis über 1000 Kilometer pro Sekunde.

Von diesen Teilchen ließen sich anhand der IBEX-Daten nun mehrere Himmelskarten erstellen, die einen breiten Energiebereich überdecken – mit unerwartetem Ergebnis. Nach gängigen Modellen der Heliosphäre sollten aus allen Richtungen etwa gleich viele Wasserstoffatome eintreffen. Doch als IBEX nach sechs Monaten den Himmel vollständig erfasst hatte, zeigte sich ein anderes Bild: Die neutralen Wasserstoffatome entstehen in der Grenzschicht keineswegs überall in gleicher Häufigkeit. Vielmehr wurde ein lang gestrecktes Band erkennbar, aus dem besonders viele Atome zu uns gelangen. Es windet sich fast um den gesamten Himmel. Aus dem Innern des Bands kommen zwei- bis dreimal so viele Wasserstoffatome wie von Regionen außerhalb. Die Voyager-Sonden haben diese besonders aktive Zone nicht entdeckt, weil beide daran vorbeigeflogen sind.

Der Chefwissenschaftler der IBEX-Mission, David McComas vom South-

west Research Institute in San Antonio (Texas), zeigte sich von den Resultaten völlig verblüfft. Noch kann niemand eine befriedigende Erklärung für die Existenz des Bands geben; keine Theorie hat es vorhergesagt. Das Bild der Grenze des Sonnensystems bedarf somit einer gründlichen Revision. Als Ursache des Bands wäre laut McComas ein Magnetfeld außerhalb der Heliosphäre vorstellbar, das die geladenen Teilchen des Sonnenwinds ablenkt und bündelt. Doch sei noch unklar, räumt der Forscher ein, ob nicht auch andere physikalische Prozesse für die Anhäufung der Partikel sorgen könnten. Nur so viel scheint sicher: Das interstellare Medium beeinflusst die Struktur der Heliosphäre stärker als bislang gedacht.

Außer neutralisierten Ionen des Sonnenwinds fand IBEX auch neutrale Atome, die von außerhalb des Sonnensystems kommen. Erstmals ließen sich so Wasserstoff, Helium und Sauerstoff aus dem interstellaren Medium direkt nachweisen. Diese extrasolaren Atome bewegen sich erheblich langsamer als die ur-

## ANZEIGE

## Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.\*

Die täglichen Aufgaben im Beruf und privat stellen mit den Jahren wachsende Anforderungen an die Konzentration und Gehirnleistung. Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit kommt es darauf an, die Kraftwerke der Gehirnzellen zu aktivieren. **Tebonin®** aktiviert die Energieproduktion in den Gehirnzellen. Für mehr Gehirnleistung und mehr Konzentration bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.



**Tebonin®**

**\* Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit  
infolge zunehmender Funktionseinbußen der Nervenzellen im Gehirn.**

**Tebonin® konzent 240 mg** 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnrnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG, Karlsruhe**

Stand: Januar 2010 T/12/09/1



## Tebonin® stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.\*

Ginkgo-Spezialextrakt  
EGb 761®

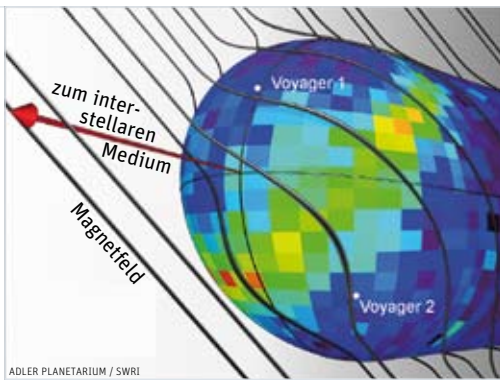
- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich



Mit der Natur.  
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG

[www.tebonin.de](http://www.tebonin.de)



Auf ihrem Weg durch die Milchstraße pflügt die Sonne durchs interstellare Medium. Ein vom Satelliten IBEX entdecktes Band, aus dem besonders viele Neutralteilchen zur Erde gelangen (ihre Anzahl nimmt von blau über grün und gelb nach rot zu), ist hier auf der Oberfläche der blasenartigen Heliosphäre dargestellt. Diese wird vom galaktischen Magnetfeld verformt. Die beiden Voyager-Sonden haben das Sonnensystem an Stellen verlassen, die außerhalb des Bands liegen.

sprünglichen Sonnenwindpartikel; ihre Geschwindigkeit in Erdnähe ist etwa um eine Größenordnung geringer.

Die betreffenden IBEX-Messungen hat Eberhard Möbius von der University of New Hampshire in Durham zusammen mit Kollegen ausgewertet. Wie der Physiker erläutert, entsteht der beobachtete interstellare »Wind« dadurch, »dass die Sonne durch eine Gaswolke in unserer interstellaren Nachbarschaft pflügt, wobei die Relativgeschwindigkeit zwischen beiden etwa 26 Kilometer pro Sekunde beträgt«. Die Richtung, aus der die extrasolaren Teilchen eintreffen, kann IBEX auf ein zehntel Grad genau mes-

sen. Wie sich zeigte, erreichen diese Partikel seine Sensoren nicht auf geradem Weg, sondern werden unterwegs in einer Weise abgelenkt, die sich mit der Gravitation und dem Strahlungsdruck der Sonne erklären lässt (Kasten S. 18).

Durch die neuen Erkenntnisse stehen nun auch die Vorstellungen über die großräumige Gestalt der Heliosphäre zur Disposition. Nach bisheriger Ansicht sollte sie derjenigen eines Kometen ähneln, mit einem halbkugelförmigen »Kopf« in Richtung des anströmenden interstellaren Mediums und einer Art Schweif auf der Gegenseite. Nun vermuten einige Astronomen, dass die Helio-

sphäre vom galaktischen Magnetfeld gestaucht wird. Hinweise auf eine unregelmäßige Form ihrer Grenzregion lieferten schon die Voyager-Sonden. Voyager 1 durchflog den Termination Shock in einer Sonnendistanz von 94 Astronomischen Einheiten (dem 94-fachen Bahnradius der Erde). Dagegen erreichte Voyager 2, der das Sonnensystem in einer etwas anderen Richtung verlässt, die Stoßwelle schon nach 84 Astronomischen Einheiten.

Bisher sind zwei Jahre für die IBEX-Mission vorgesehen. Aus Sicht der beteiligten Forscher wäre jedoch eine Verlängerung sinnvoll, insbesondere weil durch den elfjährigen Sonnenfleckenzyklus die Aktivität unseres Zentralgestirns in den kommenden Jahren deutlich zunehmen dürfte. Das letzte Minimum war ungewöhnlich lang, scheint nun aber zu Ende zu gehen. Eine aktivere Sonne sollte Größe und Gestalt der Heliosphäre beeinflussen – erste Anzeichen für zeitliche Veränderungen sind in den IBEX-Daten schon erkennbar.

**Thorsten Dambeck** ist promovierter Physiker und als Wissenschaftsautor in Heidelberg tätig.

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

## Herzen von Mutter und Fötus im Gleichtakt

Obwohl das Herz des Ungeborenen schneller schlägt als das der werdenden Mutter, versucht es sich an dessen Rhythmus anzupassen. Dadurch werden beide immer wieder kurzfristig synchronisiert. Das geschieht umso öfter, je schneller die Mutter atmet.

Von Peter van Leeuwen  
und Jürgen Kurths

**A**m Anfang des Lebens bildet die werdende Mutter die unmittelbare Umwelt für ihr Kind. Während der Schwangerschaft kann man sie und den Fötus als ein zusammengehöriges System mit vielfältigen internen Wechselwirkungen auffassen. Aktivität und Befinden der Mutter stecken die physikalischen und physiologischen Rahmenbedingungen für die Entwicklung des Ungeborenen ab und sollten es deshalb stark beeinflussen. Beispielsweise hat sich gezeigt, dass die fötale Herzfrequenz bei körperlicher oder psychischer Belastung der Mutter zunimmt.

Allerdings ist der quantitative Nachweis einer direkten Interaktion zwischen den beiden Individuen schwierig, weil er eine zuverlässige Messung physiologischer Parameter bei jedem von ihnen erfordert.

Das embryonale Herz schlägt bereits mit sechs Wochen, und nach zehn Wochen ist das Herz-Kreislauf-System des Ungeborenen funktionsfähig. Seit einigen Jahren untersuchen wir die kardiale Aktivität von Föten anhand der Magnetokardiografie (MKG). Damit lässt sich schon ab der 16. Schwangerschaftswoche der Herzschlag des Ungeborenen nicht-invasiv und belastungsfrei aufnehmen. So genannte SQUIDS (*super conducting quantum interference devices*) zeichnen

dabei schwache Magnetfelder, die durch die elektrische Aktivierung des fötalen Herzens erzeugt werden, mit hoher Präzision auf. Da wir bei unseren Messungen mit dem Herzschlag des Fötus auch den der Mutter aufnehmen, eröffnet sich die Möglichkeit, Korrelationen zwischen beiden zu analysieren.

Systeme, die einen gleichartigen Takt oder Rhythmus aufweisen, bezeichnet man als synchronisiert. Ein Beispiel einer solchen Synchronisation hat schon 1665 Christiaan Huygens entdeckt und erforscht, dafür allerdings den Ausdruck Sympathie benutzt. Der berühmte holländische Physiker, Astronom und Mathematiker beschäftigte sich damals in-

tensiv mit der Konstruktion hochseetauglicher Pendeluhr. Dabei bemerkte er zufällig in seinem Fachwerkhaus, dass zwei solche Uhren, die an einem gemeinsamen Holzbalken hingen, im Gleichtakt schwangen. Tatsächlich genügt, wie Huygens durch gezielte Experimente herausfand, die ziemlich schwache Wechselwirkung über den Balken für die Synchronisation der Pendel. Die Dynamik dieses Systems ist allerdings viel einfacher als beim menschlichen Herzschlag.

Auch nach Huygens erforschten Physiker lange Zeit ausschließlich die Kopplung zwischen periodischen Schwingungen. Erst jüngst reifte die Erkenntnis, dass Synchronisation nur in nichtlinearen Systemen auftreten kann. Daraufhin wurde dieses Phänomen vor wenigen Jahren auch bei komplexeren, insbesondere chaotischen Schwingungen gefunden.

Derartige Synchronisationen sind allerdings nicht mehr direkt sichtbar. Deshalb wurden Nachweismethoden für sie entwickelt, welche nichtlineare Dynamik und Informationstheorie mit mathematischer Statistik verbinden. Sie ermöglichen es, Synchronisation auch in ökologischen Zyklen wie der Population von Hase und Luchs in Kanada, im Herz-Kreislauf-System, im Gehirn und im Klimasystem nachzuweisen.

Daraus ließen sich jeweils wichtige Schlüsse über die Funktionsweise der zu Grunde liegenden dynamischen Rückkopplungen ziehen. Das gilt etwa für die Erkenntnis, dass das El-Niño-Phänomen im Pazifik in bestimmten Zeitspannen über schwache, aber weit reichende Wechselwirkungen, so genannte Telekonnektionen, mit dem indischen Monsun synchronisiert ist.

## Synchronisation höherer Ordnung

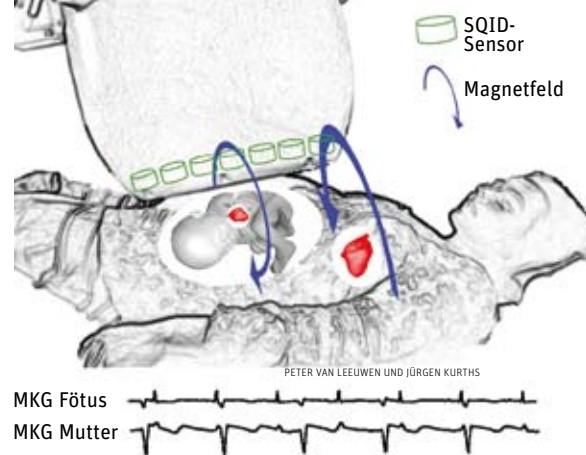
Die Untersuchung zeitlicher Beziehungen zwischen mütterlicher und fötaler Herzfrequenz stellt besondere Anforderungen an die Analysemethoden. Einerseits schwankt die Herzfrequenz nämlich recht stark, andererseits generieren beide Herzen keinen identischen Rhythmus: Das fötale schlägt deutlich schneller als das mütterliche. Man muss also nach Episoden suchen, in denen eine Synchronisation höherer Ordnung auftritt, beispielsweise im Verhältnis fünf zu drei; in diesem Fall kämen auf fünf Herzschläge des Fötus drei der Mutter. Derartige Beziehungen zwischen zwei unabhängigen, aber schwach gekoppelten

Systemen lassen sich mittels Synchronogrammen aufspüren.

Bei einer ersten Untersuchung waren in fast allen Messreihen kurze Episoden der Synchronisation zwischen den Herzschlägen von Mutter und Kind zu erkennen. Unsere Begeisterung darüber wurde freilich durch die Einsicht gedämpft, dass solche Übereinstimmungen auch rein zufällig auftreten können. Wie mitunter die Blinker von Autos in der Abbiegespur an einer Ampel vorübergehend alle gleichzeitig leuchten, besteht die Möglichkeit, dass die Herzen von Mutter und Fötus kurzfristig im Takt schlagen, ohne gekoppelt zu sein.

Um dies zu überprüfen, erweiterten wir unser Analyseinstrumentarium um eine spezielle statistische Methode, die auf besonders konstruierten Ersatzdaten beruht, so genannten Surrogaten. Dabei werden die Herzschlagreihen der Föten mit denen fremder Mütter verglichen; unter diesen Umständen ist jede Verbindung zwischen beiden Herzen ausgeschlossen. Eine detaillierte Prüfung zeigte, dass sich mindestens ein Teil der in den echten Datenreihen identifizierten Synchronisationsepisoden deutlich von den Surrogatereihen unterscheiden. Die Synchronisation ist in diesen Fällen also statistisch gesichert (bei einem Signifikanzniveau von fünf Prozent).

An dieser Stelle fragten wir uns, ob sich vielleicht Bedingungen schaffen lassen, die eine physiologische Interaktion im Mutter-Fötus-System fördern oder unterdrücken. Eine naheliegende Idee war, die bekannte Respiratorische Sinus-Arrhythmie (RSA) zu nutzen, wonach sich die Herzfrequenz beim Einatmen beschleunigt und beim Ausatmen verlangsamt. In einem zweiten Versuch baten wir deshalb die Mütter, nicht spontan zu atmen, sondern ihre Atemfrequenz an einen akustischen Taktgeber anzupassen. So variierten wir diese Frequenz zwischen 10, 12, 15 und 20 Zügen pro Minute.



Damit überdeckten wir den Bereich von einer sehr langsamen über die normale bis zu einer sehr schnellen Atmung.

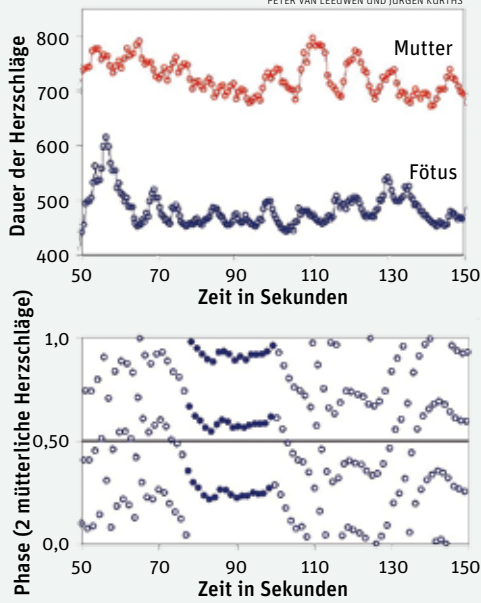
Wie sich herausstellte, hängt das Ausmaß der Synchronisation in der Tat deutlich vom Atemrhythmus ab. Bei raschem Luftholen treten ungewöhnlich viele Synchronisationsepisoden auf, bei zehn Atemzügen pro Minute dagegen nur wenige. Dieses Ergebnis überprüften wir mit einem verbesserten statistischen Verfahren: so genannten Zwillingssurrogaten. Dabei erzeugt ein Algorithmus aus der gemessenen Herzschlagzeitreihe der Mutter eine neue, bei der wesentliche Eigenschaften wie die Herz- oder Atemfrequenz unverändert sind.

## Reifung des Nervensystems

Auf diese Weise ließ sich das Resultat statistisch absichern: Bei schnellerer mütterlicher Atmung zeigten sich in den echten Daten signifikant mehr Synchronisationsepisoden als in den Zwillingssurrogaten (auch hier betrug das Signifikanzniveau fünf Prozent). Das ist ein klares Indiz für eine direkte physiologische Interaktion zwischen der mütterlichen und der fötalen Herzaktivität.

Die stärkere Synchronisation bei erhöhter Atemfrequenz der Mutter hängt vermutlich damit zusammen, dass bei höheren Atemfrequenzen der mütterliche Herzschlag ziemlich gleichmäßig ist. An den weitgehend konstanten Rhythmus kann sich das Herz des Fötus dann relativ gut anpassen. Eine solche Anpassung gelingt viel schwerer, wenn die mütterlichen Herzschläge – was bei niedrigen Atemfrequenzen die Regel ist – stark variieren.

Wozu ist die beobachtete Synchronisation gut? Wie man weiß, feuern im Gehirn ausgedehnte Verbände von Nervenzellen im Gleichtakt. Dahinter steckt eine physiologische Optimierung, durch die Informationen zusammengeführt und Vorgänge koordiniert werden. Ähnliches dürfte für die kardiale Mutter-Kind-Syn-



Das Herz des Fötus schlägt im Abstand von 350 bis 600 Millisekunden, das der Mutter nur alle 700 bis 800 Millisekunden (oben). Ein Synchrogramm (unten) zeigt, wie die fötalen Schläge zeitlich zu denen der Mutter auftreten. Bleibt diese Relation einige Zeit konstant, so dass beide Schläge vorübergehend in einer festen Phasenbeziehung zueinander stehen, liegt eine Synchronisation vor. Sie manifestiert sich in einem horizontal verlaufenden Kurvenstück (ausgefüllte Punkte). Das gezeigte Synchrogramm überdeckt zwei Herzschläge der Mutter. Da das Herz des Fötus in dieser Zeit dreimal schlägt, handelt es sich um eine Synchronisation im Verhältnis drei zu zwei.

chronisation gelten. Vermutlich dient sie der pränatalen Reifung von Strukturen wie dem autonomen Nervensystem. In weiteren Untersuchungen wollen wir klären, in welchen Stadien der Schwangerschaft diese Art von Interaktion auftritt und mit welchen physiologischen Bedingungen sie zusammenhängt. Eines Tages lassen sich so vielleicht durch Messung der Synchronisation und der zugehörigen Kopplungsstärke Störungen in der fötalen Entwicklung frühzeitig erkennen.

**Peter van Leeuwen** ist Privatdozent an der Universität Witten/Herdecke und leitet dort im Grönemeyer-Institut für Mikrotherapie die Abteilung Biomagnetismus. **Jürgen Kurths** ist Professor an der Humboldt-Universität zu Berlin und Leiter des Forschungsbereichs »Transdisziplinäre Konzepte und Methoden« am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

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

# Ethisch unbedenkliche Stammzellen in Reichweite?

Die vor wenigen Jahren entdeckte Methode, spezialisierte Körperzellen in den Zustand der Alleskönner zurückzusetzen, ist langwierig, ineffizient und mit Risiken verbunden. Nun gibt es Verfahren, die entweder sicher oder effizient sind – noch nicht die endgültige Lösung, aber ein Fortschritt.

Von Michael Groß

Embryonale Stammzellen (ES) können prinzipiell alle Arten von Körpergewebe bilden. Mediziner hoffen deshalb, dass es gelingt, daraus eines Tages Ersatzteile für defekte Organe zu erzeugen. In Deutschland und Teilen der USA hat der Gesetzgeber die Forschung mit solchen Stammzellen wegen ethischer Bedenken allerdings erheblich eingeschränkt. Deshalb suchen Wissenschaftler intensiv nach einem gleichwertigen Ersatz.

Im Jahr 2006 gelang dabei ein wichtiger Durchbruch. Wie Forscher an der Universität Kioto (Japan) herausfanden, genügt es bei Zellen erwachsener Mäuse, die Gene für vier regulatorische Proteine einzuschleusen, um sie in den embryonalen Zustand zurückzusetzen. Ein Jahr später konnte auf analoge Weise auch für menschliche Zellen die Uhr der Embryonalentwicklung zurückgedreht werden. Wissenschaftler sprechen von induzierter Pluripotenz (iP).

Das seit 2007 benutzte Verfahren eignet sich allerdings nicht für medizinische Anwendungen, weil eines der übertragenen Gene Krebs auslösen kann. Zudem lädt das zum Einschleusen verwendete Virus seine Fracht an zufälligen Stellen im Genom ab. Dabei können andere Gene zerstört werden – mit potenziell katastrophalen Folgen bis hin zur Tumorbildung.

Selbst wenn die Züchtung menschlicher Ersatzgewebe aus solchen iPStammzellen gelänge, wäre deren Verwendung also viel zu gefährlich. Hinzu kommt, dass das Verfahren extrem langwierig und ineffizient ist. Die Prozedur dauert rund vier Wochen und gelingt nur bei einer von rund 10 000 behandelten Zellen.

Das Bestreben geht deshalb dahin, Möglichkeiten zu finden, schneller und

effizienter weniger gefährliche iPStammzellen zu erzeugen. Eine naheliegende Idee ist, statt der Gene die entsprechenden Proteine selbst einzuschleusen. Die Arbeitsgruppe von Sheng Ding am Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien) hat das, wie sie vergangenen April berichtete, erfolgreich ausprobiert (*Cell Stem Cell*, Bd. 4, S. 381). Damit das Verfahren funktioniert, muss allerdings zusätzlich ein Wirkstoff namens Valproinsäure übertragen werden, der normalerweise als Medikament gegen Epilepsie dient. Diese Vorgehensweise würde die Sicherheitsprobleme weitgehend lösen, verbessert aber in keiner Weise die Effizienz und Schnelligkeit des Verfahrens, weil das Einschleusen von Proteinen eher schwieriger ist als das von Genen.

## Eingriff in zellinterne Signalketten

Ideal wäre es, wenn man der Zelle die nötigen Signale zum Zurückstellen der Uhr einfach mit einem Wirkstoff-Cocktail vermitteln könnte, den man nur zugeben und nicht einschleusen muss. Aus diesem Grund haben inzwischen etliche Forscher den Effekt diverser kleiner Moleküle auf die Erzeugung von iPStammzellen untersucht. Die Arbeitsgruppen von Lee Ruben und Kevin Eggan an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) fanden heraus, dass sich zumindest eines der Gene, *Sox2*, derart ersetzen lässt. Bei einem systematischen Test von 800 Substanzen entdeckten sie sogar gleich drei geeignete Wirkstoffe. Alle drei hemmen Enzyme aus der Familie der Kinasen, die Phosphatgruppen an Proteine anhängen und so unter anderem die zellinterne Übermittlung von Signalen beeinflussen.

Sheng Dings Team hat unterdessen daran gearbeitet, die Effizienz des etablierten »Vier Genfaktoren«-Rezepts zu ver-

bessern. Dabei gelang es ihm, einen Chemikalien-Cocktail zu entwickeln, der die Ausbeute an transformierten Zellen um das 200-Fache steigert und zugleich die Prozedur auf eine Woche verkürzt. Auch diese Substanzen sind Kinase-Inhibitoren. Sie richten sich gegen das Enzym ALK5 und die Kinasen-Familie MEK. Ein weiteres kleines Molekül, Thiazovivin, verbessert zudem die Überlebenschancen der Zellen bei der weiteren Verarbeitung (*Nature Methods*, Bd. 6, S. 805).

Dank dieser Fortschritte kann man jetzt also zwischen größerer Effizienz oder höherer Sicherheit wählen. Im nächsten Schritt sollte es hoffentlich gelingen, beide Ziele gleichzeitig zu erreichen. Allerdings warnen Experten wie der Oxforder Stammzellforscher Paul J. Fairchild vor übersteigerten Erwartungen. Sie geben zu bedenken, dass Wirkstoffe, die in zellinterne Signalketten eingreifen, ebenfalls ein hohes Krebsrisiko bergen könnten. Die Gefahr ist umso größer, als nach Befunden aus Fairchilds Team Gewebe, die aus embryonalen Stammzellen hervorgegangen sind, eine Substanz ausscheiden, die sie vor Angriffen durch das Immunsystem schützt. Wenn das auch für Züchtungen aus iPS-Zellen gilt, was naheliegt, könnten sich darin Tumoren oder Viren ungehindert vermehren.

Bis diese offenen Fragen beantwortet und die ausstehenden Probleme gelöst sind, haben auch konkurrierende Ansätze eine Chance. So berichtete die International Stem Cell Corporation, ein Unternehmen in Oceanside (Kalifornien), kürzlich bei der Jahrestagung der Amerikanischen Gesellschaft für Reproduktionsmedizin über die erfolgreiche Gewinnung von pluripotenten Stammzellen aus unbefruchteten Eizellen, einem Abfallprodukt der Reagenzglasbefruchtung. Als solches könnte man zwar auch jene Embryonen im 16-Zell-Stadium bezeichnen, aus denen die existierenden embryonalen Stammzelllinien erzeugt wurden, doch der entscheidende bioethische Knackpunkt ist, dass selbst die schärfsten Kritiker der Stammzellforschung eine unbefruchtete Eizelle nicht als Lebewesen bezeichnen können. Demnach wäre diese Methode ebenfalls ein gangbarer Weg zu moralisch unbedenklichen Kulturen pluripotenter Stammzellen.

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

## Springers Einwürfe

### Wie funktioniert ein Aufstand?

Überraschende Einsichten aus der Komplexitätstheorie

**Kürzlich stand ich in Boston vor einem Denkmal**, das einen stolz ins Weite schauenden Mann in altertümlicher Kleidung zeigte. Darunter stand: »Samuel Adams (1722 – 1803). A Patriot. He Organized the Revolution and Signed the Declaration of Independence.« Davor paradierten Soldaten, manche historisch kostümiert, andere in modernen Tarnuniformen. Denn heute sind die USA, die einst aus dem Aufstand gegen die britische Kolonialherrschaft hervorgingen, selbst in mehreren Teilen der Welt führend an der Niederschlagung von Rebellionen beteiligt, insbesondere in Irak und Afghanistan. Dort handelt es sich freilich nicht mehr um klassische antikoloniale Unabhängigkeitskriege, sondern um dezentrale Widerstandsbewegungen, die mit terroristischen Einzelaktionen einen »asymmetrischen Krieg« gegen multinational unterstützte und dennoch schwache Regierungen führen.

Haben diese modernen Aufstände etwas gemeinsam? Eine Gruppe von Forschern um den britischen Physiker und Komplexitätstheoretiker Neil F. Johnson, seit Kurzem an der University of Miami (Florida) tätig, behauptet, sein quantitatives Modell könne einen generellen Mechanismus dahinter offenbaren (*Nature*, Bd. 462, S. 911).

Das Team hat gut 50 000 blutige Ereignisse in neun über die Welt verstreuten Konflikten analysiert und dabei ein schon früher entdecktes einfaches Potenzgesetz bestätigt gefunden: Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses mit  $x$  Todesopfern ist stets ziemlich genau proportional zu  $x$  hoch  $-2,5$ . Demnach ist ein relativ begrenzter Terrorakt mit 10 Opfern 316-mal wahrscheinlicher als ein großer Aufruhr mit 100 Toten, denn  $10$  hoch  $2,5$  ist 316. Das gilt, so die Autoren, für Bürgerkriege in Sierra Leone wie in Peru, für Terroranschläge in Indonesien wie in Israel.

Zur Erklärung dieser generellen Aufstandsformel präsentieren die Forscher ein Modell, das von kleinen, spontan entstehenden und sich rasch wieder zerstreuen Gruppen ausgeht. Es fehlen zentrale Anführer wie beim amerikanischen Unabhängigkeitskrieg, wo Feldherren wie George Washington oder politische Repräsentanten wie besagter Samuel Adams als Katalysatoren für die Bildung einer Nation wirkten.

**An die Stelle solcher Identifikationsfiguren treten unpersönliche Institutionen** mit unstillbarem Hunger auf Neuigkeiten: die Nachrichtenmedien. Ein virtueller Anführer wie Bin Laden ist längst nur noch als Videobotschaft präsent, und die Terroraktionen der Aufständischen zielen auf maximales Medienecho ab. Infolgedessen konkurrieren die Guerillagruppen um Präsenz in den Nachrichten. Eine Gruppe von Aufständischen wird für ihren Anschlag bewusst einen ruhigen Tag ohne Zwischenfälle wählen, da die Aktion sonst in anderen Schreckensmeldungen unterginge.

Aus solchen Mechanismen erklärt das Team um Johnson das offenbar allgemein gültige Potenzgesetz für moderne Aufstände, wonach kleine Überraschungsattacken den schwelenden Aufstand dominieren, während die Wahrscheinlichkeitskurve zu großen Terrorakten mit vielen hunderten Toten hin stark abfällt.

Eine naheliegende Konsequenz aus diesem Befund wäre natürlich eine totale Nachrichtensperre. Doch das können allenfalls zentralistisch-diktatorische Regime durchsetzen – und auch nur, solange der Aufstand klein bleibt. So erklärt sich, warum Unruhen wie in Tibet oder unter den Uiguren weltweit erst bekannt wurden, als sie ganze Städte und Regionen erfassten. Dort finde ich Johnsons Modell sozusagen negativ bestätigt: Kleine Terrorakte würden nie in die zentral gelenkten Medien gelangen – und aus eben diesem Grund kommen sie, da zwecklos, vermutlich auch gar nicht erst vor.



Michael Springer

# SCHWARZE STERNE an Stelle SCHWARZER LÖCHER?

Nach Einsteins Theorie kollabiert ein massereicher Stern am Ende zu einem Schwarzen Loch, das alles verschluckt, was ihm zu nahe kommt. Doch Quanteneffekte könnten den Kollaps bremsen und einen »Schwarzen Stern« erzeugen – einen ungemein dichten, schwach strahlenden Materiekumpen.

## In Kürze

- ▶ **Schwarze Löcher** sind Gebilde, deren Existenz aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt. Die Schwerkraft eines Schwarzen Lochs hält alles gefangen, was einmal seinen Ereignishorizont passiert hat.
- ▶ Eine näherungsweise Anwendung der Quantenmechanik ergibt, dass Schwarze Löcher langsam verdampfen – allerdings mit paradoxen Konsequenzen. Die Physiker suchen noch nach einer vollständigen **Quantentheorie der Gravitation**, um Schwarze Löcher widerspruchsfrei zu beschreiben.
- ▶ Einige Forscher verfolgen die Idee, dass ein Quanteneffekt namens **Vakuum-polarisation** ausreicht, um die Entstehung eines Lochs zu verhindern und stattdessen einen »Schwarzen Stern« zu erzeugen.

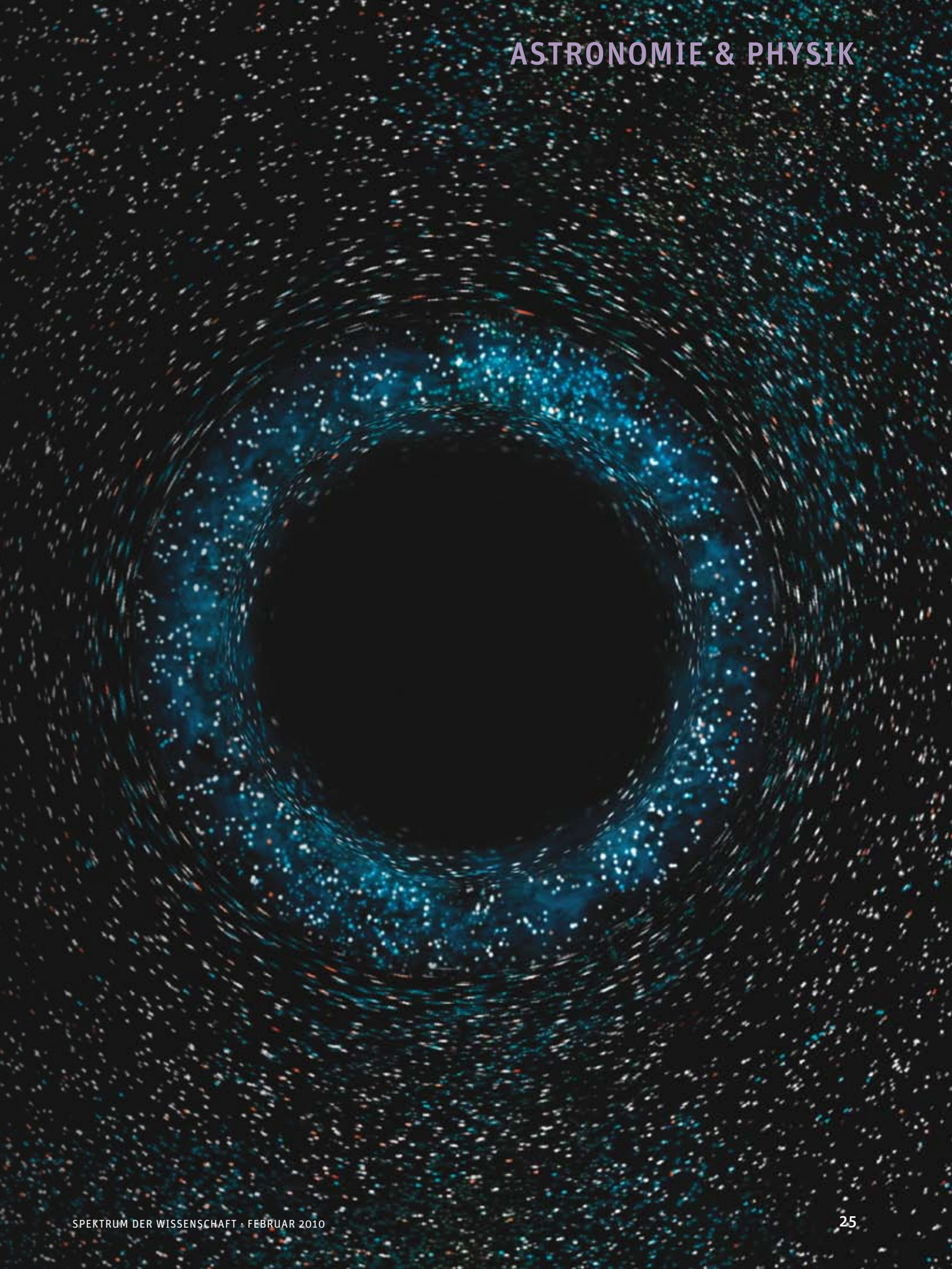
Von Carlos Barceló, Stefano Liberati, Sebastiano Sonego und Matt Visser

**S**chwarze Löcher sind so populär geworden, dass sie öfter in Science-fiction-Filmen auftreten. Kein Wunder, denn diese dunklen Überbleibsel kollabierter Sterne bergen unergründliche Geheimnisse.

Für theoretische Physiker sind Schwarze Löcher zunächst nur bestimmte Lösungen der von Einstein aufgestellten Feldgleichungen, des Kernstücks seiner allgemeinen Relativitätstheorie. Die Theorie beschreibt, wie Materie und Energie die Raumzeit deformieren, als wäre sie aus Gummi, und wie diese Krümmung der Raumzeit wiederum als Gravitation die Bewegung von Materie und Energie steuert. Aus den Gleichungen geht eindeutig hervor, dass es Raumzeitregionen geben kann, aus denen kein Signal einen entfernten Beobachter zu erreichen vermag. Solche Regionen enthalten einen Ort, an dem die Materiedichte unendlich groß wird; diese Singularität ist von einer leeren Zone extremer Schwerkraft umgeben, aus der nichts, nicht einmal Licht, entkommen kann. Eine abstrakte Grenze, der Ereignishorizont, trennt diesen Bereich vom Rest der Raumzeit. Im einfachsten Fall ist der Ereignishorizont eine Kugel; für ein Schwarzes Loch von der Masse der Sonne wäre sein Durchmesser nur sechs Kilometer groß.

So viel zu Sciencefiction und Theorie. Wie steht es um die Tatsachen? Eine Vielzahl astrophysikalischer Beobachtungen besagt, dass das Universum in der Tat einige extrem kompakte Himmelskörper enthält, die von sich aus praktisch keine Strahlung emittieren. Die dunklen Objekte haben zwischen einigen wenigen und mehr als einer Million Sonnenmassen, und ihre Durchmesser reichen von ein paar Kilometern bis zu Millionen Kilometern. Insoweit stimmen die besten Schätzungen der Astrophysiker und die Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie für Schwarze Löcher überein.

Aber sind die dunklen und massereichen Objekte, die von Astronomen aufgespürt werden, wirklich die Schwarzen Löcher aus Einsteins Theorie? Gewiss, bisher passen die Messungen ganz gut zur Theorie, doch sie selbst wirft durch die Art, wie sie Schwarze Löcher beschreibt, peinliche Fragen auf. Insbesondere geht aus der Aussage der allgemeinen Relativitätstheorie, in jedem Schwarzen Loch müsse eine Singularität stecken, paradoxerweise hervor, dass die Theorie an diesem Punkt versagt – wie das üblicherweise der Fall ist, wenn eine Theorie unendliche Größen liefert. Vermutlich scheitert die Relativitätstheorie hier, weil sie die in mikroskopischen Größenordnungen dominierenden Quanteneffekte nicht berücksichtigt. Darum suchen Forscher angestrengt nach einer so ge-



nannten Quantengravitation, die Relativitätstheorie und Quantenmechanik unter einen Hut bringt.

Solange diese Quantentheorie der Gravitation fehlt, bleiben faszinierende Fragen unbeantwortet: Wie sehen quantenmechanisch korrigierte Schwarze Löcher aus? Sind sie radikal verschieden vom gängigen Bild, oder bleibt ihre klassische Beschreibung eine gute Näherung? Wir vier haben gezeigt, dass bestimmte Quanteneffekte durchaus verhindern können, dass Schwarze Löcher überhaupt entstehen. Stattdessen bildet sich etwas, das wir einen Schwarzen Stern nennen. Ein solcher Himmelskörper wird daran gehindert, den endgültigen Sprung zu unendlicher Dichte zu vollziehen und sich in einen Ereignishorizont zu hüllen. Ihn stützt

etwas, das normalerweise nicht gerade als robustes Baumaterial gilt: der Raum selbst.

Wir ziehen unsere Schlüsse aus einem etablierten Ansatz, der den Namen semiklassische Gravitation trägt; allerdings machen wir etwas andere Annahmen über die kollabierende Materie, um gewisse Paradoxien zu vermeiden. In Ermangelung einer vollwertigen Theorie der Quantengravitation hat man sich in den letzten drei Jahrzehnten mit der semiklassischen Gravitation beholfen, um zu analysieren, wie die Quantenmechanik Schwarze Löcher verändert. Diese Methode baut gewisse Aspekte der Quantenfeldtheorie in die klassische einsteinsche Gravitation ein.

Die Quantenfeldtheorie beschreibt jedes fundamentale Teilchen – Elektron, Photon, Quark und so fort – durch ein eigenes Feld, das ähnlich wie das elektromagnetische Feld den Raum erfüllt. Die Quantenfeldgleichungen wurden ursprünglich in flacher Raumzeit aufgestellt, das heißt ohne Gravitation. Die semiklassische Gravitation verwendet hingegen eine in gekrümmter Raumzeit formulierte Quantenfeldtheorie.

### Das Gewicht des Quantenvakuums

Ganz grob ausgedrückt geht die semiklassische Theorie folgendermaßen vor: Eine irgendwie konfigurierte Ansammlung von Materie erzeugt gemäß der klassischen allgemeinen Relativitätstheorie eine entsprechend gekrümmte Raumzeit. Doch die Krümmung der Raumzeit modifiziert die Energie der Quantenfelder. Die modifizierte Energie verändert nach der klassischen Relativitätstheorie die Krümmung der Raumzeit. Und so weiter, eine Iteration nach der anderen.

Das Ziel ist eine selbstkonsistente Lösung, das heißt eine gekrümmte Raumzeit, in der die Quantenfelder so konfiguriert sind, dass ihre Energie gerade diese Krümmung erzeugt. Die Lösung sollte viele Situationen, in denen sowohl Quanteneffekte als auch Gravitation eine Rolle spielen, in guter Näherung beschreiben, obwohl es für die Gravitation selbst noch keine Quantentheorie gibt. Somit baut die semiklassische Theorie minimale Quantenkorrekturen in die allgemeine Relativitätstheorie ein: Sie berücksichtigt das Quantenverhalten der Materie, behandelt aber die Schwerkraft – das heißt die Raumzeitkrümmung – weiterhin klassisch.

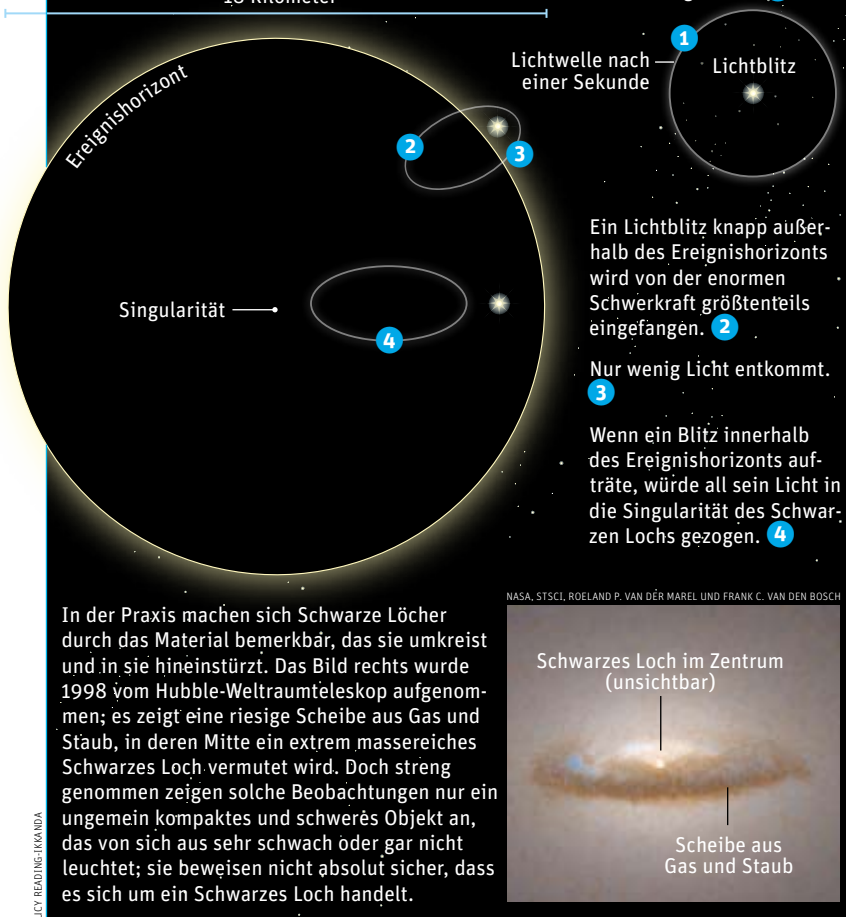
Doch dieser Ansatz führt sofort zu einem unangenehmen Problem. Für die Nullpunktenergie der Quantenfelder – die tiefstmögliche Energie, bei der keinerlei Teilchen vorhanden sind, die Energie des Vakuums – ergibt sich ein unendlicher Wert. Das Problem entsteht tatsächlich schon in der gewöhnlichen

## SCHWARZE LÖCHER KURZ GEFASST

**Ein Schwarzes Loch ist ein Gebiet** der Raumzeit mit so starker Gravitation, dass nichts daraus entkommen kann. Seine Grenze wird durch den Ereignishorizont definiert: Was hineinfällt, verschwindet für immer. Das Schwarze Loch ist größtenteils leer, denn seine Masse konzentriert sich auf einen unendlich dichten Punkt – eine »Singularität« – innerhalb des Horizonts.

Ein Schwarzes Loch mit drei Sonnenmassen hätte rund 18 Kilometer Durchmesser; das entspräche der Größe eines mittleren Asteroiden.

In genügend großer Entfernung vom Schwarzen Loch breitet sich ein Lichtblitz symmetrisch in alle Richtungen aus. 1



Ein Lichtblitz knapp außerhalb des Ereignishorizonts wird von der enormen Schwerkraft größtenteils eingefangen. 2

Nur wenig Licht entkommt. 3

Wenn ein Blitz innerhalb des Ereignishorizonts aufträte, würde all sein Licht in die Singularität des Schwarzen Lochs gezogen. 4

In der Praxis machen sich Schwarze Löcher durch das Material bemerkbar, das sie umkreist und in sie hineinstürzt. Das Bild rechts wurde 1998 vom Hubble-Weltraumteleskop aufgenommen; es zeigt eine riesige Scheibe aus Gas und Staub, in deren Mitte ein extrem massereiches Schwarzes Loch vermutet wird. Doch streng genommen zeigen solche Beobachtungen nur ein ungemein kompaktes und schweres Objekt an, das von sich aus sehr schwach oder gar nicht leuchtet; sie beweisen nicht absolut sicher, dass es sich um ein Schwarzes Loch handelt.

NASA, STSCI, ROELAND P. VAN DER MAREL UND FRANK C. VAN DEN BOSCH



LUCY READING-IRKANDA



Quantenfeldtheorie, das heißt im flachen Raum, ohne Gravitation. Dort hängt das Verhalten der Teilchen aber zum Glück nur von den Energieunterschieden zwischen Zuständen ab, und darum spielt der Wert der Vakuumenergie keine Rolle. Durch geschicktes Subtrahieren, die so genannte Renormierung, lassen sich die Unendlichkeiten beseitigen und die Energiedifferenzen extrem genau berechnen.

Doch sobald die Gravitation ins Spiel kommt, macht die Vakuumenergie einen gewaltigen Unterschied. Eine unendliche Energiedichte müsste eine ungeheuer starke Raumzeitkrümmung erzeugen. Das heißt, selbst der »leere« Raum würde eine intensive Schwerkraft enthalten, die nicht im Entferntesten zu unserem Universum passt; alle astronomischen Beobachtungen der letzten zehn Jahre besagen, dass die Nullpunktenergie einen extrem winzigen Beitrag zur gesamten Energiedichte des Universums leistet. Der semiklassische Ansatz versucht erst gar nicht, das Dilemma zu lösen. Stattdessen wird einfach postuliert, dass die Lösung den Nullpunktbeitrag zur Energiedichte bei flacher Raumzeit exakt aufhebt. Diese Annahme führt zu einem konsistenten semiklassischen Vakuum: Die Energiedichte ist überall dort null, wo die allgemeine Relativitätstheorie eine flache Raumzeit ergibt.

Wenn Materie vorhanden ist, wird die Raumzeit gekrümmt. Dadurch ändert sich die Nullpunktenergiedichte der Quantenfelder, sie wird nicht mehr exakt aufgehoben. Der Überschussbetrag gilt als Folge einer Vakuumpolarisation – analog zur Wirkung einer elektrischen Ladung, die ein Medium polarisiert (siehe Kasten auf der nächsten Seite).

Wir haben bisher nur von Masse und Energiedichte gesprochen, aber in der allgemeinen Relativitätstheorie bewirken nicht nur diese Größen eine Krümmung der Raumzeit. Hinzu kommen die Impulsdichte sowie die Drücke und Scherspannungen, die in einer bestimmten Materiekonfiguration herrschen. Ein einziges mathematisches Objekt, der Spannungs-Energie-Tensor – kurz SET –, fasst all diese Größen zusammen. Der semiklassische Ansatz postuliert, dass die Nullpunktbeiträge der Quantenfelder zum gesamten SET bei flacher Raumzeit exakt aufgehoben werden. Das mathematische Objekt, das durch Anwendung eines solchen Subtraktionsverfahrens auf den SET gewonnen wird, heißt renormierter Spannungs-Energie-Tensor oder kurz RSET.

Im Fall gekrümmter Raumzeit beseitigt das Subtraktionsschema zwar noch immer erfolgreich die divergenten Teile im SET, lässt aber einen endlichen, von null verschiedenen Wert

### MASSEKLASSEN

Nach der allgemeinen Relativitätstheorie wird ein Schwarzes Loch durch drei Größen vollständig definiert: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung. Es macht keinen Unterschied, ob Materie, Antimaterie oder Energie ins Loch gefallen ist.

Die Astronomen unterscheiden drei Klassen nach ihrer Masse. Löcher mit rund 5 bis 15 Sonnenmassen entstehen aus sterbenden Sternen. Viele Galaxien bergen in ihrem Zentrum ein Loch mit Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Löcher mit einigen tausend Sonnenmassen wurden im Zentrum von Kugelsternhaufen entdeckt.

## DAS INFORMATIONSPROBLEM BEI SCHWARZEN LÖCHERN

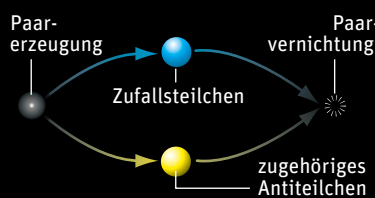
**Gemäß den klassischen** – nicht quantenphysikalischen – Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie darf dem Ereignishorizont überhaupt nichts entkommen. Doch in den 1970er Jahren folgerte Stephen W. Hawking aus quantenphysikalischen

Überlegungen, dass ein Schwarzes Loch in sehr geringem Maß Zufallsteilchen emittiert (links). Die Zufallsverteilung dieser Hawking-Strahlung führt zum Informationsproblem Schwarzer Löcher (rechts).

### WIE HAWKING-STRAHLUNG ENTSTEHT

Selbst im leeren Raum entstehen durch Quantenprozesse immerfort Paare virtueller Teilchen und Antiteilchen, die einander gleich wieder vernichten.

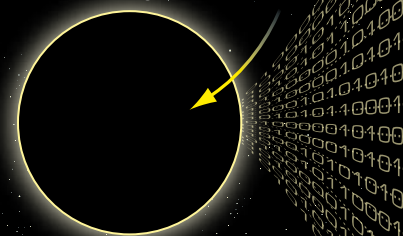
In der Nähe des Ereignishorizonts kann der eine Partner des virtuellen Teilchenpaares vom Schwarzen Loch verschluckt werden, während der andere entwischt. Das entkommene Teilchen trägt außer seiner Masse so viel Energie mit sich, dass die Masse des Lochs insgesamt abnimmt.



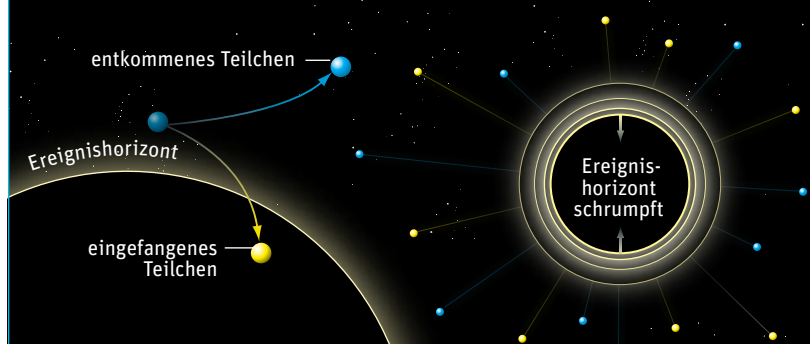
Auf diese Weise sinkt die Masse des Schwarzen Lochs allmählich, und damit schrumpft der Ereignishorizont. Dieser Verdampfungsprozess beschleunigt sich, je kleiner das Loch wird.

### INFORMATION GEHT VERLOREN

Die in ein Schwarzes Loch stürzende Materie trägt eine riesige Informationsmenge mit sich.



Nach Hawkings Szenario kann ein Schwarzes Loch restlos verdampfen, doch die dabei emittierten Zufallsteilchen tragen praktisch keine Information nach außen. Dieser Informationsverlust verletzt eine fundamentale Eigenschaft der Quantenmechanik, die so genannte Unitarität. Das Problem blieb bisher ungelöst.

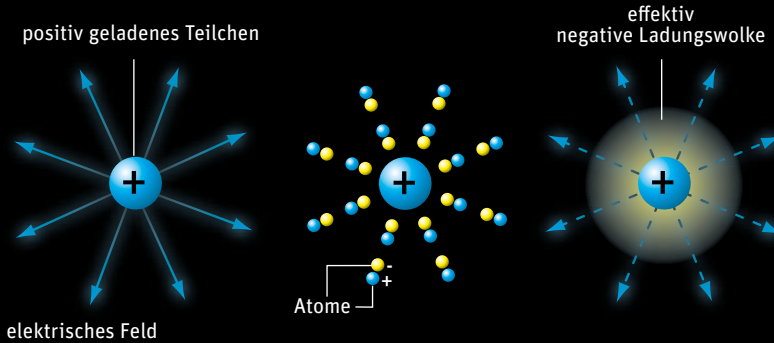


DAS AKTIVE QUANTENVAKUUM

In der klassischen Relativitätstheorie ist die Raumzeit dynamisch, durch ihre Krümmung wird Schwerkraft erzeugt. Doch auch mit einem Quanteneffekt – der so genannten Vakuumpolarisation – kann der leere Raum eine aktive Rolle im Universum spielen.

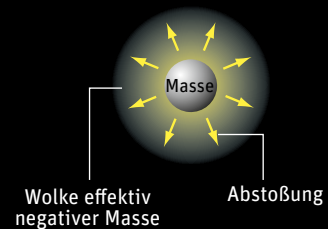
ELEKTRISCHE POLARISATION

In einem Medium polarisiert das elektrische Feld eines geladenen Gegenstands (links) die Atome in der Nähe (Mitte) und schwächt dadurch das gesamte elektrische Feld (rechts). Wie die Quantenfeldtheorie zeigt, kann sogar das Vakuum polarisiert werden, denn ein elektrisches Feld beeinflusst virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare.



VAKUUMPOLARISATION

In der allgemeinen Relativitätstheorie spielen Masse und Energie die Rolle der elektrischen Ladung, während die gekrümmte Raumzeit – die Schwerkraft – dem elektrischen Feld entspricht. Die Vakuumpolarisation erzeugt ein Energiedefizit – praktisch eine Wolke negativer Energie – und eine Abstoßungskraft.



für den RSET übrig. Zum Endresultat führt nun folgender Iterationsprozess: Klassische Materie krümmt die Raumzeit mittels der einsteinschen Gleichungen um einen durch den klassischen SET bestimmten Betrag. Infolge dieser Krümmung erhält das Quantenvakuum einen endlichen, von null verschiedenen RSET. Der Vakuum-RSET wirkt als zusätzliche Gravitationsquelle und verändert die Krümmung. Die neue Krümmung ruft ihrerseits einen anderen Vakuum-RSET hervor, und so weiter.

Quantenkorrigierte Schwarze Löcher

Nachdem der Ansatz der semiklassischen Gravitation formuliert ist, stellt sich die Frage: Wie beeinflussen diese Quantenkorrekturen die Vorhersagen über Schwarze Löcher? Insbesondere, wie verändern die Korrekturen den Entstehungsvorgang eines Schwarzen Lochs?

Das einfachste Schwarze Loch rotiert nicht und trägt keine elektrische Ladung; es hat nur eine bestimmte Masse, sagen wir die  $M$ -fache Sonnenmasse. Sein Radius  $R$  heißt Schwarzschild- oder Gravitationsradius und beträgt nach der klassischen Theorie  $3M$  Kilometer. Wenn Materie aus irgendeinem Grund auf ein Volumen unterhalb dieser Größe kollabiert, bildet sie ein Schwarzes Loch.

Beispielsweise hat die Sonne einen Radius von 700 000 Kilometern, während ihr Gravitationsradius nur drei Kilometer ausmacht. Aus den semiklassischen Gravitationsgleichungen geht hervor, dass der RSET des Quantenvakuums in diesem Fall vernachlässigt werden kann. Demnach ist die Sonne weit davon entfernt, gemäß den klassischen Gleichungen ein

Schwarzes Loch zu bilden, und Quantenkorrekturen ändern auch nichts daran. Die Astrophysiker dürfen Quantengravitationseffekte getrost ignorieren, wenn sie die Sonne und die meisten anderen Himmelskörper analysieren.

Hingegen fallen die Quantenkorrekturen ins Gewicht, wenn ein Stern nicht viel größer ist als sein Gravitationsradius. 1976 untersuchte David G. Boulware – jetzt an der University of Washington tätig – den Fall, dass ein derart kompakter Stern stationär bleibt, das heißt nicht kollabiert. Boulware zeigte: Je knapper der stationäre Radius des Sterns bei seinem Gravitationsradius liegt, desto größer wird der Vakuum-RSET in der Nähe seiner Oberfläche und die Energiedichte erreicht unendliche Werte. Daraus geht hervor, dass die semiklassische Gravitationstheorie kein stationäres Schwarzes Loch mit konstantem Ereignishorizont als Lösung ihrer Gleichungen zulässt.

Allerdings sagt Boulwares Resultat nichts über den Fall eines kollabierenden Sterns aus, der nach der klassischen allgemeinen Relativitätstheorie als Schwarzes Loch endet. Für dieses Problem hatte Stephen W. Hawking schon ein Jahr zuvor mit etwas anderen Methoden gezeigt, dass ein klassisches Schwarzes Loch Zufallsteilchen emittiert. Genauer gesagt, die Teilchen haben eine für Wärmestrahlung charakteristische Energieverteilung; das Schwarze Loch hat eine Temperatur. Nach Hawkings Ansatz sind quantenkorrigierte Löcher im Wesentlichen klassische Objekte, die durch thermische Strahlung langsam verdampfen. Ein Loch mit einer Sonnenmasse hätte eine Temperatur von 60 Nanokelvin

WAS BRINGT DIE ZUKUNFT?

- Künftige Arbeit am Modell Schwarzer Sterne muss gezielt physikalische Systeme suchen, bei denen die Vakuumpolarisation einen Kollaps gemäß der semiklassischen Gravitationstheorie erfolgreich zum Stillstand bringt.
- Stringtheoretiker haben Schwarze Löcher als Bündel so genannter Branen beschrieben und damit Vorhersagen der semiklassischen Gravitation für gewisse Spezialfälle reproduziert. Sie versuchen diese Resultate auf alle Arten Schwarzer Löcher zu verallgemeinern.
- Eine endgültige Lösung für das Informationsproblem und das Schicksal kollabierender Materie wird höchstwahrscheinlich erst eine vollständige Quantentheorie der Gravitation bringen.

(milliardstel Grad über dem absoluten Nullpunkt). Die entsprechende Verdampfungsrate wäre so gering, dass sie durch Absorbieren der kosmischen Hintergrundstrahlung völlig überdeckt würde; das Loch müsste sogar an Größe zunehmen. Ein verdampfendes Schwarzes Loch mit dieser Masse wäre praktisch von einem klassischen nicht zu unterscheiden, weil die Verdampfung unmessbar klein ausfiel.

In den folgenden Jahren unternahmen die Theoretiker große Anstrengungen, um dieses Bild abzurunden – unter anderem durch näherungsweise Berechnung des RSET für kollabierende Konfigurationen. Heute sind die meisten Physiker überzeugt: Schwarze Löcher entstehen so, wie es die klassische allgemeine Relativitätstheorie beschreibt, und danach unterliegen sie der langsamen Quantenverdampfung durch die Hawking-Strahlung.

### Das Problem mit der Information

Hawkings Entdeckung enthüllte – zusammen mit früheren Resultaten von Jacob D. Bekenstein von der Hebrew University of Jerusalem – einen tiefen und bis heute nicht ganz verstandenen Zusammenhang zwischen Gravitation, Quantenphysik und Thermodynamik. Dadurch entstanden neue Probleme. Das wohl wichtigste ist als Informationsproblem bekannt; es hängt eng mit der Frage zusammen, was am Ende aus einem restlos verdampften Schwarzen Loch werden soll (siehe »Das Informationsparadoxon bei Schwarzen Löchern« von Leonard Susskind, Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 58).

Betrachten wir einen großen Stern, während er unter der eigenen Schwerkraft zusammenbricht. Er verkörpert mit den Orten, Geschwindigkeiten und anderen Eigenschaften seiner gut  $10^{55}$  Teilchen eine riesige Informationsmenge. Angenommen, der Stern bildet ein Schwarzes Loch und verdampft über Äonen hinweg, indem er Hawking-Strahlung emittiert. Da die Temperatur eines Schwarzen Lochs umgekehrt proportional zu seiner Masse ist, wird es immer wärmer und verdampft immer schneller. Schließlich wirft eine gewaltige Explosion den letzten Rest der Masse aus. Was bleibt danach übrig? Verschwindet das Loch komplett, oder lässt es irgendeine kleine Spur zurück? Und was ist so oder so aus all der Information des Sterns geworden? Gemäß Hawkings Rechnung tragen die vom Loch abgestrahlten Teilchen praktisch keinerlei Daten über den Anfangszustand des Sterns mit sich.

Das Verschwinden von Information ist ein echtes Problem, denn zu den Grundpfeilern der Quantentheorie gehört die Aussage: Quantenzustände entwickeln sich unitär. Daraus folgt unter anderem, dass keine Information

jemals wirklich gelöscht werden darf. Sie mag zum Beispiel nach dem Brand einer Bibliothek praktisch unzugänglich sein, aber im Prinzip bleibt sie in den Schwaden von Rauch und Asche komplett erhalten.

Da Hawkings Rechnungen auf semiklassischer Gravitation beruhen, können die Physiker nicht sicher sein, ob der Informationsverlust nur ein Artefakt der verwendeten Näherungen ist. Falls der Verdampfungsvorgang wirklich Information zerstört, müssen die Gleichungen der vollständigen Quantengravitation die Unitarität der uns bekannten Quantenmechanik verletzen. Oder umgekehrt: Wenn die Information erhalten bleibt und wenn eine

## WIE EIN SCHWARZER STERN ENTSTEHT

**Ein Schwarzes Loch bildet sich**, wenn Materie unter ihrem eigenen Gewicht zusammenbricht und keine Kraft dem widersteht. Die meisten Physiker glauben, dass Quanteneffekte nicht ausreichen, um einen solchen Kollaps zu stoppen. Die Autoren sind anderer Meinung.

**SCHNELLER KOLLAPS IST UNAUFHALTSAM**

Für frei fallende Materie ist die Vakuumpolarisation zu vernachlässigen – selbst wenn die Materie dicht genug wird, einen Ereignishorizont zu bilden und zum Schwarzen Loch zu werden.

**LANGSAMER KOLLAPS KÖNNTE ZUM ERLIEGEN KOMMEN**

Wenn der Sturz der Materie sich verlangsamt, so die Vakuumpolarisation wachsen und Abstoßung erzeugen.

Die Abstoßung bremst den Kollaps weiter, wodurch sich die Polarisation intensiviert.

Der verzögerte Kollaps bildet niemals einen Ereignishorizont.

**SCHWARZER STERN**

Schließlich entsteht ein Schwarzer Stern. Sein Schwerfeld gleicht dem um ein Loch, aber das Innere ist von Materie erfüllt und es gibt keinen Ereignishorizont. Ein Schwarzer Stern kann eine Art Hawking-Strahlung emittieren, die jedoch die geschluckte Information wieder preisgibt; dadurch bleibt die Unitarität erhalten. Denkt man sich den Stern wie eine Zwiebel Schicht für Schicht geschält, so entsteht jedes Mal ein kleinerer Schwarzer Stern, der Strahlung emittiert. Da kleine Schwarze Sterne stärker strahlen und wärmer sind als größere, wird der Stern zum Mittelpunkt hin immer heißer.

vollständige Theorie der Quantengravitation enthüllen wird, wo sie in der Strahlung steckt, dann muss entweder die allgemeine Relativitätstheorie oder die Quantenmechanik modifiziert werden.

Das Informationsproblem und ähnliche Rätsel haben uns – und andere – veranlasst, die Schlussfolgerungen, die in den 1970er Jahren zum fast klassischen Verdampfungszenario führten, erneut unter die Lupe zu nehmen. Wie wir herausfanden, beruht die alte

semiklassische Aussage, durch Gravitationskollaps entstünden stets Schwarze Löcher, auf mehreren stillschweigenden Voraussetzungen.

Insbesondere wird bei den alten Berechnungen unterstellt, dass der Kollaps sehr rasch abläuft; er soll ungefähr so lange dauern wie der freie Fall von Oberflächenmaterial, das ins Zentrum des Sterns stürzt. Wir entdeckten, dass bei langsamerem Kollaps durch Quanteneffekte ein neuartiges Objekt entstehen kann, das keinen Ereignishorizont besitzt.

Wie schon erwähnt, ist der RSET des Quantenvakuums in einer Raumzeit, die durch einen typischen Stern gekrümmt wird, überall vernachlässigbar. Wenn der Stern zu kollabieren beginnt, kann sich der RSET eventuell ändern. Dennoch gilt weiterhin, dass der RSET vernachlässigbar bleibt, sofern der Kollaps so schnell vor sich geht wie der freie Fall.

## ANDERE AUSWEGE AUS DEM SCHWARZEN LOCH

**Als Alternative zu der herkömmlichen** – aber problematischen – Idee eines verdampfenden Schwarzen Lochs haben viele Forscher mehr oder weniger exotische Objekte erdacht. Diese Vorschläge – und die Hypothese des Schwarzen Sterns – haben eines gemeinsam: Sie kommen ohne Ereignishorizont aus.

### GRAVASTERNE

Die Raumzeitgeometrie um einen »Gravitations-Vakuumbstern« gleicht der eines Schwarzen Lochs bis aufs Haar – genauer gesagt, bis auf  $10^{-35}$  Meter Abstand von dem kugelförmigen Gebiet, das den Ereignishorizont eines klassischen Schwarzen Lochs bilden würde. Der Horizont wird durch eine nur  $10^{-35}$  Meter dünne Schale aus Materie und Energie ersetzt. Ihre Dicke entspricht der Planck-Länge, bei der Quantengravitationseffekte dominieren. Das Innere des Gravasterns ist leerer Raum mit starker Vakuumpolarisation; die dadurch erzeugte Abstoßung verhindert, dass die Materieschale weiter kollabiert. Bei einer Variante des Gravastern-Modells bricht der klassische Geometriebegriff in der Grenzregion zwischen innen und außen zusammen.

### SCHWARZLOCH-KOMPLEMENTARITÄT

In der üblichen Quantenmechanik bedeutet Komplementarität, dass bei der Beobachtung eines Quantenobjekts entweder Wellen- oder Teilchenaspekte zu Tage treten, aber nie beide gleichzeitig. Die Quantenmechanik Schwarzer Löcher könnte eine ähnliche Komplementarität aufweisen. Ein Beobachter, der außerhalb eines Schwarzen Lochs verharrt, beschreibt dessen Geometrie zum Beispiel als Membran mit bestimmten physikalischen Eigenschaften an Stelle des Ereignishorizonts; ein ins Loch stürzender Beobachter muss eine andere Beschreibung verwenden.

### FUZZBALLS

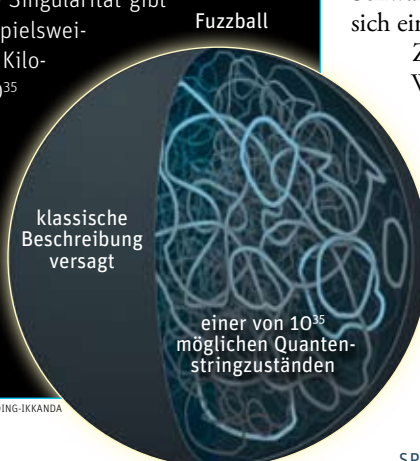
Die Verfechter dieser »Wuschelkugeln« meinen, der Horizont sei eine Übergangszone zwischen der außen gültigen klassischen Geometrie und einem quantenmechanischen Innenbereich ohne klar definierte Raumzeit. Für das Innere soll die Stringtheorie zuständig sein; eine Singularität gibt es nicht (rechts). Jeder äußeren Geometrie, beispielsweise der eines Schwarzen Lochs mit exakt  $10^{30}$  Kilogramm, entspricht im Inneren einer von  $10^{35}$  stringtheoretischen Quantenzuständen. Das semiklassische Bild – mit Ereignishorizont, riesiger Entropie, einer Temperatur und thermischer Hawking-Strahlung – ist der statistische Mittelwert aller möglichen Innenzustände. Dies gleicht der thermodynamischen Beschreibung eines Gasvolumens, bei der die genauen Orte und Bewegungen der einzelnen Atome vernachlässigt werden.

### Eine radikale Alternative

Wenn der Kollaps allerdings bedeutend langsamer abläuft, kann der RSET nahe am Schwarzschild-Radius – wo sich der klassische Ereignishorizont gebildet hätte – beliebig große und negative Werte annehmen. Ein negativer RSET erzeugt eine Abstoßung, die den Zusammenbruch weiter verlangsamt. Der Kollaps könnte kurz vor Entstehen eines Horizonts völlig zum Stillstand kommen oder in immer langsamerem Tempo ewig weitergehen; nie käme es zu einem Horizont.

Das schließt nicht aus, dass Schwarze Löcher entstehen. Eine homogene kugelförmige Materiewolke mit 100 Millionen Sonnenmassen, die unter ihrem eigenen Gewicht im freien Fall zusammenstürzt, würde gewiss einen Ereignishorizont bilden. Eine derart große Wolke hätte dabei ungefähr die Dichte von Wasser. Bei dieser geringen Dichte wird der RSET nicht groß genug, um die Horizontentstehung zu verhindern. Allerdings wissen wir, dass es im Universum nicht wirklich so zugegangen ist. Die riesigen, fast homogenen Materiewolken, die aus den frühen Stadien des Urknalls hervorgingen, kollabierten nicht zu Schwarzen Löchern. Stattdessen entwickelte sich eine Abfolge von Strukturen.

Zuerst bildeten sich Sterne, und die Wärme ihrer Kernreaktionen hielt den Kollaps lange auf. Wenn ein Stern seinen nuklearen Brennstoff fast erschöpft hat, kann er zu einem Weißen Zwerg schrumpfen oder bei genügend großer Masse als Supernova explodieren; im zweiten Fall bleibt ein Neutronenstern zurück – eine Kugel aus Neutronen, die nur wenig größer ist als der Gravitationsradius des Sterns. In beiden Fällen



LUCY READING-ICKANDA

verhindert ein reiner Quanteneffekt, das paulische Ausschließungsprinzip, den weiteren Zusammenbruch. Die Teilchen im Neutronenstern dürfen gemäß dem Pauli-Verbot nicht denselben Quantenzustand einnehmen, und der resultierende Druck widersteht dem Gravitationskollaps. Das Gleiche gilt für die Ionen und Elektronen im Weißen Zwerg.

Falls der Neutronenstern Masse hinzugewinnt, überwindet schließlich die zermalmen-de Last der Schwerkraft den Entartungsdruck der Neutronen, und der Kollaps setzt sich fort. Wir wissen nicht genau, was dann geschieht. Nach der üblichen Ansicht bildet sich ein Schwarzes Loch, doch Theoretiker haben mehrere Alternativen vorgeschlagen – Quarksterne, Seltsame Sterne, Bosonensterne oder Q-Kugeln –, die selbst bei Drücken, unter denen ein Neutronenstern zusammenbricht, stabil bleiben. Die Physiker müssen aber erst besser verstehen, wie sich die Materie bei Dichten weit oberhalb der von Neutronen verhält.

Jedenfalls liefert die Quantenmechanik immer neue Tricks, um den Gravitationskollaps aufzuschieben. Zwar ist offenbar keiner dieser Aufschübe von Dauer, denn jede noch so stabile Konfiguration lässt sich mit genügend viel zusätzlicher Materie destabilisieren. Doch jeder Prozess, der den Kollaps verzögert, bedeutet mehr Zeit, in der sich der negative RSET des Quantenvakuums aufbauen kann. Seine Abstoßungskraft bildet ein mächtiges Gegengewicht zur Gravitationsanziehung. Da diese Abstoßung über alle Grenzen wachsen kann, vermag sie den Kollaps der Materie zu einem Schwarzen Loch für immer aufzuhalten.

### Wo finden wir sie?

Auf diese Weise entstehen die hypothetischen Schwarzen Sterne. Da sie extrem klein und dicht sind, sehen sie zwar in vieler Hinsicht wie Schwarze Löcher aus, doch ihr Wesen ist davon grundverschieden. Sie sind echte Himmelskörper mit einer materiellen Oberfläche und einem von dichter Materie erfüllten Inneren. Für entfernte Beobachter leuchten sie äußerst schwach, denn das von der Oberfläche emittierte Licht erleidet auf dem Weg durch die intensiv gekrümmte Umgebung des Schwarzen Sterns eine starke Rotverschiebung. Im Prinzip können Astronomen solche Exoten nach allen Regeln der Kunst untersuchen; kein Ereignishorizont hindert sie daran.

Manche Objekte aus der Familie der Schwarzen Sterne sehen vielleicht verdampfenden Schwarzen Löchern gleich, weil sie eine Art Hawking-Strahlung emittieren. Für den speziellen Fall, in dem sich der Kollaps der Bildung eines Horizonts annähert, aber nie ganz damit fertig wird, haben wir Folgen-

des gezeigt: Der Schwarze Stern emittiert Teilchen mit einem so genannten planckschen Energiespektrum – das einem thermischen Spektrum stark ähnelt –, wobei die zugehörige Temperatur nur geringfügig unter der Hawking-Temperatur liegt. Da der Stern keinen Horizont hat, kann er keinerlei Information wegsperren. Vielmehr tragen die emittierten Teilchen und die im Stern zurückbleibende Materie die gesamte Information. Die übliche Quantenphysik reicht aus, um diesen Entstehungs- und Verdampfungsprozess zu beschreiben. Allerdings lösen Schwarze Sterne das Informationsproblem nicht ganz, solange sich irgendwo im Universum Ereignishorizonte bilden können.

### Über den Horizont hinaus

Diese Objekte könnten Schwarze Quasilöcher genannt werden, denn von außen haben sie ungefähr dieselben thermodynamischen Eigenschaften wie Schwarze Löcher. Doch im Inneren herrschen unterschiedlichste Temperaturen, mit einem Maximum im Mittelpunkt. Wenn wir uns den Stern als eine Art Zwiebel mit konzentrischen Schalen vorstellen, so schrumpft jede Schale zwar langsam zusammen, aber nie so weit, dass ihre und die umschlossene Masse ausreichen, um einen Horizont zu bilden. Jede Schale wird am Kollaps durch den Vakuum-RSET gehindert, der sich nach unserer Theorie immer dort bildet, wo die Bedingungen für einen Horizont genügend langsam – annähernd, aber nie ganz – erreicht werden. Die tieferen Schalen haben höhere Temperaturen, genau wie Schwarze Löcher mit kleineren Massen.

Die Erforschung Schwarzer Löcher hat immer wieder höchst unterschiedliche Reaktionen ausgelöst. Auf der einen Seite ist es ein aufregender Gedanke, dass sich in ihnen vielleicht eine neue Physik verbirgt (siehe »Nackte Singularitäten« von Pankaj S. Joshi, Spektrum der Wissenschaft 12/2009, S. 24). Andererseits haben diese exotischen Objekte manche Physiker stets beunruhigt, und darum ist die Suche nach Alternativen so alt wie die Idee der Schwarzen Löcher selbst.

Unser Modell des Schwarzen Sterns und die Alternativen anderer Forscher haben eines gemeinsam: In der gesamten Nachbarschaft ist die Raumzeit praktisch identisch mit der um ein klassisches Schwarzes Loch. Der Unterschied zeigt sich erst in nächster Nähe des Gebiets, wo der Horizont liegen würde. Zwar können wir die Geheimtür, die zur Vereinigung von Quantenphysik und Gravitation führt, noch nicht sehen, aber vielleicht verbirgt sie sich nicht hinter der undurchdringlichen Mauer eines Ereignishorizonts. ◀



**Carlos Barceló** ist Professor für theoretische Physik und stellvertretender Leiter am Andalusischen Institut für Astrophysik in Spanien. **Stefano Liberati** ist Assistenzprofessor für Astrophysik an der International School for Advanced Studies in Triest (Italien). **Sebastiano Sonego** ist Professor für mathematische Physik an der Universität Udine (Italien). **Matt Visser** ist Mathematikprofessor an der Victoria University of Wellington in Neuseeland (von oben nach unten).

**Barceló, C. et al.:** Fate of Gravitational Collapse in Semiclassical Gravity. In: Physical Review D 77 (4), 2008.

**Skenderis, K. und Taylor, M.:** The Fuzzball Proposal for Black Holes. In: Physics Reports 467(4-5), S. 117–171, 2008.

**Susskind, L.:** The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics. Little Brown, London 2008.

**Visser, M. et al.:** Small, Dark, and Heavy: But Is It a Black Hole? In: Proceedings of Black Holes in General Relativity and String Theory, 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1017402](http://www.spektrum.de/artikel/1017402).

# Pioniere unter den GRÜNEN MINILASERN

Erst im vergangenen Jahr gelang die Herstellung von Halbleiterlasern, die reines grünes Licht aussenden. Dank des rasant wachsenden Methodenarsenals der Forscher geht die Entwicklung nun aber immer schneller voran. Bald werden Laserprojektoren mit brillantem Licht das ganze optische Spektrum abdecken.

## In Kürze

- ▶ Schon seit längerer Zeit können **Halbleiterlaser** rotes und blaues Licht emittieren. Die »grüne Lücke« wurde aber erst vor wenigen Monaten geschlossen.
- ▶ Die Forschung ist dennoch längst nicht beendet. Zahlreiche Wissenschaftlerteams arbeiten an **unterschiedlichen Ansätzen**, um die Laserdioden zu optimieren.
- ▶ Sobald die **Produkte kommerziell verfügbar** sind, können sie beispielsweise zur Erzeugung brillanter Laserprojektionen dienen.

Von Shuji Nakamura und Michael Riordan

**A**n einem verregneten Samstagmorgen im Januar 2007 ging für den Präsidenten der University of California in Santa Barbara (UCSB) ein dringender Telefonanruf ein. Abrupt verabschiedete sich Henry Yang aus einer Sitzung, schnappte Regenmantel und Schirm und eilte über den windgepeitschten Campus der UCSB zu deren Solid State Lighting and Display Center (SSLDC). Als er das Zentrum erreichte, wimmelte es in dem kleinen Testlabor von Leuten, »und auch Shuji war gerade eingetroffen«, erinnert sich Yang.

Shuji Nakamura, einer der Autoren dieses Beitrags, gehört dem zweiköpfigen Direktorium des mittlerweile in SSLEC (Solid State Lighting and Energy Center) umbenannten Instituts an. Mitfinanziert von rund einem Dutzend Partnerunternehmen weltweit, widmet es sich der Herstellung von Halbleitermaterialien, die möglichst effizient und kontrolliert Licht abgeben sollen.

Schon Mitte 2006 war Nakamura mit dem Millennium Technology Prize für seine mittlerweile über ein Jahrzehnt zurückliegende Erfindung der ersten leistungsfähigen, blau strah-

lenden Leuchtdioden (LEDs) ausgezeichnet worden und leistet seit diesem Durchbruch weiter Pionierarbeit auf dem Gebiet der Lichterzeugung auf Halbleiterbasis. Neben grünen LEDs entwickelte er auch blaue Laserdioden, wie sie in Abspielgeräten für Blu-ray-Medien, den hochauflösenden Nachfolgern der DVDs, unverzichtbar sind.

An jenem Samstag waren auch Nakamuras Kollegen Steven DenBaars, ebenfalls SSLDC-Direktor, und James C. Speck in das Testlabor gekommen und diskutierten dort mit aufgeregten Studenten und Postdocs, während sie der Reihe nach Blicke durch ein Mikroskop warfen. Dann machten sie Platz für Yang, und als auch er durch das Okular sah, wurde er Zeuge eines hellen, blauviolettten Blitzes, ausgesandt von einem Chip mit glatter, glänzender Oberfläche aus Galliumnitrid (GaN).

Der Universitätspräsident war beeindruckt. An sich sind blaue Laserdioden zwar nicht revolutionär. Doch Unternehmen wie Nichia Chemical Industries im japanischen Tokushima, wo Nakamura bis zum Jahr 2000 tätig gewesen war, und Sony waren noch immer verzweifelt auf der Suche nach Verfahren, welche die Herstellung kostengünstiger GaN-Laser für den Blu-ray-Markt erlaubten. Denn

bislang hatten sie bei der Produktion der Dioden mit hartnäckigen Problemen gekämpft, so dass die Stückzahlen gering und die Laserdioden teuer blieben. Wenige Tage später war aber klar: Das Kunststück ließ sich wiederholen. Einer Forschergruppe der Rohm Company im japanischen Kioto, die schon damals zu den Partnern des Instituts gehörte, war der Effekt mit einem ähnlichen Material gelungen.

### Hoffnung auf den Durchbruch

Die Wissenschaftler an der UCSB und bei Rohm arbeiten an neuen Methoden zur Herstellung leistungsfähiger Laserdioden aus aufeinandergeschichteten kristallinen Lagen aus Galliumnitrid und seinen Legierungen. Hinter ihren Anstrengungen steht vor allem aber auch die Hoffnung, bald robuste und kompakte GaN-Dioden herstellen zu können, die grünes Laserlicht aussenden und sich im industriellen Maßstab produzieren lassen.

Die »grüne Lücke« in der Triade aus Rot, Grün und Blau, die man zur vollständigen Darstellung realistischer Farben benötigt, bereitet Wissenschaftlern wie Ingenieuren schon lange Kopfzerbrechen. Sie ist das bislang größte Hindernis bei der Herstellung von Bild-

schirmen und Projektoren auf Basis von Halbleiterlasern. Gelingt den Forschern hier der Durchbruch – könnte also ein mit vernünftigem Aufwand herstellbarer und leistungsfähiger Halbleiterlaser im Wellenlängenbereich von 520 bis 535 Nanometern (milliardstel Meter, nm) strahlen (»True Green«) –, wären schon bald Laserprojektoren für Fernsehen und Kinos verfügbar, die bisherige Systeme durch ihren Farbreichtum weit übertreffen würden. Auch winzige »Pikoprojektoren«, wie sie schon jetzt in einem Handy Platz finden, würden dann höchste Qualität erreichen. Grüne Hochleistungsdioden könnten aber auch bei der DNA-Sequenzierung, der industriellen Fertigungskontrolle und selbst bei der Unterwasserkommunikation zum Einsatz kommen.

LEDs (siehe »Meilenstein für grüne Leuchtdioden«, SdW 1/2010, S. 16) und Laserdioden sind miteinander verwandt, aber nur Letztere erzeugen kohärentes Laserlicht. Ihre blau strahlenden Varianten existieren schon länger: Der entscheidende Schritt, um Halbleiter zur Emission von hellem, blauem Licht zu veranlassen, war bereits Mitte der 1990er Jahre erfolgt. Während sich die meisten Forscher zuvor auf Zinkselenid und damit verwandte Ver-

### GIBT ES GRÜNE LASER NICHT SCHON LÄNGST?

Tatsächlich sind Lasersysteme, die grünes Licht aussenden, bereits seit Jahren verfügbar – etwa in Form von Laserpointern, wie sie gerne bei Vorträgen genutzt werden. In ihnen regt eine Laserdiode einen Kristall dazu an, Strahlung mit einer Wellenlänge von 1064 Nanometern (nm) auszusenden. Deren Frequenz wird durch einen weiteren Kristall verdoppelt, so dass grünes Licht der Wellenlänge 532 nm entsteht. Doch das Verfahren ist aufwändig und ineffizient. Heißt sich der zweite Kristall auf, ändert sich zudem die Wellenlänge der Strahlung. Mit Halbleiterlaserdioden, die grünes Licht auf direktem Weg erzeugen, lassen sich diese Probleme lösen.

**Die Energie der Photonen lässt sich durch die Eigenschaften des Halbleitermaterials präzise steuern**

bindungen konzentriert hatten, begann man damals, zu ihrer Herstellung Galliumnitrid und seine Legierungen zu verwenden.

Zwischen zwei Sandwichschichten aus GaN kommt dabei eine extrem gleichmäßige, nur Nanometer dicke so genannte aktive Schicht aus Indiumgalliumnitrid (InGaN) zu liegen, wodurch ein so genannter Quantentopf entsteht. Dann erzeugen die Forscher ein elektrisches Feld senkrecht zu diesen Schichten. Dieses treibt Elektronen und »Löcher« – also Orte fehlender Elektronen, die sich wie ein positiv geladenes, bewegliches Quasiteilchen verhalten – aufeinander zu (Kasten unten).

In der so genannten aktiven Schicht aus InGaN rekombinieren die Elektronen und Löcher und erzeugen dabei Photonen mit einer Energie, die präzise durch die Eigenschaften des aktiven Halbleitermaterials gegeben ist. Durch eine Erhöhung des Indiumanteils der Legierung lässt sich diese Energie verringern und damit die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts vergrößern. So kann man

die Farbe von Violett (welches das kurzwellige Ende des Spektrums markiert) über Blau zu Grün verschieben.

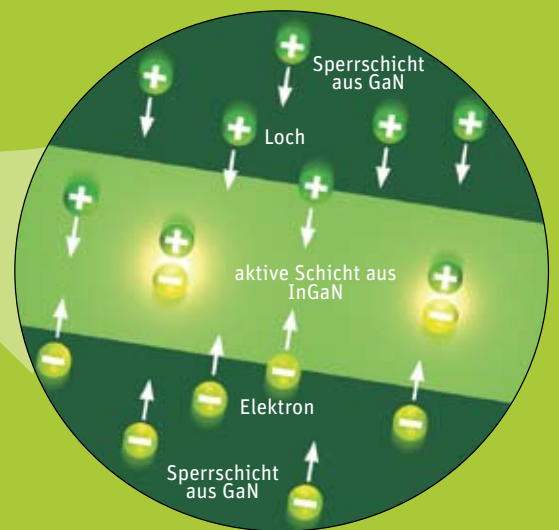
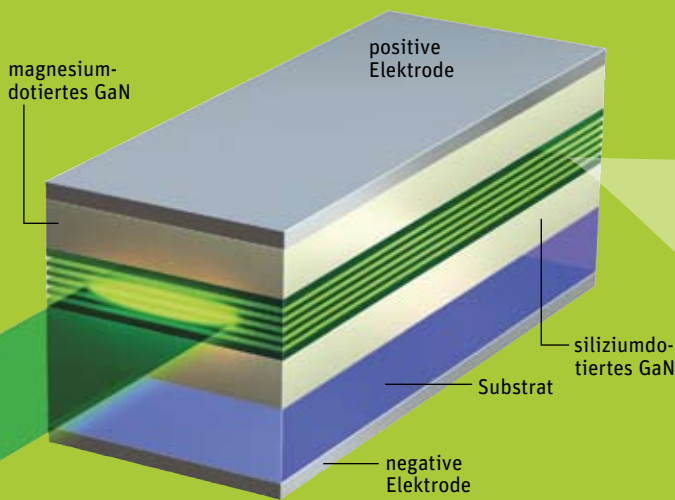
In LEDs entkommen die Photonen praktisch sofort aus dem Quantentopf. Sie prallen vielleicht ein- oder zweimal an dessen Wänden ab, bevor sie entweder in einer anderen Schicht absorbiert werden oder aber die Diode verlassen. Laserdioden hingegen erzeugen kohärentes Licht. In ihnen bleiben die meisten Photonen in der aktiven Schicht gefangen: Zwei hochreflektierende Spiegel – meist polierte Kristallflächen an deren Enden – werfen sie im Inneren hin und her und begünstigen dadurch weitere Elektron-Loch-Rekombinationen. Dank dieser so genannten stimulierten Emission tritt schließlich ein eng gebündelter Laserstrahl von großer Farbreinheit aus dem System aus.

Bei der Herstellung konventioneller GaN-Dioden kommt eine dünne Scheibe, ein so genannter Wafer, aus Saphir zum Einsatz. (Immer häufiger besteht er auch aus

**SO FUNKTIONIEREN HALBLEITERLASER**

**Im Inneren eines Festkörperlaser** treffen die negativ geladenen Elektronen auf so genannte Löcher. (Diese positiv geladenen Quasiteilchen entstehen dort, wo Elektronen angeregt wurden und eine »Lücke« hinterlassen haben.) Bei der Rekombination er-

zeugen sie Licht, dessen Wellenlänge von ihren jeweiligen Energiezuständen abhängt. Die Wellenlänge beeinflussen die Forscher, indem sie die Atomlagen des Halbleiters dotieren, ihnen also Fremdatome hinzufügen.



**SCHICHT FÜR SCHICHT**

Halbleiterlaser oder Laserdioden werden hergestellt, indem man Schichten aus halbleitendem Material auf ein Substrat aufbringt. Am unteren Ende eines solchen Halbleitersandwichs befindet sich oft mit Siliziumatomen dotiertes Galliumnitrid (GaN). Dadurch kommt es dort zu einem Überschuss an Elektronen. Am oberen Ende ist das GaN mit Magnesium dotiert, um einen Überschuss an positiven Ladungen oder »Löchern« zu erhalten. Eine an den Elektroden angelegte Spannung erzeugt dann ein elektrisches Feld, das Elektronen und Löcher in die aktiven Schichten (Mitte) aus Indiumgalliumnitrid (InGaN) treibt.

**INNERER WIDERSTREIT**

Im Inneren dieser aktiven Schichten rekombinieren Elektronen und Löcher paarweise und erzeugen dabei Licht. Die Wellenlänge dieses Lichts hängt vom Indiumanteil der aktiven Schicht ab: Mehr Indium (In) führt zu längeren Wellenlängen und somit, wenn die Ausgangsfarbe im blauen oder violetten Bereich liegt, zu grünerem Licht. Doch je mehr Indium die Schichten enthalten, desto leichter sammelt es sich während der Herstellung zu kleinen Indium-»Inseln«. Wenn solche Inhomogenitäten die Wellenlänge des Lichts variieren lassen, kommt die Halbleiterstruktur nicht mehr als Laser in Frage.



## EINE NEUE GRUNDLAGE

**BASIS DER HALBLEITERSTRUKTUREN** ist ein Substrat, eine aus einem Kristall geschnittene Scheibe, die den auf sie aufgebrauchten Atomlagen ihre kristalline Struktur »vererbt«. Die blauviolett strahlenden Diodenlaser, wie sie sich in Blu-ray-Playern befinden, sind gewöhnlich auf einem Saphirsubstrat gewachsen.

Diese Kristalle sind vergleichsweise billig und leicht erhältlich, für die Herstellung grüner Laserdioden aber nicht gut geeignet. Mittlerweile setzen die Forscher darum auf andere Substrate, die wiederum auf unterschiedliche Weise aus einem Kristall geschnitten werden.



### C-EBENE: DER KLASSISCHE SCHNITT

Bei der Herstellung blauer Laser finden meist c-Ebenen-Substrate Verwendung. Dabei wird der Ausgangskristall senkrecht zu dessen hexagonaler Symmetrieachse geschnitten. Doch in diesen Substraten entstehen elektrische Felder, die Elektronen und Löcher voneinander trennen. Je stärker die Wellenlänge in Richtung grün verschoben wird, desto größer wird dieses Problem.



### M-EBENE: DIE TEURE ALTERNATIVE

Laserdioden kann man auch auf der m-Ebene – einer Seitenfläche – eines Kristalls wachsen lassen. Dann leiden die Dioden kaum unter induzierten Feldern, aber diese nicht polaren Substrate sind erheblich teurer als ihre c-Ebenen-Pendants.



### DER SEMIPOLARE KOMPROMISS

Eine dritte Option ist das semipolare Substrat, bei dem der Schnitt unter einem Winkel von 45 Grad zur Kristallachse erfolgt. Die induzierten Felder sind etwas größer als im Fall der m-Ebenen-Substrate. Auch die jüngste Entwicklung der UCSB-Forscher, eine 506-nm-Laserdiode, basiert auf einem semipolaren Substrat.

GEORGE RETSECK

Galliumnitrid.) Dieser wird in einer Reaktionskammer mit entsprechenden Ausgangsmaterialien bedampft, so dass sich aufeinander folgende Schichten aus Gallium-, Indium- und Stickstoffatomen auf dem Substrat ablagern und dabei die von diesem vorgegebene kristalline Struktur annehmen. Atom für Atom wachsen die Schichten dann parallel zur so genannten c-Ebene des Substrats heran (siehe Kasten oben).

### Der Quantentanz bleibt aus

Allerdings führen elektrostatische Kräfte und innere Spannungen, die zwischen aufeinander folgenden Schichten positiv geladener Gallium- oder Indiumatome und negativ geladener Stickstoffatome entstehen, zur Bildung starker elektrischer Felder senkrecht zur c-Ebene. Diese Felder können eine Stärke von bis zu 100 Volt pro Mikrometer erreichen. So wenig das klingt: Umgerechnet auf die Größe eines Menschen entspricht das fast 200 Millionen Volt! Weil die Felder der von außen angelegten Spannung entgegenwirken, zerren sie die Elektronen von den Löchern weg, erschweren den Teilchen folglich die Rekombi-

nation und verringern damit die Lichtausbeute. Denn letztlich sammeln sich die Elektronen dann am einen Ende des Quantenballsals und die Löcher am anderen Ende – der Quantentanz bleibt aus.

Verschieben die Forscher die Farbe des abgestrahlten Lichts von Violett über Blau zu Grün, wird dieser störende *quantum-confined Stark effect* (Stark-Effekt mit Quanteneinschluss) sogar immer stärker. Und nimmt der Strom durch die Diode zu, schirmt die wachsende Anzahl der Ladungsträger einen Teil der inneren elektrischen Felder ab, die Elektronen und Löcher voneinander trennen. Diese verlieren daher weniger Energie bei der Überwindung der Felder, rekombinieren folglich bei höheren Energien, so dass sich auch die Frequenz des emittierten Lichts erhöht und seine Farbe zum blauen Ende des Spektrums verschiebt.

Solche Probleme sind der Hauptgrund dafür, dass grüne Laserdioden und hocheffiziente grüne LEDs auch im letzten Jahrzehnt ein Traum geblieben sind. Um sie zu umgehen, setzen die UCSB- und Rohm-Forscher auf eine besondere Herangehensweise. Ihr Wa-

**Umgerechnet auf die Größe eines Menschen entsprechen die internen Felder fast 200 Millionen Volt**

## HANDLICHE PROJEKTOREN

**Die derzeit erhältlichen Miniprojektoren** können Bilder mit einer Diagonale von bis zu 1,27 Meter (50 Zoll) erzeugen und werden als Pikoprojektoren bezeichnet (die Vorsilbe steht für Billionstel). Üblicherweise erreicht die Größe des Lichtstroms, also die erzielbare Helligkeit des projizierten Bilds, bis zu 15 Lumen. Die Geräte sind etwa so groß wie eine Fernbedienung und nutzen meist LEDs zur Lichterzeugung. Die ersten auf Laserdioden basierenden Modelle kommen derzeit ebenfalls auf den Markt. Grünes Laserlicht erzeugen sie zwar per Frequenzverdopplung, können aber schon jetzt hoch aufgelöste, farbenreiche Bilder darstellen. Zukünftige Modelle auf der Basis grüner Laserdioden werden bei geringerem Strombedarf noch hellere Projektionen ermöglichen. Manche LED-Modelle finden zudem schon Platz in einem Handy. Hier eine kleine, nicht vollständige Marktübersicht:

### MICROVISION SHOW WX

Im Inneren dieses Laserprojektor-Prototyps, der schon bald auf den Markt kommen dürfte, werden rote, blaue und grüne Laserstrahlen auf einen stecknadelkopfgroßen Spiegel fokussiert. Dieser bewegt sich rasch hin und her und scannt so das ganze Bild ab, das dann an eine Wand oder eine Leinwand projiziert wird. Für die Entwicklung des Spiegels zeichnet das Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme in Dresden verantwortlich. Grüne und blaue Laser bezieht das US-Unternehmen von der Regensburger OSRAM Opto Semiconductors GmbH. Da der Projektor keine Linsen enthält, muss er niemals scharf gestellt werden.

*Auflösung: 848 x 480 Pixel (DVD-Äquivalent)*



MICROVISION, INC.

### LIGHT BLUE OPTICS

Das Start-up-Unternehmen Light Blue Optics entwickelt ebenfalls einen Laserprojektor. Das Gerät basiert auf einem LCOS-Chip – Flüssigkristall auf Silizium –, der Tausende von kleinen Flüssigkristall-»Fenstern« enthält. Der Chip öffnet und schließt diese Pixel in rasanter Folge, um das Licht an den gewünschten Stellen durchzulassen und das Bild zu erzeugen. Derzeit steht die Auslieferung an Projektorenhersteller an.

*Auflösung: 854 x 480 Pixel*

### 3M MPRO120

Das LED-basierte Vorgängermodell MPro110 war 2008 der erste tragbare Projektor, der in den USA auf den Markt kam. Er ist zwar etwas größer als der Samsung MBP200 (unten), aber dafür kann der LCOS-Projektor Videos in Fernsehqualität projizieren.

*Auflösung: 640 x 480 Pixel (entspricht der Standardauflösung des Fernsehens)*



3M

### SAMSUNG MBP200 PIKOPROJEKTOR

Dieser ebenfalls LED-basierte Projektor ist seit März 2009 erhältlich und verwendet eine miniaturisierte Version des Digital Light Projection (DLP) Chips von Texas Instruments. Licht einer weißen LED tritt zunächst durch ein sich schnell bewegendes Farbrad. Dann trifft es auf ein Feld aus Tausenden von Spiegeln. Jeder dieser Spiegel ist nur ein Fünftel so groß wie der Durchmesser eines menschlichen Haars und wird mehrere tausendmal pro Sekunde an- und abgeschaltet. Das an den Spiegeln reflektierte Licht erzeugt dann die einzelnen Pixel des Bilds.

*Auflösung: 480 x 320 Pixel*



SAMSUNG

Weitere Projektoren unterschiedlicher Technik stammen etwa von Toshiba, BenQ oder Aiptek. Ziel der Entwicklung ist nun vor allem auch eine Erhöhung der Projektionshelligkeit, so dass auch bei weniger abgedunkelten Räumen helle Bilder entstehen. Hierzu muss allerdings der Energiebedarf gesenkt werden, schließlich sind die Geräte als mobile Begleiter konzipiert.



TOSHIBA CORP.

fer besteht aus reinem kristallinem GaN, das aus einem größeren Kristall entlang der m-Ebene (siehe Kasten S. 35) geschnitten und anschließend poliert wird. Dioden, die auf solchen so genannten nichtpolaren Substraten hergestellt werden, sind konventionellen, polaren c-Ebenen-Dioden überlegen, weil die störenden inneren Felder in ihnen sehr viel schwächer ausfallen.

Außerdem weisen auf GaN gewachsene Dioden gegenüber ihren Pendanten auf Saphirbasis weniger Defekte in ihrer Kristallstruktur auf. Rekombinieren Elektronen und Löcher an solchen submikroskopischen Unregelmäßigkeiten oder an so genannten Versetzungen – dort stört eine Halbebene die regelmäßige Kristallstruktur –, geben sie statt Licht Wärme ab, die zudem noch abgeführt werden muss. In die aktiven Bereiche gelangen diese Defekte, indem sie sich während des Wachstumsprozesses einfach durch die Schichten hindurch ausbreiten. (Als Nichia und Sony erstmals versuchten, blaue Laserdioden herzustellen, führte genau dieser Effekt zu einer verheerenden Ausschussrate.)

### Endlich exzellente Substrate

Die Idee zur Verwendung nichtpolarer Substrate war Ende der 1990er Jahre aufgekommen. An ihrer Umsetzung versuchten sich dann mehrere Forschergruppen, auch DenBaars und Speck an der UCSB gehörten zu ihnen, im Jahr 2000. Die ersten auf diese Weise produzierten Bauelemente lieferten allerdings nur geringe Leistung, vor allem weil es noch an hochwertigen GaN-Substraten mangelte. Ab dem Jahr 2006 aber konnte die Mitsubishi Chemical Corporation, ein weiterer Tokioter Partner des UCSB-Zentrums, den Teams exzellente m-Ebenen-Substrate aus GaN liefern, die nur noch wenige Defekte aufwiesen. Geschnitten wurden sie aus kleinen GaN-Kristallen von der Größe eines Bleistiftspitzers, und ihre Seitenlänge betrug nicht einmal einen Zentimeter.

Ende 2006 erlaubte das verbesserte Ausgangsmaterial den Rohm- und UCSB-Forschern, sehr viel effizientere LEDs als bisher herzustellen, so dass sie sich – auf Basis derselben Substrate – Anfang 2007 an die Produktion der technisch anspruchsvolleren Laserdioden machen konnten. Und an jenem verregneten Samstagmorgen, dem 27. Januar 2007, stellte sich der Erfolg ein. Matthew Schmidt hatte gerade den letzten Fertigungsschritt vollzogen. Und als der UCSB-Doktorand mit der fertigen Diode ins benachbarte Testlabor ging, sie an eine Spannungsquelle anschloss und den Stromfluss langsam erhöhte, schoss plötzlich ein gebündelter Strahl

blauviolett Licht aus der Diode heraus. Als er seinen wissenschaftlichen Betreuer Den-Baars anrief, glaubte der zwar zunächst, Schmidt erlaube sich einen Scherz. Dann aber rief er rasch den Rest der Gruppe zusammen und holte auch Präsident Yang hinzu.

Die erste nichtpolare GaN-Laserdiode arbeitete bei einer Wellenlänge von 405 Nanometern, und die Stärke des durch sie hindurchfließenden Stroms war lediglich zweibis dreimal höher als in den von Nichia und Sony damals kommerziell vertriebenen blauen c-Ebenen-Laserdioden. Das bedeutete: Mit der geringfügig stärkeren Aufheizung würden die Forscher schon fertig werden.

Nach diesem Durchbruch, der wenige Tage später auch der Rohm Company gelang – mit Licht genau derselben Wellenlänge –, entschied die UCSB-Gruppe, die Arbeiten an polaren Dioden weitgehend einzustellen und sich auf nichtpolare Dioden zu konzentrieren. Außerdem wandten sich die Forscher einer auf semipolaren GaN-Substraten beruhenden Herstellungsstrategie zu. Dafür werden Wafer unter einem Winkel von rund 45 Grad zur Hauptachse eines Kristalls geschnitten (siehe Kasten S. 35). Dies führt zwar zu etwas stärkeren inneren Feldern als im Fall von Dioden auf nichtpolaren Substraten; ihren polaren Pendanten sind sie jedoch ebenfalls deutlich überlegen. Eine der beiden Geometrien, so die Hoffnung der Forscher, würde ihnen schließlich den Weg zu einer leistungsfähigen grünen Laserdiode ebnen. Obendrein ließen sich dann Hochleistungs-LEDs für noch größere Wellenlängen entwickeln.

Auch die Wissenschaftler der Rohm Company konzentrierten sich nun auf nichtpolare und semipolare Substrate. Um in Bereiche jenseits von Blau vorzudringen, reicht deren Verwendung allein allerdings nicht aus. Grüne Dioden erfordern nämlich einen höheren Indiumanteil in der aktiven InGaN-Schicht, gleichzeitig erhöht das zusätzliche Indium aber die inneren Spannungen. So vergrößert sich die Anzahl der Kristalldefekte, wodurch die Lichtausbeute sinkt und mehr überschüssige Wärme entsteht. Zwar funktionieren LEDs meist trotzdem, doch ihre Effizienz sinkt rapide, wenn man die Farbe von Blau zu Grün verschiebt. Laserdioden sind gegenüber Defekten sogar noch weit empfindlicher.

Während man die GaN-Schichten bei Temperaturen von 1000 Grad Celsius wachsen lässt, müssen die Temperaturen bei der Herstellung von InGaN-Schichten auf 700 Grad Celsius abgesenkt werden. Sonst lösen sich die Indiumatome von den anderen Atomen ab und bilden Regionen aus inhomogenen Indi-

umlegungen. Solche Inseln führen dazu, dass die Rekombinationsenergie für Elektron-Loch-Paare von Ort zu Ort variiert; das Emissionsspektrum wird also zu breitbandig, um kohärentes, monochromatisches Laserlicht zu erhalten. Wenn während des Wachstums der Halbleiterstruktur die Temperatur in der Reaktionskammer wieder erhöht wird, um die jeweils nächste GaN-Schicht auf einer InGaN-Schicht aufzutragen, dürfen also nicht zu viele dieser Inseln entstehen. Doch je höher der Indiumanteil, desto schwieriger wird diese Aufgabe und desto sorgfältiger müssen die Forscher vorgehen.

Im Fall polarer Dioden verschärfen sich die Probleme noch. Um den starken inneren Feldern entgegenzuwirken, arbeiten die Wissenschaftler mit immer dünneren aktiven InGaN-Schichten. Sie sind mittlerweile weniger als vier Nanometer dick, bestehen also aus gerade einmal 20 Atomlagen. Dadurch rücken Elektronen und Löcher näher zusammen, und es steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sie zusammentreffen und Licht abstrahlen.

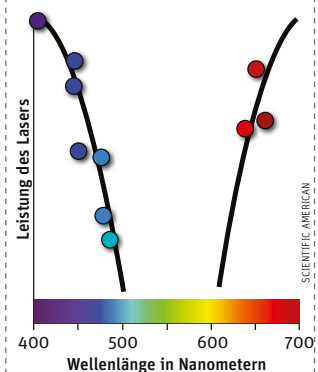
In nichtpolaren und semipolaren Dioden mit ihren nahezu vernachlässigbaren inneren Feldern können die aktiven InGaN-Schichten hingegen bis zu 20 Nanometer dick sein. Auch in solchen stabileren Schichten bilden sich zwar noch Indiuminseln. Das geschieht aber, so vermuten die Forscher, näher bei den Übergängen zu den umgebenden GaN-Schichten. Kann man die Inseln tatsächlich auf diese Zonen beschränken, stehen sie der Erzeugung eines ausreichend schmalbandigen Spektrums, wie es für einen Laser nötig ist, nicht allzu sehr im Weg. Zudem vereinfachen dickere und robustere aktive Schichten den Produktionsprozess. Dann können die Forscher auf zusätzliche Schichten verzichten, die ursprünglich dazu dienten, Photonen einzufangen und zu leiten.

### Ergebnisse folgen nun Schlag auf Schlag

Seit ihrem Durchbruch im Januar 2007 erweiterten die Arbeitsgruppen an der UCSB und bei Rohm stetig die Grenzen der neuen Technik und publizierten zahlreiche neue Ergebnisse. Im April 2007 beispielsweise berichtete die UCSB-Gruppe über eine nichtpolare LED, die blauviolett Licht mit einer Wellenlänge von 402 nm aussendet und dabei eine Quantenausbeute – das Verhältnis von abgestrahlten Photonen zu hineinströmenden Elektronen – von über 45 Prozent erreicht. Binnen nur einem Jahr hatten die Forscher die Ausbeute des Systems damit um den Faktor 100 erhöht. Einige Monate später berichtete das Team dann über eine semipolare grü-

## Binnen nur einem Jahr hatten die Forscher die Ausbeute um den Faktor 100 erhöht

### DAS PROBLEM DER GRÜNEN LÜCKE



Schon seit Langem stellen Wissenschaftler Halbleiterlaser her, die rotes Licht aussenden. Im vergangenen Jahrzehnt gelang es ihnen zudem, solche Laser für blaues und violett Licht zu entwickeln. Bei ihren Versuchen, auch in den grünen Bereich vorzustoßen, nahm die Laserleistung bisher aber meist drastisch ab.

ne LED mit einer Wellenlänge von 519 nm und einer Quantenausbeute von bis zu 20 Prozent. (Aus bislang unerklärlichen Gründen zeigen diese Dioden allerdings deutliche Blauverschiebungen.) Mittlerweile gelang es an der UCSB sogar, eine gelbe semipolare LED mit einer Wellenlänge von 563 nm und einer Quantenausbeute von über 13 Prozent herzustellen. Das war die erste effiziente gelbe LED, die auf GaN und seinen Legierungen basiert.

Unterdessen erreichten auch nichtpolare Laserdioden allmählich die Leistungsfähigkeit ihrer polaren Konkurrenz. Im Mai 2008 berichteten die Forscher der Rohm Company über eine nichtpolare Laserdiode, die Licht mit Wellenlängen von 481 nm aussendet und damit fast den damaligen Rekord polarer Dioden von 488 nm brach.



**Shuji Nakamura** (links) ist Professor für Materialwissenschaft und Direktor des Solid State Lighting and Energy Center an der University of California in Santa Barbara. 2006 erhielt der Halbleiterphysiker den Millennium Technology Prize für seine Arbeiten über blaue Laserdioden und LEDs. Als Honorarprofessor lehrte er 2004 auch an der Universität Bremen. **Michael Riordan**, der ursprünglich als Teilchenphysiker forschte, unterrichtet Physik- und Technikgeschichte an der Stanford University und an der University of California in Santa Cruz. Er ist zudem Mitverfasser populärwissenschaftlicher Bücher.

## Zähe Entwicklung

Bauteile im Labor herzustellen ist allerdings etwas ganz anderes, als sie in kommerziellen Mengen zu produzieren. Zu den größten Hindernissen für die Herstellung nichtpolarer und semipolarer GaN-Laserdioden und -LEDs – ob sie nun violett, blau, grün oder gelb strahlen – zählt weiterhin die eingeschränkte Verfügbarkeit von Substraten. Mitsubishi produziert derzeit aus kleinen Kristallen entlang der c-Ebene geschnittene GaN-Substrate mit einer Oberfläche von einem Quadratzentimeter, doch die Waferfläche muss, bei akzeptablem Preis, noch um das fast 20-Fache größer werden.

Die ökonomische Herstellung von Laserdioden erfordert, so erklärt Halbleiterexperte Robert Walker von der kalifornischen Beteiligungsgesellschaft Sierra Ventures, Substrate mit einem Durchmesser von mindestens fünf Zentimetern zu einem Preis von rund 2000 Dollar. Selbst um die einfacher herzustellenden LEDs zum Erfolg zu bringen, so Walker weiter, müssen die Substratpreise auf ein Zehntel fallen. Dann werden diese LEDs aber immer noch in Konkurrenz zu modernen blauen und grünen LEDs stehen, wie sie der britische Halbleiterspezialist Cree Research (ebenfalls ein Partner des UCSB-Zentrums), der auf Substrate aus Siliziumkarbid setzt, bereits im Jahr 2007 eingeführt hatte.

Mitsubishi bemüht sich derzeit darum, die Herstellung nichtpolarer GaN-Substrate zu kommerzialisieren. Diesen Weg müsse das Unternehmen aber langsam und mit großer Sorgfalt beschreiten, erklärt Mitsubishi-Forscher Kenji Fujito, der die Methoden für das Wachstum solcher Substrate entwickelt hat. Derzeit kann das Unternehmen gerade ausreichend nichtpolare und semipolare GaN-Sub-

strate herstellen, um den Bedarf der Forscher von Rohm und UCSB abzudecken. Und auch Fünf-Zentimeter-Wafer sind noch nicht verfügbar. Den breiten Markt, so vermutet Halbleiterexperte Walker, werden die Hersteller nichtpolarer Substrate wohl erst in einigen Jahren beliefern können.

Vorerst jedoch treiben die Forschungslabors die Entwicklung weiter voran, in immer höherem Tempo. Den Wissenschaftlern von Nichia Chemical Industries gelang es im April 2009, GaN-Laserdioden auf Basis von polaren c-Ebenen-Substraten herzustellen, die mit einer Wellenlänge von 515 nm strahlten und eine Ausgangsleistung von fünf Milliwatt besaßen. Damit dürften sie diese Technologie aber bereits bis nahe an ihre Grenze getrieben haben. Auch der Regensburger Firma Osram Opto Semiconductors gelang es, eine 515-nm-Diode zu bauen. Sie basiert auf Substraten desselben Typs, arbeitet gepulst und leistet dank einer großen Oberfläche bereits 50 Milliwatt. Allerdings setzt die Laseremission erst ab einer relativ hohen Stromdichte ein, zudem kommt es leicht zur Überhitzung der Diode.

Den tatsächlichen Durchbruch konnte indessen die Firma Sumitomo vermeiden: Auf einem semipolaren GaN-Substrat (einem anderen als dem an der UCSB verwendeten) hatten sie im Juli 2009 eine GaN/InGaN-Laserdiode aufgebaut, die Licht mit einer Wellenlänge von 531 nm emittierte – genau im Zentrum des grünen Spektralbereichs. Damit wurde die grüne Lücke noch im Jahr 2009 geschlossen, so wie wir dies bereits in »Scientific American« im April letzten Jahres vorhergesagt hatten.

Unterdessen arbeiten aber auch wir mit Hochdruck weiter. Das UCSB-Team hatte schon im September 2008 über stimulierte Emission mit Wellenlängen von 480 nm (blaugrün oder cyan) und 514 nm (grün) in nichtpolaren und semipolaren Dioden berichtet, die durch das Licht eines zweiten Lasers optisch gepumpt wurden. Und jüngst hat das UCSB-Team unter Leitung von Hiroaki Ohta, der zuvor bei Rohm arbeitete, eine grüne Laserdiode auf Basis eines semipolaren GaN-Substrats hergestellt, die bei 506 nm emittiert. Einer ihrer Vorteile: Die Schichtstruktur ist wesentlich weniger komplex als im Fall des Sumitomo-Produkts, so dass sich diese Diode viel leichter in größeren Stückzahlen herstellen lässt.

Auf dem Weg zum grünen Laser wurde im letzten Jahr ein entscheidender Durchbruch erreicht, doch das Rennen geht weiter: Nun geht es darum, in einem Spektrum von Möglichkeiten die besten zu identifizieren. <

**DenBaars, S., Nakamura, S., Speck, J.:** Non-Polar GaN Reaches Tipping Point. In: *Compound Semiconductor* 13(5), S. 21–23, 2007.

**Nakamura, S. et al.:** *The Blue Laser Diode: The Complete Story*. Springer, Heidelberg, 2. Auflage 2000.

**Metzger, R.:** New GaN Faces Offer Brighter Emitters. In: *Compound Semiconductor* 12(7), S. 20–22, 2006.

**Tyagi, A. et al.:** AlGaIn-Cladding Free Green Semipolar GaN Based Laser Diode with a Lasing Wavelength of 506.4 nm. In: *Applied Physics Express* 3, S. 0110022, 2010.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1017404](http://www.spektrum.de/artikel/1017404).

# Der Blumen im Winter sah

Beim Wachsen von Eisblumen am Fenster wirken Zufall und Notwendigkeit zusammen.

*Doch an den Fensterscheiben, Wer malte die Blätter da?  
Ihr lachst wohl über den Träumer, Der Blumen im Winter sah?*

Wilhelm Müller (1794–1827)

Von H. Joachim Schlichting

Heute muss man sie wohl als bedrohte Art ansehen, denn ihre größten Feinde – Zentralheizungen und wärmedämmende Doppelscheiben – haben sich weithin etabliert. In früheren Wintern jedoch gehörten Eisblumen am Fenster zu einer alltäglichen Erscheinung: »Es war ein ziemlich kalter Tag und draußen lag fußhoher Schnee. Drinnen aber war es behaglich ... die Wanduhr ging in starkem Schlag und der Kachelofen tat das Seine ... während Lina weitab an dem ganz mit Eisblumen überdeckten Fenster saß und sich ein Guckloch gepustet hatte, durch das sie nun bequem sehen konnte, was auf der Straße vorging.« (Theodor Fontane, Unterm Birnbaum, 1885).

Zuvor war, davon dürfen wir ausgehen, die Temperatur der Glasscheibe allmählich immer tiefer gesunken. Zunächst unter den Taupunkt. Ab diesem Zeitpunkt ist mehr Wasserdampf in der Luft, als diese fassen kann, so dass er sich verflüssigt und kondensiert, sich also in Form winziger Tröpfchen an die Scheibe anlagert. Sobald deren Temperatur nun auch den Gefrierpunkt des Wassers unterschreitet – um mindestens ein bis zwei Grad –, kristallisieren sie schließlich zu Eis. Manchmal kommt es auch gar nicht erst zum Zwischenschritt des Verflüssigens. Denn unter bestimmten Bedingungen geht Wasserdampf auf direktem Weg in Eis über, er resublimiert.

Der Ursprung der Eisblumen liegt in winzigen Kristallen mit einer für Wassermoleküle charakteristischen sechseckigen Struktur. Sie entstehen an Kondensationskeimen, etwa Schmutzpartikeln, an denen sich Tröpfchen beziehungsweise Kristalle spontan bilden können. Ihre Form beeinflusst das Kristallwachstum zunächst in zufälliger Weise, bald aber kommt die Notwendigkeit hinzu. Denn wo die Kristallisation stattfindet, wird auch Wärme abgegeben, und zwar ganz schön viel.

Es ist dieselbe Menge, die man Eis zum Auftauen zuführen muss – und jeder weiß, wie lange sich Eisstücke im Erfrischungsgetränk halten. Das Kristallwachstum käme sogar zum Stillstand, würde die frei werdende Wärme nicht schnell genug abtransportiert.



FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Das heißt aber auch: Der Kristall wächst bevorzugt dorthin, wo die Wärme am besten abgegeben werden kann, nämlich weg von seinem Ursprung. Es bilden sich darum exponierte Spitzen, an deren mitwachsenden Flanken die Wahrscheinlichkeit für weitere Anlagerungen ebenfalls steigt. Diese Nebenzweige wachsen ihrerseits weder entlang der Hauptspitze noch im rechten Winkel dazu, sondern suchen stattdessen einen »schrägen« Kompromiss. Nur so können auch sie die entstehende Wärme optimal abgeben.

Allmählich entsteht ein farnartiges Gebilde, das ganz zum Schluss, wenn auch die Zwischenräume gefrieren, eine blattartige Form gewinnt. Aus dem Zusammenwirken von Zufall und Notwendigkeit sind Strukturen entstanden, wie wir sie auch bei (biologischen) Blättern und Blumen beobachten können: Sie ähneln einander zwar, sind aber nie identisch.

Erfahrungsgemäß bilden sich die schönsten Formen bei einer Scheibentemperatur von etwa minus zwei Grad Celsius. Wirkliche Vielfalt entfaltet sich zudem nur, wenn das Fenster leicht verschmutzt ist und genügend Kondensationskeime vorhanden sind. Sauberkeit ist für Schönheit also keine Voraussetzung. ◁

**Zufall und Notwendigkeit wirken zusammen, wenn Eisblumen auf einer Fensterscheibe wachsen (oben). Auch Bodenfliesen – am besten leicht verschmutzt – bieten die Voraussetzungen für vielfältige Formen (unten).**



**H. Joachim Schlichting** ist Professor und Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster.

# WIRKVERSTÄRKER für Impfstoffe

Neue Erkenntnisse über das Immunsystem beleben das Interesse an Zusatzstoffen wieder, die existierende Impfstoffe verstärken und neuartige erst ermöglichen.

Von Nathalie Garçon und Michel Goldman

**R**eihen eiserner Lungen mit polio-  
gelähmten Kindern, embryonale  
Missbildungen durch Röteln in der  
Schwangerschaft oder die fürchter-  
lichen Hustenattacken, wenn ein Baby mit  
Keuchhusten ringt – manch einer denkt noch  
mit Schrecken an die Zeit, als solches Leid  
nicht durch geeignete Impfstoffe zu verhin-  
dern war. In Industrienationen sind die jün-  
geren Generationen glücklicherweise mit Vak-  
zinen gegen diese und einige weitere Geiseln  
der Menschheit aufgewachsen und daher  
praktisch nicht mehr damit konfrontiert.

Mit fast keiner anderen Maßnahme lässt  
sich so erfolgreich und kosteneffektiv Infek-  
tionskrankheiten vorbeugen wie mit dem  
Impfen; es wird nur noch übertroffen von der  
hygienischen Aufbereitung von Trinkwasser  
einschließlich sanitärer Maßnahmen beim Ab-  
wasser. Seit der britische Arzt Edward Jenner  
vor über 200 Jahren erstmals seine Pocken-  
immunisierung praktizierte, haben Impfstoffe  
Millionen von Menschen vor einem frühen  
Tod oder folgenschweren Erkrankungen be-  
wahrt. Die Pocken sind seit 1979 sogar welt-  
weit in der Bevölkerung ausgerottet. Kinder-  
lähmung und Masern sollen nun folgen – und  
eines Tages vielleicht sogar die Malaria. Al-  
lerdings bedarf es für eine wirksame Immuni-  
sierung gegen die Tropenseuche innovativer  
Ansätze.

Das Grundprinzip einer Impfung besteht  
vereinfacht gesagt darin, dem Immunsys-  
tem einen Krankheitserreger in ungefährlicher  
Form und Menge zu präsentieren. Unser Ab-  
wehrsystem lernt dadurch, das Feindbild zu  
erkennen und für später gewappnet zu sein:  
Wenn es dem Erreger erneut begegnet, wird  
es ihn sofort schlagkräftig bekämpfen. Kon-  
ventionelle Impfstoffe wirken aber leider nicht  
bei allen Menschen – und man kann bisher  
auch längst nicht allen übertragbaren Erkran-  
kungen auf diese Weise vorbeugen. Zum Bei-

spiel reagiert das Immunsystem im Alter teil-  
weise nicht stark genug auf konventionelle  
Vakzine. Zudem können bestimmte Erreger  
die speziellen Verteidigungsmechanismen un-  
terlaufen, die durch eine Impfung aufgebaut  
werden. Daher gibt es auch noch keine ver-  
lässliche Immunisierung etwa gegen Malaria,  
Tuberkulose oder Aids.

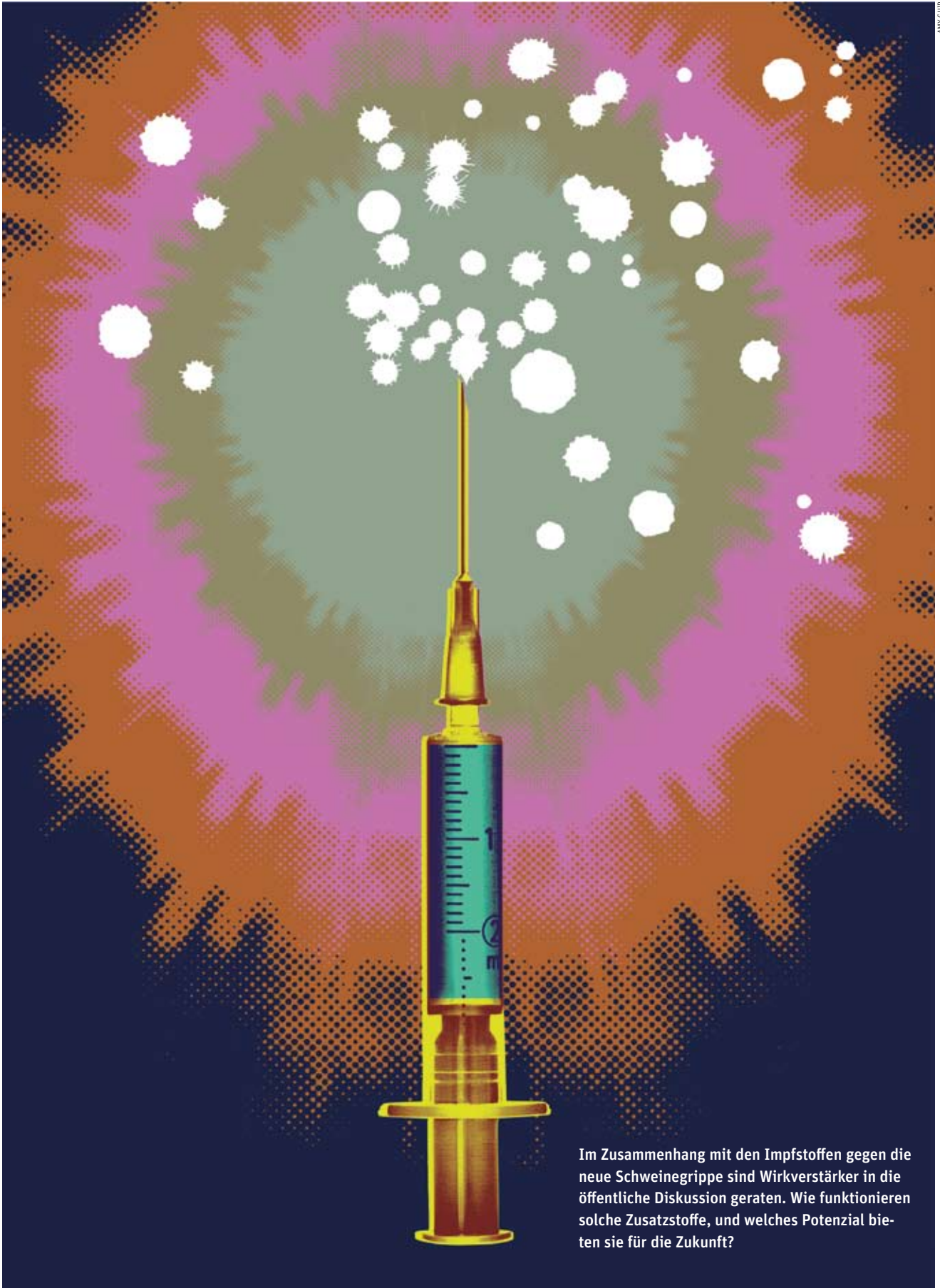
Das Prinzip der Impfung ließe sich sogar  
auf verschiedene nicht übertragbare Erkran-  
kungen ausdehnen, darunter Krebs, Allergien  
oder die Alzheimerdemenz. Hier müsste das  
Immunsystem allerdings dazu gebracht wer-  
den, auf Strukturen anzusprechen, die es nor-  
malerweise kaum oder gar nicht zur Kenntnis  
nimmt.

In all diesen Fällen könnten Immunstimu-  
latoren dem Körper helfen, das Impfmateri-  
al zu erkennen und darauf zu reagieren. Solche  
Zusatzstoffe bezeichnet man als Adjuvanzien,  
abgeleitet vom lateinischen *adjuvare* für hel-  
fen. Ein paar kennt man seit über 100 Jahren.  
Genutzt werden die Substanzen als Wirkver-  
stärker für Impfstoffe und in der Krebsthera-  
pie. Wie die Mechanismen der Impfung selbst  
waren die genauen Wechselwirkungen zwi-  
schen Adjuvanzien und Abwehrzellen bis vor  
einer Zeit nicht hinreichend geklärt. Die  
enormen Fortschritte in der Immunologie,  
vor allem im letzten Jahrzehnt, verschafften  
jedoch neue Einblicke in die Wirkweise. Da-  
durch eröffneten sich Wege zur Konzipierung  
von Impfstoffen, die auf bestimmte Zielgrup-  
pen und Krankheitserreger speziell zuge-  
schnitten sind. Dank dem neuen Instrumen-  
tarium werden inzwischen früher undenkbar  
Vakzine entwickelt und alte Impfstoffe effek-  
tiver und effizienter gemacht.

Was natürliche Infektionen anbelangt, so  
haben viele zumindest einen positiven Effekt:  
Der Patient ist nach überstandener Erkran-  
kung lebenslang gegen den Erreger immun.  
Ein idealer Impfstoff würde ebenfalls einen  
solchen Langzeitschutz bieten, am besten  
schon nach Injektion einer einzigen Dosis.

## In Kürze

- ▶ **Schutzimpfungen** wären eine noch bessere Vorbeugung, würden sie bei mehr Menschen und gegen ein breiteres Spektrum von Krankheiten wirken.
- ▶ Moderne immunologische Erkenntnisse offenbaren, wie **neue Klassen von Wirkverstärkern für Impfstoffe** – so genannte Adjuvanzien – dazu beitragen können, zielgenau Vakzine für bestimmte Bevölkerungsgruppen und gegen bestimmte Krankheitserreger zu entwickeln.
- ▶ Mit **innovativen Adjuvanzien** lassen sich verfügbare Impfstoffe wirksamer machen und sogar Vakzine konzipieren, die bisher nicht realisierbar waren.

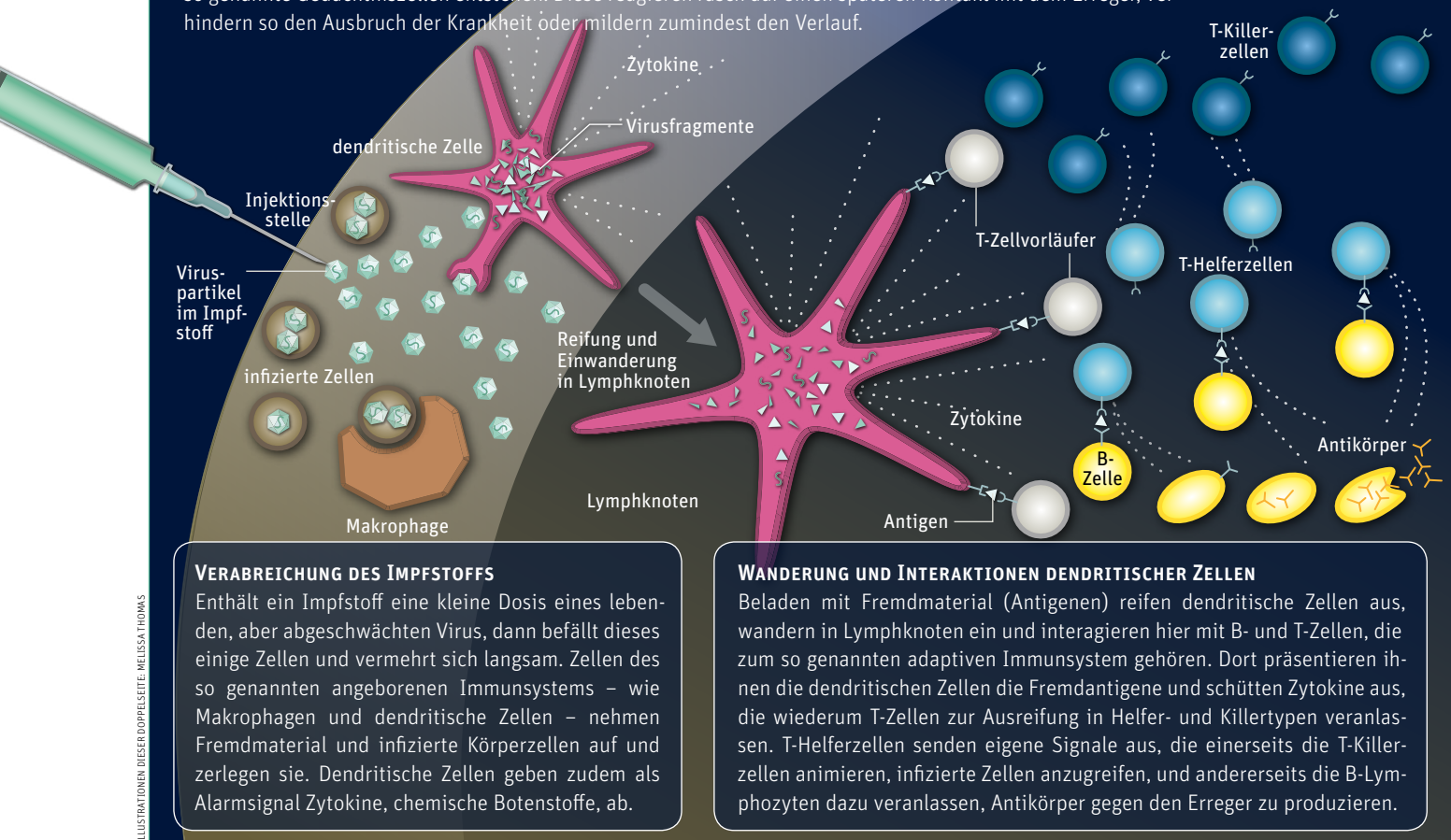


AMY CLIP

Im Zusammenhang mit den Impfstoffen gegen die neue Schweinegrippe sind Wirkverstärker in die öffentliche Diskussion geraten. Wie funktionieren solche Zusatzstoffe, und welches Potenzial bieten sie für die Zukunft?

## IMPfstoffe IMITIEREN INFektionen – UM SIE ZU VERHINDERN

Bei Impfungen gegen Infektionskrankheiten werden abgetötete oder abgeschwächte Krankheitserreger beziehungsweise deren Bestandteile in den Körper eingebracht. Das ruft eine Immunantwort hervor, in deren Verlauf so genannte Gedächtniszellen entstehen. Diese reagieren rasch auf einen späteren Kontakt mit dem Erreger, verhindern so den Ausbruch der Krankheit oder mildern zumindest den Verlauf.



ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: MELISSA THOMAS

Es dauert bei einer Erstinfektion **mehrere Tage**, bis das Immunsystem seine volle Kampfkraft erreicht

Vielleicht würde er sogar vor Varianten eines wandlungsfähigen Erregers schützen, etwa im Fall eines sich stets weiterentwickelnden Grippevirus. Um dies zu erreichen, muss der Impfstoff eine Vielzahl verschiedener Abwehrzellen aktivieren, nämlich alle, die auch bei einer echten Infektion auf den Plan treten.

Gelangt ein Krankheitserreger zum ersten Mal in den Körper, trifft er sofort auf die vorderste Verteidigungslinie: Zellen des so genannten angeborenen Immunsystems, die im gesamten Organismus patrouillieren und nach Eindringlingen suchen. Zu diesen Wächtern zählen Makrophagen (große Fresszellen) und dendritische Zellen (bezeichnet nach ihren Ausläufern). Sie verschlingen und zerstören Krankheitserreger beziehungsweise befallene Körperzellen. Vereinnahmtes Material zerlegen sie und präsentieren Fragmente davon als so genannte Antigene auf ihrer Oberfläche. Der Zweck des Ganzen: geeignete B- und T-Zellen – Mitglieder des adaptiven Immunsystems – gezielt aufmerksam zu machen. Diese weißen Blutkörperchen aus der Klasse der

Lymphozyten erkennen Merkmale des eingedrungenen Erregers, sofern ihr individuelles Sensormolekül dazu passt. Gleichzeitig entlassen die präsentierenden Wächter Zytokine: chemische Signalstoffe, die eine Entzündungsreaktion hervorrufen und weitere T- und B-Zellen an den Ort des Geschehens lenken.

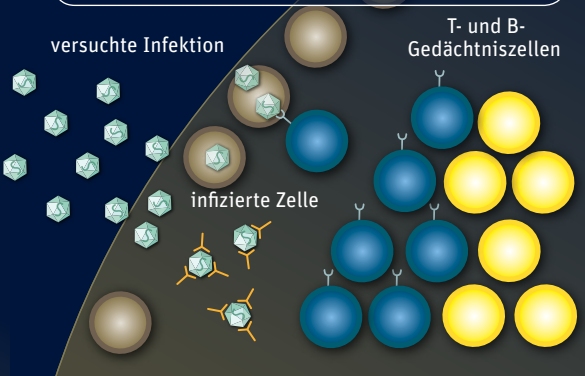
Es dauert bei einer Erstinfektion mehrere Tage, bis durch die Interaktion der Beteiligten eine wirkungsvolle Kampfkraft erreicht ist. Denn die zunächst wenigen passenden Immunzellen müssen sich noch vermehren und zudem heranreifen. Die reifen B-Lymphozyten geben dann Antikörper ab, während T-Killerzellen gezielt Körperzellen zerstören, die von dem Erreger befallen sind. Nach erfolgreicher Abwehr der Infektion überdauert ein Teil der spezifischen, angepassten B- und T-Lymphozyten im Körper als Gedächtniszellen – manchmal für Jahrzehnte –, stets bereit, eine erneute Infektion mit den gleichen Erregern im Keim zu ersticken.

Auch Impfungen setzen diesen Prozess in Gang, nur dass dabei der Krankheitserreger



**DAS IMMUNOLOGISCHE GEDÄCHTNIS**

Einige B- und T-Zellen werden zu langlebigen Gedächtniszellen. Sie dienen als Wächter, die bei künftigen Infektionen sofort reagieren können.



in abgetöteter oder geschwächter Version beziehungsweise in Form gewisser Teile dem Immunsystem dargeboten wird (siehe Kasten oben). Nicht allen Impfstoffen gelingt es, eine voll ausgeprägte Immunantwort hervorzurufen, doch lassen sich einige Krankheitserreger schon allein durch Antikörper eindämmen, so dass man ohne die Aktivierung von T-Killerzellen auskommt.

Bei der Konzeption eines Impfstoffs ist Verschiedenes zu berücksichtigen, unter anderem die Art des Erregers und wie er die Krankheit hervorruft. Als Impfmateriale kommen standardmäßig in Frage: lebende, aber abgeschwächte – so genannte attenuierte – Bakterien oder Viren, abgetötete oder inaktivierte komplette Erreger oder nur einzelne, gereinigte Moleküle davon (siehe Kasten rechts). Jede dieser Optionen hat ihre Vor- und Nachteile.

**Höchst problematische Erreger**

Die abgeschwächten Erreger in Lebendimpfstoffen vermehren sich im Körper, wenn auch sehr langsam. Dadurch konfrontieren sie das Immunsystem einige Zeit lang mit ihren Antigenen und rufen so eine starke und anhaltende Immunantwort hervor. Da es sich aber bei attenuierten Stämmen trotz allem um infektiöses Material handelt, eignen sich Lebendimpfstoffe nicht für Menschen mit einem beeinträchtigten Immunsystem, das möglicherweise nicht damit fertig wird. Bei attenuierten Viren besteht zudem das Risiko, dass sie in eine gefährliche Form zurückmutieren. Im Fall tödlicher Erreger wie HIV wäre das fatal.

Häufiger enthalten Impfstoffe komplette Viruspartikel, die beispielsweise durch Erhitzen inaktiviert wurden. Diese »abgetöteten«

Erreger vermehren sich nicht mehr, ihre Proteine sind jedoch noch relativ intakt und werden von Immunzellen gut erkannt. Allerdings sind hier nach der Grundimmunisierung in gewissen Abständen Auffrischungsimpfungen erforderlich.

Eine dritte gängige Form stellen die so genannten Subunitvakzine dar, die bestimmte isolierte Untereinheiten eines Erregers enthalten. Statt das Material aus dem Mikroorganismus selbst zu gewinnen, kann man es auch rekombinant, also mit Hilfe gentechnisch veränderter Zellen herstellen. Da jedoch solche Impfstoffe nur einen Bestandteil des Krankheitserregers enthalten, gelingt es ihnen nicht immer, die Alarmsignale auszulösen, die für eine optimale Immunantwort nötig sind.

Welche entscheidende Rolle antigenpräsentierende Zellen, insbesondere die dendritischen Zellen, in diesem Kontext spielen, wurde erst in den letzten Jahren erkannt. Es gilt nämlich für die Akteure, das Gefahrenpotenzial eines Erregers zu erfassen und die angemessene Antwort darauf zu bestimmen. Wenn dendritische Zellen am Ort der Infektion oder Impfung ihre Antigenfracht aufgenommen haben, reifen sie und wandern in nahe gelegene Lymphknoten ein. Dort leiten sie über Signalstoffe und zelluläre Kontakte letztlich die Ausbildung einer schützenden B- und T-Zellantwort ein (siehe Kasten oben). Ohne die für komplette Mikroorganismen typischen Gefahrenindikatoren reifen und wandern dendritische Zellen aber nicht richtig. Subunitimpfstoffe benötigen daher häufig Adjuvanzien, um diese Zellen in geeigneter Weise zu alarmieren.

Die meisten der in den USA benutzten Impfstoffe enthalten eines der ältesten Adjuvanzien, nämlich unlösliche Aluminiumsalze. Seit den 1930er Jahren als Wirkverstärker in Gebrauch, sind sie zwar vielfach erprobt – genügen aber nicht, wenn ein Impfstoff mehr als eine reine Antikörperreaktion auslösen soll, um vor einer Erkrankung effektiv zu schützen.

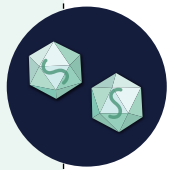
Verschiedene Erreger, die lebensbedrohliche Infektionen wie Aids, Hepatitis C, Tuberkulose oder Malaria hervorrufen, können dem Angriff von Antikörpern entgehen. Ein hier wirksames Vakzin müsste daher eine starke T-Zellantwort anregen. Tatsächlich hat auch der Kampf gegen diese höchst problematischen Erreger das Interesse an Impfstoffadjuvanzien wiederbelebt, während er gleichzeitig Durchbrüche beim Verständnis des Immunsystems förderte, was umgekehrt zu besseren Adjuvanzien führte.

Schon in den achtziger Jahren des 19. Jahrhunderts – um die Zeit, als Louis Pasteur den Speichel eines tollwütigen Hundes zur Her-

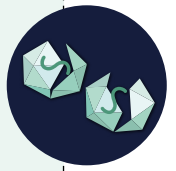
Gewisse alterprobt Adjuvanzien **genügen leider nicht**, wenn ein Impfstoff mehr als eine reine Antikörperreaktion auslösen soll

**ÜBLICHE IMPFSTOFFTYPEN**

**ATTENUIERTE VAKZINE:** lebende, aber abgeschwächte Viren oder Bakterien. Deren stark gebremste Vermehrung verlängert die Kontaktzeit der Immunzellen mit den Antigenen des Erregers, ohne dass die Krankheit ausbricht.



**TOTVAKZINE:** vollständige, aber abgetötete Erreger, die sich nicht vermehren und keine Krankheit hervorrufen können



**SUBUNITVAKZINE:** Isolierte Bestandteile des Erregers, wie Hüllproteine oder genetisches Material, dienen als Antigen, das die Immunzellen erkennen.



stellung des ersten Tollwutimpfstoffs verwendete – erfand ein New Yorker Chirurg, ohne es zu wissen, ein Verfahren zur allgemeinen Verstärkung der Immunantwort. Man darf dies als den ersten Einsatz eines Immunadjuvans betrachten. William B. Coley vom New York Cancer Hospital war damals fasziniert von Berichten über Krebspatienten, deren Tumoren sich nach einer Infektion mit Bakterien der Spezies *Streptococcus pyogenes* zurückbildeten oder ganz verschwanden. Er vermutete, dass die Immunreaktion auf die Bakterien zugleich die Fähigkeit des Körpers zur Bekämpfung der Tumoren verstärkte. Daher begann er 1881 Krebspatienten zunächst lebende Streptokokken und später Infusionen aus abgetöteten Bakterien zu verabreichen. Mit dieser Therapie, die als »Coleys Toxine« (Coleys Giftstoffe) bekannt wurde, erzielte er in einigen Fällen eine beeindruckende Rückbildung von Tumoren. Wie sie genau funktionierte, blieb jedoch lange verborgen.

Trotz allem bauten Forscher im frühen 20. Jahrhundert weiter auf der Hypothese auf, dass Bakterien und andere Substanzen die natürliche Immunantwort des Menschen verstärken könnten. Der französische Tiermediziner Gaston Ramon und der englische Immunologe Alexander T. Glenny experimentierten mit so unterschiedlichen Substanzen wie Tapioka (Stärke aus Maniokknollen) und Aluminiumhydroxid, um die Wirksamkeit von Diphtherie- und Tetanusimpfstoffen bei Tieren zu erhöhen. In den 1930er Jahren fanden andere Wissenschaftler heraus, dass manche Antigene stärkere Immunreaktionen hervorrufen, wenn man sie in Öl-in-Wasser-Emulsionen suspendiert. Als Adjuvantien getestet wurden auch Bakterienbestandteile wie das Lipopolysaccharid (LPS) – es ist eine typische Komponente in der Zellwand bestimmter Bakteriengruppen. Viele dieser Zusätze hatten zwar den gewünschten Effekt, doch machten negative Nebenwirkungen, darunter heftige Entzündungen, ihren Einsatz unkalkulierbar.

In der Folge schwand das Interesse an Adjuvantien, bis in den 1980er Jahren ein neues lebensbedrohliches Virus auftauchte: der Aids-erreger HIV. Seine Ausbreitung war Anlass, alle nur denkbaren Strategien zu seiner Bekämpfung zu prüfen. Mit der klassischen Impfung war ihm nicht beizukommen. Zum einen befällt HIV bevorzugt T-Lymphozyten und beeinträchtigt dadurch das adaptive Immunsystem, zum anderen wandelt sich das Virus fortwährend und entzieht sich immer wieder dem Angriff schützender Antikörper.

Impfstoffforscher, die mit rekombinanten HIV-Proteinen arbeiteten, mussten auf irgendeine Weise das Immunsystem in die Lage

## WIRKUNG VON ADJUVANZIEN

**Spezielle Zusatzstoffe verstärken** die Immunantwort auf Impfstoffantigene über verschiedene Mechanismen. Den größten Effekt erzielen sie wahrscheinlich aber über die Aktivierung von Rezeptoren, mit denen die dendritischen Zellen Krankheitserreger erkennen. Abhängig von der Art der wahrgenommenen Bedrohung veranlassen diese Abwehrzellen andere Immunzellen zu unterschiedlichen Reaktionen. Impfstoffentwickler können derartiges Wissen nutzen, um gezielt Adjuvantien auszuwählen, die nicht nur die Immunantwort allgemein verstärken, sondern dabei speziell die gewünschten Reaktionen fördern.

versetzen, auf die angebotenen Antigene effektiv zu reagieren. Dazu experimentierten sie mit bereits bekannten Adjuvantien in unterschiedlichen Kombinationen, wandelten aber auch alte zu neuen Impfstoffverstärkern ab.

### Durchbruch bei Rezeptoren

Den vielleicht größten Durchbruch für das Verständnis der Wirkweise brachte 1997 die Entdeckung spezieller Rezeptoren, mit denen die dendritischen Zellen Kategorien von Krankheitserregern erkennen können. Wie sich zeigte, kommen Moleküle jener Klasse auf oder in solchen Abwehrzellen vor und erfassen grundlegende Bestandteile von Mikroorganismen, wie etwa das Protein Flagellin in den Geißeln vieler Bakterien. Diese Detektoren melden der dendritischen Zelle nicht nur Gefahr und aktivieren sie, sondern informieren sie zugleich über die Art der Bedrohung. Unter den neu entdeckten Schlüssel-molekülen ist besonders die Gruppe der so genannten TLRs, nach dem Englischen für *Toll-like receptors*, von zentraler Bedeutung für das Verhalten dendritischer Zellen (siehe SdW 8/2005, S. 68).

Bisher wurden in der Gruppe zehn funktionsfähige Rezeptoren identifiziert. Jeder von ihnen erkennt ein anderes strukturelles Grundmotiv von Viren oder Bakterien (Kasten oben), daher auch die Bezeichnung Mustererkennungsrezeptoren. So detektiert TLR-4 beispielsweise LPS, während TLR-7 die für einige Viren typische Einzelstrang-RNA erfasst. Nach diesen Entdeckungen war klar, weshalb Bakterienextrakte als immunstimulierende Adjuvantien agieren: Sie versetzen via TLRs dendritische Zellen in den Alarmzustand. Die Aufklärung jener Mechanismen bedeutete für die Impfstoffentwickler, dass sie definierte Adjuvantien

### ALTE ADJUVANZIEN



Aluminiumsalz

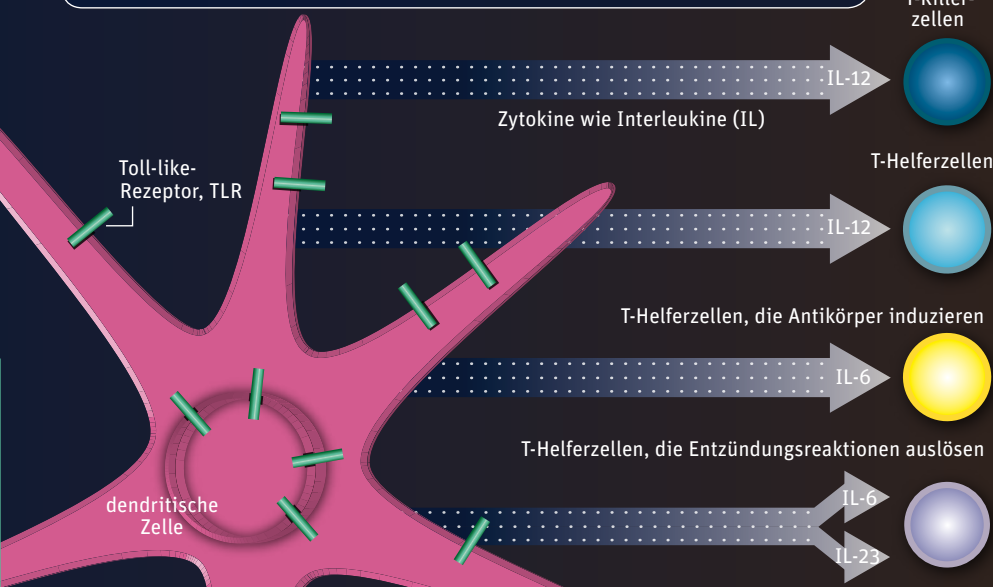
PHOTO RESEARCHERS, INC. / ADAM HARE DAVIS

#### WIRKVERSTÄRKER IN ZUGELASSENEN IMPFSTOFFEN

- Aluminiumsalze
- Emulsionen (Öl in Wasser und Wasser in Öl)
- Liposomen (kleinste Lipidbläschen)
- Virosomen (künstliche Lipidmembranen mit viralen Proteinen)
- Vitamin E
- Monophosphoryl-Lipid A (MPL), ein gereinigtes Derivat bakterieller Lipopolysaccharide

## ERKENNUNG VON KRANKHEITSERREGERN

Dendritische Zellen besitzen ein Sortiment so genannter Toll-like-Rezeptoren (TLRs), die jeweils typische Bestandteile einer Kategorie von Krankheitserregern erkennen – zum Beispiel bakterielle Proteine oder charakteristische Sequenzmotive viraler Gene (siehe Auflistung rechts). Adjuvantien, die einen oder mehrere TLRs aktivieren, können verschiedene natürliche Bedrohungen simulieren.



## TLR NATÜRLICHER AUSLÖSER

- | TLR   | NATÜRLICHER AUSLÖSER   |
|-------|--|
| 1 2 6 | bakterielle Lipoproteine   |
| 3     | Doppelstrang-RNA   |
| 4     | Lipopolysaccharide (LPS), Hitzeschockproteine, Respiratorisches Syncytialvirus (RSV) |
| 5     | bakterielles Flagellin-Protein   |
| 7 8   | Einzelstrang-RNA   |
| 9     | bakterielle CpG-DNA  |
| 10    | unbekannt  |
| 11    | bakterielles Profilin-Protein  |

## DENDRITISCHE ZELLEN ALS LENKER

Das Signalverhalten dendritischer Zellen entscheidet, zu was T- und B-Lymphozyten ausreifen und wie sie sich vermehren werden. So begünstigt beispielsweise das Zytokin Interleukin-12 die Entwicklung von T-Killerzellen und einem T-Helferzelltyp, die beide im Kampf gegen intrazelluläre Erreger gebraucht werden. IL-6 hingegen fördert einen T-Helferzelltyp, der B-Lymphozyten zur Antikörperproduktion anregt. Gemeinsam mit IL-23 stimuliert es einen weiteren Subtyp der Helferzellen, der dann Entzündungsreaktionen begünstigt. Auch Interleukine werden auf ihre Tauglichkeit als Adjuvantien untersucht.

MELISSA THOMAS

einzelnen oder in Kombination einsetzen können, um selektiv bestimmte TLRs anzusteuern.

In den Forschungsprojekten, die schon in den achtziger und neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts begonnen hatten, ging es darum, natürliche wie auch modifizierte oder vollsynthetische Adjuvantien zu identifizieren und daraufhin zu prüfen, ob sie sich vielleicht zur Modulation der Immunantwort gegen bestimmte Erreger oder bei bestimmten Personengruppen eignen. Dazu gehören neben herkömmlichen Adjuvantien wie Aluminiumhydroxid auch Öl-in-Wasser-Emulsionen, etwa MF59 und AS03. Diese letzten beiden sind in Europa als Zusatz in bestimmten Influenzaimpfstoffen zugelassen. Als Adjuvant im weiteren Sinn kann man überdies jegliche Substanz betrachten, die Ausmaß und Qualität der Immunantwort auf einen Impfstoff optimiert, indem sie dendritische Zellen oder andere Immunzellen beeinflusst (siehe Kästen links und rechts).

Experimentelle Untersuchungen sowie die Fortschritte der Immunologie ermöglichten es den Wissenschaftlern zum einen, toxisch wirkende Komponenten früherer Adjuvantien zu eliminieren. Zum anderen konnten die Forscher durch abgestimmte Mischung mehrerer Zusatzstoffe deren Gesamtwirkung optimieren und so die gewünschte Immunantwort hervorrufen. Beispielsweise entstand aus dem bakteriellen LPS ein neues Adjuvans namens Monophosphoryl-Lipid A (MPL), und zwar durch Abtrennung toxischer Bestandteile und

durch Aufreinigung eines bestimmten Lipids. MPL ist ein Adjuvans, das wie LPS den Rezeptor TLR-4 stimuliert, jedoch ohne die unerwünschten Nebenwirkungen des Ausgangsmaterials. Enthalten ist es in einigen bereits auf dem Markt befindlichen Impfstoffen, außerdem in mehreren Vakzinenkandidaten, die in fortgeschrittenen klinischen Studien mit bisher günstigen Ergebnissen geprüft werden (siehe Kasten S. 46).

Dazu gehört auch ein experimenteller Impfstoff gegen die Malaria, den eine von uns (Garçon) als Leiterin des Vaccine Adjuvant Center von GlaxoSmithKline Biologicals in Belgien mitentwickelt hat. Die Malaria, eine Infektion mit einzelligen Parasiten der Gattung *Plasmodium*, ist eine schwer wiegende Erkrankung, an der jährlich mehr als eine Million Menschen sterben, meist Kinder im Alter unter fünf Jahren. Der Parasit ist in der Lage, sich in Zellen des infizierten Menschen zu verbergen und der Immunabwehr zu entgehen. Plasmodien wandeln während ihres Lebenszyklus mehrfach ihre Gestalt. Das erschwert die Suche nach einem Antigen, an dem das Immunsystem den Erreger in allen Infektionsstadien erkennen kann. Um die Parasiten am Befall von Zellen zu hindern und um bereits infizierte Zellen zu zerstören, muss ein wirksamer Malariaimpfstoff sowohl eine Antikörper- als auch eine T-Zellantwort hervorrufen. Dieses Ziel erfordert wiederum Adjuvantien, die mehr leisten als simple Aluminiumsalze.

## NEUE ADJUVANTZEN

### ZUSÄTZE IN ENTWICKLUNG

- CpG, ein kurzes Stück bakterieller DNA ohne die Methylgruppen, wie sie in menschlicher DNA mit der gleichen Sequenz typisch sind
- Saponine (Pflanzenextrakte):
  - QS21
  - Quil A
  - immunstimulatorische Komplexe (Saponin in Lipidkapseln)
- Viren als Antigenvehikel:
  - Hühnerpockenvirus
  - Vacciniavirus
  - Kanarienvirus
- virusartige Partikel, Virushüllen, die kein Erbmaterial enthalten
- Interleukine und andere Signalmoleküle der Zellen

Nach diesen Anforderungen entwickelte unsere Gruppe einen Impfstoff basierend auf einem Antigen, das wir RTS,S taufen. Es entstand folgendermaßen: Wir fusionierten auf gentechnischem Weg ein Fragment eines Proteins, das Plasmodien während der extrazellulären Phase ihres Lebenszyklus und kurz nach ihrem Eindringen in rote Blutkörperchen auf ihrer Zellmembran tragen, mit dem Oberflächenantigen des Hepatitis-B-Virus (HBsAg), das die Immunerkennung verbessert.

Der Impfstoff enthält dieses Fusionsantigen RTS,S in einer Mischung von Adjuvanzen, die aus einer Öl-in-Wasser-Emulsion, MPL und QS21 besteht. Letzteres ist ein Pflanzenextrakt, der seit den 1930er Jahren in der Veterinärmedizin als Adjuvans eingesetzt wird. Nach weiterer Optimierung der Rezeptur starteten wir gemeinsam mit Kollegen vom Walter Reed Army Institute of Research in Silver Spring (Maryland) kleinere Versuchsreihen mit gesunden Probanden. Die Teilnehmer erklärten sich bereit, ihren Arm in einen Kasten mit malarieinfizierten Moskitos zu halten und sich mindestens fünfmal stechen zu lassen. Sechs von sieben der geimpften Testpersonen waren gegen die Infektion geschützt – anders als Probanden, die das gleiche Impfmateriale, aber mit Aluminiumsalzen als Adjuvans erhalten hatten.

Der eigentliche Wirksamkeitsbeweis fand dann außerhalb des Labors in Gegenden mit

dauernder Malariaexposition statt: Größere Studien bei Erwachsenen in Gambia ergaben, dass 71 Prozent der Geimpften über einen Zeitraum von neun Wochen gegen Malaria geschützt waren. Spätere Studien fanden an Kindern in Malariagebieten von Mosambik statt. Ergebnis: Nach drei Impfdosen waren 30 Prozent der geimpften Kinder vor der Parasiteninfektion geschützt, und unter jenen, die trotz Impfung erkrankten, zeigten sich im Beobachtungszeitraum von sechs Monaten weniger als halb so viele schwere Verläufe wie in der Kontrollgruppe. Eine weiter verbesserte Version des Impfstoffs enthält Liposomen (Hohlkugelchen aus Fettmolekülen) und befindet sich in der Endphase fortgeschrittener klinischer Studien (Phase 3) bei Kindern. Das RTS,S-Vakzin ist der erste Malariaimpfstoff, der eine statistisch signifikante Verminderung der Infektionsrate und schwerer Krankheitsverläufe erreicht. Dementsprechend besteht große Hoffnung, dass er einen Beitrag zur Eindämmung der Seuche leisten kann.

Der Erfolg dieses Impfstoffs verdeutlicht das Potenzial einer rationalen Planung und Herstellung, mit gezielten Kombinationen von Antigenen und Adjuvanzen die gewünschte Immunantwort zu induzieren. Dies gilt sowohl bei der Entwicklung neuer als auch bei der Optimierung bereits existierender Vakzine. Viele Impfstoffe, die in der Allgemeinbevölkerung erfolgreich zum Einsatz kommen, sind

**VIEL SAGENDE ZAHLEN**

Nur etwa die Hälfte der über 65-Jährigen, die eine übliche Grippeimpfung erhalten, bildet ausreichende Mengen an Antikörpern, die vor Influenza schützen. Ein experimenteller Impfstoff gegen die saisonale Grippe, der die Öl-in-Wasser-Emulsion AS03 enthält, erreichte dies bei 90,5 Prozent der über 65-jährigen Freiwilligen.

**IMPFSTOFFE DER NÄCHSTEN GENERATION**

Die aufgeführten Vakzine enthalten neue Adjuvanzen und sind entweder in einigen Ländern bereits zugelassen oder befinden sich in der späten Phase der klinischen Prüfung beim Menschen (Phase 3).

KRANKHEIT/ERREGER	IMPFSTOFF	ENTHALTENE ADJUVANZIEN	STAND DER ENTWICKLUNG	PHARMAUNTERNEHMEN
Hepatitis A	Epaxal	Virosomen	zugelassen in Europa	Crucell
	Fendrix	AS04 (Aluminiumsalze, MPL)	zugelassen in Europa	GlaxoSmithKline (GSK)
Hepatitis B	Supravax	synthetisches MPL RC-529	zugelassen in Argentinien	Dynavax Technologies
	Hepelisav	CpG	Phase 3	Dynavax Technologies
Humanes Papillomvirus (kann Gebärmutterhalskrebs verursachen)	Cervarix	AS04	zugelassen in 96 Ländern	GSK
Influenza (saisonale und pandemische)	Fluad, Focetria	MF59 (Öl-in-Wasser-Emulsion)	zugelassen in Europa	Novartis
	Inflexal V	Virosomen	zugelassen in Europa	Crucell
	Prepandrix, Pandemrix	AS03 (Öl-in-Wasser-Emulsion, Vitamin E)	zugelassen in Europa	GSK
	saisonaler Impfstoff für ältere Menschen	AS03	Phase 3	GSK
Malaria	Mosquirix	AS01 (Liposomen, MPL, QS21)	Phase 3	GSK
nichtkleinzelliges Bronchialkarzinom	Mage-3-Vakzin	AS15 (Liposomen, MPL, QS21, CpG)	Phase 3	GSK
	CimaVax EGF	Montanid ISA-51 (Öl-in-Wasser-Emulsion)	zugelassen in Kuba und Chile	Bioven



GETTY IMAGES / AFP / ANTONIO SCORZA

Zur Bekämpfung einer pandemischen Influenza müssen große Bevölkerungsgruppen geimpft werden. Als Wirkverstärker erlauben Adjuvanzien es, mit weniger Antigen pro Dosis Impfstoff auszukommen. Möglicherweise schützen solche Vakzine auch vor Grippeviren, die sich geringfügig vom Impfstamm unterscheiden.

möglicherweise bei bestimmten Gruppen nicht sicher genug oder nicht ausreichend wirksam, darunter bei jenen, die sie eigentlich am dringendsten benötigen. Ein Beispiel bietet die saisonale Grippe: Kleinkinder und ältere Menschen tragen das größte Risiko, an einer schweren Influenza zu versterben, denn das kindliche Immunsystem ist noch nicht voll entwickelt, während im höheren Alter die Abwehrkraft abnimmt. So bildet nur etwa die Hälfte der über 65-Jährigen, die eine übliche Grippeimpfung erhalten, ausreichende Mengen von Antikörpern, die eine Influenzainfektion verhindern. Im Gegensatz dazu erzielte ein experimenteller Impfstoff gegen die saisonale Grippe, der die Öl-in-Wasser-Emulsion AS03 enthält, schützende Antikörpertiter bei 90,5 Prozent der über 65-jährigen Freiwilligen.

### Dreimal ergiebiger mit Verstärker

Da Adjuvanzien den Immunzellen helfen, Antigene zu erkennen, können sie auch dazu dienen, wirksame Impfstoffe mit geringerem Antigengehalt herzustellen. Diese Tatsache gewinnt dann an Bedeutung, wenn im Fall einer Pandemie eine große Zahl von Menschen schnell geimpft werden muss. Ein weiterer experimenteller Impfstoff auf Basis von AS03, dieses Mal gegen das Vogelgrippevirus H5N1, induzierte eine schützende Antikörperantwort, obwohl er nur ein Drittel der Antigenmenge enthielt, die sich in einem typischen saisonalen Grippevakzin befindet.

Dies alles sind Beispiele für Produkte, die kurz vor dem breiten Einsatz beim Menschen stehen. Sie illustrieren, wie das Aufgreifen und Weiterentwickeln von Adjuvanzien in den achtziger und neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts jetzt Früchte trägt – und wie die Erkenntnis, dass die speziellen Erkennungsfähigkeiten der dendritischen Zellen ein wesentliches Bindeglied zwischen angeborenem und erworbenem Immunsystem darstellen, die Entwicklung völlig neuer Typen von Adju-

vanzien ermöglichte. Das ist wohl erst der Anfang für ein ganzes Arsenal weiterer Adjuvanzien, aus dem Vakzinentwickler präzise die jeweils geeigneten auswählen können.

Dabei kommen nicht nur aus der Immunologie und Molekularbiologie, sondern auch aus den Materialwissenschaften Impulse für neuartige Adjuvanzien. Liposomen fungieren bereits als Trägerkapseln für Medikamente und andere Substanzen, um diese vor Abbau geschützt zu einem Zielgewebe im Körper zu bringen. Als Träger und vorübergehender Schutz für Impfantigene schaffen sie ein Vakzindepot, aus dem allmählich Antigen freigesetzt wird und so die Immunzellen länger damit konfrontiert. Eine Variation dieses Prinzips ist der Einschluss in Polymerkäfige aus synthetischen Polyester oder aus natürlichen Polysacchariden, wie sie in Bakterienzellwänden vorkommen. Diese Materialien eignen sich nicht allein zur kontrollierten Freisetzung von Antigenen im Körper. Denn sie bieten zusätzlich den Vorteil, dass sie natürliche oder künstliche immunstimulierende Bestandteile enthalten können, welche die Signalgebung bei Abwehrzellen in die gewünschte Richtung lenken.

Mit der Entzifferung des Immunkodes hatten Wissenschaftler auch entdeckt, dass das Frühwarnsystem der dendritischen Zellen nicht einfach nur Alarm auslöst, sondern je nach Art der erkannten Gefahr zugleich die Art der Gegenmaßnahme bestimmt (ähnlich wie Feuer- und Luftangriffalarm am Heulton der öffentlichen Sirenen zu unterscheiden sind). Theoretisch ließen sich daher Kombinationen von Adjuvanzien zusammenstellen, die den Schwerpunkt der Immunantwort verlagern: entweder auf die Antikörperproduktion oder aber auf die Stimulation bestimmter Subtypen von T-Zellen. Tatsächlich werden inzwischen sogar die Signalmoleküle selbst experimentell auf ihre Eignung als Adjuvanzien untersucht. Eine Klasse von Zytokinen – die Interleukine (IL) – dient schon länger zum

Mit Adjuvanzien lassen sich auch wirksame Impfstoffe mit geringerem Antigengehalt herstellen



**Nathalie Garçon** leitet das Global Adjuvant Center for Vaccines bei GlaxoSmithKline Biologicals (GSKB) in Belgien, einem Impfstoffhersteller, der in den letzten 20 Jahren die Entwicklung neuer Adjuvanzen vorantrieb. Die auf Immunologie spezialisierte Pharmakologin trat 1990 als Leiterin des Adjuvanzenprogramms in das Unternehmen ein. **Michel Goldman**, Professor für Immunologie an der Freien Universität Brüssel in Belgien, erforscht vornehmlich die Kontrolle dendritischer Zellen und der Signalgebung durch Toll-like-Rezeptoren (TLRs). Beide Mechanismen sind für die Wirksamkeit von Impfstoffen und Adjuvanzen von zentraler Bedeutung. Inzwischen ist er geschäftsführender Direktor der Innovative Medicines Initiative, einer Partnerschaft der Europäischen Kommission mit dem Europäischen Verband der Pharmazeutischen Industrie.

**Garçon, N. et al.:** GlaxoSmithKline Adjuvant Systems in Vaccines: Concepts, Achievements and Perspectives. In: Expert Reviews of Vaccines 6(5), S. 723–739, Oktober 2007.

**Travis, K.:** Deciphering Immunology's Dirty Secret: Can Innate Immune Adjuvants Save Vaccinology? In: The Scientist 21(1), S. 46–51, Januar 2007.

**Wilson-Welder, J. H. et al.:** Vaccine Adjuvants: Current Challenges and Future Approaches. In: Journal of Pharmaceutical Sciences 98(4), S. 1278–1316, April 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1017405](http://www.spektrum.de/artikel/1017405).

Beispiel bei bestimmten Krebstherapien dazu, Immunreaktionen zu steigern. Allerdings produzieren dendritische Zellen mehrere verschiedene Interleukine, wobei sie über die spezifische Mischung der Zytokinsignale bestimmen können, welche Immunzellen reagieren. So stimulieren beispielsweise IL-4, IL-5 und IL-6 die Produktion von T-Killerzellen, während IL-2 und IL-12 die Antikörperproduktion begünstigen (siehe den Kasten S. 44/45).

Ähnliche Effekte lassen sich mit Kombinationen von Aktivatoren der TLR-Rezeptoren erzielen. Verschiedene TLRs erkennen mikrobielle Bestandteile, TLR-4 jedoch reagiert zudem auf Moleküle, die der Körper bei Belastungen freisetzt, die so genannten Hitzeschockproteine. Manche Kombinationen aus TLR-Aktivatoren und anderen Adjuvanzen, wie etwa Ölemulsionen, wirken stark synergistisch beim Aktivieren dendritischer Zellen. Daher könnten sich derartige Mixturen auf Gebieten als nützlich erweisen, die zu den größten Herausforderungen zählen, darunter die Entwicklung therapeutischer Impfstoffe bei Krebs.

### Viel versprechende Krebsimpfstoffe

Tumorzellen sind eher ungewöhnliche Zielstrukturen für Vakzine, da es sich nicht um fremde Eindringlinge, sondern um körpereigene Bestandteile handelt. Zwar baut der Organismus eine gewisse Immunantwort gegen Tumorzellen auf, diese ist jedoch kaum ausreichend, um eine bestehende Krebserkrankung zu bekämpfen. Versuche zur Entwicklung therapeutischer Impfstoffe verliefen hier bisher insgesamt enttäuschend. Möglicherweise bringt jedoch die richtige Kombination von Adjuvanzen eine Wende: So zeigt eine Reihe von experimentellen Krebsvakzinen mit verschiedenen neuen Adjuvanzmixturen viel versprechende Wirkungen.

Einer der neuartigen Tumorimpfstoffe befindet sich schon in fortgeschrittenen Phasen der klinischen Prüfung. Es handelt sich um eine Kombination eines molekularen Antigens (Mage-A3), das praktisch ausschließlich bei bestimmten Tumorzellen vorkommt, mit AS15. Das ist eine Adjuvanzen-Mischung aus stabilen Liposomen, MPL, QS-21 und CpG. Bei letzteren handelt es sich um so genannte CpG-Motive, nackte Cytidin-Guanosin-Dinukleotide in der Sequenz einer DNA, typisch für mikrobielle Erreger, die Zellen befallen. Bei Studien an Patienten mit nichtkleinzelligem Lungenkrebs zeigten 96 Prozent der Geimpften eine starke Antikörperimmunantwort gegen Mage-A3, zusätzlich zu Indikatoren für erwünschte Interleukinsignale. Bei fast einem Drittel kam die Erkrankung zum Stillstand oder die Tumoren bildeten sich zu-

rück. In einer weiteren laufenden Studie wird CpG zusammen mit Chemotherapie und Bestrahlung bei verschiedenen Krebsarten erprobt. CpG ist ein charakteristisches bakterielles DNA-Motiv, das von TLR-9 erkannt wird und dendritische Zellen zur Aktivierung starker T-Zell-Reaktionen veranlasst. Sein Einsatz als Adjuvans erinnert an William Coleys historische Versuche zur Krebstherapie mit Bakterienextrakten.

Kurzum, die verschiedenen, hier vorgestellten Adjuvanzensysteme erweitern insgesamt die Möglichkeiten vorbeugender Impfstoffe und wecken große Hoffnungen für therapeutische Vakzine dort, wo dringender medizinischer Bedarf besteht. Das gilt auch für das Gebiet der Allergien – hier sollen Immuntherapien eine Desensibilisierung erreichen. Ein hohes Allergiepotezial hat der Pollen des Beifußblättrigen Traubenkrauts (*Ambrosia artemisiifolia*), einer aus Amerika nach Europa eingeschleppten Staude. Im Ursprungsland gilt er inzwischen als Hauptauslöser von Heuschnupfen, der zu schwerem Asthma fortschreiten kann. Erste klinische Studien mit einem Impfstoff, der ein Antigen aus der Pflanze sowie CpG als Adjuvans enthält, verliefen viel versprechend gegen Heuschnupfen.

Die Entwicklung präventiver Grippeimpfstoffe mit breiterer Schutzwirkung erhofft man sich von Adjuvanzen, die dafür sorgen können, dass nach der Immunisierung auch verwandte Stämme des genutzten Influenzavirus mit erkannt werden. Und erstmals sind wohl bald Schutzimpfungen für Menschen mit krankheitsbedingt oder medikamentös geschwächtem Immunsystem möglich. Zwar dürften Adjuvanzen nicht alle Schwachstellen der heutigen Impfstoffe beheben, doch werden sie sicherlich manche Probleme lösen.

Das Abwehrsystem zu modulieren ist eine anspruchsvolle und heikle Aufgabe. Sie bedarf fortlaufender kritischer Prüfung der Sicherheit von Impfstoffen. Zugleich erfordert sie eine transparente, präzise Informationspolitik über Vakzine und Adjuvanzen der neuen Generation. Die Entwicklung der Wirkverstärker für innovative Impfstoffe orientiert sich an einem detaillierten Verständnis ihrer Wirkmechanismen – und davon wird man sich auch bei ihrem Einsatz und ihrer Überwachung leiten lassen. Ermutigend ist hier, dass bei den fortschrittlichsten adjuvanzierten Schutzimpfstoffen bisher keine Anzeichen für bedenkliche Probleme aufgetreten sind, dennoch sollten die Entwickler auch zukünftig wachsam sein.

Dank weiterer Fortschritte auf diesem Feld Vakzine mit ausgewogenem Sicherheits- und Wirksamkeitsprofil maßzuschneidern – das ist jedenfalls die nahe Zukunft. ◀

## HYPERBOLISCHE GEOMETRIE

# Mathematik mit der Häkelnadel

Man rümpfe nicht die Nase über das biedere Werkzeug. Es verschafft uns Einblick in die abstrakteste nichteuklidische Geometrie.

Von Christoph Pöppe

Für eine aufrechte Feministin muss Daina Taimina, aufgewachsen und promoviert in Lettland, heute Professorin für Mathematik an der Cornell University in Ithaca (New York), ein echter Stein des Anstoßes sein. Da kämpft frau jahrelang gegen die üblichen Rollenklischees: Mathematik sei Männersache und die Frauen in dem Fach deswegen so krass unterrepräsentiert, weil ihnen die mathematiktypischen Denkfähigkeiten abgingen. Allmählich beginnt die Welt sich auf die Erkenntniseinzulassen, dass es in Wirklichkeit keine »männliche« oder »weibliche« Mathematik gibt und dass die Vorstellung, Frauen würden grundsätzlich anders oder gar schlechter denken als Männer, chauvinistischer Männerunfug ist, *bullshit* mit deutlicher Betonung auf *bull*.

Und dann kommt Daina Taimina. Sie sieht nicht nur so aus wie das klassische Hausmütterchen; sie leistet auch noch der Vorstellung Vorschub, es gebe so etwas wie weibliche Mathematik oder, schlimmer noch, Hausfrauenmathematik. Sie fertigt nämlich ihre mathematischen Modelle durch Häkeln, und das Ergebnis ihrer Bemühungen gleicht auf den ersten Blick einem ziemlich verkrumpten Topfappen.

Aber eigentlich ist es ein Modell für etwas höchst unhausfraulich Abstraktes, nämlich ein Stück der hyperbolischen Ebene. Unversehens gerät man (und frau) damit von der biederen Häkelnadel zu einer der fundamentalsten Fragen der Geometrie: Muss die Winkelsumme im Dreieck stets 180 Grad betragen? Oder, was auf dasselbe hinausläuft: Gibt es wirklich zu einer Geraden durch einen Punkt außerhalb dieser Geraden genau eine Parallele?

Der antike Mathematiker Euklid (um 360–280 v. Chr.), der das Wissen der damaligen Zeit in unübertrefflicher Weise systematisierte, war wie alle seine



Mit ihren selbst gehäkelten Visualisierungen der hyperbolischen Geometrie findet Daina Taimina ein zunehmend interessiertes Publikum.

Zeitgenossen davon überzeugt, konnte es aber nicht beweisen. So blieb ihm nichts übrig, als diese Aussage unter die »Axiome« aufzunehmen, jene unbeweisbaren Grundannahmen, aus denen er die ganze Geometrie herleitete. Jahrhundertlang versuchten Euklids Nachfolger, diesen vermeintlichen Mangel im Werk des großen Meisters auszubessern und das merkwürdige Parallelenaxiom, das eben nicht so elementar und selbstverständlich aussah wie die anderen, aus diesen anderen herzuleiten.

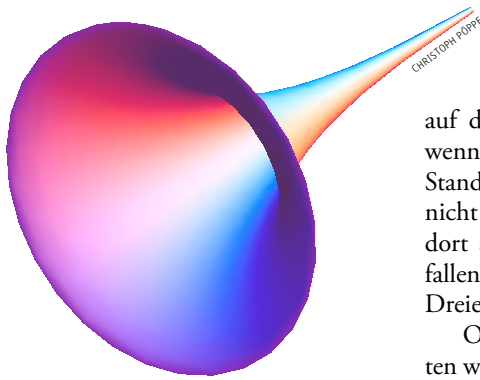
### Leben in einer gekrümmten Welt

Erst im 19. Jahrhundert wurde das Problem auf unerwartete Weise erledigt. Das Parallelenaxiom ist keineswegs denknotwendig. Vielmehr ist eine Geometrie widerspruchsfrei denkbar, in der es zu einer Geraden durch einen Punkt außerhalb von ihr mehr als eine Parallele gibt – es sind dann gleich unendlich viele – und in der die Winkelsumme im Dreieck stets kleiner ist als 180 Grad. Den Ruhm für diese Entdeckung teilen sich János Bolyai (1802–1860), Nikolai Iwanowitsch Lobatschewski (1792–1856) und Carl Friedrich Gauß (1777–1855), der

sein Ergebnis jahrzehntelang unveröffentlicht hatte liegen lassen, bis Bolyai und Lobatschewski unabhängig von ihm auf dieselbe Idee gekommen waren.

An die abstrakte Entdeckung schließt sich alsbald die konkrete Frage an: Wie lebt es sich in einer solchen nichteuklidischen Welt? Wenn die Winkelsumme im Dreieck nicht kleiner, sondern stets größer als 180 Grad sein soll, ist die Antwort nicht schwer. Diese Verhältnisse herrschen auf der Oberfläche einer Kugel. Man nehme zwei Längengrade, die sich am Nordpol unter einem Winkel von 90 Grad treffen, und das Stück Äquator, das zwischen ihnen liegt, und schon hat man ein Dreieck mit drei rechten Winkeln und entsprechend einer Winkelsumme von 270 Grad. Man muss sich allerdings vorstellen, dass die Bewohner der Kugeloberfläche zweidimensionale Wesen sind. Alles, was außerhalb ihrer Lebensfläche liegt, existiert für sie einfach nicht. Gleichwohl können sie erkennen, dass sie auf einer Kugeloberfläche leben, indem sie große Dreiecke vermessen und deren Winkelsummen bestimmen.

Entsprechend könnte es sein, dass wir dreidimensionalen Wesen in Wirk-



**Die Pseudosphäre ist die Rotationsfläche einer Kurve namens Traktrix.**

lichkeit auf der »Oberfläche« einer vierdimensionalen Kugel leben. Wir haben vielleicht nur deshalb noch nichts davon gemerkt, weil die Krümmung unserer Welt sehr gering ist. Darüber hinaus hätten wir die größten Schwierigkeiten, uns diese vierdimensionale Kugel anschaulich vorzustellen. Wir sind eben in allem

auf drei Dimensionen beschränkt. Erst wenn man ein Dreieck aus unserem Standpunkt und zwei fernen Sternen nicht nur von hier, sondern auch von dort aus vermessen könnte, würde auffallen, dass die Winkelsumme in diesem Dreieck größer ist als 180 Grad.

Oder eben kleiner. In diesem Fall hätten wir noch größere Schwierigkeiten mit dem Vorstellungsvermögen. Selbst unsere gedachten zweidimensionalen Kollegen wären nicht auf einer so wohlgeformten Fläche wie der Kugeloberfläche anzusiedeln.

Hier entfalten Daina Taiminas Häkelarbeiten ihre segensreiche Wirkung. Gesucht ist eine Fläche, deren »intrinsische Krümmung« in jedem ihrer Punkte negativ ist und den gleichen Wert hat. Intrinsisch heißt, dass ein Einwohner der Fläche sie mit auf die Fläche beschränkten Mitteln messen kann, zum Beispiel an-

hand der Abhängigkeit des Kreisumfangs vom Radius. Für uns auswärtige Betrachter läuft das darauf hinaus, dass die gaußsche Krümmung der Fläche in jedem Punkt den gleichen negativen Wert haben muss. Die gaußsche Krümmung ist das Produkt der Hauptkrümmungen. Das heißt: Die Fläche muss in einer Richtung nach der einen Seite und in der dazu senkrechten Richtung nach der anderen Seite gekrümmt sein. (Man muss die beiden Richtungen wählen, in denen die Krümmung ihre Extremwerte annimmt.) Ist die Fläche in der einen Richtung sehr stark gekrümmt, darf sie in der anderen fast eben sein; nur das Produkt der Krümmungen muss stimmen. Und für

**Ein und derselbe hyperbolische Topflappen bietet je nachdem, wie er gefaltet wird, die verschiedensten Anblicke.**



DAINA TAIMINA, MIT FROL, GEN. VON A. K. PETERS LTD.

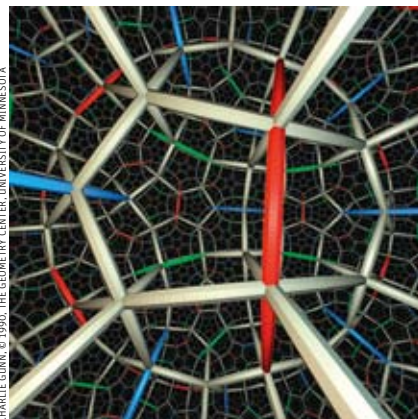
## EINE LANDKARTE DER HYPERBOLISCHEN EBENE

In der klassischen Darstellung von Henri Poincaré (1854–1912) wird die ganze unendliche hyperbolische Ebene ins Innere eines endlichen Kreises abgebildet. Das funktioniert, weil der Maßstab, mit dem Entfernungen gemessen werden, umso stärker schrumpft, je näher man dem Rand des Kreises kommt. Wir betrachten gleichsam die hyperbolische Ebene durch eine sehr merkwürdige Linse, die ferne Gebiete umso stärker verkleinert, je weiter entfernt sie sind. Die Linse deformiert Geraden zu Kreisbögen, die auf dem Rand des Poincaré-Kreises senkrecht stehen.

Die poincarésche Kreisscheibe erlaubt eindrucksvolle Darstellungen. So ist auf den ersten Blick zu sehen, wie die Ebene mit rechtwinkligen Fünfecken (jajawohl, fünf rechte Winkel) zu pflastern ist (Spektrum der Wissenschaft 10/1990, S. 12, und 4/2008, S. 65). Entsprechend kann man den dreidimensionalen hyperbolischen Raum lückenlos mit rechtwinkligen Dodekaedern vollstapeln. Die Poincaré-Darstellung bildet diesen ganzen Raum in das Innere einer Vollkugel ab; das preisgekrönte Video »Not Knot« (deutsch: »Knoten ohne

Knoten«) des Geometry Center in Minneapolis (Minnesota) zeigt einen spektakulären Flug durch den hyperbolischen Raum in dieser Darstellung, mit einem Gitter aus rechtwinkligen Dodekaedern (Bild). Die bekannten Werke namens »Kreislimit« des niederländischen Künstlers Maurits C. Escher (1898–1972) beruhen ebenfalls auf dem Poincaré-Modell der hyperbolischen Ebene.

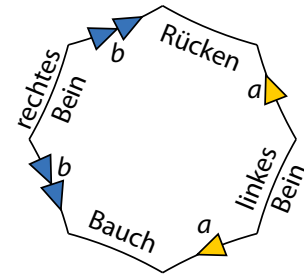
Poincarés Linse ist winkeltreu. Sie bildet Gerades auf Krummes ab, gibt aber die Winkel zwischen zwei Linien (das heißt zwischen deren Tangenten im Schnittpunkt) korrekt wieder. Deswegen ist sie für die Sache mit der Winkelsumme ein geeignetes Darstellungsmittel. Andere Aspekte dagegen drohen durch die Linsenverzerrung unterzugehen. Wer würde in dieser Darstellung schon sehen, dass der Umfang eines Kreises vom Radius  $r$  stets größer ist als  $2\pi r$ ? Gesellige Typen wissen diesen Aspekt des Lebens im hyperbolischen Raum zu schätzen: Die Anzahl der Bekannten, die in einer Entfernung von höchstens  $r$  zu erreichen sind, ist größer als im euklidischen Raum. Der Unterschied wird mit zunehmender Entfernung  $r$  immer ausgeprägter.



CHARLIE GUNN, © 1990, THE GEOMETRY CENTER, UNIVERSITY OF MINNESOTA



Ein Achteck in der hyperbolischen Ebene, bei dem gewisse Seiten identifiziert werden (unten), ergibt eine Strampelhose besonderer Art, gehäkelt von Sarah-Marie Belcastro.



In beiden Fällen erbt das neue Gebilde seine Geometrie, insbesondere die intrinsische Krümmung, vom alten.

Hier findet auch die unvermeidliche Frage »Hat denn die ganze Häkelei einen praktischen Nutzwert?« eine überzeugende Antwort. Man identifiziere in einem hyperbolischen Achteck nicht gegenüberliegende Seiten, sondern gewisse andere Paare von Seiten, während andere frei bleiben (Bild oben). Das Resultat ist ein Strampelhöschen! Taiminas Fachkolleginnen Sarah-Marie Belcastro und Carolyn Yackel geben detaillierte Häkelanleitungen für verschiedene Größen vom Neugeborenen bis zum Fünfjährigen.

Damit nicht genug: Eine Gruppe, die sich bei der gemeinsamen Jahrestagung der amerikanischen Mathematikerverbände AMS und MAA 2005 konstituierte, pflegt noch weitere Spielarten der »Fadenkunst« (*fiber arts*), von positiv gekrümmten Flächen, sprich Häkelmützen, über algebraische Socken bis hin zu Stickarbeiten, die naheliegenderweise die Symmetriegruppen der Ebene zum Thema haben. ◁



**Christoph Pöppe** ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

**Belcastro, S.-M., Yackel, C. (Hg.):** Making Mathematics with Needlework. Ten Papers and Ten Projects. A K Peters, Wellesley (Massachusetts) 2008.

**Henderson, D., Taimina, D.:** Crocheting the Hyperbolic Plane. The Mathematical Intelligencer 23(2), S. 17–28, 2001.

**Taimina, D.:** Crocheting Adventures with Hyperbolic Planes. A K Peters, Wellesley (Massachusetts) 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1017412](http://www.spektrum.de/artikel/1017412).

THOMAS HILL. MIT FRIEDL GER. VON A. K. PETERS LTD.



C. PÖPPE, MACH. SARAH-MARIE BELCASTRO

den zweidimensionalen Einwohner der Fläche kommt es auf diese Feinheiten überhaupt nicht an. Seine Welt sieht an jeder Stelle gleich aus, einerlei, ob wir an dieser Stelle zwei bis aufs Vorzeichen gleiche oder um Größenordnungen verschiedene Krümmungen messen.

Die einfachste Fläche konstanter negativer gaußscher Krümmung ist die so genannte Pseudosphäre. Sie sieht aus wie ein unendlich langes Trompetenrohr, das in einen Schalltrichter endlicher Größe mündet (Bild links oben). Über dessen Rand hinaus ist sie nicht verlängerbar. Wollte man es trotzdem versuchen, so würde die Fläche sich kräuseln und selbst überschneiden.

Wenn aber die Fläche nicht starr ist, sondern aus gehäkeltem Stoff besteht, geht sie jeder Selbstüberschneidung aus dem Weg, indem sie sich geeignet verbiegt (Bilder links). Die intrinsische Geometrie wird dadurch nicht gestört: Was die zweidimensionalen Wesen an Winkeln und Entfernungen messen, bleibt bei derartigen Deformationen unverändert.

Wie häkelt man denn nun eine hyperbolische Fläche? Dem großen theoretischen Aufwand zum Trotz ist das Rezept verblüffend einfach. Man häkele eine ringförmig geschlossene Reihe aus einer gewissen Anzahl Maschen. An diese füge man weitere Reihen an; dabei enthält jede neue Reihe um einen konstanten Faktor mehr Maschen als ihre Vorgängerin. Soll dieser Faktor zum Beispiel  $7/6$  sein, häkelt man in jede sechste Masche der alten Reihe zwei Maschen der neuen ein statt nur eine.

Rundungsfehler sind unvermeidlich: Wenn die Maschenzahl einer Reihe kein Vielfaches von 6 ist, dann müsste ihre Nachfolgerin eine nichtganze Anzahl von Maschen haben. Solange die Reihen kurz sind, fallen diese Fehler noch auf,

lassen sich aber auf die Dauer gut ausgleichen. Beginnt man mit sehr kleinen Maschenzahlen, so entsteht zunächst das Trompetenrohr der Pseudosphäre. Aber man kann eben über die Grenze der Selbstüberschneidung hinaushäkeln.

Allerdings ist gerade dieses enge Rohr keine korrekte Wiedergabe der hyperbolischen Ebene. Dort kommt es nämlich nicht vor, dass man ein kurzes Stück »geradeaus« (in der Wahrnehmung des Flächenbewohners) laufen kann und bereits nach kurzer Strecke in den eigenen Fußstapfen steht, was auf dem kurzen Weg rund ums Trompetenrohr der Fall ist. Vielmehr muss man sich die hyperbolische Ebene, genauer: ein Stück derselben, unendlich oft ums Trompetenrohr gewickelt vorstellen.

### Hyperbolische Strampler

Die klassische Darstellung der hyperbolischen Ebene ist die poincarésche Kreisscheibe (Kasten links). Mit ihrer Hilfe kann man nachvollziehen, dass die Pseudosphäre nur einen Ausschnitt der kompletten hyperbolischen Ebene wiedergibt – und Daina Taiminas Häkelwerk einen etwas größeren Ausschnitt.

Andererseits: Die hyperbolische Geometrie ist nicht auf die hyperbolische Ebene beschränkt (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 74). Nehmen wir ein regelmäßiges Achteck in der hyperbolischen Ebene, das so bemessen ist, dass seine Innenwinkel 120 Grad betragen. Mit diesen Kacheln kann man, drei um jeden Eckpunkt, die ganze hyperbolische Ebene lückenlos pflastern. Indem man nun gegenüberliegende Seiten dieses Achtecks miteinander identifiziert, schafft man ein neues, geschlossenes Gebilde mit endlichem Flächeninhalt, ebenso wie aus einem euklidischen Rechteck durch Identifizieren gegenüberliegender Seiten ein Torus wird.

# Haben SCHÖNE ELTERN MEHR TÖCHTER?

Die Öffentlichkeit wird oft mit zweifelhaften Nachrichten aus der Wissenschaft versorgt. Häufig basieren sie auf einer allenfalls marginalen statistischen Signifikanz – Grund genug, um genauer auf korrekte Bedingungen bei der Schätzung kleiner Effekte zu achten.

Von Andrew Gelman und David Weakliem

Satoshi Kanazawa, Professor für Management und Forschungsmethodik an der London School of Economics, hat in den letzten Jahren im »Journal of Theoretical Biology« eine Reihe von Arbeiten publiziert, die Titel trugen wie »Große und hochgewachsene Eltern haben mehr Söhne«, »Gewalttätige Männer haben mehr Söhne«, »Ingenieure haben mehr Söhne, Pflegepersonal hat mehr Töchter« oder »Schöne Eltern haben mehr Töchter«. Zuletzt hat er gemeinsam mit Alan S. Miller einige dieser Behauptungen auch in einem Buch vorgestellt.

Allerdings wurde gezeigt, dass die statistische Analyse in Kanazawas Behauptungen fundamentale Schwächen aufweist. So begeht er in einigen seiner Untersuchungen den Fehler, bei der Schätzung eines kausalen Effekts abhängige Variablen als Kontrollparameter zu wählen. In einer weiteren Studie kommt es zu einem Problem mit mehrfachen (multiplen) Vergleichen. Diese handwerklichen Fehler (die gleich näher beleuchtet werden) führen zu irrigen Schlüssen. Kurz: Kanazawas Behauptungen sind statistisch nicht signifikant, die von ihm analysierten Muster können auch zufällig aufgetreten sein.

Wäre der Mangel an Signifikanz bei der Begutachtung aufgefallen, so wären seine Artikel vermutlich niemals erschienen. Der Umstand, dass sie erschienen sind und über Medien und Bücher große Bekanntheit erlangten, wirft die Frage auf: Was sollen wir von Forschungsergebnissen halten, die zwar faszinierend, aber eben statistisch nicht signifikant sind?

Am einfachsten wäre es, sie zu ignorieren. Schließlich kann jeder, der sich ein simples Statistikprogramm besorgt, öffentliche Datenbanken durchkämmen und Korrelationen herausfischen, um eine bestimmte Hypothese zu bestätigen. Das wäre jedoch zu vorschnell, denn auch nicht signifikante Ergebnisse können auf etwas hindeuten. Zum Beispiel könnte ein statistischer Test ergeben, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Mädchen zu bekommen, bei attraktiven Eltern fünf Prozent höher liegt als bei unattraktiven Eltern – bei einem Standardfehler von vier Prozent. Das wäre zwar nicht signifikant. Aber wenn wir raten sollten, ob ein neugeborenes Mädchen schöne oder hässliche Eltern hat, würden die Daten uns eher Ersteres nahelegen.

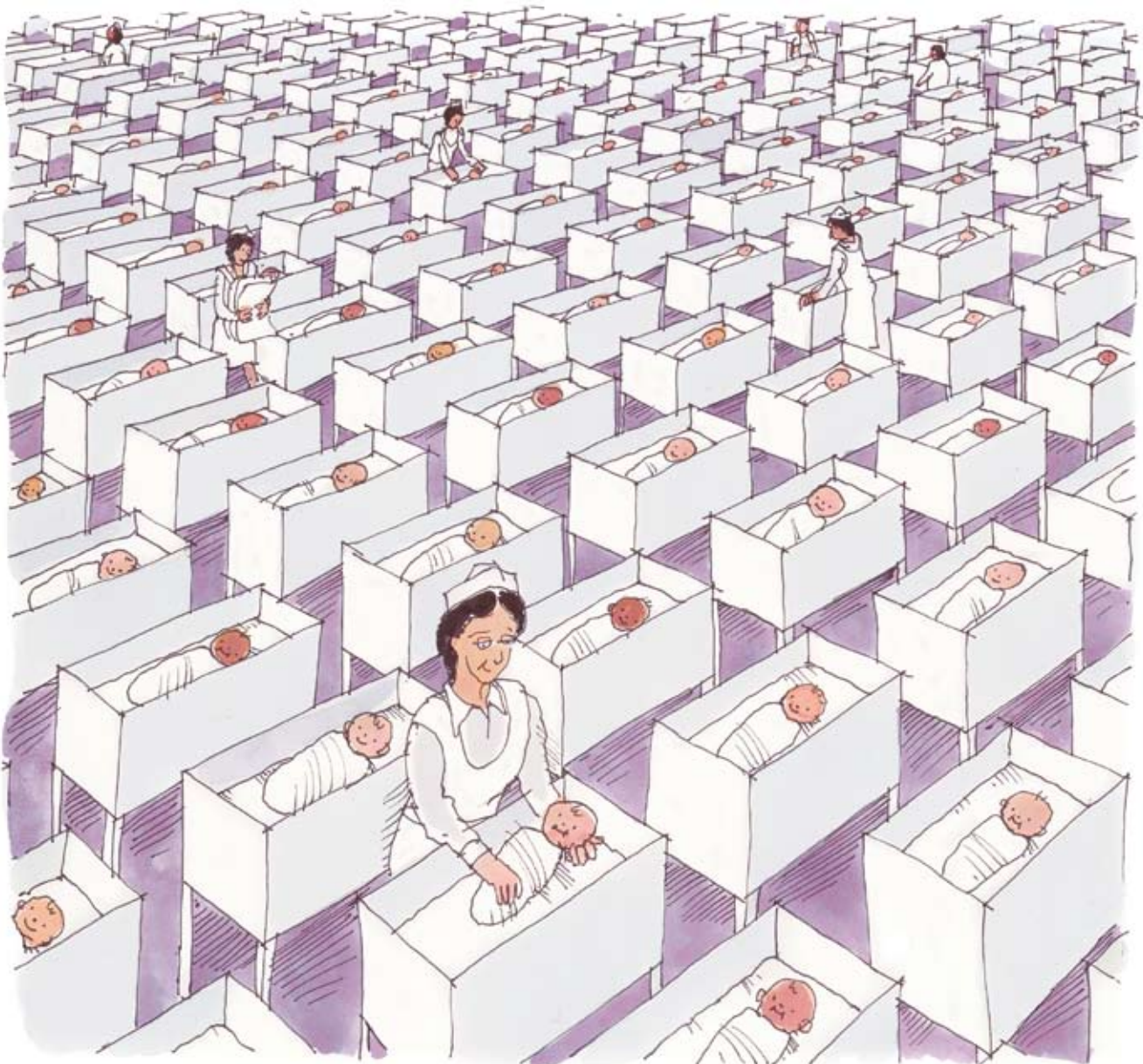
Es gibt weitere gute Gründe, Kanazawas Hypothese nicht vorschnell zu verwerfen. Denn sie stützt sich auf ein anerkanntes Modell, das Robert Trivers und Dan Willard 1973 publiziert haben: Wenn eine erbliche Eigenschaft Kindern eines Geschlechts stärker zugutekommt als Kindern des anderen Geschlechts, dann bekommen Eltern relativ mehr Kinder dieses einen Geschlechts. Das ist die Trivers-Willard-Hypothese. Darüber hinaus haben Forscher gezeigt, dass schöne Menschen mehr respektiert werden als andere; auch beeinflusst das Geschlecht der Kinder die Einstellungen der Eltern. Zum Beispiel sind Politikerväter von Töchtern in Frauenfragen progressiver als solche von Söhnen.

Wie also soll man nicht signifikante Ergebnisse interpretieren? Und wie ist mit fragwürdigen Befunden umzugehen, die bei Massenmedien besonders beliebt sind? Es ist ja kein Wunder: Statistiker und Soziologen, die sorg-

## In Kürze

- ▶ Oft werden **starke Hypothesen** mit **schwacher Statistik** unterlegt. Dies gilt vor allem für Effekte, die erwartbar klein sind.
- ▶ Beim Geburtenverhältnis von Jungen zu Mädchen wurden **marginale Befunde** als **große Effekte** ausgegeben. Genaue Analysen zeigten jedoch, dass all diese Resultate statistisch nicht signifikant sind, sich also auch mit dem Zufall erklären lassen.
- ▶ Korrekte Anwendung statistischer Konzepte wie **Signifikanz, Teststärke oder Stichprobenumfang** sind wesentlich, um belastbare Aussagen zu erhalten – auch wenn sie dann nicht immer gute Schlagzeilen liefern.

Die Evolutionsbiologen Robert Trivers und Dan Willard behaupteten im Jahr 1973, dass das Geschlechterverhältnis (also das Verhältnis von weiblichen zu männlichen Geburten) abhängig sei von bestimmten Erbanlagen, die besonders einem der Geschlechter einen relativen Vorteil böten. Solche Einflüsse sind oft untersucht worden, lagen jedoch stets unter einem Prozent. Die Behauptung, dass schöne Eltern zu 26 Prozent häufiger Töchter als Söhne bekommen, war daher erstaunlich – und zweifelhaft.



ALLE ABILDUNGEN DES ARTIKELS: AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNE

**NULLHYPOTHESE**

In der Statistik wird mit der **Nullhypothese** eine Annahme über die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariablen getroffen. Dagegen steht die Alternativhypothese.

Meist besagt die Nullhypothese, dass ein bestimmter Zusammenhang *nicht* besteht: dass sich zwei Gruppen also nicht unterscheiden oder dass ein bestimmtes Medikament wirkungslos ist. Diese These soll verworfen werden, so dass die Alternativhypothese als wahrscheinlich übrig bleibt.

In einer US-Studie mit fast 3000 Datensätzen wurde die Attraktivität der Teilnehmer auf einer fünfstufigen Skala erfasst. Darin wurde die attraktivste Gruppe mit dem Durchschnitt der übrigen vier Gruppen verglichen. Danach ist die Wahrscheinlichkeit, dass das erstgeborene Kind ein Mädchen ist, bei der attraktivsten Gruppe erhöht (blaue Kurve).

fältig arbeiten und argumentieren, hüllen sich gerne in Wolken von Fachbegriffen und Relativierungen, was Laien kaum verstehen. Umso mehr lassen sich Medienvertreter durch Übertreibungen gerne beeindrucken. Als Folge werden kleine Effekte überschätzt und damit die Öffentlichkeit und oft sogar Wissenschaftler in die Irre geleitet.

Für das Weitere brauchen jetzt aber auch wir einige Fachbegriffe. Unter »statistisch signifikant« verstehen wir (wie üblich) eine Abschätzung, die mindestens zwei Standardfehler von der so genannten Nullhypothese entfernt ist, also von einem vorab festgelegten Wert, der anzeigen würde, dass kein Effekt vorliegt. Ein Schätzwert ist statistisch nicht signifikant, wenn der beobachtete Wert auch durch reine Zufallsschwankungen erklärt werden kann.

Beispiel Münzwurf: Wenn bei 20 Würfeln achtmal der Kopf und zwölfmal die Zahl oben landen, dann würden wir sagen, dass dieses Ergebnis vom Zufall (50:50) nicht signifikant abweicht. Das heißt, die beobachtete Kopfseiten-Häufigkeit beträgt 40 Prozent, der Standardfehler elf Prozent – somit liegen die Daten weniger als zwei Standardfehler von der Nullhypothese (50 Prozent Köpfe) entfernt. Das Resultat lässt sich also mühelos durch Zufall erklären. Der Standardfehler, ein Maß für die Streuung eines Kennwerts, schrumpft mit wachsender Größe der Stichprobe und nähert sich schließlich null an.

Nehmen wir die 2007 veröffentlichte Analyse von Daten aus der National Longitudinal Study of Adolescent Health (Nationale Längsschnittstudie zur Gesundheit Heranwachsender). Darin folgert Kanazawa, dass gut aussehende Eltern mehr Töchter hätten. Bei der Studie hatten die Interviewer im Rahmen der Erhebung von Daten wie dem Geschlecht der

Kinder auch die Attraktivität der Befragten subjektiv eingeschätzt (auf einer Skala von 1 bis 5). Bei einer Gruppe von knapp 3000 Eltern soll Kanazawa zufolge ein statistisch signifikanter Unterschied von acht Prozent auftreten: Die Wahrscheinlichkeit, dass Eltern ein Mädchen bekamen, betrug in der höchsten Attraktivitätsstufe 52 Prozent, in den vier restlichen Attraktivitätskategorien durchschnittlich nur 44 Prozent. Einer von uns (Gelman) hat dazu angemerkt, dass ein Vergleich zwischen der obersten und den unteren vier Kategorien nur einer von vielen a priori gleichwertigen Vergleichen ist, die man mit diesen Daten durchführen kann – das ist das eingangs erwähnte Problem mehrfacher Vergleiche.

**Wie groß kann ein Effekt sein?**

Hier wird also in bestimmten Daten ein Muster wahrgenommen, das suggestiv wirkt, ohne statistisch signifikant zu sein. Das heißt, es könnte auch allein durch Zufälle zu Stande gekommen sein. Andererseits liefert es immerhin gewisse Indizien zu Gunsten einer vorgeschlagenen Hypothese. Wie sollten wir als Statistiker und Soziologen mit dem Problem statistisch nicht signifikanter Indizien umgehen?

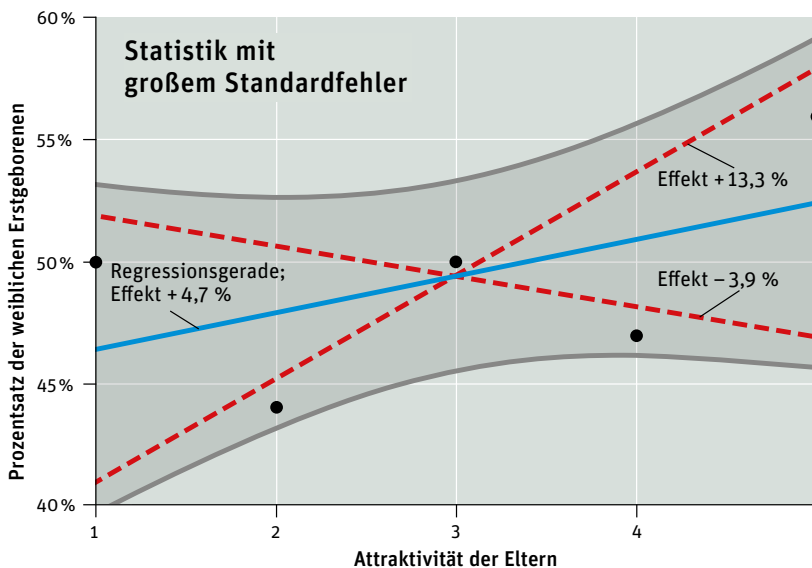
Der Schlüssel besteht darin, über mögliche Größen eines Effekts nachzudenken. Auf Grund von Erhebungen zum Geschlechterverhältnis wäre es zwar durchaus möglich, dass schöne Eltern mit einer um ein Prozent erhöhten Wahrscheinlichkeit ein Mädchen bekommen; aber ein Unterschied von fünf Prozent ist kaum plausibel. Daran lässt sich zeigen, wie sich das Problem mit zwei Paradigmen der Statistik betrachten lässt:

➤ Die »klassische Inferenz« beruht auf dem Testen von Hypothesen sowie der statistischen Signifikanz. Sie kodiert externe wissenschaftliche Informationen als eine Schar von Nullhypothesen;

➤ In die »bayessche Inferenz« fließen solche Informationen als unabhängige Daten in Form einer so genannten A-priori-Verteilung ein.

Wir haben die Daten in Kanazawas Artikel einer Standardanalyse unterzogen, die anhand des numerischen Attraktivitätsmaßes die Wahrscheinlichkeit einer Mädchengeburt voraussagt. Dabei kam heraus, dass diese Wahrscheinlichkeit bei attraktiveren Eltern um 4,7 Prozent erhöht war, bei einem Standardfehler von 0,043, also 4,3 Prozent. Die Kunst besteht nun darin, dieses Resultat zu deuten, das zwar zu einer angenommenen Hypothese passt, statistisch aber nicht signifikant ist.

Als Erstes sollte man sich klar darüber sein, dass die hier untersuchten Effekte aller Wahrscheinlichkeit nach klein ausfallen. Es gibt zahlreiche Veröffentlichungen über das Ge-



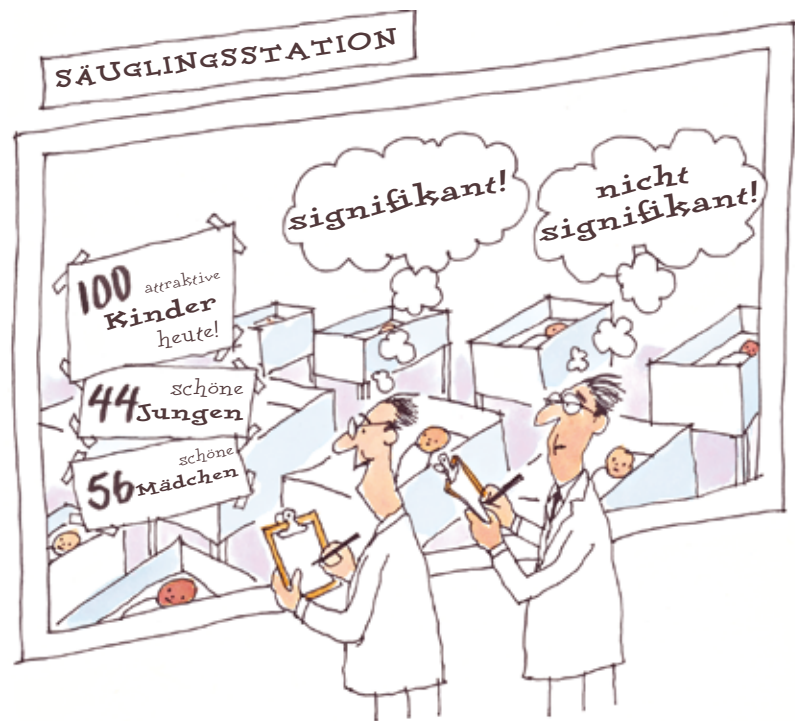
schlechterverhältnis bei menschlichen Geburten, und die gefundenen Effekte bewegen sich in der Größenordnung von einem Prozentpunkt (zum Beispiel steigt manchmal die Wahrscheinlichkeit einer Mädchengeburt von 48,5 auf 49,5 Prozent). Abweichungen, die etwa ethnischer Zugehörigkeit, Alter der Eltern, Geburtenfolge, Gewicht der Mutter, Partnerschaftsstatus oder Jahreszeit bei der Geburt zugeschrieben werden, werden auf 0,3 bis 2 Prozentpunkte geschätzt. Größere Verschiebungen (bis zu 3 Prozentpunkten) treten nur bei Armut und Hungersnöten auf. Dass in extremen Mangelsituationen mehr Mädchen als Jungen geboren werden, überrascht im Übrigen nicht. Es ist bekannt, dass männliche Föten (und auch Kinder und Erwachsene) unter widrigen Umständen häufiger sterben als weibliche. Somit würden wir erwarten, dass der Effekt der Schönheit auf das Geschlechterverhältnis weniger als einen Prozentpunkt beträgt, wie es für natürliche Abweichungen unter normalen Bedingungen typisch ist.

Kehren wir zu Kanazawas Beispiel zurück: Mit einem Schätzwert von 4,7 Prozent und einem Standardfehler von 4,3 Prozent liegt das klassische 95-Prozent-Konfidenzintervall für einen Unterschied in der Wahrscheinlichkeit einer Mädchengeburt bei attraktiven beziehungsweise unattraktiven Eltern im Intervall von  $[-3,9 \text{ Prozent}, +13,3 \text{ Prozent}]$ . Das heißt: Effekte bis zu minus 3,9 Prozent oder bis zu plus 13,3 Prozent sind mit den Daten verträglich. In Anbetracht einer erwarteten Effektgröße im Bereich von  $\pm 1$  Prozent haben wir aus dieser Studie im Grunde nichts erfahren.

### Vier Szenarien mit Standardfehlern

Was würde passieren, wenn wiederholt voneinander unabhängige Untersuchungen mit derselben Genauigkeit und folglich mit etwa demselben Standardfehler von 4,3 Prozent durchgeführt würden? Benutzt man ein Konfidenzintervall von 95 Prozent, gibt es eine mindestens fünfprozentige Wahrscheinlichkeit, ein statistisch signifikantes Ergebnis zu erzielen, was zu einem Schätzwert von plus oder minus 8,4 Prozent oder mehr führen würde (1,96 Standardabweichungen beiderseits der Null).

Werden multiple Tests durchgeführt, steigt auch die Aussicht, etwas statistisch Signifikantes zu finden. In jedem Fall liegt der geschätzte Effekt aber mit mindestens 8,4 Prozent erheblich über allen Größen des Effekts, die wir realistischerweise erwarten dürfen. Dies nennen wir einen Typ-M-Fehler (M für *magnitude*, also Größe). Die Studie wurde so angelegt, dass jedes statistisch signifikante Ergebnis höchstwahrscheinlich den wahren Ef-



fekt deutlich überschätzt. Darüber hinaus sind auch Typ-S-Fehler zu erwarten (S für *sign*, also Vorzeichen), bei denen der Schätzwert in die eine und der wahre Effekt in die andere Richtung zeigt. Wir bekommen ein Gespür für die Häufigkeit solcher Fehler, wenn wir vier Szenarien mit Standardfehlern von 4,3 Prozentpunkten durchspielen:

#### 1. WAHRE DIFFERENZ GLEICH NULL

Besteht kein Zusammenhang zwischen der Schönheit der Eltern und dem Geschlechterverhältnis der Kinder, dann wird in fünf Prozent aller Fälle ein statistisch signifikanter Schätzwert auftreten, der in jedem Fall irreführend ist.

#### 2. WAHRE DIFFERENZ GLEICH 0,3 PROZENT

Angenommen, die Wahrscheinlichkeit, ein Mädchen zu bekommen, übertrifft bei attraktiven Eltern die von unattraktiven Eltern um 0,3 Prozent. Somit existiert eine Chance von drei Prozent, ein statistisch signifikantes positives Ergebnis zu erhalten, und in zwei Prozent der Fälle wird man ein statistisch signifikantes negatives Ergebnis sehen. In beiden Fällen wird der geschätzte Effekt von mindestens 8,4 Prozentpunkten den wahren Effekt um mehr als eine Größenordnung übertreffen, und mit einer Wahrscheinlichkeit von 2/5 weist er zudem in die verkehrte Richtung. Wenn das Ergebnis statistisch nicht signifikant ist, hat der Schätzwert sogar mit einer Wahrscheinlichkeit von 47,5 Prozent ein falsches Vorzeichen (ein Typ-S-Fehler). Dies liegt so dicht an 50 Prozent, dass die Rich-

Statistische Aussagen liegen nicht im Belieben des Betrachters. Die Einzelereignisse werden in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung zusammengefasst. So sind 56 zwar eindeutig mehr als 44, aber auf einer Säuglingsstation können immer auch mal 56 Mädchen und 44 Jungen liegen – rein zufällig.

HOFFENTLICH IST DER COMPUTER KAPUTT,  
SONST WIRD NÄMLICH KEINE UNSERER  
KORRELATIONEN SIGNIFIKANT!



tung des Schätzwerts kaum etwas über das Vorzeichen des tatsächlichen Effekts aussagt.

### 3. WAHRE DIFFERENZ GLEICH EIN PROZENT

Angenommen, attraktive Eltern würden im Mittel tatsächlich ein Prozent mehr Mädchen bekommen als unattraktive Eltern, was in Anbetracht der Literatur schon am oberen Ende des möglichen Effekts liegt. Dann existiert eine vierprozentige Wahrscheinlichkeit, ein statistisch signifikantes positives Ergebnis zu erzielen, und immer noch eine Wahrscheinlichkeit von über einem Prozent, dass ein statistisch signifikantes Ergebnis in die falsche Richtung zeigt. Alles in allem werden in 40 Prozent der Studien Typ-S-Fehler auftreten: Wieder liefert uns der Schätzwert allein kaum zuverlässige Informationen – weder über das Vorzeichen noch über die Größe des Effekts.

### 4. WAHRE DIFFERENZ GLEICH 3 PROZENT

Selbst wenn der tatsächliche Unterschied bei drei Prozent liegen sollte, beträgt die Chance, ein statistisch signifikantes Ergebnis zu erzielen, gerade zehn Prozent, und die möglichen Typ-S-Fehler summieren sich zu 24 Prozent.

Eine Analyse dieses Umfangs eignet sich also nicht, um eine Variation in der Größenordnung von wenigen Prozent abzuschätzen. Unter anderem aus diesem Grund beruhen Studien zum Geschlechterverhältnis beim Menschen auf erheblich größeren Stichproben, zumeist auf demografischen Datenbanken mit Millionen von Datensätzen. Wir können Ka-

nazawas Daten auch mit Hilfe einer bayesischen A-priori-Verteilung analysieren. Bei der bayesischen Inferenz steht die A-priori-Verteilung für Informationen, die nicht aus dem fraglichen Datensatz selbst stammen.

Als diffus bezeichnet man A-priori-Verteilungen, die über diese Daten hinaus keine relevanten Zusatzinformationen enthalten. Bei einer hinreichend diffusen A-priori-Verteilung wäre die A-posteriori-Verteilung annähernd normal verteilt, mit einem Mittelwert von 4,7 Prozent und einem Standardfehler von 4,3 Prozent. Das hieße, der wahre Effekt ist mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 86 Prozent positiv. Allgemein gilt: Je mehr sich die A-priori-Verteilung um null konzentriert (eine Annahme, die sich auf die Geschlechterverhältnis-Forschung mit ihren zumeist sehr kleinen Effekten stützt), desto mehr nähert sich die A-posteriori-Wahrscheinlichkeit der 50-Prozent-Marke.

Betrachten wir zum Beispiel eine glockenförmige Verteilung mit dem Median null. Die Kurve soll so geformt sein, dass der wahre Unterschied im Mädchenanteil bei den Kindern schöner und hässlicher Eltern höchstwahrscheinlich nahe bei null liegt, und zwar mit 50 Prozent Wahrscheinlichkeit zwischen  $-0,3$  und  $+0,3$  Prozent, mit 90 Prozent zwischen  $-1$  und  $+1$  Prozent und zu 94 Prozent zwischen  $-3$  und  $3$  Prozent. Wir wählen null als Median, weil wir a priori keinen Grund haben, die wahre Differenz zwischen den Wahrscheinlichkeiten einer Mädchengeburt bei attraktiven beziehungsweise unattraktiven Eltern in der Allgemeinbevölkerung als positiv oder negativ einzustufen.

Im nächsten Schritt berechnen wir die Wahrscheinlichkeiten zu verschiedenen Größen des Effekts, auf Basis der A-priori-Verteilung sowie der konkreten Daten. Kurz gefasst, liefert die A-posteriori-Verteilung eine nur 58-prozentige Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Differenz positiv ist – dass also schöne Eltern tatsächlich mehr Töchter bekommen. Selbst wenn der Effekt positiv wäre, wird er zu 78 Prozent kleiner als ein Prozentpunkt ausfallen. Diese Analyse hängt natürlich von der A-priori-Verteilung ab, aber nicht besonders stark. Würde man etwa die Glockenkurve verbreitern, um so mehr Ausreißer einzubeziehen, läge die A-posteriori-Wahrscheinlichkeit für eine zutreffende positive Differenz immer noch erst bei 65 Prozent. Zu anderen Verteilungskurven überzugehen hätte also ebenfalls kaum Auswirkungen auf die Ergebnisse. Der springende Punkt ist die mutmaßlich geringe Größe des Phänomens, und tatsächlich passen die Daten zu einem kleinen Effekt.

Ideal für das wissenschaftliche Verständnis einer Größe (in diesem Fall der Korrelation

Stichproben zum  
**Geschlechterverhältnis**  
umfassen zumeist  
Millionen von Daten-  
sätzen

zwischen der Schönheit der Eltern und dem Geschlechterverhältnis ihrer Kinder) ist es, wenn man die Schwankung kennt und sie mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreiben kann. Einzelne Forscher können Daten erheben oder bekannte Datenbestände kreativ auswerten (wie Kanazawa) und ihre Ergebnisse veröffentlichen. Danach lassen sich die Resultate gelegentlich in Metaanalysen untersuchen. Dieses Vorgehen glättet einen Teil der Schwankungen heraus, die für Studien mit kleinen Stichproben typisch sind und die Wahrscheinlichkeit eines positiven Effekts leicht einmal von 50 Prozent auf 58 Prozent hochschnellen lassen, während sie in der nächsten Studie vielleicht nur bei 38 Prozent liegt.

### Prominente und ihre Kinder

Ein Weg, uns über Kanazawas Ergebnisse mehr Klarheit zu verschaffen, besteht in der Sammlung weiterer Daten. Jedes Jahr veröffentlicht die US-Zeitschrift »People« eine Liste der 50 schönsten Menschen. Da es sich um Prominente handelt, ist es nicht schwer, auch das Geschlecht ihrer Kinder zu ermitteln, was wir für die Jahre 1995 bis 2000 getan haben. Die Daten wurden Wikipedia, der Internet Movie Database und den Webseiten der Prominenten entnommen, und zwar bis zum August 2007. Uns fehlten lediglich wenige Details aus diesen Jahren. (Die Daten können unter [www.stat.columbia.edu/~gelman/research/beautiful/](http://www.stat.columbia.edu/~gelman/research/beautiful/) heruntergeladen werden.)

Demnach hatten bis 2007 die 50 schönsten Menschen der USA im Jahre 1995 exakt 32 Mädchen und 24 Jungen, also 57,1 Prozent Mädchen bekommen; das liegt um 8,6 Prozentpunkte über dem Bevölkerungsmittelwert von 48,5 Prozent. Wenn das nicht nach einer deutlichen Bestätigung der Hypothese klingt! Aber der Standardfehler beträgt  $0,5/\sqrt{32+24} = 6,7$  Prozent. Die Diskrepanz ist also statistisch nicht signifikant. Wir brauchen offenkundig mehr Daten.

Die 50 schönsten Leute des Jahres 1996 hatten 45 Mädchen und 35 Jungen: 56,2 Prozent Mädchen, 7,8 Prozent mehr als in der Allgemeinbevölkerung. Wieder gute Nachrichten! Zusammen mit den 1995er Daten erhalten wir jetzt 56,6 Prozent Mädchen – 8,1 Prozent mehr als erwartet – mit einem Standardfehler von 4,3 Prozent: Das schrammt beinahe den Bereich der statistischen Signifikanz. Sammeln wir also weitere Indizien.

Die 50 Schönsten des Jahres 1997 hatten 24 Mädchen und 35 Jungen – oh nein, das geht in die falsche Richtung, also weiter ... Für die 1998er Liste sind es 21 Mädchen und 25 Jungen, für 1999 23 Mädchen und 30 Jungen, und die 2000er Schönheiten haben

Metaanalysen glätten **Schwankungen** heraus, die für Studien mit kleinen Stichproben typisch sind

### STATISTISCHE SIGNIFIKANZ

Statistiker bezeichnen **Unterschiede zwischen Messgrößen oder Variablen** als signifikant (wesentlich), wenn die Wahrscheinlichkeit, dass sie durch Zufall so zu Stande kommen würden, gering ist. Ist etwas signifikant, wird statistisch darauf geschlossen, dass tatsächlich ein Unterschied vorliegt. Dennoch muss eine solche Differenz nicht zwingend vorhanden sein. Auch solche, die statistisch signifikant sind, können zufällig sein. Wie häufig das der Fall ist, hängt von der Auswahl der untersuchten Messgrößen ab: Es können zwischen 0 und 100 Prozent der statistisch signifikanten Zusammenhänge zufälligen Ursprungs sein.



Die Sammelkassette von **Spektrum** bietet Platz für 12 bis 15 Hefte. Sie können darin alle Ihre **Spektrum**-Hefte und -Sonderhefte aufbewahren. Die stabile Sammelkassette ist aus schwarzem Kunststoff und kostet € 9,50 (zzgl. Inlandsversand).

[www.spektrum.com/sammeln](http://www.spektrum.com/sammeln)

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel.: 06221 9126-743 | Fax: 06221 9126-751 | [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

## STICHPROBE

Als Stichprobe bezeichnet man eine Teilmenge einer Grundgesamtheit, die unter bestimmten Gesichtspunkten ausgewählt wurde. Mit Stichproben wird gearbeitet, wenn es nicht möglich ist, die Grundgesamtheit, etwa die Gesamtbevölkerung oder alle hergestellten Exemplare eines Produkts, zu untersuchen. Grundgedanke ist das **Induktionsprinzip**, bei dem von besonderen auf allgemeine Fälle geschlossen wird. Kritisch ist jeweils das Auswahlverfahren. Die korrekte Wahl des Auswahlverfahrens ist wichtig, da die Stichprobe repräsentativ sein muss, um auf die Grundgesamtheit schließen zu können.

Wenn plötzlich behauptet wird, es gebe einen großen Effekt, müssten bei Gutachtern und Journalisten alle **Alarmlampen** aufleuchten

bis 2007 29 Mädchen und 25 Jungen bekommen. Führen wir alle Daten zusammen und eliminieren die Dopplungen (beispielsweise Brad Pitt), so haben die laut »People« schönsten Menschen der Jahre 1995 bis 2000 insgesamt 329 Kinder bekommen, von denen – bei einem Standardfehler von 2,8 Prozent – 157 oder 47,7 Prozent Mädchen sind: statistisch nicht signifikante 0,8 Prozent weniger als in der Allgemeinbevölkerung. Hier scheint also nichts Aufregendes abzulaufen. Gälten hingegen auch statistisch nicht signifikante Ergebnisse als akzeptabel, so könnten wir auf der Grundlage der aktuellen Schönsten-Listen alle zwei Jahre einen Fachartikel veröffentlichen.

Warum ist uns das so wichtig? Warum verschwenden wir unsere Zeit an eine Reihe von Fachartikeln, deren statistische Fehler den Gutachtern der Zeitschrift leider nicht aufgefallen sind? Aus zwei Gründen: Erstens stellen sich vergleichbare statistische Probleme auch bei zahlreichen anderen Forschungsergebnissen, die suggestiv, aber statistisch nicht signifikant sind – dazu gleich mehr. Zweitens scheinen die ungeschriebenen Gesetze des wissenschaftlichen Publizierens und die selektive Medienwahrnehmung die sozialwissenschaftliche Forschung systematisch zu verzerren.

Schon vor seinem Artikel in »Psychology Today« und seinem Buch haben Kanazawas Feststellungen in den neuen Medien viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Zum Beispiel hieß es im beliebten Blog »Freakonomics«:

»Eine neue Studie von Satoshi Kanazawa legt nahe, dass ... es auf der Welt mehr schöne Frauen als schöne Männer gibt. Warum? Demnach ist das erstgeborene Kind gut aussehender Eltern mit einer 36 Prozent höheren Wahrscheinlichkeit ein Mädchen als ein Junge – was evolutionär betrachtet heißt, dass Schönheit für Frauen ein wichtigeres Merkmal ist als für Männer. Die Untersuchung beruht auf den Daten von 3000 Amerikanern und wurde im »Journal of Theoretical Biology« veröffentlicht.«

Man beachte, wie der Effekt entlang der Berichterstattungskette anwächst. So stieg der (statistisch nicht signifikante) Unterschied von 4,7 Prozent auf 8 Prozent an, als Kanazawa unter mehreren gleichwertigen Vergleichen den auffälligsten herausgriff, nämlich den zwischen der attraktivsten Gruppe und dem Mittelwert der vier übrigen Kategorien. Das steigerte sich dann zu 26 Prozent in der Darstellung als logistischer Regressionskoeffizient und sprang schließlich – warum auch immer – auf 36 Prozent.

Das Seltsame ist, dass bei dieser Zahl eigentlich alle Alarmlampen hätten aufleuchten müssen, denn damit wäre der Effekt 10- bis

Wie sich magere 4,7 Prozent plötzlich auf 36 Prozent aufblähen können: Behauptungen, die sich auf Statistiken stützen, sind besonders kritisch zu prüfen, wenn es um kleine Effekte geht – wie hier zum Geschlechterverhältnis. Selbst in der Fachpresse finden sich immer wieder Hypothesen mit schwacher statistischer Basis, wenn nicht gar fehlerhafter Interpretation. Das passiert vor allem dann, wenn Aussagen besonders einleuchtend sind.

100-mal größer als alle anderen Faktoren, die über Geschlechterverhältnisse bekannt sind. Als wir diese großen Schätzwert gesehen haben, sagten wir nicht: »Wow, was für ein großer Effekt!«, sondern: »Mann, was für eine miserable Teststärke!« Die Teststärke (englisch: *statistical power*) beschreibt die Aussagekraft eines statistischen Tests.

Bei gegebener Effektgröße wächst die Teststärke mit der Größe der Stichprobe. Kein Wunder, dass Tests mit zu kleinen Stichproben nur selten signifikante Ergebnisse liefern. Noch schlimmer: Sie überschätzen die Größe eines Effekts dramatisch. Physikalisch gesprochen ist in diesen Fällen das Rauschen stärker als das Signal.

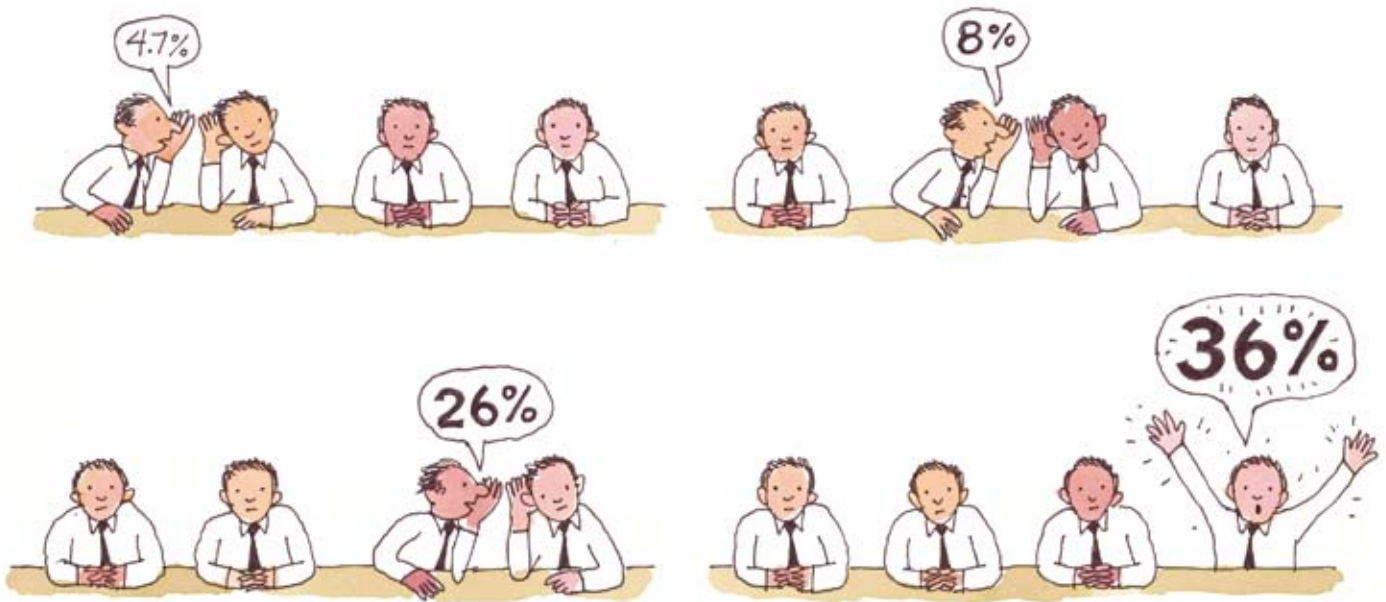
## Argumente, die durch bloße Fakten nicht totzukriegen sind

Dieses Problem wird künftig noch häufiger auftreten. Sind die großen Fragen erst einmal geklärt, untersuchen Forscher zunehmend auch kleinere Effekte. Außerdem sind Geschlechterverhältnisse für alle Menschen interessant, die Kinder bekommen wollen.

Wie erwähnt liefern Studien von zu geringer Teststärke Zufallsergebnisse, die bisweilen statistisch signifikant und noch häufiger suggestiv sind, so wie Kanazawas Schöne-Elternmehrmädchen-Analyse. Ein gegenteiliges Ergebnis könnte man ebenso leicht evolutionsbiologisch begründen, und zwar so: Menschen, die als schön empfunden werden, sind wahrscheinlich im Schnitt gesünder sowie wohlhabender und gehören eher der dominierenden Ethnie an.

Sie haben insgesamt mehr Merkmale, die in der Gesellschaft geschätzt werden. Solche Gruppen üben mit größerer Wahrscheinlich-





keit Macht aus, ein Merkmal, das einigen Soziobiologen zufolge eher Männern als Frauen nützt – daher wäre es nur natürlich, wenn attraktive Eltern eher Söhne bekämen. Wir behaupten nicht, dass dem so ist; wir stellen nur fest, dass man mühelos in beide Richtungen argumentieren kann. Auf die Fähigkeit dieser Theorie, nahezu beliebige Befunde zu erklären, hat Jeremy Freese hingewiesen, und er hat diesen Argumentationstypus »eher vampirisch als empirisch« genannt, da er »durch bloße Fakten nicht totzukriegen« sei.

In der Statistik lässt sich nicht beweisen, dass etwas nicht der Fall ist. »Schöne Eltern haben mehr Töchter« funktioniert als Schlagzeile. Die ehrlichere Aussage »Es gibt keine überzeugenden Belege dafür, dass schöne Eltern mit höherer oder geringerer Wahrscheinlichkeit Töchter bekommen« hat weniger Charme. Folglich wimmelt es in der öffentlichen Wissenschaftswahrnehmung von unbewiesenen Behauptungen, die auch solidere Forschungen diskreditieren können.

Viele Wissenschaftler werden angesichts der Statistik in diesem Artikel wohl mit den Schultern zucken. Aber wenn das alles so trivial ist, wie konnte dieser Fehler dann gleich in einer ganzen Reihe von Fachartikeln durchgehen? Ein Grund ist sicher die Überlastung der Gutachter. Statistische Fehler können schwer zu entdecken sein. Aber ein weiterer Grund ist der verwirrende Zusammenhang zwischen statistischer Signifikanz und Stichprobengröße. Bekanntermaßen kann man jede Stichprobe so groß machen, dass man fast immer einen zwar statistisch signifikanten, wenn auch kleinen Effekt findet. Weniger bekannt ist, dass es bei einem tatsächlich kleinen Effekt sinnlos ist, ihn mit

Untersuchungen geringer Teststärke nachweisen zu wollen.

Nüchtern betrachtet muss ein Forscher beim Geschlechterverhältnis zwei Nachweise führen. Einen statistischen: nämlich dass die beobachteten Muster echte Populationseffekte darstellen und nicht durch Stichprobenvariabilität erklärt werden können. Und einen biologischen: dass nämlich Effekte von einem Prozentpunkt wirklich bedeutsam sind. Ein Effekt von 26 Prozent hätte sofort Verdacht wecken müssen. Statistiker sind an diesem Prozess nicht unschuldig. Lehrbücher erklären zwar die Konzepte von statistischer Signifikanz und Teststärke, aber sie sagen wenig darüber, was zu tun ist, wenn man aus kleinen Stichproben unglaublich große Schätzwerte ermittelt hat. In klassische Signifikanzberechnungen fließen keine Vorkenntnisse über Effektgrößen ein, und bayessche Analysen sind oft nicht besser.

In den Lehrbuchbeispielen für bayessche Inferenz werden fast immer aussagearme A-priori-Verteilungen verwendet, und die Teststärke wird kaum je erwähnt. Berechnungen der Teststärke fließen zwar regelmäßig in das Studiendesign ein (um die nötige Stichprobengröße zu ermitteln), werden aber nur selten zur Beurteilung von Datenanalysen herangezogen. Theoretische Konzepte wie Typ-S- und Typ-M-Fehler haben sich in der statistischen Praxis noch nicht etabliert.

Eine zeitgemäße Lösung für die Kommunikation statistischer Behauptungen besteht in einem offeneren Austausch über Methoden und Konzepte. Wir hoffen, dass eine Auseinandersetzung mit den Schätzwerten für kleine Effekte die Selbsttäuschung verhindern wird. ◀



**Andrew Gelman** (links) lehrt am Department of Statistics sowie am Department of Political Science an der Columbia University, New York. **David Weakliem** unterrichtet am Department of Sociology, University of Connecticut.

**Dubner, S. J.:** Why do Beautiful Women Sometimes Marry Unattractive Men? In: <http://freakonomics.blogs.nytimes.com/>, 2. August 2006.

**Gelman, A.:** Scaling Regression Inputs by Dividing by Two Standard Deviations. Technical Report, Department of Statistics, Columbia University, 2007.

**Kanazawa, S.:** Beautiful Parents have More Daughters: A Further Implication of the Generalized Trivers-Willard Hypothesis. In: *Journal of Theoretical Biology* 244, S. 133–140, 2007.

**Miller, A. S., Kanazawa, S.:** Why Beautiful People Have More Daughters. Perigee, New York 2007.

© American Scientist  
[www.amsci.org](http://www.amsci.org)

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1017406](http://www.spektrum.de/artikel/1017406).

# Amazoniens Tropenwälder

## Eine alte Kulturlandschaft?

Wo heute dichter Dschungel wuchert, so die neue Sicht einiger Archäologen, gediehen einst miteinander vernetzte »Gartenstädte«, in denen Amazoniens Ureinwohner Maniokfelder und Obstgärten hegten.

Von Michael J. Heckenberger

**A**ls die brasilianische Regierung 1961 den Parque Indígena do Xingu einrichtete, lag dieses gut 27000 Quadratkilometer große Schutzgebiet für die Ureinwohner des Landes noch fernab der modernen Welt, verborgen in den Urwäldern des Mato Grosso am Xingu, einem Zufluss des Amazonas. Auch 1992 hatte sich daran wenig geändert.

Damals lebte ich zum ersten Mal bei den Kuikuro, einer der dort heimischen Gruppen, und die Grenzlinie des Nationalparks verlief irgendwo im wuchernden Grün. Heute ist sie klar erkennbar, denn ein Flickenteppich landwirtschaftlicher Nutzflächen kontrastiert scharf mit der Mauer von Urwaldriesen. Wie eine grüne Insel liegt der Parque inmitten eines von Sojaanbau, Bewässerungsanlagen und Sattelschleppern geprägten modernen Brasiliens, eine »Lost World«, bewohnt von »Xinguano«, wie die Indianergruppen im Quellgebiet des Xingu zusammenfassend bezeichnet werden. Das Schutzgebiet ermöglicht ihnen eine vergleichsweise ursprüngliche Lebensweise, weit ursprünglicher, als ich es bei meiner Ankunft noch ahnte.

Bis in das 20. Jahrhundert hinein assoziierten Europäer wie Nordamerikaner mit Amazonien Bilder von üppiger Urwaldvegetation und endlosen, mäandernden Flussläufen, von mysteriösen, oftmals bedrohlichen Tieren. Und von Ureinwohnern, die sich von dem ernährten, was die natürliche Umwelt ihnen bot, ohne zentralisierte Herrschaft, stadtähnliche Siedlungen und Überschusswirtschaft. Ein Leben wie in der Steinzeit. »Am Anfang war die

ganze Welt Amerika«, befand der britische Philosoph John Locke 1690 demgemäß.

Doch im wuchernden Grün liegen die Überreste einer komplexen Gesellschaft aus vorkolumbischer Zeit verborgen. Gemeinsam mit den Kuikuro legte ich in den vergangenen Jahren ein Netz von Städten, Dörfern und Straßen frei, das bisherige Vorstellungen widerlegt. Einst lebten dort offenbar gut 20-mal so viele Menschen wie heute. Mit ausgefeilten Anbautechniken kultivierten sie den Urwaldboden, doch die Siedlungen, Gärten, Felder und Obstaine eroberte sich die Natur zurück, nachdem von Europäern eingeschleppte Krankheiten die Vorfahren der heutigen Kuikuro dahingerafft hatten.

Und so bot sich dem deutschen Arzt und Völkerkundler Karl von den Steinen auf seinen Expeditionen in das Xingu-Gebiet 1884 und 1887/88 jenes Bild dar, das er in seinem Werk »Unter den Naturvölkern Zentral-Brasiliens« 1894 publizierte, das zum Klassiker der noch jungen Ethnologie avancierte. Demnach lebten die Amazonasvölker als kleine und isolierte Gruppen in einem sensiblen Gleichgewicht mit ihrer Umwelt. Spätere Forscher extrapolierten den Befund in die Vergangenheit, denn der wenig fruchtbare Boden des Tropenwalds schloss ihres Erachtens intensive Landwirtschaft und somit große Siedlungen beziehungsweise dichte Populationen kategorisch aus. Das Amazonien der Gegenwart glich offenbar dem der Zeit vor Kolumbus.

Eine Vorstellung, die auch der britische Forschungsreisende Percy Harrison Fawcett nicht revidieren konnte. Nach mehreren erfolgreichen Südamerika-Expeditionen – die meist der Kartierung unerforschter Dschun-



LUGI MARINI

**Kuhikugu – der Name bedeutet »Ort der kleinen Fische«, die wissenschaftliche Bezeichnung der archäologischen Stätte lautet X11 – war vor der Ankunft der Europäer die wohl größte Stadt im viele tausend Quadratkilometer umfassenden Quellgebiet des Xingu, eines Zuflusses des Amazonas. 1000 Menschen oder mehr bewohnten den Ort, der im Zentrum eines Netzwerks von Siedlungen stand.**



## In Kürze

- ▶ Ein dampfender, urwüchsiger Dschungel, bewohnt von wilden Tieren und kleinen Gruppen steinzeitlicher Indianervölker, bedroht von Raubbau und Brandrodung – das ist unser Bild der **Regenwälder Amazoniens**. Entwickelte Kulturen mit stadthähnlichen Siedlungen passen nicht zu dieser Vorstellung.
- ▶ Erst seit wenigen Jahren wissen Archäologen: In vorkolumbischer Zeit existierten im Xingu-Quellgebiet **sorgfältig geplante**

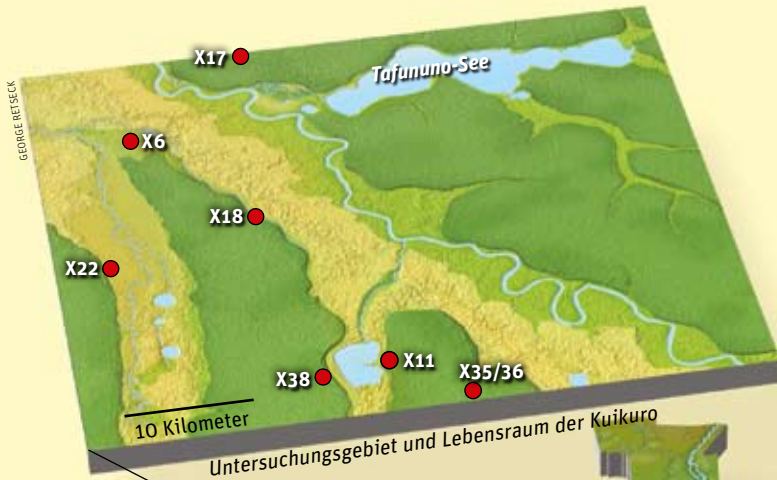
**Siedlungscluster.** Erst nachdem die Bevölkerung durch von Europäern eingeschleppte Krankheiten dezimiert worden war und landwirtschaftliche Nutzflächen brach lagen, entwickelte sich dort dichter Tropenwald als Sekundärbewuchs.

- ▶ Ausgrabungen im Schutzgebiet Parque Indígena do Xingu zeigen, dass die materielle Kultur vor der Ankunft der Europäer dort jener **der heutigen Xinguano** in vielem gleicht. Der Erhalt des inzwischen bedrohten Tropenwaldgebiets ist deshalb nicht nur eine ökologische Notwendigkeit, sondern auch von Bedeutung für die Erforschung der Menschheitsgeschichte.

gelgebiete galten – versuchte er 1925 »Z« zu finden, die legendäre Ruinenstadt einer untergegangenen Hochkultur im Xingu-Gebiet. Ein Häuptling hatte ihm davon erzählt, und Fawcett glaubte Hinweise darauf entdeckt zu haben. In der Fachwelt fand er wenig Resonanz mit seiner Theorie. Immerhin wurden später mehr als ein Dutzend Versuche unternommen, das Schicksal seiner im Urwald verschwundenen Expedition zu klären. Außerdem inspirierten Fawcetts Berichte seinen Freund Arthur Conan Doyle zu dem Roman »Die verlorene Welt«, dem Vorbild zahlloser Abenteuer geschichten, die Kulturen einer fernen Vergangenheit in der Weltabgeschiedenheit unzugänglicher Natur überdauern lassen.

So fantastisch Fawcetts These über »Z« gewesen sein mag, so hatte er doch Recht damit, die gängige Vorstellung von der Kontinuität einer steinzeitlichen Kultur Amazoniens in

Frage zu stellen. Erst in den 1970er Jahren entstanden erste Risse am Theoriegebäude. Neubewertungen früher europäischer Reise schilderungen zeigten, dass diese keineswegs von vereinzelt Stämmen, sondern vielmehr von dichten Populationen berichteten. Als der Chronist und Missionar Gaspar de Carvajal am 25. Juni 1542 einen Fluss in der Region befuhr, notierte er: »Wir gelangten zu Inseln, die wir unbewohnt glaubten. Aber nachdem wir uns zwischen ihnen befanden, entdeckten wir eine große Zahl von Siedlungen. ... Als sie uns sahen, kamen uns auf dem Fluss über 200 Kanus entgegen, die jeweils 20 oder 30 Indianer, ja sogar 40 an Bord hatten ... Diese waren farbenprächtig mit verschiedenen Zeichen dekoriert, und sie trugen Posaunen und Trommeln bei sich.« Noch 1723 beschrieb der Brasilianer António Pires de Campo eine dicht besiedelte Landschaft am Quellgebiet



### LAND DER LEGENDEN

**Archäologische Surveys und Ausgrabungen** bestätigen das neue Bild Amazoniens, wie es eine Neubewertung historischer Quellen seit den 1970er Jahren nahelegt: Am Vorabend der europäischen Kolonisierung war das Land dicht besiedelt und intensiv bewirtschaftet. Der Autor arbeitet seit 1993 im Parque Indígena do Xingu, einem Schutzgebiet am Oberlauf des Xingu im Bundesstaat Mato Grosso, das vom Volk der Kuikuro bewohnt wird. Genau in diesem Gebiet verschwand die Expedition des britischen Forschers Percy Harrison Fawcett 1925 auf ihrer Suche nach der legendären Ruinenstadt »Z«.



des Tapajós (siehe Karte links unten): »Es gibt hier so unüberschaubar viele Menschen, dass es unmöglich ist, ihre Siedlungen zu zählen, und bei einem Tagesmarsch stößt man auf zehn oder zwölf Dörfer, und jedes davon besteht aus zehn oder 30 Häusern, und darunter sind manche 30 bis 40 Schritte breit.«

Archäologische Erkundungen – etwa auf der Insel Marajó und in der Umgebung von Santarém und Manaus – bestätigten inzwischen solche Berichte. Die Funde belegen überdies, dass die frühen Zivilisationen weit reichende Handelsbeziehungen untereinander pflegten. Weniger erforscht ist bislang Amazoniens südliche Peripherie. Jüngste Untersuchungen in Llanos de Mojos im Tiefland Boliviens und im brasilianischen Bundesstaat Acre deuten aber ebenfalls auf komplexe Gesellschaftsstrukturen der einstigen Bewohner hin. Wie weit entwickelt einige davon waren,

verdeutlicht ein weiteres Zitat aus dem Bericht de Campos: »Auch ihre Straßen verlaufen sehr gerade und sind breit, und sie halten diese so rein, dass man nicht mal ein vom Baum gefallenes Blatt darauf findet.«

Als ich mich in den frühen 1990er Jahren daran machte, die Geschichte des Xingu-Gebiets zu erforschen, verschwendete ich keinen Gedanken an versunkene Ruinen. Steinens Klassiker kannte ich wohl, von Fawcett und seiner Stadt »Z« hatte ich kaum etwas gehört. Obschon der überwiegende Teil des Amazonasbeckens für Archäologen damals Neuland darstellte, schien es unwahrscheinlich, dass Tempelpyramiden oder dergleichen bislang übersehen worden waren.

Und doch gab es offene Fragen. Robert Carneiro, Anthropologe und Kurator des New Yorker American Museum of Natural History, hatte in den 1950er Jahren bei den Kuikuro

## DIE KUIKURO

**Das Schutzgebiet des Nationalparks** um den Oberlauf des Xingu bietet Brasiliens Ureinwohnern die Möglichkeit, ihre Tradition und Kultur zu leben. Eines der bedeutendsten Völker dieser »Xinguano« sind die Kuikuro. Mitglieder dieses Stamms gehören zum Team des Autors und verfassten mit ihm verschiedene Zeitschriftenartikel. Vieles deutet darauf hin, dass sie mit den Indianern der vorkolumbischen Zeit einiges gemein haben. So betreiben auch die Kuikuro heute Felderwirtschaft, legen Obstgärten an, züchten Fische und nutzen den Wald, all dies freilich auf nachhaltige Weise. Sie benutzen in Form und Dekoration ähnliches Kochgeschirr, wie es in den Ausgrabungsstätten zu Tage kam. Auch die Struktur der Siedlungen und der Häuser finden sich in der Vergangenheit.



Eine Kuikuro fischt mit einem Korb in einem angelegten Teich wie in alter Zeit.

Flötenbläser und Tänzer erinnern bei einer Begräbniszeremonie an den Verstorbenen – ob auch solche Bräuche einer alten Tradition entsprechen, lässt sich derzeit noch nicht sagen.



Die Kuikuro bewahren eine Lebensweise aus einer Zeit vor 1492. Ihre Ökonomie und die Organisation der Siedlungen stimmen mit den archäologischen Befunden überein.



Ein Dorf der Xinguano wird von mehreren hundert Menschen bevölkert und besteht aus großen Häusern um eine kreisrunde Plaza.

gelebt. Er wusste von einer prähistorischen Stätte, die von einem Grabensystem umgeben sei (auf der Karte rechts mit X11 bezeichnet). Die Bürgerrechtler Cláudio und Orlando Villas Boas, auf deren Initiative hin der Nationalpark Xingu eingerichtet wurde, hatten Erdwälle in der Nähe zahlreicher Dörfer gesehen. Und Carneiro berechnete damals, dass Landwirtschaft und Fischerei in diesem Gebiet eigentlich Populationen von 1000 und 2000 Menschen ernähren könnten – ein Vielfaches der heutigen Bevölkerung.

Kurz nach meiner Ankunft im Kuikuro-Dorf führte mich Afukaka, der das Amt des Häuptlings geerbt hatte, zu einem Ort, den die Einheimischen Nokugu nennen – nach dem dort hausenden Jaguargeist. Profaner klingt die wissenschaftliche Bezeichnung der archäologischen Stätte: X6. Unterwegs beobachtete ich einige Männer, wie sie eine immense Fischreuse über den Fluss Angahuku spannten, der nach heftigen Regenfällen um ein Vielfaches angeschwollen war.

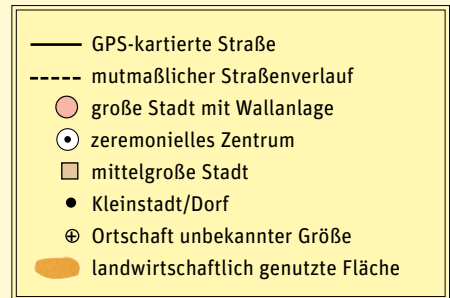
Afukaka brachte mich zu einem Graben von enormen Ausmaßen: zehn Meter breit und zwei bis drei Meter tief, und das auf einer Länge von zwei Kilometern. Ich war absolut verblüfft von den Dimensionen, die so gar nicht zu meinen Vorstellungen passten. Gemeinsam mit einigen Kuikuro vermaß und kartierte ich in den folgenden Monaten die zu Tage liegenden Erdbauten der nicht weniger als 45 Hektar umfassenden Siedlung. Am Ende des folgenden Jahres präsentierte ich dem Häuptling den Stand der Forschung. Ein äußerer Graben umschloss die Siedlung, überquert von einer irdenen Brücke. Auf der verlief einst eine ungepflasterte Straße, die in der einen Richtung zwischen zehn und 20 Meter breit schnurgerade zu der fünf Kilometer entfernten archäologischen Stätte X13 führte, im einheimischen Idiom ebenfalls nach einem Jaguargeist benannt: Heulugihiti.

Wir überquerten die Brücke und betraten Nokugu. Niedrige Erdwälle begrenzten zu beiden Seiten die Straße, die sich nun auf 40 Meter Breite öffnete, dem Maß einer vierspurigen Autobahn. Nach ein paar hundert Metern überquerten wir einen inneren Graben und betrachteten unsere neueste Entdeckung: Ein Suchgraben hatte die trichterförmige Basis einer Palisade aus Baumstämmen zum Vorschein gebracht. Afukaka erzählte mir dazu eine Geschichte über bewehrte Dörfer und Kriegszüge, die sich in einer fernen Vergangenheit seines Volks zugetragen haben sollten.

Bald durchquerten wir Waldstücke mit dichtem Unterholz, dann wieder freie Flächen: allesamt Spuren früherer Eingriffe in die

VORKOLUMBISCHE STÄDTE

**Ausgrabungen belegen**, dass die Vorfahren der Kuikuro Hunderte von Quadratkilometern an Urwaldboden in fruchtbares Ackerland verwandelt haben (archäologische Stätten sind mit einem X gekennzeichnet). Große und kleine Ortschaften bildeten einen Verbund, der als politische Einheit fungierte. Häuser, Siedlungen und Siedlungscluster wurden stets an einer Ost-West-Achse orientiert.



Landschaft. Wir gelangten zu einer grasbedeckten, kreisrunden Lichtung, die von meterhohen Plattformen umgeben war. Einst war dies sicher der zentrale Platz des Ortes, heute wachsen dort hohe Palmen. Ich erklärte dem Häuptling, dass sie ursprünglich in den Kompostgärten der alten Wohnbezirke gewachsen waren und im Lauf der Jahrhunderte die aufgelassene Plaza erobert hatten.

Schneisen im Urwald

In der weiteren Umgebung stießen wir auf große Abfallhaufen, die dem hinter Afukakas Haus sehr ähnlich waren. Sie waren voll mit zerbrochenen Töpfen, und er bemerkte gleich, dass diese bis ins Detail jenen glichen, die seine Frauen nutzten, um Maniok zu verarbeiten. Bei einem späteren Besuch, als wir gerade dabei waren, ein altes Haus auszugraben, zog der Häuptling im Küchenbereich ein großes Keramikstück aus dem Boden und bestätigte meinen Eindruck, dass der Alltag dieser alten Gesellschaft dem heutigen glich. »Schau, ein Topfuntersatz!«, rief Afukaka überrascht. Ein solcher *undagi*, wie die Kuikuro ihn nennen, wird zum Kochen von Maniok verwendet.

Diese Verbindungen sind es, die die Xinguano, die indianischen Gruppen im Xingu-Quellgebiet, so faszinierend machen. Sie gehören zu den wenigen vorkolumbischen Gesellschaften im Amazonasgebiet, deren gegenwärtige materielle Kultur zum archäologischen Fundgut passt. Inzwischen haben wir ein über

GESCHICHTE AM OBERLAUF DES XINGU

**UM 500:** Radiokarbondatierungen zufolge leben Menschen seit mindestens 1500 Jahren im Quellgebiet.

**6. JAHRHUNDERT:** Vorfahren der heutigen Bevölkerung besiedelten das Gebiet von Westen her.

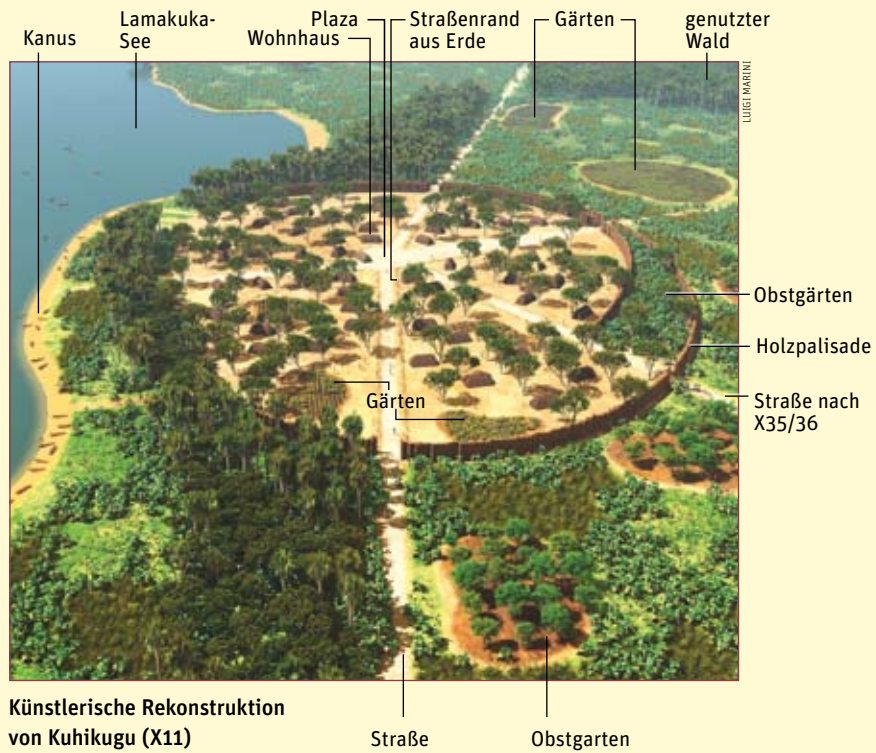
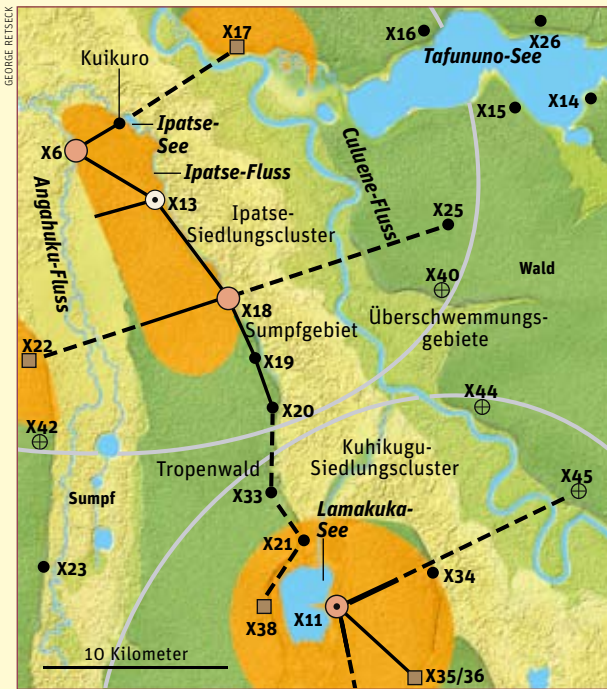
**13. JAHRHUNDERT:** Entstehung regionaler Siedlungseinheiten mit einer Bevölkerungsdichte zwischen 30 000 und 50 000 Menschen.

**1542.** Der Chronist Gaspar de Carvajal berichtet über die erste europäische Expedition auf dem Amazonas unter der Führung des spanischen Eroberers Francisco de Orellana.

**18. JAHRHUNDERT:** Europäische Kontakte und Sklavenhandel dezimieren die Xinguano-Population.

**1884:** Der deutsche Ethnologe Karl von den Steinen lebt bei den Xinguano und schätzt deren Zahl auf 3500.

**1961:** Orlando, Cláudio und Leonardo Villas Boas initiieren die Gründung des Nationalparks Xingu, wo damals noch 500 Xinguano lebten.



Künstlerische Rekonstruktion von Kuhikugu (X11)

30 Kilometer langes Netz von Schneisen durch den dichten Tropenwald geschlagen, um das Gebiet des Nationalparks zu kartieren und alle gefundenen Stätten zu untersuchen. Und dabei bestätigte sich immer wieder, dass auch die alten befestigten Städte im Aufbau heutigen Dörfern glichen, mit ihrem zentralen Platz und strahlenförmig verlaufenden Straßen, nur dass sie in der Vergangenheit zehnmal größer und mit Wehranlagen befestigt gewesen waren.

Afukaka residiert zwar in einer strohgedeckten Hütte, die jedoch ist von unglaublicher Größe: Die Grundfläche beträgt mehr als 1000 Quadratmeter. Man kann sich kaum vorstellen, wie ein Haus, das die Form eines umgekippten Korbs besitzt, in dieser Dimension ohne Stein, Mörtel und Nägel zu bauen ist. Doch selbst das durchschnittliche Haus eines Xinguano besitzt mit 250 Quadratmetern die gleiche Grundfläche wie ein Wohnhaus in den USA.

Aber nicht allein seine Ausmaße, sondern auch die Lage am südlichen Ende der Plaza hebt das Haus eines Häuptlings von anderen ab. Die hochrangigen Familien des Dorfs leben rechts (südlich) und links (nördlich) entlang des von Ost nach West verlaufenden Hauptwegs. Diese Anordnung findet sich selbst in den Häusern wieder: Die Hängematte des hochrangigsten Bewohners ist rechts der Längsachse befestigt. Stirbt ein Häuptling, wird dessen Leichnam in einer

Hängematte aufgebahrt und nach Westen ausgerichtet.

Dieses Ordnungsprinzip findet man auf allen Größenskalen im oberen Becken des Xingu. Es gab für alles einen spezifischen Platz: Hauptstraßen verliefen von Ost nach West, Nebenstraßen nach Norden und Süden, kleinere Wege zweigten davon in alle andere Richtungen ab. Zu Beginn meiner Forschung benötigten wir noch Wochen, um Gräben, Plätze und Verkehrsadern nach archäologischen Standards zu kartieren; dank der 2002 eingeführten GPS-Messungen reduziert sich der Aufwand für die Kartierung von Erdbauten heute auf wenige Tage.

In unserem Forschungsgebiet gab es demnach zwei Cluster hierarchisch organisierter Siedlungen (siehe Karte oben). Jeder bestand aus einem Zentralort und darauf ausgerichteten Trabantenstädten, in denen jeweils mehr als 1000 Menschen gewohnt haben dürften; kleinere Dörfer lagen im weiteren Umkreis. Der nördliche Cluster war auf die Stätte X13 ausgerichtet, ein zeremonielles Zentrum. Zwei große befestigte Siedlungen befanden sich in gleicher Distanz jeweils im Norden und Süden, zwei mittelgroße, ebenfalls befestigte im gleichen Abstand nordöstlich und südwestlich. Der südliche Cluster unterscheidet sich etwas, denn das zentrale X11 war auch eine Wohnstadt, umgeben von kleinen bis mittelgroßen Ansiedlungen. Beide Cluster erstreckten sich auf ungefähr 250 Quadratkilometern,

**Literaturhinweise**

**Bush, M. B. et al.:** Holocene Fire and Occupation in Amazonia: Records from Two Lake Districts. In: Philosophical Transactions of The Royal Society 362, S. 209 – 218, 2007.

**Grann, D.:** The Lost City of Z: A Legendary British Explorer's Deadly Quest to Uncover the Secrets of the Amazon. Simon & Schuster, New York 2009.

**Heckenberger, M. J. et al.:** Pre-Columbian Urbanism, Anthropogenic Landscapes, and the Future of the Amazon. In: Science 321, S. 1214 – 1217, 29. August 2008.

**Mann, C. C.:** Ancient Earthmovers of the Amazon. In: Science 321, S. 1148 – 1152, 29. August 2008.

**Prümers, H.:** Mit Jaguarzähnen ins Jenseits. In: Archäologie in Deutschland 3/2009, S. 14 – 19.

**Tarmas, O.:** Bevor Kolumbus kam. In: epoc 01/2009, S. 44 – 49.

wobei der bebaute Kernbereich ein Fünftel dieser Fläche einnahm und damit in etwa die Ausdehnung einer modernen Kleinstadt besaß.

Heutzutage ist der Großteil der einst bebauten Flächen überwuchert, man erkennt sie nur noch anhand bestimmter Pflanzen, Tier- und Bodenarten sowie archäologischer Artefakte wie Gebrauchskeramik. Wie die Kuikuro heute, nur in größerem Maßstab, ernteten die Bewohner dieses lange vergangenen Orts Früchte von Pequibäumen, die in kleinen Gärten gediehen, legten Felder für die nahrhafte Maniokknolle und für das Sapé-Gras an, mit dem sie ihre Häuser deckten. Die damalige Landschaft bestand aus einem Flickenteppich landwirtschaftlich genutzter Gebiete, durchsetzt mit Sekundärwald, der brach liegende Felder überwucherte. Vielleicht hat der

Mensch gerade durch seine gestaltenden, dabei immer maßvollen Eingriffe mit dazu beigetragen, dass in diesen Wäldern eine solch faszinierende Artenvielfalt herrscht.

In und um die Wohnareale fällt eine fruchtbare, dunkle Erde auf, von den Kuikuro *egepe* genannt, wissenschaftlich als Terra preta bezeichnet. Die verrottenden Haushaltsabfälle vieler Generationen sowie spezielle Maßnahmen zur Bodenbewirtschaftung wie das Abbrennen der Pflanzendecke haben den sonst wenig fruchtbaren Urwaldboden dort mit Nährstoffen angereichert. In Feuchtgebieten entdeckten wir die Zeugnisse einer intensiven Fischzucht wie künstlich angelegte Becken, aufgeschüttete Dämme und Verankerungen für Reusen. Die Peripherie der Cluster war dünner besiedelt, und im Gebiet zwischen ihnen gedieh der Urwald, wo nicht nur Heil-

## INTERVIEW

### »Ich bin da eher skeptisch«

Ein Gespräch mit Heiko Prümers von der Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen des Deutschen Archäologischen Instituts. Prümers leitet ein archäologisches Projekt in den Llanos de Moxos, einem in Nordostbolivien gelegenen Teil des Amazonasgebiets.

**Spektrum der Wissenschaft:** Die ersten europäischen Besucher Amazoniens berichteten von einer dichten Besiedlung. Einige Archäologen bestätigen dieses Bild und sehen das heutige Amazonien als einstige Kulturlandschaft. Ist das ein neues Paradigma?

**Heiko Prümers:** Soweit mir bekannt, gibt es nur einen solchen Bericht. Er stammt von Gaspar de Carvajal, dem Chronisten der Expedition des spanischen Konquistadoren Francisco de Orellana. Und: Nein, die Besiedlungsdichte des Amazonas-Tieflands wird kontrovers diskutiert. Ich persönlich bin da eher skeptisch.

**Spektrum:** Ihr amerikanischer Kollege Michael Heckenberger fand am Oberlauf des Xingu Belege für miteinander vernetzte Siedlungen, was doch wohl für komplexe vorkolumbische Gesellschaften spricht.

**Prümers:** Ich würde den archäologischen Befund vorsichtiger deuten. Es sind zunächst einmal nur benachbarte, durch Wege verbundene Siedlungen. Wenn man heute von vernetzt spricht, impliziert das aber eine sehr enge Beziehung untereinander – und die wäre noch nachzuweisen. Da bislang keine Informationen darüber vorliegen, wie viele Häuser es jeweils gab, wie groß diese waren und wie viele Menschen darin lebten, sollte man auch nicht von Städten sprechen.

**Spektrum:** Aber diese Orte waren offenbar keine Ausnahmen. So wurden in Westbrasilien Geoglyphen entdeckt, bis zu 350 Meter große Bodenfiguren, die aus tiefen Gräben bestehen. Spricht das nicht für entwickelte Gesellschaften auch in dieser Region?

**Prümers:** Der Begriff Geoglyphe ist in diesem Zusammenhang vollkommen irreführend, und es ist bedauerlich, dass er von Kollegen für diese Anlagen verwendet wird. Es handelt sich schlicht um Siedlungsplätze, die von Gräben umschlossen waren. Knapp 200 davon sind inzwischen bekannt, allesamt in der Nähe von Flussläufen.

**Spektrum:** Was weiß man über die Archäologie Amazoniens abseits der Überflutungsgebiete?

**Prümers:** Sehr wenig. Umso interessanter sind die Analysen des Biologen Mark Bush vom Florida Institute of Technology, der Sedimente aus zwei Seengebieten untersucht hat, von denen eines in der Nähe von Puerto Maldonado in Ostperu und das andere nahe der Mündung des Amazonas lag. Er fand Holzkohle, als Anzeichen für Brandrodungsfeldbau und damit die Präsenz des Menschen, nur in Proben, die nahe von Flussläufen entnommen wurden. Bush warnt daher auch davor, Erkenntnisse aus den ebenfalls nur wenigen archäologischen Stätten im Uferbereich des Amazonas und seiner Nebenflüsse auf ganz Amazonien zu verallgemeinern. Damit hat er sicher Recht, denn es käme dem Versuch nahe, aus Funden in einem zehn Kilometer schmalen Streifen entlang von Rhein und Donau die Geschichte Europas zu rekonstruieren. Allein der brasilianische Teil dessen, was wir Amazonien nennen, ist größer als ganz Europa.

**Spektrum:** Die Erforschung des vorkolumbischen Amazonien steht also erst am Anfang?

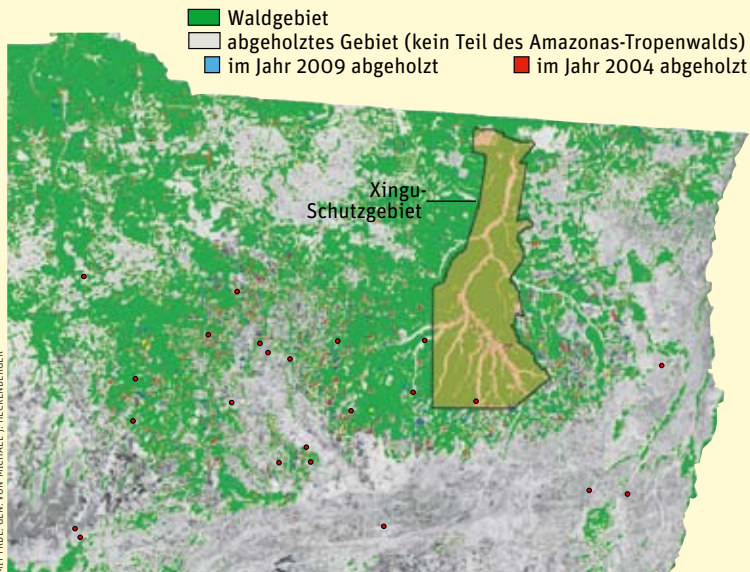
**Prümers:** Geben Sie uns noch ein paar Jahrzehnte. Die aktuelle Datenlage erlaubt bisher keine vernünftige Theorie über das Amazonien vorspanischer Zeit. Lange galt es als Konsens, dass die tropischen Böden dort keine langfristige intensive Landwirtschaft erlaubt haben. Heute wissen wir, dass es Ausnahmen gab, insbesondere in den Gebieten mit Schwarzerden, die sehr wahrscheinlich durch die Akkumulation von organischem Abfall an den Siedlungsplätzen entstanden, und in Überflutungszonen, die von den Schlammfrachten der Flüsse profitierten. Wenn dieser Diskurs nun aber eine 180-Grad-Wendung erfährt und Archäologen äußern, Amazonien sei eine Parklandschaft gewesen, ja, die vorspanischen Menschen hätten mit ihren Eingriffen in die Natur sogar die Biodiversität gefördert, dann halte ich das für riskant.

*Das Interview führte Klaus-Dieter Linsmeier, Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.*



## EINE INSEL AUS BÄUMEN

Land indigener Bevölkerungsgruppen gilt heute in weiten Teilen des Amazonasgebiets als wichtigste Barriere gegen die weitere Abholzung des tropischen Walds. Einst lag das Xingu-Schutzgebiet tief im Dschungel verborgen, heute ist es umgeben von Rinderfarmen und Anbauflächen für Soja.



Negativrekord für Brasilien – im Mato-Grosso-Gebiet werden pro Minute fünf Hektar Wald abgeholzt.

pflanzen gesammelt, Bäume gefällt und Beutetiere gejagt wurden – der Wald galt sicher auch damals als von Geistern bewohnt.

Die Identifizierung stadtähnlicher Siedlungen in einem Gebiet, fast so groß wie das Bundesland Brandenburg, lässt vermuten, dass am Oberlauf des Xingu wenigstens 15 solcher Cluster existierten. Ein Großteil dieser Region ist jedoch noch unerforscht, so dass deren Zahl auch höher sein mag. Nach Radiokarbondatierung der Stätten im Nationalpark besiedelten die Vorfahren der Xinguano das Gebiet wahrscheinlich von Westen her und begannen vor etwa 1500 Jahren, Wald und Feuchtgebiete für ihre Zwecke umzugestalten. In den Jahrhunderten vor der Entdeckung Amerikas entstanden jene Siedlungscluster, deren Dimension mich zu der Schätzung veranlassen: Im Xingu-Quellgebiet vorkolumbischer Zeit könnten 30 000 bis 50 000 Menschen gelebt haben – heute sind es gerade mal 3000.

Vor gut einem Jahrhundert ersann der Brite Ebenezer Howard das Konzept der Gartenstadt. Als Gegenentwurf zu einer sich langsam mit Großstädten füllenden industrialisierten Welt entwarf er das Bild eines Lebensraums aus vernetzten Kleinstädten im Grünen, um eine größere Zentralstadt gelegen. Diese Struktur sollte sich zudem in jeder Siedlung finden: Ringförmige Wohngebiete um einen in der Mitte liegenden Park, radial verlaufen-

de Straßenzüge. Hätte Howard von den Clustern der frühen Xinguano gewusst, hätte er ihnen gewiss einen Abschnitt in seinem Werk gewidmet.

Erkenntnisse über komplexe Gesellschaften der vorkolumbischen Vergangenheit im südlichen Amazonasgebiet sind heute wichtiger denn je, da sich dieser Lebensraum durch die Eingriffe der westlichen Zivilisation rasant verändert. Der ursprüngliche Tropenwald des südlichen Amazoniens fällt mehr und mehr Ackerbau und Viehwirtschaft zum Opfer. Beim derzeitigen Tempo wird er in den nächsten zehn Jahren auf 20 Prozent seiner ursprünglichen Größe geschrumpft sein. Vieles von dem, was übrig bleibt, wird sich auf Nationalparks wie den Parque Indígena do Xingu beschränken, wo die indigene Bevölkerung zum Nachlassverwalter einer schwindenden Biodiversität wird. Aber müssten die Xinguano nicht selbst den Wald großflächig roden und Plantagen anlegen, um eine wachsende Bevölkerung zu ernähren und ihren Kindern einen höheren Lebensstandard zu ermöglichen? Die Antwort lautet: Nein, und sie erreicht uns aus der Vergangenheit. Wenn es ehemals möglich war, eine erheblich größere Bevölkerung als heute zu ernähren, kann das auch erneut gelingen. Im Einklang mit der Natur, nicht durch Ausrottung der tropischen Umwelt. ◀



**Michael J. Heckenberger**, Anthropologe an der University of Florida in Gainesville, betreibt seit 1992 archäologische und ethnologische Forschungen in der Xingu-Region und anderen Gebieten des brasilianischen Amazoniens. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf der soziopolitischen Organisation und Ökologie vorkolumbischer Gesellschaften in der Xingu-Region. Darüber hinaus untersucht er die Veränderungen indigener Gesellschaften als Folge der europäischen Kolonisierung.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1017407](http://www.spektrum.de/artikel/1017407).



# Die »neuen« ÖKO- SYSTEME

Zählt im Naturschutz letztlich nur unberührte Wildnis?  
Einzelne Forscher betonen den Wert von sich selbst  
überlassenen, aber durch Menscheneinfluss veränderten  
Lebensräumen.

Die Wälder Hawaiis sind heute längst nicht mehr im ursprünglichen Zustand. Oft bestimmen fremde Arten aus aller Welt das Bild, viele einheimische sind verschwunden. Der Biologe Joe Mascaro setzt sich dafür ein, den ökologischen Beitrag dieser neuen Ökosysteme anzuerkennen.



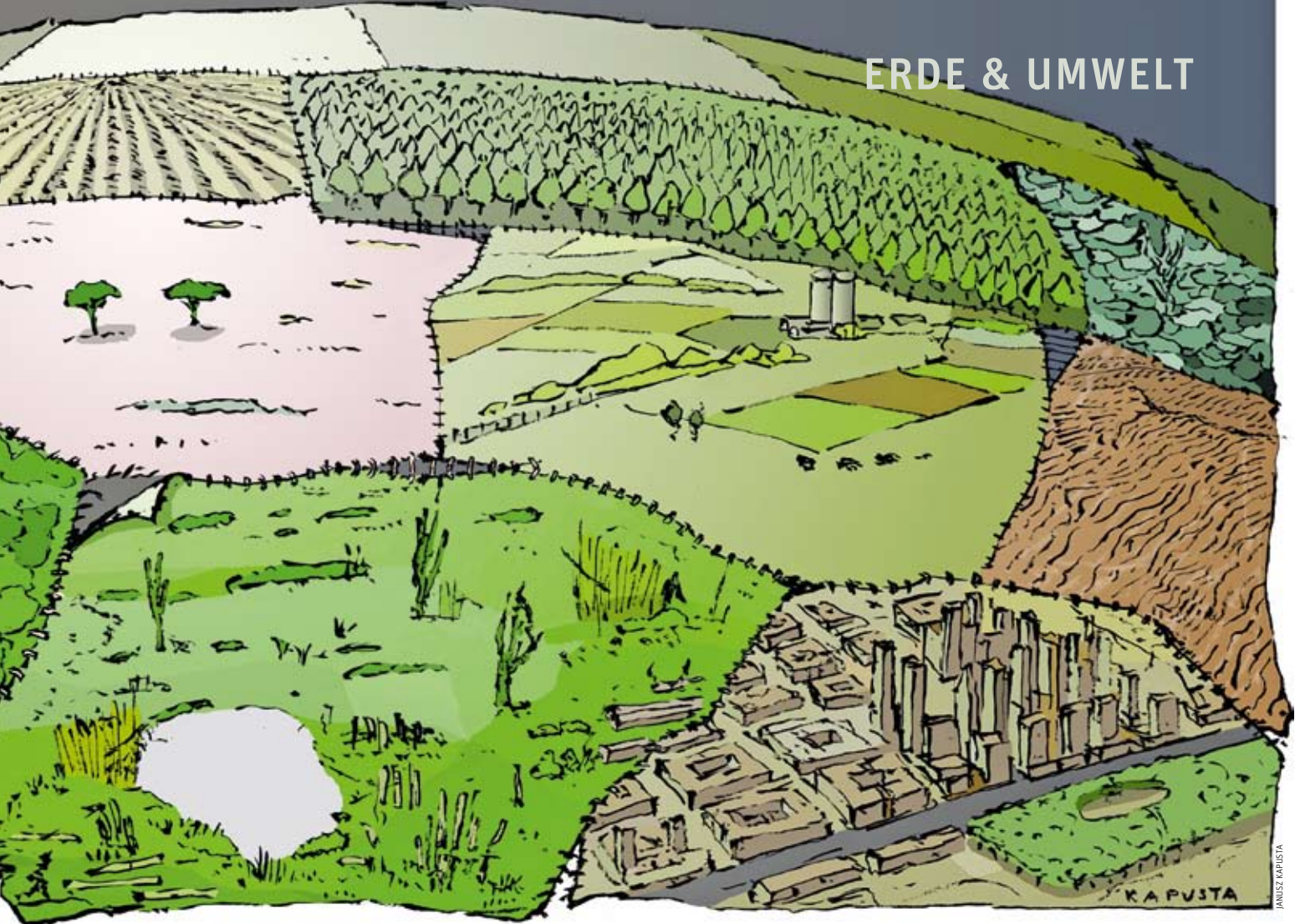
EMMA MARRIS



Von Emma Marris

Joe Mascaro kämpft sich durch den Dschungel auf der größten Insel von Hawaii. Ein dichtes Blätterdach verwehrt den Blick in den Himmel. An tropischen Bäumen, Baumfarnen und moosigen Stützwurzeln winden sich Luftwurzeln bis tief hinunter zu den Farnen und Schösslingen am Boden. Die Vegetation wächst üppig, die Luft ist feucht, und es wimmelt von Moskitos. Nur – in diesem scheinbaren Urwald geht es kosmopolitisch zu wie auf dem Londoner Flughafen Heathrow.

Hier wachsen Pflanzen aus aller Welt: indische Mangobäume, *Mangifera indica*; die Baumart *Cecropia obtusifolia* aus Mexiko, Mittelamerika und Kolumbien mit riesigen, sternförmigen Blättern, die zu den Maulbeergewächsen gehört; der südostasiatische Rosenapfel *Syzygium jambos*, ein Myrtengewächs; Erdbeer-Guaven, *Psidium cattleianum*, mit schmackhaften Früchten aus dem bedrohten brasilianischen Küstenurwald; vereinzelt der so genannte Queensland-Ahorn *Flindersia brayleyana* aus Australien. Auch gedeiht hier der Lichtnussbaum *Aleurites moluccana*, vom Menschen so viel verschleppt, dass seine Her-



kunft nicht völlig klar ist. Das ursprüngliche Hawaii vertritt der Hala oder Schraubenbaum, *Pandanus tectorius*.

Einheimische Vögel leben in diesem Dschungel keine mehr. Joe Mascaro sieht dagegen viele verwilderte Schweine, die einst polynesische oder andere Siedler mitbrachten. Der Doktorand von der University of Michigan in Milwaukee macht auf den schwarzen, fruchtbaren Boden aufmerksam. Er mag diesen Wald.

Die meisten Ökologen und Umweltschützer würden solch ein Habitat als degradiert einstufen, seine starke Durchsetzung mit Fremdarten betonen und auf die anthropogenen Einflüsse verweisen. So mancher Biologe dürfte es deswegen als minderwertiges Ökosystem bewerten. Denn was bietet es schon, außer ein paar Wildkräutern, überwuchert von aggressiven Eindringlingen, überdies die meisten davon vom Menschen eingeschleppt? Besteht da überhaupt ein großer Unterschied zu einer überwucherten Abfallhalde?

Aber nicht alle Wissenschaftler geben sich so rasch zufrieden. Sie möchten Ökosysteme nicht vorschnell in gut und schlecht einordnen: Ersteres gleichwertig mit ursprünglich, vom Menschen unberührt; alles Übrige für die Natur eher nutzlos. Lieber sprechen sie

neutral von neuen Ökosystemen. Damit ist Natur gemeint, die der Mensch zwar stark beeinflusst hat, aber nicht lenkt. Eine bewirtschaftete Baumplantage fällt nicht darunter, eine vor Jahrzehnten verlassene Bepflanzung dagegen schon. Auch ein wilder Wald voller fremdländischer Baumarten zählt dazu, wie der beschriebene Dschungel auf Hawaii, egal, ob Menschen dort jemals Bäume geschlagen oder Brände gelegt haben. Sie müssen das Gebiet nicht einmal betreten haben.

Den Anteil von neuen Ökosystemen an der gesamten Landfläche der Welt kennt niemand genau. Erle Ellis von der University of Maryland in Baltimore pflegt Karten von der Nutzung der Erde durch den Menschen zu erstellen. Für diesen Artikel zeichnete er die abgebildete Weltkarte (siehe Bild S. 70). Als neue Ökosysteme wertete er hierfür »in landwirtschaftliche oder urbane Regionen eingebettete Flächen, die aber selbst nicht landwirtschaftlich oder städtisch genutzt werden«. Nach seiner Schätzung trifft das auf mindestens 35 Prozent der Landgebiete zu. Dieser Anteil dürfte sich noch erhöhen. Viele Ökologen glauben inzwischen, dass es sich lohnt, diese Systeme zu erforschen, und dass manche davon sogar schützenswert sind.

**Die Landschaften der Erde sind heute zunehmend zerstückelt und oft durch den Menschen beeinflusst. Aber bedeutet das ökologisch grundsätzlich ein Desaster?**

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

**nature**

Das englische Original dieses Artikels erschien in *Nature* 460, S. 450–453, 2009.

## DER ANTEIL NEUER ÖKOSysteme



ERLE C. ELLIS, UNIVERSITY OF MARYLAND, BALTIMORE COUNTY

Erle Ellis von der University of Maryland in Baltimore entwarf diese Weltkarte. Sie zeigt den prozentualen Anteil an so genannten neuen Ökosystemen von Flächen innerhalb landwirtschaftlich oder urban genutzter Gebiete. Nach dieser Schätzung stellen schon mindestens 35 Prozent der Landflächen solche neuen Ökosysteme dar. Nur die weißen Gebiete sind in der Beziehung noch naturbelassen.

Zum einen können manche der neuen Ökosysteme einheimischen Arten Lebensraum bieten – was mitunter deren Überleben sichert, wenn die ursprünglichen Habitate nicht mehr existieren. Zum anderen leisten sie oft wertvolle so genannte Ökosystemdienste, gewissermaßen Servicefunktionen, von denen wir Menschen profitieren: So reinigen sie in Feuchtgebieten das Wasser, schützen Hanglagen vor Bodenerosion, entnehmen der Luft Kohlendioxid oder unterstützen die Bodenbildung. Im Naturschutz zählt der Erhalt von Ökosystemdiensten als gewichtiges Argument. Doch viele Fachleute schrecken davor zurück, die Leistungen stark veränderter Habitate ähnlich hoch anzusetzen wie die von unberührter Natur.

Mascaro hingegen gibt den neuen Ökosystemen in Einzelfällen sogar den Vorzug – dann, wenn ein natürliches Habitat derart empfindlich auf menschliche Störung reagiert, dass es im ursprünglichen Zustand überhaupt nur mit intensiven Hilfsmaßnahmen erhalten werden kann. Solche Bedingungen stuft der Forscher als museal ein. Er fragt: »Was schätzen wir an der Natur eigentlich? Dass sie vielerlei enthält, was es schon vor 1000 Jahren gab? Oder die eigenständigen Vorgänge und Abläufe jenseits von menschlicher Kontrolle?« Seines Erachtens beruht der Wert der Natur auf den Vorgängen und Abläufen.

Nach Ansicht vieler Forscher lohnt es sich, zu verfolgen, wie sich solch ein Zusammenspiel von Arten entfaltet. Neue Ökosysteme stellen oft geradezu ideale natürliche Experimente dar, etwa um zu beobachten, wie sich Lebensgemeinschaften formen, also wie Arten

an einen Ort kommen und welche von ihnen dann dort bleiben. Diese Habitate bilden zugleich eine Bühne für die Evolution von Arten, die aufeinander reagieren. Zum Studium der Dynamik von Ökosystemen benötigt man nun einmal sich verändernde Lebensgemeinschaften. Und genau darin sind die neuen Systeme Spitze. Überdies wettet Mascaro darauf, dass sämtliche übergreifenden Regeln und Beziehungsmuster, die Ökologen über Jahre für Urwälder und andere ursprüngliche Habitate herausgearbeitet haben, gleichfalls für die neuen Systeme gelten. Genauer weiß das noch niemand, denn Letztere sind erst wenig erforscht.

Daneben dürften manche der Unterschiede, wenn sie denn vorkommen, aufschlussreich sein. So ist die Frage, ob sich der ursprüngliche Landschaftstyp im neuen Ökosystem erhält, also ob ein Wald wieder durch anderen Wald ersetzt wird, eine Graslandschaft wieder durch eine Grasflur. Andere Fragen lauten: Verläuft die Evolution in einem neuen Ökosystem schneller? Muss man befürchten, dass sich eine der neuen Spezies durchsetzt und dann alles beherrscht? Wird die Artenzusammensetzung über viele Jahrzehnte heftig schwanken? »Das alles können wir nur durch Beobachtung herausfinden«, kommentiert Mascaro.

Den Wert solcher Lebensräume erkannte als einer der Ersten Ariel Lugo. Er arbeitet als Ökologe beim Forstdienst von Puerto Rico. Im Jahr 1979 leitete er eine Wissenschaftlergruppe, die in sich selbst überlassenen Kiefernplantagen Messungen vornehmen sollte. Verschwitzt und deprimiert kamen die Männer aus dem Wald zurück. »Sie behaupteten, die

Bäume erst vermessen zu können, wenn alles Unterholz entfernt wäre. Das sei undurchdringlich. Ich hielt die Leute für Memmen.«

Ein Ökosystem, in dem Kiefern – vor Ort Fremdkörper – dominierten, sollte unbegebar sein? Das widersprach einem zentralen Dogma der Ökologie. Am üppigsten wachsen doch naturbelassene Wälder, eben Urwälder! Über Jahrtausende, dass wussten alle, haben sich darin die Arten aneinander angepasst und so gut wie jede Nische besetzt. In so einem System nutzen die Organismen demnach die verfügbaren Ressourcen in jeder Weise höchst effizient. Außerdem leisten solche unberührten Wälder nach der verbreiteten Meinung im Umweltschutz die besten Ökosystemdienste.

Doch Ariel Lugo sah sich die Kiefernplantagen genauer an. Sie strotzten wirklich von Leben, viel stärker als die gleich alten Wälder daneben mit einheimischen Arten. Eine anschließende wissenschaftliche Vergleichsstudie über das Unterholz von Kiefern- und Mahagoniwäldern ergab: Der Artenreichtum war bei den Kiefern fast genauso groß wie im Mahagoniwald, die Biomasse (das Gewicht an biologischer Substanz) sogar größer. Im ersten Fall wurden die Nährstoffe überdies besser genutzt. Diese Ergebnisse reichte Lugo bei der Fachzeitschrift »Ecological Monographs« ein. Die Gutachter waren entsetzt. Bis die Arbeit schließlich erschien, verstrichen fast zehn Jahre.

### UMDENKEN GEFORDERT

Später fand Lugo in Puerto Rico und auch in anderen Ländern viele von Biologen weitgehend unbeachtete neue Ökosysteme, die eine größere Artenvielfalt aufweisen als heimische Wälder. »Deren Vielfalt an Arten zählt eben nicht. Es sind ja die falschen«, kommentiert der Forscher kopfschüttelnd. Doch er entdeckte fremde Bäume, unter deren Blätterdach es einheimischen Baumarten möglich war, sich auf ausgedörrten, ausgelaugten Weideflächen wieder anzusiedeln. Darum mag er fremde Arten nicht verdammen. Er begrüßt den Wandel sogar. »Es gab das Puerto Rico meiner Eltern und von deren Eltern. Für mich ist es bereits ein anderes Land. Meine Kinder werden wieder anderes vorfinden.«

Mit dieser Einstellung war Lugo schon früher nicht allein gewesen. Aber erst im Jahr 2006 gab es zu dem neuen Ansatz ein Manifest, und er bekam einen Namen. Unter dem Schlagwort »Novel Ecosystems« publizierte Lugo zusammen mit 17 weiteren Wissenschaftlern hierzu eine Arbeit. (Der Titel lautet übersetzt: »Neue Ökosysteme: theoretische und Managementaspekte der neuen ökologischen Weltordnung«.) Darin hieß es, diese Systeme verdienten die Aufmerksamkeit der Forscher.

Die Autoren zitierten außerdem Kommentare von Gutachtern des Manuskripts, um aufzuzeigen, wie stark die Vorbehalte gegen die neue Ansicht waren: »Ein Gutachter meinte, bei den aufgeführten Beispielen handle es sich um ökologische Katastrophen. Die Biodiversität sei dort dezimiert, die Ökosystemfunktionen seien zerstört: »Aus solchen Zitronen kann man schwerlich Limonade machen.« Lugo und seine Kollegen sahen das anders: »Wir steuern auf eine Situation mit mehr Zitronen als Limonade zu. Das sollten wir erkennen. Wir müssen uns entscheiden, was wir mit diesen Zitronen anfangen wollen.«

»Zitronen haben einen eigenen Wert«, meint der Erstautor des Papers Richard Hobbs. Der Experte für die Wiederherstellung von Ökosystemen arbeitet heute an der University of Western Australia in Crawley. Laut Hobbs stellen manche der neuen Ökosysteme »alternative stabile Zustände« dar. Sie seien in sich recht gefestigt. Die früheren Verhältnisse wieder einzuführen, dürfte sehr schwerfallen.

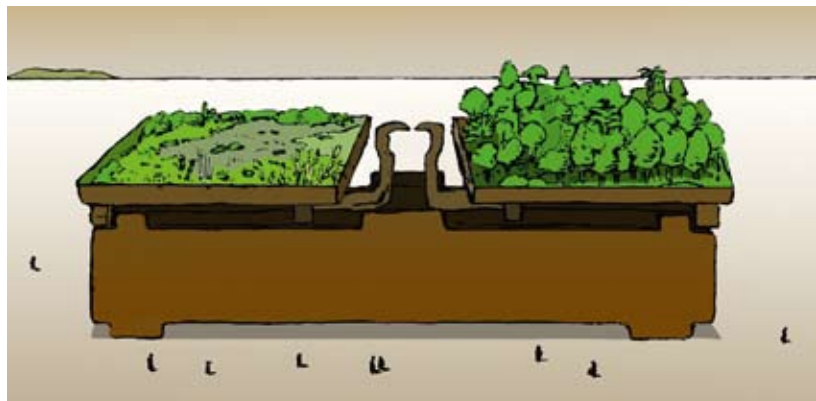
Ungefähr als diese Arbeit erschien, wurde Mascara auf Lugos Forschungen aufmerksam. Er wollte wissen, ob Gleiches wie für Puerto Rico für die Windseite von Hawaiis Hauptinsel gilt. Sind die vielen neuen Ökosysteme mitunter für einige einheimische Arten gut? Leisten sie irgendwelche Ökosystemdienste? Mascara untersuchte 46 Wälder, die in verschiedenen Höhen und auf jeweils unterschiedlich alter Lava standen. Dort dominierten ganz verschiedene eingeführte Bäume, wie die Akazie *Albizia (Falcataria moluccana)* und der Kängurubaum *Casuarina equisetifolia* aus Australien. Mascara zählte durchschnittlich ebenso viele Arten wie in ursprünglichen Wäldern – darunter allerdings nur wenige, teils gar keine einheimischen Spezies. Offenbar herrschten meist für sie ungünstige Wachstumsbedingungen.

Der Unterschied zu Puerto Rico mag sich teilweise mit der über 30 Millionen Jahre weitgehend eigenen Geschichte der Pflanzenwelt Hawaiis erklären. Einst hatten nur recht wenige verschiedene Pflanzen und kleinere Tiere

## In Kürze

- ▶ Als am wertvollsten gelten in der Biologie traditionell **unberührte Urwälder**, also vom Menschen in ihrer Substanz nicht beeinflusste Natur. Diese Sicht ist nach Ansicht mancher Ökologen zu einseitig.
- ▶ Neuerdings weisen Forscher auf den Wert von **»verfälschten« Naturräumen** hin. Obwohl einheimische Arten verschwunden oder zurückgedrängt sind und sich fremde breitmachen, können die so genannten neuen Ökosysteme viele wertvolle Funktionen übernehmen, das heißt Ökosystemdienste leisten (also etwa für gute Luft, sauberes Wasser, neuen Boden sorgen).
- ▶ **Neue Ökosysteme** bieten zudem vielfältige Antriebe für das Zusammenspiel von Organismen und für deren weitere Evolution.

In mancher Hinsicht können neue Ökosysteme unberührte Natur durchaus aufwiegen. Viele sind ähnlich artenreich und teils sogar produktiver. Oft leisten sie gleichfalls wertvolle Ökosystemdienste. Manche von ihnen bieten bedrohten einheimischen Arten wieder Lebenschancen. Neuen evolutionären Entwicklungen leisten sie anscheinend Vorschub.





WENN ICH DAS RICHTIG VERSTEHE, DANN IST DIE ETHIKKOMMISSION GEGEN DIE BIODIVERSITÄT!

zu den Inseln gefunden. Da herrschte geringe Konkurrenz und Gefahr, gefressen zu werden. Himbeeren und Rosen verloren ihre Stacheln, Minzen die typischen streng schmeckenden Inhaltsstoffe, die ihnen anderswo zur Verteidigung dienen. Gegen die neuen Pflanzen und Tiere, die später der Mensch mitbrachte, konnte sich diese einheimische Flora nicht behaupten.

Trotzdem sprachen Mascaros Befunde nicht gegen das Konzept von den neuen Ökosystemen. So kam bei seiner Studie heraus, dass die Produktivität jener Wälder dem Vergleich mit Urwaldbeständen in vieler Hinsicht standhält oder Letztere sogar übertrumpft, etwa mit ihren Nährstoffzyklen oder der Biomasse. Puristisch gesehen mögen das zwar keine natürlichen Wälder sein, doch sie verhalten sich ganz ordnungsgemäß. »Ob man solche Bestände nun mag oder nicht – sie werden zukünftig das meiste Naturgeschehen auf der Erde vorantreiben«, konstatierte Mascaro im Jahr 2008 auf der Konferenz der Ökologischen Gesellschaft Amerikas in Milwaukee (Wisconsin). Peter Kareiva von Nature Conservancy in Seattle (Washington) würde es begrüßen, wenn das Naturschutzmanagement diese Botschaft aus der Akademikerwelt aufgriffe (siehe auch seinen Artikel »Mensch und Natur – keine Gegner«, SdW 9/2008, S. 68). »Umweltschützer pflegen sich darüber auszulassen, was geschützt werden sollte und welchen Sachen Einhalt geboten werden muss. Sie sollten sich damit auseinandersetzen, wie sie sich die Welt in 50 Jahren wünschen.«

Untersuchungen an neuen Ökosystemen könnten ihnen dazu verhelfen, die Gegebenheiten anzuerkennen und darauf Strategien zu begründen, statt zu versuchen, die Uhren zu-

rückzudrehen. Kareiva ist Anhänger des Konzepts von den Ökosystemdiensten als treibender Kraft bei Naturschutzmaßnahmen. Andererseits räumt er ein, dass seine Seite noch kaum erörtert, wie sie sich dazu stellen soll, wenn neue Ökosysteme bessere Dienste erbringen als ursprüngliche. Er seinerseits kann sich eine Welt vorstellen, in der etwa in Feuchtgebieten der USA exotische Varianten des Schilfohrs *Phragmites* wachsen dürfen, weil solche Habitate Vögeln hervorragende Lebensbedingungen bieten. Vernichtungsfeldzüge gegen die fremden Pflanzen, um der alten Vegetation wieder aufzuhelfen, wären ziemlich teuer und wohl ohnehin vergeblich.

Immerhin ließ das Argument der Ökosystemdienste manche Fachleute ihr tiefes Misstrauen gegen neue Ökosysteme aufgeben oder zumindest beiseiteschieben. Viele würden das Gleiche sagen wie Shahid Naem, Ökologe an der Columbia University in New York: »Liebend gern würde ich sämtliche invasiven Organismen auf diesem Planeten ausrotten und an deren Stelle wieder all die heimischen Arten setzen.« Naem ist jedoch bereit abzuwarten, was man aus neuen Ökosystemen machen kann, denn er sieht die Notwendigkeit, die Lebensbedingungen der Milliarden von Menschen dieser Erde zu verbessern.

Hilfreich ist die Vorstellung, dass neue Ökosysteme die Biodiversität fördern. Das Problem mit den so genannten invasiven Arten wird heute viel lockerer gesehen als in den 1950er Jahren, als solche Konzepte aufkamen. Denn aktuellere Studien unter anderem von Mark Davis vom Macalester College in Saint Paul (Minnesota) und Dov Sax von der Brown University in Providence (Rhode Island) erwiesen, dass die allermeisten vom Menschen verschleppten Spezies im neuen Land einen Platz erobern, ohne dabei andere auszulöschen. Nur in Ausnahmefällen bilden fremde Pflanzen übermächtige Monokulturen, die alles andere quasi ersticken. Von Übel sind manche Neankömmlinge dennoch.

Zu den Gefahren zählt Peter Vitousek von der Stanford University (Kalifornien) Albiziwälder auf Hawaii. Sie vernichten Bestände von Ohiabäumen, *Metrosideros polymorpha*, eine auf die Inseln beschränkte Art der Myrtengewächse. Zwar gesteht der Fachmann für Biodiversität zu, dass neue Ökosysteme teils Wünschenswertes leisten. »In einzelnen wichtigen Fällen mögen sie sogar die natürliche biologische Vielfalt unterstützen. Allerdings ist es wie mit vielen an sich guten Ideen: Übertreibt man die Tolerierung von neuen Ökosystemen, verliert das Ganze irgendwann seinen Sinn. Ich denke, das gilt für die meisten Albiziwälder Hawaiis.«

### ABSCHIED VOM »GARTEN EDEN«

Paradiesische Zustände herrschen auf der Erde schon lange nicht mehr. Nur kleinere Teile der Landfläche tragen noch die überkommene, gewissermaßen ursprüngliche landestypische Vegetation. Schätzungsweise 77 Prozent der eisfreien Gebiete hat menschlicher Einfluss deutlich verändert. Die Hälfte davon nutzt der Mensch landwirtschaftlich oder anders, etwa für Städte. Die andere Hälfte, die er derzeit nicht nutzt, trägt dennoch seine Spuren. Oft handelt es sich um **sich selbst überlassene fragmentierte Waldgebiete**, ehemalige Forste oder früheres Weideland mit vielen fremden Pflanzenarten.

Was er meint, sieht man dort, wo ein Albizia- an einen Ohiahabitat grenzt. Die Invasoren am Rand ragen weit in das Ohiahabitat hinein. So entgehen sie dem Schatten ihrer eigenen Artgenossen im eigenen Terrain. Aber sie nehmen dem einheimischen Bestand das Licht. Man sieht geradezu, wie sie diese Pflanzen bedrohen und bald verdrängen werden – wie sie unermüdlich expandieren.

Diesen Sachverhalt gibt Mascaro zu: »Ich kann jeden verstehen, wenn er einen Albizialwald niederwalzen möchte, weil er befürchtet, dass sonst der letzte Flecken eines bestimmten Ökosystemtyps zu Grunde geht. Diskussionen über Nutzung und Schutz von neuen Ökosystemen müssen immer auch einkalkulieren, welches Risiko sie für andere Systeme bedeuten. Momentan befassen wir uns damit noch fast gar nicht.«

### GEWINNER – UND VERLIERER

Zumindest einige Arten werden manche der neuen Ökosysteme wohl auslöschen. Wenn sich alles neu mischt und anders verteilt, dürften vor allem solche Spezies nicht so gut zu recht kommen, die eine enge Abhängigkeit zu anderen Organismen ausgebildet haben. Zu den Verlierern gehören die wunderschönen Kleidervögel Hawaiis. Als Futterquelle nutzen sie oft nur eine einzige Pflanzensorte. Manche ihrer Arten sind schon ausgestorben. Wer sich dafür einsetzt, diese Weise des Artensterbens zu verlangsamen oder aufzuhalten, stuft neue Ökosysteme unter dem Strich negativ ein.

Auf dieser Seite steht der Ökologe James Gibbs von der State University of New York in Syracuse: »Ich finde es nicht angemessen, die neuen Systeme als gleichwertig oder sogar besser hochzujubeln.« Als Beispiel führt er den Clear Lake in Nordkalifornien an. Die Anzahl von dessen Fischarten stieg seit dem Jahr 1800 von 12 auf 25. Das mag gut klingen. Aber, so Gibbs – an die Stelle von Spezies, die nur dort lebten, traten welche, die auch andernorts reichlich vorkommen. Netto ergibt das ein Absinken der Biodiversität. Ähnliches mag für die genetische Bandbreite von Arten zutreffen. Wo Nachkommen einiger weniger Pioniere den Wald prägen, könnte bei einem entscheidenden Teil der Pflanzen eine geringere genetische Vielfalt herrschen als in einem jahrtausendealten Urwald.

Letztlich läuft es auf eine Wertediskussion hinaus – wie so oft in der Ökologie und im Naturschutz. Für Leute wie Mascaro, denen an den biologischen Prozessen liegt, bieten neue Ökosysteme große Evolutionsmöglichkeiten. Wem es dagegen vor allem auf Ökosystemdienste ankommt, der wird die neuen Verhältnisse mit den Leistungen der Vorgän-

gerformen vergleichen und je nachdem als besser oder schlechter befinden. All jenen wiederum, denen das globale Artensterben Sorgen bereitet oder denen der Erhalt von lange bestehenden Ökosystemen am Herzen liegt, können die neuen Gemeinschaften nicht gefallen – wie James Gibbs, dem die hochgradige Komplexität der über Jahrtausende oder Jahrmillionen gewachsenen Systeme viel bedeutet. »Warum sorgen wir uns um das Verschwinden von Sprachen, die Wurzeln der Musik, exotische Küchen? Offenbar haben wir ein Bedürfnis, Vielfalt zu bewahren, uns darum zu kümmern. Das Subtile, die Nuancen und die Komplexität machen das Leben interessant.« Ebendas fehlt ihm bei den neuen Ökosystemen. Sie seien eintönig und künstlich, »wie bei McDonalds zu essen«.

Kareiva sieht in dieser Haltung »einen der Gründe, warum die Naturschutzbewegung scheitert. Allein die Vorstellung, es gäbe unberührte, gewissermaßen paradiesische Ökosysteme! So etwas existiert nicht. Diese Sicht der Dinge hilft nicht weiter.«

So hat das Konzept von unberührten und statischen Ökosystemen denn auch nicht mehr viele Anhänger. Genau genommen sind dann neue Ökosysteme an sich überhaupt kein neues Phänomen. Sie repräsentieren auf einer dynamischen Erde nur die jeweils letzten Wandlungen. Denn in langen Zeiträumen gesehen pflegen Arten stets ihre Verbreitungsgebiete auf Grund allmählicher Klimawechsel oder auch rein durch Zufälle zu verlagern. Manche weichen etwa vorrückenden Gletschern aus, spalten sich irgendwann auf und formieren sich neu. Darum gefällt Forschern wie Mark Davis das Etikett »neu« nicht recht. »Ökosysteme sind immer neu, jedes Jahr wieder. Sie sind stets mit neuen Arten konfrontiert. Nur kommen die vielleicht gerade nicht aus einem fremden Land, sondern von 100 Meter flussaufwärts. Viel genauer wäre es, würden wir von ›sich rasch wandelnden Ökosystemen‹ sprechen. Ich denke aber, das klingt nicht so schlagkräftig.«

Wenn Joe Mascaro »seinen« Wald auf Hawaii durchstreift, ist er sich des steten Wandels allzu bewusst. Er hält die fortwährenden Veränderungen für wertvoll – sogar wenn Menschen daran teilhatten. Seinerseits hat er sich nie als Mitstreiter derer gesehen, die Ökosysteme in einem Zustand wie vor der Ankunft des Menschen bewahren wollten – wie viele Umweltschützer der älteren Generation. »Manchmal sagt jemand zu mir: ›Das klingt, als ob du aufgibst.‹ Dabei habe ich nie mitgekämpft. Es geht nicht darum, eine Niederlage einzugestehen. Sondern hier handelt es sich um einen völlig neuen Ansatz.« ◀



**Emma Marris** ist Wissenschaftsjournalistin in Columbia (Missouri).

© Nature Publishing Group  
[www.nature.com/nature](http://www.nature.com/nature)

**Lugo, A. E.:** Comparison of Tropical Tree Plantations with Secondary Forests of Similar Age. In: Ecological Monographs 62(1), S. 2–41, 1992.

**Hobbs, R. J. et al.:** Novel Ecosystems: Theoretical and Management Aspects of the New Ecological World Order. In: Global Ecology and Biogeography 15, S. 1–7, 2006.

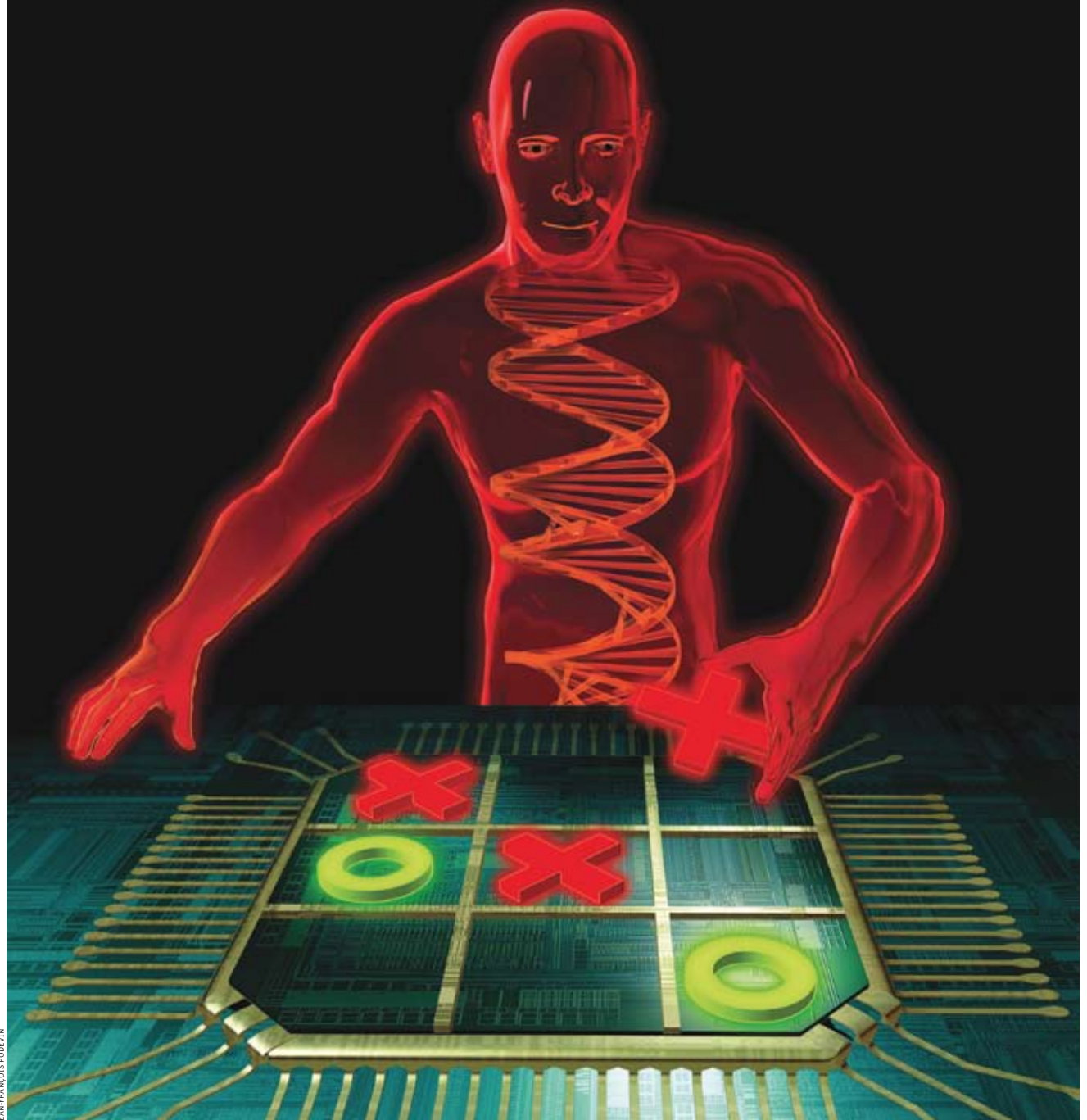
**Mascaro, J. et al.:** Limited Native Plant Regeneration in Novel, Exotic-Dominated Forests on Hawai'i. In: Forest Ecology and Management 256, S. 593–606, 2008.

**Ziegler, A. C.:** Hawaiian Natural History, Ecology, and Evolution. University of Hawaii Press, 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1017409](http://www.spektrum.de/artikel/1017409).

# DNA-COMPUTER

– die Spielversion



JEAN-FRANÇOIS POBEVIN



Eines Tages haben Sie vielleicht ein Molekülgemisch in Ihrem Blut, das sich wie ein Computer verhält und medizinische Entscheidungen trifft. Bereits heute beherrscht ein solches System ein Kinderspiel – perfekt.

Von Joanne Macdonald,  
Darko Stefanovic und Milan N. Stojanovic

Nach allgemeiner Anschauung führt die DNA (Desoxyribonukleinsäure) im Kern unserer Körperzellen ein recht beschauliches Leben, vergleichbar einem Buch in einer großen Bibliothek, das – vielleicht sogar häufig – zum Nachschlagen und Kopieren herausgenommen wird, dabei aber selbst im Wesentlichen unverändert bleibt. Nicht dass dieses zur langen Doppelhelix gewundene Molekül unbedeutend wäre; im Gegenteil, es handelt sich um den materiellen Träger unseres Erbguts. Aber seine Rolle im täglichen Leben scheint doch eher passiv.

Umso erstaunlicher ist es, dass es einer neuen Forschungsrichtung gelungen ist, das behäbige Molekül zu gänzlich ungewohnter Aktivität zu erwecken. Chemie, Enzymologie, Nanotechnologie und Informatik tun sich zusammen, um aus DNA nicht nur die elementaren Bausteine eines Computers herzustellen, sondern diese auch zusammenwirken zu lassen wie in einem herkömmlichen Rechner. Natürlich kann man zu diesem Zweck nicht DNA-Moleküle durch Drähte verbinden; vielmehr muss dieses Zusammenwirken sich bereits dadurch einstellen, dass man die richtigen Moleküle zusammen in wässrige Lösung bringt.

Fernziel unserer Bemühungen sind Computer aus DNA in Nanogröße, die zum Beispiel in unserem Blut mitschwimmen, dessen Zustand messen, daraus gewisse Schlüsse ziehen und gegebenenfalls reagieren, indem sie bei Vorliegen gewisser Voraussetzungen ein Medikament oder sogar ein Zellgift freisetzen. Trotz erster Erfolge (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 3/2007, S. 66) liegt dieses Ziel noch in so weiter Ferne, dass es lohnt, sich Zwischenziele zu setzen. Zum Beispiel wäre

ein DNA-Computer herzustellen, der Input entgegennimmt, das heißt, auf gewisse Moleküle in seiner Umgebung reagiert, daraus elementare logische Schlüsse zieht und deren Ergebnis als Output, das heißt in Form gewisser Moleküle, seiner Umgebung mitteilt.

Konkreter wäre eine Aufgabe zu formulieren, die zwar alle elementaren Techniken erfordert, gleichzeitig aber im Rahmen des Machbaren bleibt und deren Lösung obendrein unmittelbar einleuchtet. Gegen Ende 1997 verfielen zwei von uns (Stojanovic und Stefanovic) beim guten Wein nach einem gemeinsamen Abendessen auf ein geeignetes Zwischenziel: das Kinderspiel Tic-Tac-Toe, das im deutschen Sprachraum auch als »Drei gewinnt« bekannt ist.

Zwei Spieler setzen abwechselnd ihre Zeichen in ein Quadrat aus 3 mal 3 Feldern, der eine Kreuzchen, der andere Kringel. Gewonnen hat, wer zuerst drei eigene Zeichen in gerader Linie – waagrecht, senkrecht oder diagonal – eingetragen hat. Das Spiel ist recht überschaubar; insbesondere ist eine perfekte Strategie bekannt, das heißt eine, die auf jeden Fall ein Unentschieden erzwingt und obendrein zum Sieg führt, wenn der Gegner einen Fehler macht. Diese Strategie galt es zu programmieren – mit DNA.

### Nanomaschinen im Blut

Zu diesem Projekt taten wir, der Informatiker Stefanovic und der Chemiker Stojanovic, die seit ihrer Schulzeit in Belgrad befreundet sind, uns zusammen. Die Idee war, die Schaltkreise, die in einem Computer die elementaren logischen Operationen durchführen, mit chemischen Mitteln nachzubilden.

In der Elektrotechnik heißen diese sehr einfachen Bausteine logische Gatter. Sie haben naheliegende Namen wie UND, ODER und NICHT. Ein Gatter empfängt elektrische Eingangssignale, die den Nullen und Einsen

## In Kürze

- Aus DNA-Molekülen können **logische Gatter** aufgebaut werden, die wie die Schaltelemente in normalen Computern wirken. Dabei dienen kurze DNA-Stränge als Ein- und Ausgabe.
- Letztendlich könnten Gemische aus solchen Gattern zu **medizinischen Zwecken** verwendet werden, zum Beispiel indem sie Marker an Zellen registrieren und gemeinsam über eine entsprechende Reaktion darauf entscheiden.
- Ein Automat aus DNA-Gattern demonstriert die Rechenfähigkeiten derartiger Systeme, indem er ein **perfektes Tic-Tac-Toe** spielt.

## ANDERE DNA-COMPUTER

Die Fähigkeit der DNA, in ihrer Basensequenz Informationen zu speichern, ist von mehreren Forschern zum Zweck des Rechnens – im weitesten Sinn – genutzt worden.

**1994:** Leonard M. Adleman von der University of Southern California findet einen hamiltonschen Weg in einem Graphen, indem er alle (richtigen wie falschen) Lösungen des Problems in Form einer großen Anzahl von DNA-Molekülen kodiert und aus diesen in einer Reihe von Schritten die Moleküle mit der richtigen Lösung isoliert (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 70).

**1995:** Erik Winfree, der heute am California Institute of Technology (Caltech) arbeitet, schlägt vor, aus DNA flache Bausteine herzustellen, die sich selbst zu zweidimensionalen Strukturen anordnen (Spektrum der Wissenschaft 1/2005, S. 82).

**2004:** Angeregt durch frühere Arbeiten von Paul W. K. Rothemund vom Caltech entwickeln Ehud Shapiro vom Weizmann-Institut für Wissenschaften in Rehovot (Israel) und Yaakov Benenson von der Harvard University einen »Arzt in der Zelle«. Auf die DNA wirkende Enzyme analysieren, ob in einer Lösung eine Kombination von RNA-Molekülen vorliegt, die auf eine bestimmte Krankheit hinweist. Ist das der Fall, dann reagieren sie durch Freisetzung eines anderen Moleküls, das im Ernstfall ein Medikament sein könnte (Spektrum der Wissenschaft 3/2007, S. 66).

eines binären Kodes entsprechen, führt mit ihnen eine logische Operation aus und produziert das zugehörige Ausgangssignal. Zum Beispiel gibt ein UND-Gatter genau dann 1 aus, wenn beide Eingangssignale den Wert 1 haben. Hunderte von Millionen solcher logischer Gatter, zu unglaublich komplexen Schaltungen zusammengesetzt, ergeben einen Computer, ebenso wie einige wenige sehr einfache Typen von Legosteinen, in großer Anzahl zusammengesetzt, die imposantesten Bauwerke bilden. So ähnlich stellten wir uns unseren Computer vor: nicht mit Legosteinen, nicht mit elektronischen Bauteilen, sondern mit Molekülen.

Natürlich sollte er nicht mit einem herkömmlichen Computer konkurrieren. Vielmehr war Stojanovic während einer kurzen Tätigkeit bei einer pharmazeutischen Firma auf eine andere Idee gekommen: Wir wollten auf einen »intelligenten« Wirkstoff hinaus, so etwas wie ein Medikament, das den Zustand des Patienten, in dem es schwimmt, analysiert und sich selbst genau dann verabreicht, wenn es nötig ist. So wäre es für einen Diabetiker ein Segen, wenn eine Nanomaschine in seinem Blut den Glukosespiegel misst und genau dann, wenn dieser ansteigt, Insulin freisetzt (Kasten rechts). Aus diesem Grund mussten unsere molekularen logischen Gatter unbedingt biokompatibel sein.

Zahllose weitere Einsatzfelder sind denkbar. So tragen bei der Leukämie viele Unterarten weißer Blutkörperchen auf ihrer Oberfläche charakteristische Merkmale (»Marker«) in Abhängigkeit von ihrem Reifegrad und von der Stammzelle, aus der sie durch Teilung hervorgegangen sind. Im Prinzip könnte man also die entarteten Zellen (Leukämie ist ein Krebs der weißen Blutkörperchen) an diesen Markern erkennen und gezielt vernichten. Moderne Therapien arbeiten in der Tat mit Antikörpern gegen gewisse Marker. Diese töten jedoch alle Zellen, die diesen einen Marker tragen; das sind in der Regel viel zu viele, wodurch das Immunsystem des Patienten geschwächt wird, mit der Folge schwerer oder sogar tödlicher Komplikationen. Ein Nanocomputer, der mehrere Marker analysiert und dabei zu logischen Schlüssen wie »Marker A und entweder B oder C sind vorhanden, aber D fehlt« fähig ist, würde die Krankheit weit aus gezielter bekämpfen.

Unsere Moleküle könnten auch zur Analyse von natürlicher DNA dienen. Unser fortgeschrittenster Tic-Tac-Toe-Automat kann bei jeder von 32 vorbestimmten kurzen DNA-Sequenzen (Oligonukleotiden) erkennen, ob sie in einem vorgelegten DNA-Strang enthalten ist, und diese Ja-Nein-Antworten nach Belie-

ben logisch verknüpfen. Damit liefert die molekulare Maschine eine treffsichere Antwort auf die Frage, ob die vorgelegte DNA zu einer bestimmten Klasse von Krankheitserregern gehört oder – im Fall menschlicher DNA – auf gewisse Erbanlagen schließen lässt.

## Molekulare Logik

Die ersten Gatter auf der Basis synthetischer Moleküle stammen vom Anfang der 1990er Jahre. A. Prasanna de Silva und seine Mitarbeiter an der Queen's University in Belfast stellten 1993 UND-Gatter aus kleinen organischen Molekülen her, die nur dann fluoreszieren, wenn sowohl Wasserstoffionen (aus einer Säure) als auch Natriumionen an sie gebunden sind. Im Jahr 1997 schufen J. Fraser Stoddart, der heute an der Northwestern University in Evanston arbeitet, und seine Mitarbeiter XOR-Gatter (*exclusive OR*, das heißt entweder – oder), in denen die Moleküle fluoreszieren, wenn genau eine von zwei Substanzen anwesend ist (in diesem Fall Wasserstoffionen und so genannte Amine), nicht aber beide zugleich. Beide Arten von Gattern sind allerdings nicht biokompatibel, weil lebende Zellen die erforderlichen Konzentrationen an Säure und weiteren Substanzen nicht vertragen.

Andere Forscher begannen Mitte der 1990er Jahre, die wesentliche natürliche Funktion der DNA, nämlich Information zu tragen, für ihre Zwecke zu nutzen (Kasten links). Die Sprossen, welche die beiden Stränge der berühmten verwundenen Strickleiter (der DNA-Doppelhelix) zusammenhalten, bestehen aus Paaren von Basen, die üblicherweise mit A, T, G und C abgekürzt werden. In der Folge dieser Basenpaare steckt die Information. Allerdings hatten die Ansätze dieser Wissenschaftler mit den logischen Gattern, die wir im Sinn hatten, nichts gemein. Gleichwohl erbrachten sie den Beweis, dass DNA Information nicht nur speichern, sondern auch – biokompatibel – verarbeiten kann, und stellten, gemeinsam mit einigen anderen Arbeiten, das Material bereit, mit dem wir unsere Gatter erfinden konnten.

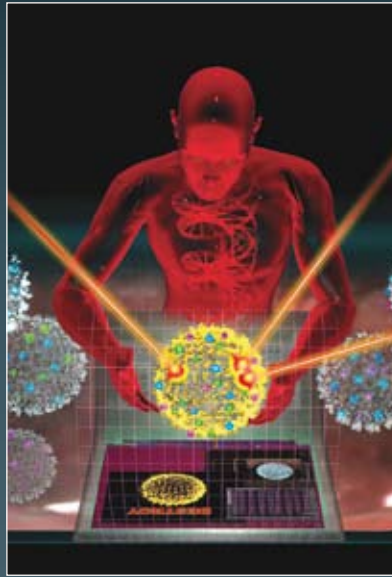
Der erste unter diesen Forschern war Gerald F. Joyce vom Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien). Er entwickelte 1995 ein Verfahren zur Herstellung von Enzymen, die selbst aus einzelsträngiger DNA bestehen und DNA-Einzelstränge entzweischen können (Spektrum der Wissenschaft 2/1993, S. 52). Diese so genannten Desoxyribozyme haben zwei kurze Arme, die sich genau dann an einen DNA-Abschnitt binden, wenn der die komplementäre Basensequenz aufweist. Sie sind also sehr spezifisch in Bezug auf ihr

## BESCHÄFTIGUNG FÜR INTELLIGENTE DNA



### PANKREAS AUS DER SPRITZE

Logische Gatter im Blut eines Diabetespatienten könnten seinen Glukosespiegel überwachen, bei Bedarf Insulin freisetzen und damit für eine erkrankte Bauchspeicheldrüse einspringen.



### SCHARFSCHÜTZEN GEGEN KREBSZELLEN

Gatter, die verschiedene Marker auf weißen Blutkörperchen aufspüren und ihre Daten kombinieren, könnten gezielt Krebszellen angreifen und zerstören, während sie gesunde Zellen verschonen, die nur einige, aber nicht alle diese Marker aufweisen.



### TERRORISMUSBEKÄMPFUNG

Chemische Sensoren und logische Gatter auf DNA-Basis könnten gemeinsam Chemikalien wie das früher unbekannte Nervengift »Novichok« aus sowjetischer Produktion oder bekanntere wie Sarin aufspüren.

Substrat, das heißt den DNA-Strang, den sie spalten (Kasten S. 78).

Spezielle Moleküle, die an den Enden des Substratstrangs angebracht werden, dienen zur Anzeige des Trennprozesses. Am einen Ende sitzt ein fluoreszierender Farbstoff, am anderen ein »Unterdrücker« (*quencher*): Dieses Molekül hindert den Farbstoff am Fluoreszieren, solange der Strang intakt ist und der Unterdrücker sich damit in räumlicher Nähe zum Farbstoff befindet. Sowie der Strang zerteilt ist, entfernen sich die beiden Teile voneinander, und das Farbmolekül kann ungehemmt fluoreszieren. In dem Maß, in dem das Enzym sein Zerstörungswerk verrichtet, leuchtet die DNA-Lösung zunehmend stärker in der Fluoreszenzfarbe.

Der zweite entscheidende Fortschritt kam gerade noch rechtzeitig, gerade als wir mit unserer eigenen Planung begonnen hatten. Ronald R. Breaker von der Yale University war es gelungen, ein Desoxyribozym mit einer Molekülgruppe zu verbinden, die als eine Art Schalter wirkt: Sie aktiviert oder hemmt das Enzym je nachdem, ob das korrekte Signalmolekül an sie gebunden ist oder nicht. Breaker konnte sogar zwei solcher Moleküle so an das Enzym hängen, dass sie als UND-Gatter wirken: Das Enzym ist nur dann aktiv, wenn

beide Schaltermoleküle eingeschaltet, das heißt an ihr jeweiliges Signalmolekül gebunden sind. Seine Arbeitsgruppe machte obendrein die bemerkenswerte Entdeckung, dass diese Form eines molekularen Schalters – mit RNA (Ribonukleinsäure) statt DNA – in der Natur vorkommt: Mit den so genannten Riboschaltern regeln Bakterien, welche ihrer Gene aktiv Proteine produzieren (Spektrum der Wissenschaft 1/2008, S. 52).

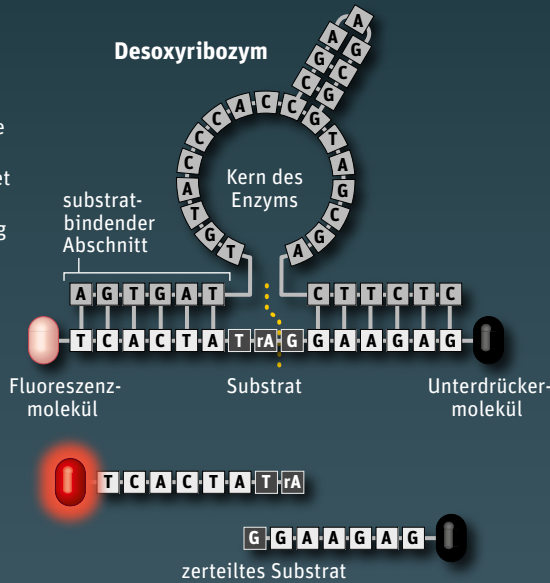
Wenn wir nun Breakers Desoxyribozyme so gestalten könnten, dass ihre Signalmoleküle ebenfalls aus einzelsträngiger DNA bestehen, dann hätten wir schon so etwas wie ein UND-Gatter. An jedem der beiden Eingänge liegt eine Eins, wenn das zugehörige Signalmolekül vorhanden ist, sonst eine Null. Die Ausgabe unseres Gatters besteht aus einem zerteilten Strang – entsprechend einer Eins – oder eben nicht, was einer Null entspricht. Der entscheidende Punkt: Die Ausgabe eines Gatters kann, da sie aus DNA besteht, als Eingabe für ein anderes dienen. Also kann man, was für einen richtigen Computer erforderlich ist, die Gatter hintereinanderschalten – nicht durch Drähte wie bei den Schaltkreisen, sondern dadurch, dass der zerteilte Strang, der aus dem einen Schaltkreis kommt, an einen der Eingänge des anderen Schaltkreises passt. Damit

**EIN- UND AUSGABEELEMENTE**

**Wie ein gewöhnlicher Computer** muss auch der DNA-Rechner in wässriger Lösung Daten aus der Umgebung entgegennehmen (»Input«) und das Ergebnis seiner Berechnungen herausgeben (»Output«). Das leisten geeignet konstruierte, haarnadelförmige DNA-Stränge.

**AUSGABENZYM**

Ein DNA-Enzym namens Desoxyribozym (rechts) besteht aus einem Stück einzelsträngiger DNA, die zu einer »Kern«-Struktur mit zwei »Armen« gefaltet ist. Daran kann sich ein anderer DNA-Einzelstrang (das Substrat) binden, der die komplementäre Basensequenz plus eine charakteristische »Brücke« aus drei Basen (dunkelgrau) aufweist. An dieser Stelle zerschneidet das Enzym den Strang (unten). Der Vorgang lässt sich beobachten, indem man an dem einen Ende des Substratstrangs ein fluoreszierendes Molekül und am anderen ein Unterdrückermolekül anbringt. Letzteres blockiert die Fluoreszenz, bis es durch das Zerteilen des Strangs außer Reichweite gerät.

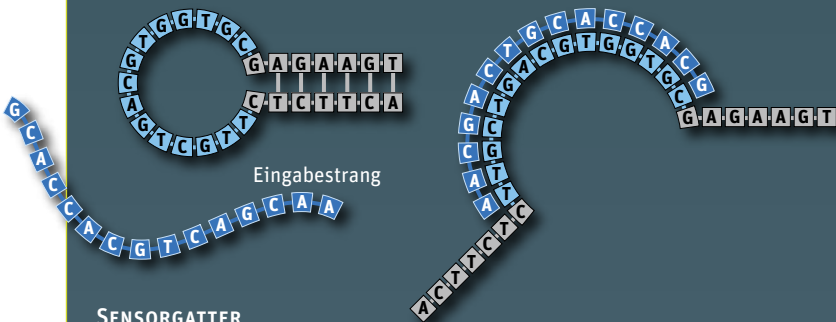


**INGABESENSOR**

In einer »Haarnadel« (unten) faltet sich die DNA zusammen, indem die beiden Enden des Strangs sich aneinanderbinden. Dabei entsteht ein doppelsträngiger Stamm, an dem eine einsträngige Schleife hängt (links). Bindet sich ein passender Strang an die Schleife, wird der Stamm auseinandergerissen (rechts).

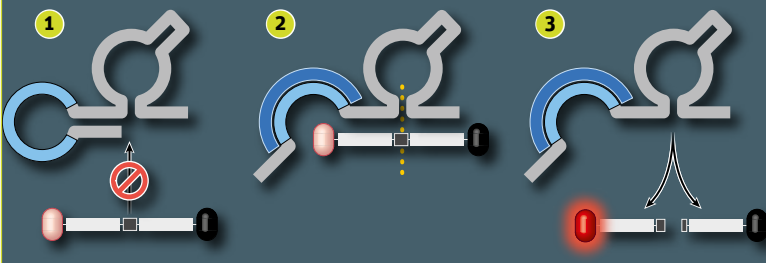
**geschlossene Haarnadel**

**offene Haarnadel**



**SENSORGATTER**

Eine Haarnadel, die an einem Arm eines Enzyms hängt, blockiert dessen Funktion **1**, bis ein DNA-Eingabestrang (blau) sie öffnet und den Arm freilegt **2**. Dadurch kann das Enzym sich an das Substrat binden und es zerteilen **3**. Diese Struktur nennt man auch JA-Gatter, weil es anzeigt: »Ja, die Eingabe ist vorhanden.«



sind die einzelnen Elemente unseres DNA-Computers logisch miteinander verbunden, obgleich sie völlig losgelöst voneinander in der Flüssigkeit schwimmen.

Wie üblich, gab es von der Idee bis zur Realisierung etliche Hindernisse zu überwinden. Nach einigen Misserfolgen legten wir uns auf die DNA-Strukturen fest, die als Haarnadeln (*stem-loops*) oder auch Haarnadelschleifen bekannt sind. Sanjay Tyagi und Fred Kramer vom Public Health Research Institute in Newark (New Jersey) hatten berichtet, dass Haarnadeln zwischen zwei Konformationen wechseln. In der geschlossenen Form lagern sich die beiden Enden aneinander an und bilden den so genannten Stamm; das Stück dazwischen krümmt sich zu einer Schleife mit dem Effekt, dass das Ganze aussieht wie eine Haarnadel oder, wenn die Schleife länger ist, wie ein Lutscher. Wenn sich an die Schleife ein komplementärer DNA-Strang anlagert, kann sich diese nicht mehr so stark krümmen wie zuvor. Also reißen die beiden Enden, die bislang den Stiel des Lutschers bilden, auseinander. Das ist die zweite, offene Konformation.

Je nachdem, wie wir die Haarnadel an einem DNA-Enzym anbringen, kann das Öffnen der Schleife das Enzym aktivieren oder hemmen. Ist eine Seite des Stamms zugleich einer der beiden zum Substrat passenden Arme des Enzyms, dann ist dessen Aktivität bei geschlossenem Stamm blockiert. Diese Struktur nennen wir einen Sensor oder ein JA-Gatter: Gibt man den zur Schleife passenden Eingabestrang (nennen wir ihn *X*) in die Lösung, dann öffnet sich der Stamm und aktiviert damit das Enzym. Die Ausgabe des Enzyms (das heißt die von ihm zerteilten DNA-Stränge) bedeutet dann: »JA, *X* ist vorhanden« (Kasten links).

Fügt man eine weitere Haarnadel mit einer anderen Schleifensequenz *Y* am zweiten Arm des Enzyms hinzu, so entsteht ein UND-Gatter. Das Enzym kann nur wirken, das heißt seine DNA spalten, falls Eingabe *X* UND Eingabe *Y* sich daran binden (Kasten rechts).

Ein hemmendes Steuerelement – also eines, das sein Enzym deaktiviert, sobald sich die richtige Eingabe an die Schleife bindet – erhalten wir, indem wir eine Haarnadel-Sequenz in den »Rücken« des Enzyms einfügen. Ist deren Stamm geschlossen, dann bleibt das Enzym intakt und produziert die Ausgabe. Der passende Eingabestrang öffnet aber die Haarnadel und deformiert dadurch das Enzym so stark, dass es deaktiviert wird.

Durch diese Deaktivierung werden natürlich die vom Gatter bis dahin produzierten Ausgabestränge nicht entfernt. Das ist allgemein eine Schwäche unserer DNA-Gatter

und der aus ihnen zusammengesetzten Computer: Man kann sie nicht einfach in den Ausgangszustand zurückversetzen. Insbesondere ist unser NICHT-Gatter in isolierter Form zu nichts nütze. Wenn es aktiviert wird, also plötzlich aufhört, Ausgabestränge zu produzieren, würde sich keines der nachgeordneten Schaltelemente anders als zuvor verhalten.

Kombiniert mit einem UND-Gatter erfüllt es jedoch durchaus eine Funktion. Das dabei entstehende Gatter nennen wir UND-UND-NICHT-Gatter oder INHIBIT-Gatter (»Hemmungsgatter«): Es produziert nur dann eine Ausgabe, wenn die Eingaben X und Y vorhanden sind, aber Eingabe Z fehlt. Diese Funktionsweise erwies sich für unseren Tic-Tac-Toe-Automaten als sehr hilfreich.

### Computer zum einmaligen Gebrauch

Die wichtigste Eigenschaft unseres Systems ist seine ausgeprägte Modularität. Unseren Computer kann man aus einer sehr großen Anzahl unabhängiger Elemente (»Module«) zusammensetzen. Wir können Hunderte, theoretisch sogar Millionen verschiedener Basensequenzen als Eingabe verwenden und auch die Sequenzen der Ausgabestränge nach Belieben wählen. Wir könnten sogar zur Grundlage unserer Konstruktionen statt eines zerteilenden Enzyms ein verbindendes nehmen, das kurze Stränge zu längeren verknüpft, eine so genannte Ligase. Die Gruppe von Andrew D. Ellington an der University of Texas in Austin hat Schalter auf Ligase-Basis ausgiebig studiert.

Die Gatter arbeiten außerdem völlig autonom. Ist die Berechnung einmal gestartet, also die Eingabesubstanz der Lösung zugesetzt, dann ist kein weiterer menschlicher Eingriff mehr vonnöten. Je nachdem, welche Eingaben sie erhalten, treffen die DNA-Moleküle ihre Entscheidungen selbstständig.

Es gibt allerdings wesentliche Unterschiede zwischen unseren Schaltkreisen und ihren elektronischen Vorbildern. Erstens rechnet unser Computer gewissermaßen nur einmal im Leben; dann ist er verbraucht. Ist der Eingabestrang erst einmal an das Steuerelement einer Haarnadel gebunden, dann bleibt er dort. Die zerteilten Ausgabestränge wachsen nicht von allein wieder zusammen. Für unsere biomedizinischen Fernziele ist das zwar kein Hindernis, für die ebenfalls denkbaren Anwendungen in der Robotik wäre aber eine »Reset«-Funktion dringend geboten. Man will den Roboterarm ja auch wieder zurückbewegen. Zurzeit prüfen wir den Einsatz von Ligasen für diesen Zweck.

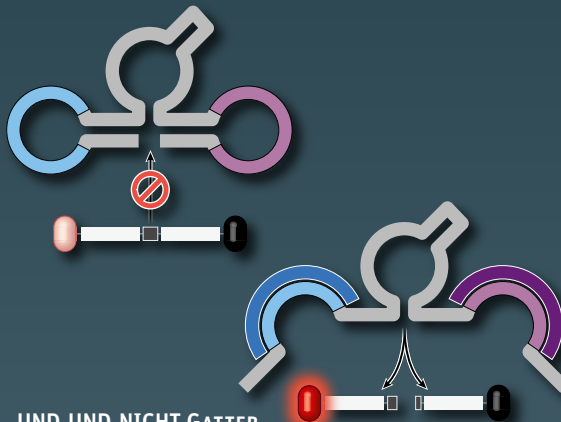
Zweitens hat ein elektronisches Gatter im Wesentlichen nur zwei Zustände, eben 0 und 1, und der Übergang zwischen ihnen findet so

## LOGISCHE GATTER

**Geeignete Kombinationen von DNA-Enzymen** mit Haarnadeln als Steuerelementen ergeben eine Vielfalt elementarer logischer Gatter, deren Ein- und Ausgänge kurze DNA-Stränge sind. Ein vom Enzym zerteilter Strang entspricht der Ausgabe 1, dessen Abwesenheit – weil das Enzym inaktiv ist – der Ausgabe 0.

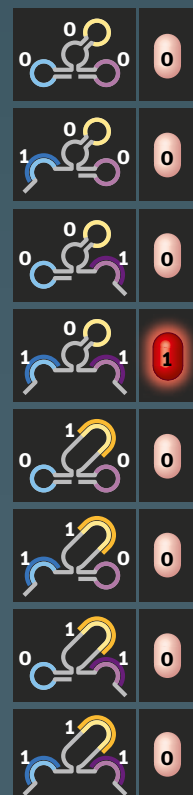
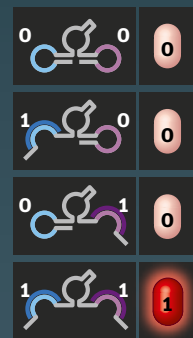
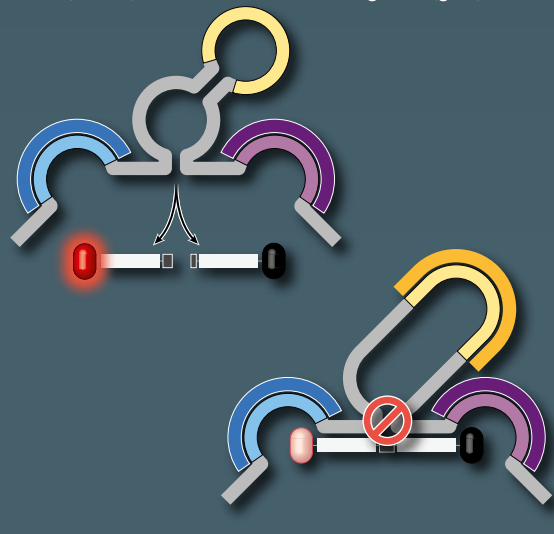
### UND-GATTER

Ein logisches UND-Gatter verarbeitet zwei Eingaben und gibt genau dann 1 aus, wenn beide Eingaben den Wert 1 haben. Das leistet ein Desoxyribozym mit einer Haarnadel an jedem seiner beiden Arme. Ein geschlossener Stamm unterbindet die Aktivität des Enzyms (links). Nur wenn beide zu den Schleifen passenden Eingabestränge der Lösung zugefügt werden, kann das Enzym das Substrat zerteilen (Mitte). Die Tabelle mit den Wahrheitswerten (rechts) fasst die Funktionsweise des Gatters zusammen.



### UND-UND-NICHT-GATTER

Eine Haarnadel als Steuerelement auf dem »Rücken« eines Desoxyribozyms wirkt als NICHT-Eingabe: Sie blockiert das Enzym, wenn der passende Eingabestrang anwesend ist. Fehlt dieser (Eingabe 0), dann bleibt der Stamm geschlossen, und das Enzym ist im Prinzip aktionsfähig. Es bildet also durch Zerteilen Ausgabestränge, falls seine Arme frei sind (links). Bindet sich der Eingabestrang an das Steuerelement, dann öffnet es sich, verformt den Kern des Enzyms und deaktiviert es dadurch (unten). Ein Desoxyribozym mit Steuerelementen an beiden Armen und auf dem Rücken wirkt also als UND-UND-NICHT-Gatter. Das Enzym ist nur dann aktiv, zerteilt also Substrat und produziert dadurch die Ausgabe 1, falls die Eingaben X (blau) und Y (violett) vorhanden sind, aber Eingabe Z (gelb) fehlt.



TOMMY HOORHMAN

schnell statt, dass die Werte dazwischen keine Rolle spielen. Das ist das Grundprinzip des Digitalrechners. Dagegen gehen unsere Gatter, die in der Flüssigkeit schwimmen, nicht plötzlich, sondern allmählich von der inaktiven in die aktive Form über, und zwar umso langsamer, je weniger von der Eingabesubstanz der Flüssigkeit zugesetzt wird. Hätten wir vor, das molekulare Äquivalent eines PC zu bauen, dann wäre diese Eigenschaft hinderlich; für biomedizinische Anwendungen spielt sie dagegen meist keine Rolle.

Nachdem wir einen allgemeinen Zugang zur Konstruktion molekularer logischer Gatter zur Verfügung hatten, suchten wir nach einem »Demonstrationsproblem«, einer Aufgabe, an der wir für jedermann ersichtlich die Fähigkeiten unserer Erfindung unter Beweis stellen konnten. Neue Computersysteme testet man traditionell mit Hilfe von Strategiespielen. Dabei gibt es nämlich eine unmittelbare Rückmeldung: Entweder beherrscht das System das Spiel oder nicht. Obendrein ist die Fähigkeit, ein Strategiespiel zu gewinnen, eng

## TIC-TAC-TOE SPIELEN GEGEN DNA

**Maya-I, der erste Automat**, der aus logischen DNA-Gattern besteht, demonstriert das Potenzial dieser Technik: Er spielt perfekt Tic-Tac-Toe, mit gewissen Einschränkungen, welche die Programmierung vereinfachen. Maya zieht zuerst und wählt stets

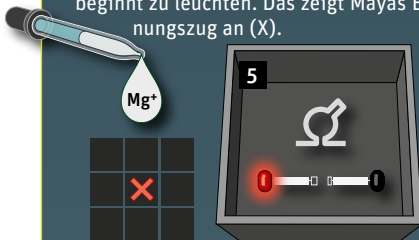
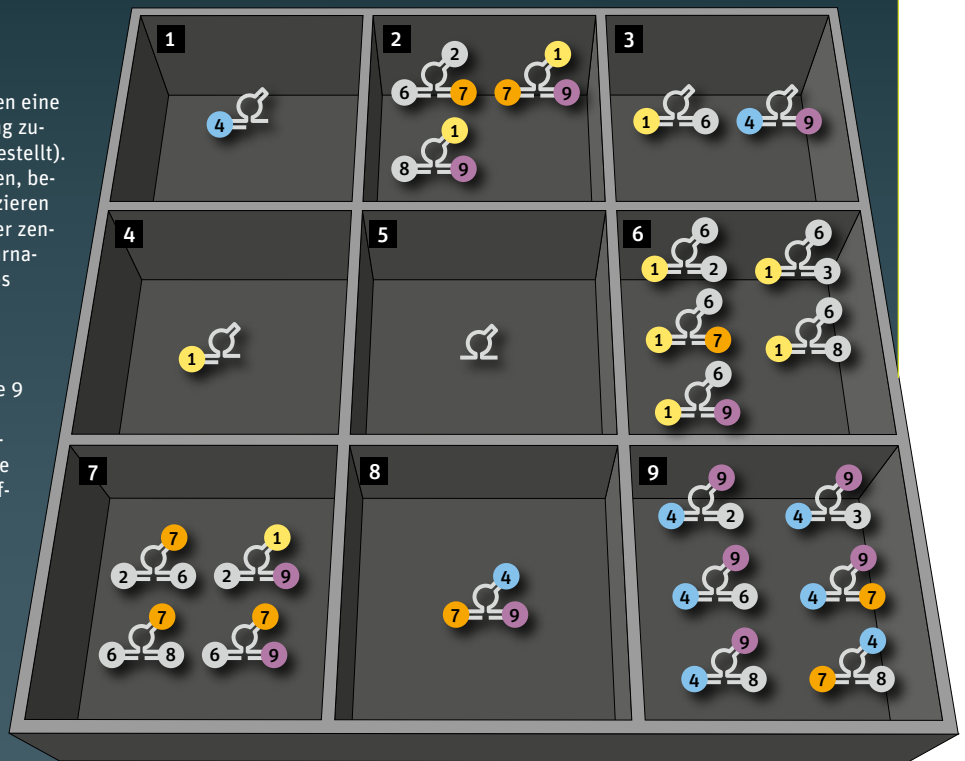
das zentrale Feld (5). Der menschliche Gegenspieler muss entweder das Feld in der linken oberen Ecke (1) oder das darunter (Feld 4) als erstes wählen, was allerdings seine Freiheiten nicht wesentlich einschränkt.

### STRUKTUR VON MAYA-I

Die 3 mal 3 Wannen des Rechners enthalten eine Vielzahl molekularer Gatter in einer Lösung zusammen mit Substratsträngen (nicht dargestellt). In den Wannen, deren Enzyme aktiv werden, beginnen die zerteilten Substrate zu fluoreszieren und färben sich dabei rot. Das Gatter in der zentralen Wanne ist ein DNA-Enzym ohne Haarnadel-Steuerelemente, ist also bedingungslos aktiv.

### BEISPIELPARTIE

Harry, der menschliche Spieler, gibt in alle 9 Wannen Magnesiumionen und setzt damit Maya in Gang. Die Enzyme in Wanne 5 zerteilen ihre Substratstränge, und die Wanne beginnt zu leuchten. Das zeigt Mayas Eröffnungszug an (X).

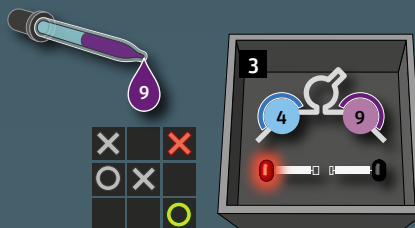


Für seinen ersten Zug wählt Harry Feld 4. Er teilt ihm Maya dadurch mit, dass er in alle Wannen Eingabestrang 4 gibt.



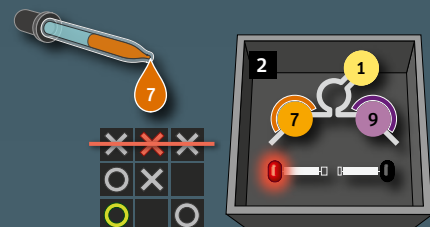
Der Eingabestrang 4 aktiviert das JA-4-Gatter in Wanne 1, die zu leuchten beginnt. Maya hat als zweiten Zug Feld 1 gewählt.

Um zu verhindern, dass Maya die Diagonale besetzt, wählt Harry Feld 9; er gibt Strang 9 in alle Wannen.



Seine beiden Eingaben aktivieren das 4-UND-9-Gatter in Wanne 3: Maya wählt dieses Feld.

Harry versucht verzweifelt, Maya zu blockieren, und besetzt Feld 7.



Pech für Harry. Seine Eingaben aktivieren jetzt das 7-UND-9-UND-NICHT-1-Gatter in Wanne 2 (Strang 1 hat er nicht in die Wannen gegeben). Maya nimmt Feld 2 und gewinnt.

mit der allgemeinen Rechenfähigkeit verknüpft.

Wir entschieden uns für das klassische Kinderspiel Tic-Tac-Toe. Es handelt sich um eines der einfachsten Zwei-Personen-Spiele mit vollständiger Information: Jeder Spieler kennt zu jedem Zeitpunkt vollständig den Zustand des Spiels, anders als bei den typischen Kartenspielen, bei denen man das Blatt seines Gegners nicht kennt. Wenn beide Spieler keine Fehler machen, endet Tic-Tac-Toe stets unentschieden. Das kann unser Automat auch; darüber hinaus kann er jeden Fehler seines Gegenspielers für sich ausnutzen.

### Maya, der spielende DNA-Rechner

Das Spiel ist so einfach, dass man für den perfekten Zug in jeder Situation nichts weiter kennen muss als die bisherigen gegnerischen Züge. Denn da es bei dieser perfekten Strategie in jeder Situation nur einen richtigen Zug gibt, sind mit den bisherigen Zügen des Gegners die eigenen bisherigen Züge, damit auch der aktuelle Spielstand und daraus wieder der nächste eigene Zug eindeutig bestimmt. Also lassen sich alle Entscheidungen in logische Operationen umsetzen, die als Eingabe den aktuellen gegnerischen Zug entgegennehmen und als Ausgabe den nächsten eigenen Zug liefern.

Im Jahr 2002 begannen wir, ein solches Netzwerk aus logischen DNA-Gattern zu bauen, also einen Automaten, der Tic-Tac-Toe spielt. Wir tauften ihn Maya, weil man das als *molecular array of Yes and AND-AND-NOT gates* (»molekulares Gitter aus JA- und UND-UND-NICHT-Gattern«) interpretieren kann – und weil Stojanovics Tochter Maya heißt.

Maya besteht aus neun Wannen, die den Kästchen des Spielfelds entsprechen. Jede Wanne enthält ihren eigenen, genau festgelegten Satz an logischen DNA-Gattern in einer Lösung (Kasten links). Die Enzyme dieser Gatter sind so gewählt, dass sie alle denselben DNA-Substratstrang zerteilen, der sich ebenfalls in allen Wannen befindet; zusätzlich benötigen sie zu ihrer Aktivierung Magnesiumionen. Man setzt Maya in Gang, indem man in alle Wannen Magnesiumionen gibt.

Da das Enzym in der zentralen Wanne durch keinerlei Haarnadeln in seiner Aktivität gehemmt ist, beginnt es sofort, das Substrat zu zerteilen, woraufhin die Flüssigkeit in dieser Wanne zu fluoreszieren beginnt. Dadurch zeigt Maya an, dass sie als Eröffnungszug das mittlere Feld wählt.

Der menschliche Gegenspieler, nennen wir ihn Harry, hat acht Eingabestränge zur Verfügung, einen für jeden der acht Spielzüge – sprich Felder –, die er noch wählen kann. Die

Basensequenzen dieser Stränge sind komplementär zu den Sequenzen auf den Haarnadeln, die Mayas DNA-Gatter steuern. Um zum Beispiel Feld 4 zu wählen, gibt Harry den Eingabestrang 4 in alle neun Wannen. Maya zeigt dann ihren Antwortzug dadurch an, dass eine der anderen Wannen zu fluoreszieren beginnt.

Genauso geht das Spiel weiter: Wenn Harry am Zug ist, tropft er in jede Wanne den Eingabestrang, der dem von ihm gewählten Feld entspricht. Der wird von der Gatterkombination jeder Wanne verarbeitet. Dabei ergibt es sich, dass jeweils genau eine Wanne ein Gatter enthält, das von der Kombination der letzten Eingabe mit allen vorhergehenden aktiviert wird. Diese Wanne beginnt dann zu leuchten und zeigt damit Mayas aktuellen Zug an.

Um die Programmierung zu vereinfachen, legten wir fest, dass Harry beim ersten Zug entweder das Feld links oben (Feld 1) oder das Feld links in der Mitte (Feld 4) wählt. Wegen der Symmetrie des Spielfelds sind diese beiden Möglichkeiten repräsentativ für alle Züge, die Harry als Erwiderung auf Mayas Eröffnungszug, das zentrale Feld, wählen kann. Würde er sich für ein anderes Feld entscheiden, dann könnte man das gesamte Spielbrett so drehen, dass das gewählte Feld auf Position 1 oder 4 gerät. Durch diese – unwesentliche – Einschränkung reduziert sich die Anzahl der Spiele, für die Maya eine Strategie bereithalten muss, auf 19. Bei einem von ihnen unterläuft Harry kein Fehler, und das Spiel endet unentschieden. In allen anderen 18 Fällen nutzt Maya einen Fehler ihres Gegners aus und gewinnt.

### Anrühren und losspielen

Nachdem wir alle 19 Spielverläufe notiert hatten, mussten wir Gatter bestimmen, die in jedem Zustand dieser 19 Spiele die richtige Antwort lieferten, und zwar aus dem Sortiment der Moleküle, die wir zur Verfügung hatten – was sich als sehr harte Einschränkung entpuppte. Dabei machten wir von der Möglichkeit, unsere logischen Elemente hintereinanderschalten, also die Ausgabe eines Gatters als Eingabe für ein anderes zu verwenden, noch gar keinen Gebrauch, weil wir unbeherrschbare Komplikationen befürchteten. Alles in allem gelang es uns in weniger als drei Monaten, Maya zu entwerfen, die Kombinationen aller Gatter zu entwickeln und sämtliche 19 Partien im Labor zu testen.

Nach diesem Erfolg befreiten wir uns im nächsten Schritt von den Beschränkungen, die wir für Maya noch in Kauf genommen hatten. Das Nachfolgemodell Maya-II (Kas-

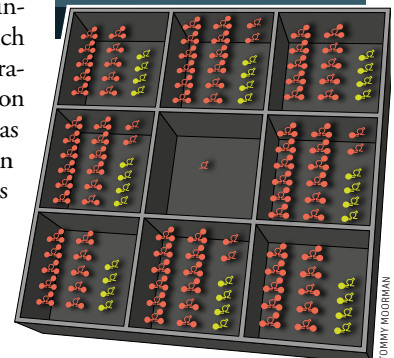
### MAYA-II

Die zweite Generation des Tic-Tac-Toe spielenden DNA-Computers der Autoren, Maya-II, ist gegenüber Maya-I in verschiedener Hinsicht weiterentwickelt.

Der menschliche Spieler kann jetzt als Antwort auf den Eröffnungszug von Maya-II, wieder stets das zentrale Feld, alle übrigen Felder wählen. Dadurch erhöht sich die Anzahl der möglichen Partien auf 76. Maya-II gewinnt davon 72, und vier enden unentschieden.

32 logische Gatter beleuchten die vom Menschen gewählten Quadrate durch grüne Fluoreszenz.

96 logische Gatter berechnen die Züge von Maya-II und zeigen sie durch rote Fluoreszenz an. Ein Computerprogramm entwarf die nötigen Gatterkombinationen.





**Joanne Macdonald, Darko Stefanovic** und **Milan N. Stojanovic** (von oben) sind auf ganz verschiedenen Wegen zu ihrer gemeinsamen Forschungsrichtung gekommen. Macdonald arbeitet als Forschungsassistentin im Department of Medicine der Columbia University in New York. Sie führt biomedizinische Forschungen durch und arbeitet am Nachweis von Viren mit Hilfe von DNA-Computern. Stefanovic ist Assistenzprofessor für Informatik an der University of New Mexico in Albuquerque und arbeitet an Algorithmen für das Speichermanagement in Computern. Stojanovic ist Assistenzprofessor an der Abteilung für Experimentelle Therapie an der Columbia University und Direktor des NSF-Zentrums für Molekulare Kybernetik.

**Macdonald, J. et al.:** Medium Scale Integration of Molecular Logic Gates in an Automaton. In: *Nano Letters* 6 (11), S. 2598 – 2603, November 2006.

**Stojanovic, M. N., Stefanovic, D.:** A Deoxyribozyme-Based Molecular Automaton. In: *Nature Biotechnology* 21(9), S. 1069 – 1075, September 2003.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1017410](http://www.spektrum.de/artikel/1017410).

ten S. 81) zieht wieder zuerst, und zwar immer noch das zentrale Feld, aber der menschliche Gegenspieler kann jetzt ein beliebiges der verbliebenen acht Felder wählen. Von den nunmehr 76 möglichen Partien gewinnt der Automat 72, und vier enden unentschieden. Obendrein ist Maya-II nutzerfreundlicher: Die Züge beider Spieler werden jetzt durch zwei verschiedene Fluoreszenzfarben angezeigt.

Diesmal schrieben wir ein Computerprogramm (für einen konventionellen Computer), um ein geeignetes System logischer Gatter zu bestimmen. Es ergab sich, dass 128 verschiedene Gatter benötigt werden; 96 davon entscheiden über die Züge des Automaten, die durch rote Fluoreszenz angezeigt werden, die restlichen 32 stellen Harrys Züge grün dar.

Allein auf Grund der Größe dieses Automaten waren Bau und Test von Maya-II eine enorme Herausforderung. Eine von uns (Macdonald) leitete das Projekt und beschäftigte mehrere Schüler damit, das Gesamtsystem zu testen, überwiegend an Samstagen und in den Sommerferien. Die Schüler hatten jede der 76 Partien mehrfach zu spielen, weil sich im Verlauf der Tests Schwächen bemerkbar machten, wodurch der Aufbau geändert – und der Test aufs Neue durchgeführt – werden musste.

Unsere größte Sorge war, dass DNA-Sequenzen sich an Stellen binden könnten, die dafür nicht vorgesehen waren. Unsere Computerprogramme reichten nicht aus, um solche Fehlbindungen vorherzusagen. Diese traten dann allerdings relativ selten auf. Viel problematischer war, dass die Gatter ihre Substrate mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten spalteten. Wir (genauer gesagt, die Schüler) mussten deshalb die Konzentrationen und Strukturen so anpassen, dass diese Unterschiede ausgeglichen wurden. Außerdem reagierten manche Gatter unterschiedlich je nachdem, ob sie allein oder vermischt mit anderen in der Lösung waren, was uns zu weiteren Änderungen am Entwurf zwang.

Nach drei Sommern und vielen Samstagen hatten wir durch zahlreiche Änderungen an den Eingabesequenzen, den Sequenzen der Gatter selbst sowie den Konzentrationen der beteiligten Substanzen schließlich ein System hergestellt, bei dem für alle Spiele die aktiven von den inaktiven Gattern in jeder Wanne klar und reproduzierbar zu unterscheiden waren.

Mit dieser Integration von mehr als 100 molekularen logischen Komponenten zu einem einheitlichen System haben wir eine bedeutende Hürde genommen. Im Jargon der Hardwarehersteller würde man Maya-II den ersten »molekularen Schaltkreis von mittlerem

Integrationsgrad« nennen. Durch die Arbeit an einem derart komplexen System ist es uns gelungen, unsere Desoxyribozyme zu echten Fertigbauteilen fortzuentwickeln. Statt *plug and play* (»einstöpseln und losspielen«) heißt es jetzt »zusammenrühren und losspielen«. Nachdem wir die mühsame Feinanpassung vorgenommen haben, laufen unsere neuen Experimente mit dem erprobten Material im Allgemeinen glatt und ohne neue Probleme.

## Moleküle mit Entscheidungsfähigkeit

Es ist uns außerdem gelungen, die von uns entwickelten Methoden mit anderen aktuellen Zugängen zu molekularen Rechnern zu kombinieren. So hat Erik Winfrees Gruppe am California Institute of Technology in Pasadena eindrucksvolle »Kaskaden des Austauschs von DNA-Strängen« (*strand replacement cascades*) aufgebaut, die zur Analyse von Oligonukleotid-Gemischen dienen. Bei diesem Verfahren werden Stränge von DNA erzeugt, indem sich gewisse Ausgangsstränge miteinander verbinden oder einander verdrängen, und zwar weitgehend ohne Katalysatoren nach der Art unserer DNA-Enzyme. Winfrees System stellte seine Fähigkeiten anhand einer fünfstufigen Kaskade unter Beweis. Dagegen wird unser gegenwärtiges System schon quälend langsam bis zur Unbrauchbarkeit, wenn nur drei Gatter hintereinandergeschaltet sind. Aller Komplexität zum Trotz hat Maya-II nicht mehr als eine einzelne Gatterschicht, benötigt aber etwa 15 Minuten für einen Spielzug.

Was steht für unsere entscheidungsfähigen Moleküle als Nächstes an? Wir verfolgen die Idee spielfähiger Automaten weiter; mit noch größeren Anzahlen an Gattern rücken zahlreiche reizvolle Aufgaben in den Bereich des Machbaren. Wir hoffen, eines Tages über ein Gemisch von Molekülen berichten zu können, das eine bestimmte Strategie lernt, indem man Beispielpartien mit ihm spielt oder indem es eine Art Auslese betreibt, bei der Gatter eliminiert werden, die Verluststrategien kodieren.

Der wohl wichtigste nächste Schritt in unserem Programm ist aber die Entwicklung von elementaren Bausteinen mit ganz neuen Funktionen. Man stelle sich vor, unser Computer würde zum Beispiel auf einen nichtchemischen Reiz wie Druck oder Wärme reagieren oder gar als Ergebnis seiner Berechnungen eine Muskelfaser kontrahieren lassen. Das würde nicht nur wie bisher Farbe, sondern auch Bewegung in das Leben unserer DNA-Bausteine bringen. Am Ende könnte unser bisheriges *plug-and-play*-System über das *play* hinaus zu echter Arbeit fähig werden. ◀



**1960**

## Strom aus der Zelle

»Der kleine elektrische Ventilator wird von der Brennstoffzelle gespeist, die ihren Brennstoff aus dem kleinen Gum-

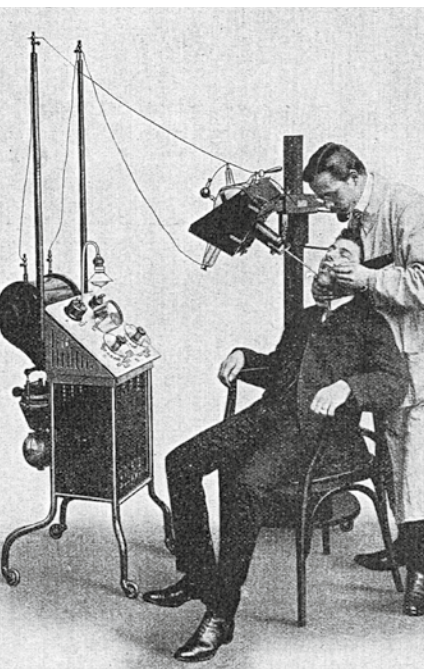
miballon erhält, nämlich reinen Wasserstoff ( $H_2$ ). Diese neue Zelle, die chemische Energie direkt in Elektrizität umwandelt, wurde im Forschungslabor der General Electric entwickelt. Wasserstoff und Luftsauerstoff verbinden sich in der Zelle zu Wasser, wobei die Energie direkt als Elektrizität freigesetzt wird.« *Populäre Mechanik*, 5. Jg., Heft 2, Februar 1960, S. 56

## Missbildungen durch Sauerstoffmangel

»In den ersten drei Schwangerschaftsmonaten werden die Anlagen für die Organe des Kindes gebildet. Untersuchungen an Tieren sowie Beobachtungen an Frauen zeigen, daß es zu Mißbildungen der Kinder kommen kann, wenn in den ersten Schwangerschaftswochen ein Sauerstoffmangel für den Embryo bestanden hat. Ein solcher Mangel an Sauerstoff kann durch verschiedene Ursachen ausgelöst werden. Nicht nur Blutungen und drohende Fehlgeburt, sondern auch Infektionskrankheiten der Mutter, sowie fieberhafte Erkrankungen und Herz- und Kreislaufkrankungen können zu Störungen der Frucht führen.« *Deutsche Hebammen-Zeitschrift*, 12. Jg., Heft 2, Februar 1960, S. 56

## Strahlender Zahnarzt

»Das kürzlich konstruierte Röntgen-Instrumentarium gestattet dem Zahnarzt, in bequemer Weise die Vorteile der Röntgenstrahlung für seine Tätigkeit auszunutzen.

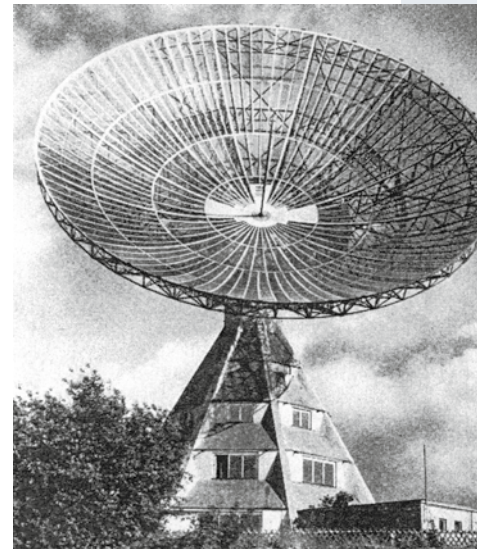


Zahnwurzelbrüche, Infraktionen des Kiefers, Eiterungen sowie alle entzündlichen Veränderungen von Zahn und Kiefer lassen sich bis in die zartesten Details darstellen und nachweisen. Ferner sind Röntgenstrahlen dem Zahnarzt deswegen wertvoll, weil sie eine bequeme Kontrolle von Bohrungen, Plombierungen und Brücken sowie Regulierungen der Zahnstellung gestatten. Der wichtigste Teil des Instrumentariums ist der Induktionsapparat zur Erzeugung hochgespannter elektrischer Ströme. Die Durchleuchtung des Körpers beruht auf der Eigenschaft der Röntgenstrahlen, feste Körper je nach deren Atomgewicht und Dicke mehr oder weniger zu durchdringen.« *Die Umschau*, 14. Jg., Nr. 7, 12. Februar 1910, S. 128 f.

**Schnell, sicher, genau:  
das Röntgeninstrumentarium  
des Zahnarztes**

## Was für ein Empfang

»Die Radioastronomie nützt die Tatsache aus, daß von den Körpern im Sonnensystem, in der Milchstraße und den fremden Galaxien hochfrequente Strahlungen ausgehen. Für den Empfang dieser Strahlen sind Antennen mit sehr großer Ausdehnung und hochwertige Empfangsanlagen erforderlich. Sie ergeben schärfste Bündelung und höchste Empfindlichkeit und damit die Möglichkeit, auch sehr weit entfernte Strahlungsquellen genau zu orten. Alle optisch bekannten Objekte im Weltraum sind damit auch Objekte der Funkortung geworden. Die aus den optischen Beobachtungen abgeleiteten Vorstellungen vom Aufbau des Sonnensystems, der Milchstraße und der fremden Galaxien wurden in



**Radioteleskop der Universität Bonn mit einem Spiegel von 25 Meter Durchmesser**

vollem Umfang bestätigt und in wichtigen Einzelheiten vervollständigt.« *Elektrotechnische Zeitschrift*, Bd. 12, Heft 4, 22. Februar 1960, S. 87

## Achtung, Blitzer

»Zwei Lehrer vom Technologischen Institut in Massachusetts haben jetzt die Photographie dazu verwendet, um die Geschwindigkeit von Motorfahrzeugen zu registrieren. Sie verwenden eine doppelte Kamera, machen zwei Belichtungen hintereinander auf einer langen Platte und empfangen zusammen mit der Aufnahme des Fahrzeugs zwei Schattenbilder eines Chronographen. Aus den Aufzeichnungen der Chronographen

**1910**

kann man zunächst die Differenz zwischen beiden Aufnahmezeiten ablesen, man kann aber auch die zwischen beiden Belichtungen durchlaufende Strecke oder die Geschwindigkeit bestimmen.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik*, 31. Jg., Nr. 3, 1. Februar 1910, S. 38

## Polonium entdeckt

»In der Akademie für Wissenschaften, Paris, teilte Prof. Lippmann im Namen der Frau Prof. Curie die Ergebnisse ihrer zusammen mit Debierne ausgeführten Arbeiten über das neue von ihr entdeckte radioaktive Element Polonium mit. Sie hat ein Zehntel Milligramm erhalten, was eine verhältnismäßig ansehnliche Menge ist, da das Polonium etwa 5000mal seltener ist als das Radium. Es ist weit radioaktiver als das letztere Element, erzeugt weit mehr Alphastrahlen und läßt weit mehr Helium ausstrahlen, doch zerfällt es sehr rasch. In 140 Tagen war die anfängliche Menge auf die Hälfte ihres ursprünglichen Gewichts zusammengeschwunden.« *Die Umschau*, 14. Jg., Nr. 9, 26. Februar 1910, S. 177

GPS

## Wegweiser im All

Was als Navigationssystem für militärische Zwecke begann, hat sich zu einem Massenprodukt entwickelt.

Von Mark Fischetti und Bernhard Gerl

Sonore Stimmen, Textangaben oder auch Pfeile dirigieren Autofahrer durch unbekannte Straßen, 3-D-Grafiken helfen an Autobahnkreuzen auf die richtige Spur, Icons verweisen auf die nächste Tankstelle. Die Satellitennavigation, kurz GPS genannt und ursprünglich für militärische Zwecke entwickelt, hat den Konsumenten erreicht.

Jedes Global Positioning System besteht aus drei Segmenten: den mindestens 24 in gut 20 000 Kilometer Höhe um die Erde kreisenden Satelliten, Bodenstationen zu deren Kontrolle sowie den Endgeräten der Nutzer. Ein Prozessor berechnet anhand der in jedem Satellitensignal kodierten Uhrzeiten des Aussendens sowie des Empfangs die Laufzeit und daraus wiederum den Abstand zum GPS-Satelliten. Theoretisch genügen drei Funksignale zur Bestimmung des Standorts. Weil die Endgeräte aber nur über Quarzuhren verfügen – die Flugkörper haben Atomuhren an Bord –, ist die Empfangszeit nicht präzise genug bestimmt. Ein viertes Signal hilft, die geringfügige Abweichung zu korrigieren.

In westlichen Ländern stehen derzeit die 24 Satelliten von NAVSTAR (*Navigational Satellite Timing and Ranging*) zur Verfügung. Ab 1978 wurde das System des amerikanischen Verteidigungsministeriums gestartet, seit 1995 ist es voll betriebsfähig. Bis zum Jahr 2000 wurden die Signale vom US-Militär gestört und die Genauigkeit der Positionsbestimmung so auf 100 Meter begrenzt. Seitdem lässt sich jeder Standort auf fünf bis zehn Meter in der Horizontalen, auf 35 Meter in der Vertikalen bestimmen.

Weitere Verbesserung werden Satelliten schaffen, die nicht ein einziges Funksignal, son-

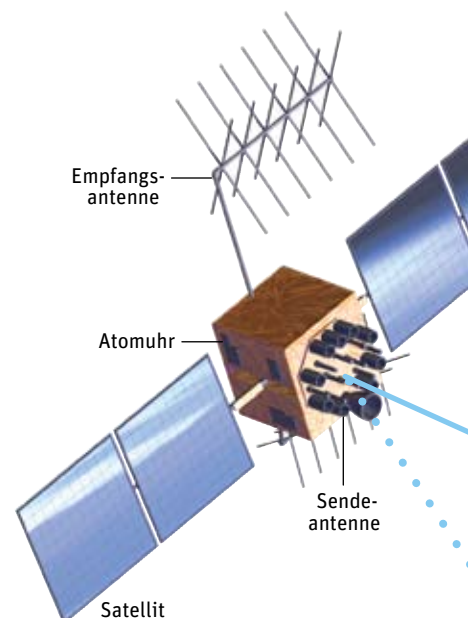
dern gleich drei auf unterschiedlichen Frequenzen senden. Auf diese Weise will man Störungen durch die elektrisch leitende Ionosphäre und damit geringfügige Verzögerungen in der Signallaufzeit kompensieren.

Die Genauigkeit wächst auch mit der Zahl der vom Empfänger »gesichteten« Satelliten. Auch deshalb arbeitet ein europäisches Konsortium an einem eigenen GPS-System namens Galileo, das NAVSTAR ergänzt, im Krisenfall aber auch davon unabhängig macht. Es soll in diesem Jahr den Probebetrieb aufnehmen und laut Planung ab 2012 voll betriebsfähig sein. Dann werden jederzeit 15 Satelliten – auch von NAVSTAR – sichtbar und nutzbar sein. Kostenfrei soll die Genauigkeit vier Meter in der Ebene und knapp acht Meter in der Senkrechten betragen. Um das System zu finanzieren, verfälschen Störsender die Signale. Erwirbt der Nutzer einen speziellen Code, kann sein Empfänger die Störung herausfiltern und die Präzision auf einen halben Meter steigern. Weitere Verbesserungen sollen terrestrische Sender in Großstädten bieten, die zusätzliche Positionsdaten ausstrahlen, wenn in Straßenschluchten die »Sicht« auf Satelliten versperrt ist. So genannte hybride oder erweiterte GPS-Empfänger werden auch solche Informationen verwerten können.

Bei aller Genauigkeit im Detail zeigen die Displays aber nur einen kleinen Ausschnitt der Umgebung. Wer sich in einer Stadt oder Landschaft weiträumig orientieren möchte, um einen Weg selbst zu planen, wird die technischen Systeme wohl auch künftig mit üblichen Straßen- oder Geländekarten kombinieren.

**Mark Fischetti** ist Redakteur bei »Scientific American«, **Bernhard Gerl** ist freier Autor in Mainz.

In einer Höhe von 20 183 Kilometern kreisen **DIE SATELLITEN DES AMERIKANISCHEN NAVSTAR-SYSTEMS** um die Erde – 24 sind erforderlich, weitere drei oder vier können ausgefallene Satelliten ersetzen. Die **Flugkörper geben permanent auf Frequenzen zwischen ein und zwei Gigahertz ihre aktuelle Position sowie die genaue Uhrzeit durch. Nach etwa zehn bis zwölf Jahren muss ein Satellit ausgetauscht werden, was derzeit zwei Monate dauert.**



### WUSSTEN SIE SCHON?

► **Meldungen über Staus und Sperrungen** senden einige Radiostationen digital über den *Traffic Message Channel* (TMC), einen sonst nicht genutzten Bereich des UKW-Signals. Entsprechend eingerichtete Navigationsgeräte verwerten diese Nachrichten, informieren den Fahrer, berechnen alternative Routen und vergleichen den zeitlichen Mehraufwand für eine Umfahrung mit der veranschlagten Zeit für die Verkehrsbehinderung.

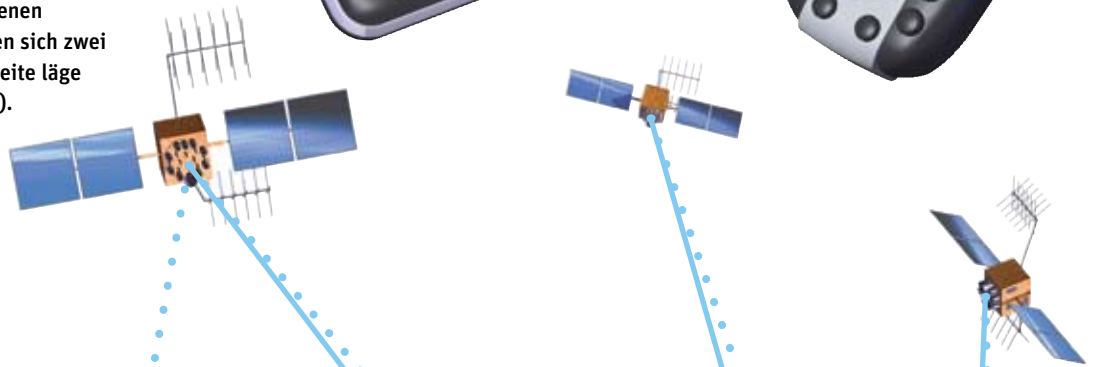
► **Eine Variante der klassischen Schnitzeljagd** ist das Geocaching: Die einzelnen Stationen sind über ihre GPS-Koordinaten auffindbar. Diese wiederum ergeben sich teilweise als Lösung von Rätseln und einfachen Rechenaufgaben. Im Unterschied zur klassischen Schnitzeljagd funktioniert Geocaching ohne direkte Absprachen: Koordinaten und Aufgaben werden auf Webseiten

wie [www.geocaching.com](http://www.geocaching.com) eingetragen. Mal genügt es, eine angegebene GPS-Position anzusteuern und dort den »Schatz« zu suchen – meist eine Dose mit einem Logbuch, mitunter auch mit kleineren Gegenständen –, ein anderes Mal müssen Rätsel gelöst werden wie beim Cache »Rauchzeichen 2.0« (er erfordert die Lektüre eines bestimmten Artikels dieser Zeitschrift). Allein in Deutschland gibt es nach Angaben des Geräteherstellers Garmin bereits mehr als 100 000 Caches.

► **Russland arbeitet schon seit dem Kalten Krieg** am GPS-System GLONASS, das in diesem Jahr in Betrieb gehen soll, Europa will bis 2012 Galileo, China bis 2015 Beidou fertig stellen. Auch Indien und Japan haben Pläne, doch deren Satelliten sollen nur die GPS-Abdeckung über dem eigenen Staatsgebiet verbessern.

Ein Empfänger berechnet aus der Uhrzeit des Aussendens, die im Signal kodiert ist, sowie der des Empfangs die Laufzeit und daraus wiederum den Abstand zum **GPS-SATELLITEN**. Dieser entspricht dem Radius einer Kugel um den Empfänger, auf deren Oberfläche sich der Satellit befinden muss. Der Schnittpunkt von drei solchen Kugeln legt die Koordinate des eigenen Standorts fest (zwar ergeben sich zwei Schnittpunkte, doch der zweite läge nicht auf der Erdoberfläche).

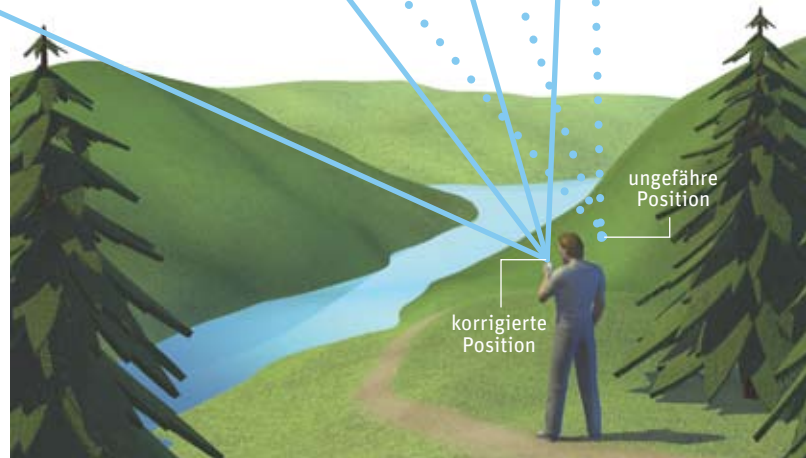
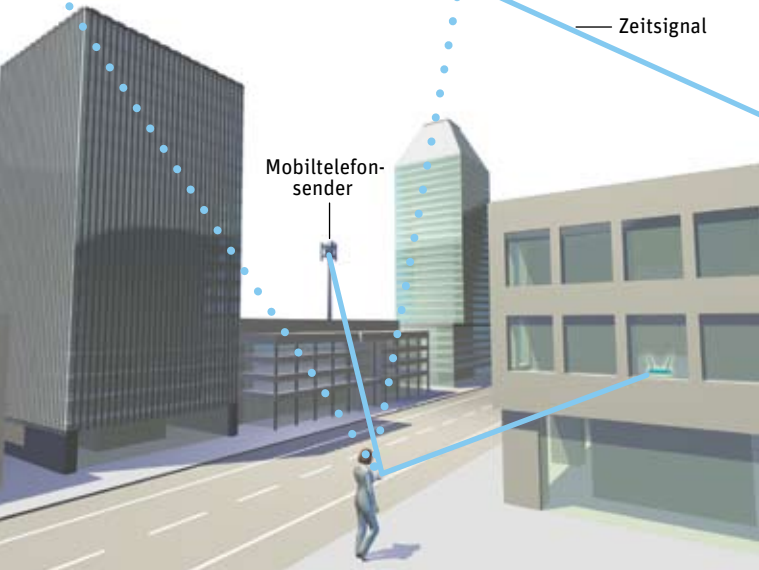
Der Nutzer kann je nach Anwendung zwischen diversen Endgeräten wählen. Neben dem großen Navigationsmodul für das Automobil bieten hochpreisige Mobilfunkgeräte GPS-Funktion (links), für Wanderer und Radfahrer empfiehlt sich ein kompaktes GPS-Handgerät (rechts).



Gebäude schirmen die Satellitensignale ab. **EIN HYBRIDER GPS-EMPFÄNGER** verwendet deshalb auch von nahe gelegenen Radio- oder Handysendern ausgestrahlte Angaben über ihren genauen Senderort.

erste Entfernungsmessung  
verbesserte Entfernungsmessung

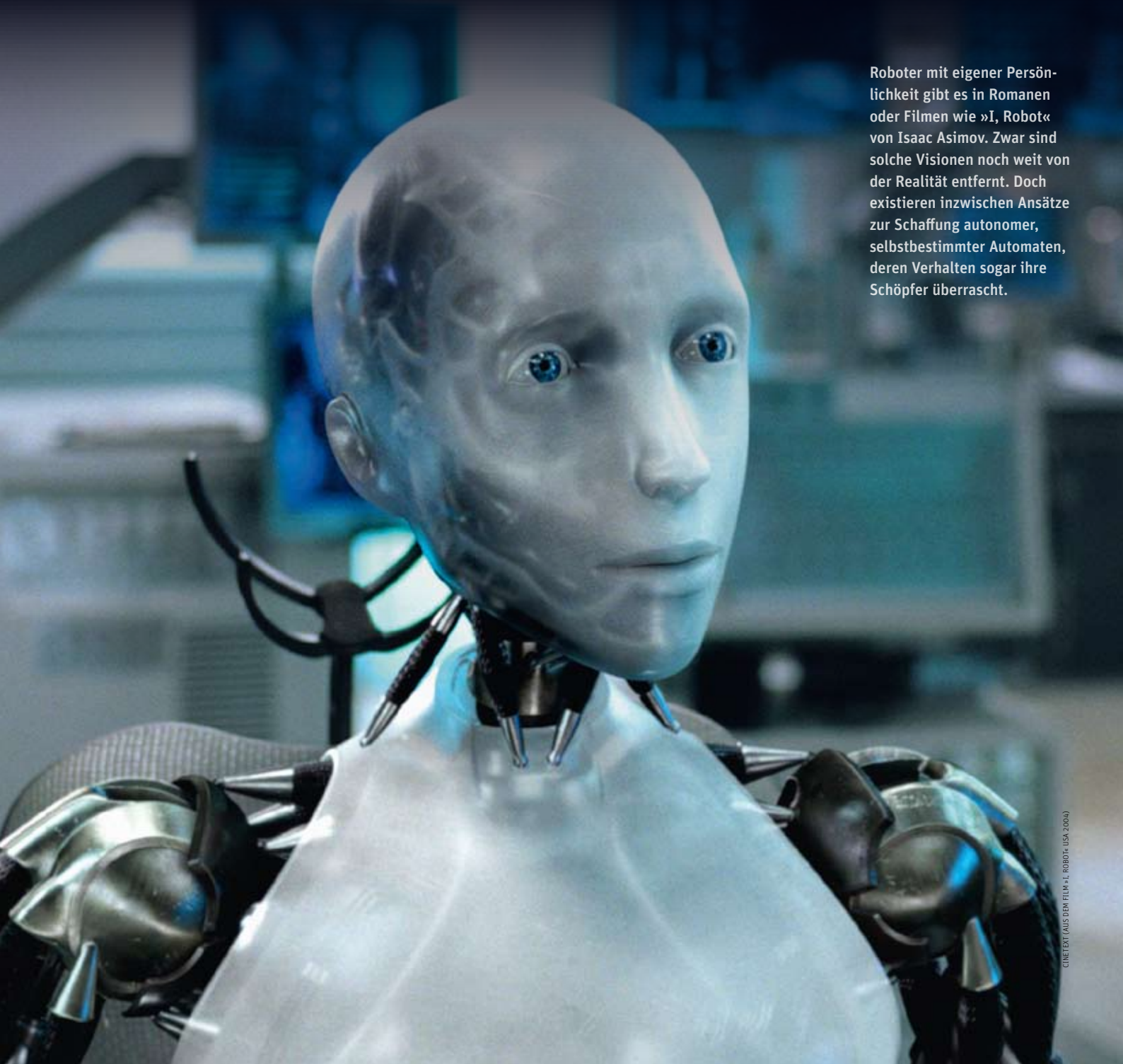
Zeitsignal



# ROBOTER mit Entdeckerlust

Heutige Roboter kranken daran, dass sie nur das können, was ihnen explizit einprogrammiert wurde. Ihnen zu einem kreativen Eigenleben mit spontanem Neugierverhalten zu verhelfen, erfordert andere Paradigmen. Neue Entwicklungen in der Informationstheorie sind dabei wegweisend.

Roboter mit eigener Persönlichkeit gibt es in Romanen oder Filmen wie »I, Robot« von Isaac Asimov. Zwar sind solche Visionen noch weit von der Realität entfernt. Doch existieren inzwischen Ansätze zur Schaffung autonomer, selbstbestimmter Automaten, deren Verhalten sogar ihre Schöpfer überrascht.



## Von Ralf Der und Nihat Ay

**L**ernfähige Roboter mit eigener Persönlichkeit sind uns aus Büchern und Filmen wohl bekannt. Das Sciencefiction-Genre wimmelt von drolligen, pffrigen und oft eigensinnigen Fantasiewesen, denen wir gern menschliche Eigenschaften wie Gefühle und eigenen Willen zugestehen, wissen wir doch, dass sie nur eine Projektion unserer selbst sind. Sogar wenn Roboter als mordlüsterne Terminatoren auftreten, fällt es uns leicht, Parallelen zu menschlichem Verhalten zu entdecken.

Wie weit sind solche Visionen von der Realität entfernt? Werden uns dereinst selbstbestimmte künstliche Wesen auch in der wirklichen Welt begegnen? Welcher Grad an Autonomie lässt sich von ihnen erwarten? Werden sie wie Organismen kreativ auf neuartige Lebensumstände reagieren können? Nehmen sie vielleicht sogar wie Menschen eine eigenständige Entwicklung bis hin zu einer individuellen Persönlichkeit?

Antworten auf diese Fragen sind kaum von philosophischen Reflexionen zu erhoffen. Auskunft geben letztlich nur praktische Experimente mit realen Robotern. Diese offenbaren schnell und oft gnadenlos, wie weit ein Ansatz tatsächlich führt oder ob eine raffinierte Idee an den allgegenwärtigen Misslichkeiten der physikalischen Realität scheitert. Robotiker beschreiben die Schwierigkeiten beim Umgang mit verrauschten Daten und gestörten Motoraktionen nicht ohne Grund mit drastischen Worten wie dem von der *dirty reality* (der gemeinen Wirklichkeit) oder beklagen die Tatsache, dass sich mit jedem zusätzlichen Freiheitsgrad eines Roboters die Probleme verdoppeln, als Fluch der Dimensionen.

Lebewesen meistern solche Widrigkeiten spielend. So haben Forscher und Ingenieure schon sehr früh die Natur als großen Lehrmeister erkannt und versucht, dort Lösungen für ihre Probleme zu finden. Doch auch das Abkupfern eines natürlichen Vorbilds ist keineswegs einfach. Der Fortschritt kommt in Raten und als Ergebnis eines Wechselspiels: Die technische Realisierung eines naturnahen Verfahrens wirft im Experiment schnell neue Fragen an die Natur auf, die dann zu verbesserten oder ganz neuen Ansätzen führen. Daraus erwächst schließlich ein Verständnis von Lebewesen auf immer tieferen und abstrakteren Ebenen. So wird die Robotik auch zum Ideengeber für die biologische Forschung.

Schließlich sollte es auf diesem Weg gelingen, aus den vielfältigen Erscheinungsformen

des Lebendigen Prinzipien zu abstrahieren, die so elementar sind, dass die darwinsche Evolution nur als Spezialfall davon erscheint. Beispielsweise zeigt es sich immer wieder, dass Sinnesorgane optimal für die Verarbeitung bestimmter Informationen ausgelegt sind. Demnach scheint die Effektivität der Informationsverarbeitung ein wesentliches Grundprinzip der Biologie darzustellen. Ein anderes Beispiel ist *Occam's razor* (Ockhams Rasiermesser), wonach in der Natur von etwa gleich günstigen Lösungen eines Problems immer die mit der geringsten Komplexität ausgewählt wird.

Die Biologie selbst taugt aber nur bedingt als Prüfstein für die Allgemeingültigkeit solcher Abstraktionen. In der Vielzahl von Formen und Funktionen, welche die Evolution hervorgebracht hat, kann fast jede Denkschule genug passende Einzelfälle finden. Die Bedeutung eines Grundprinzips wird dann schnell durch den Eifer seiner Verfechter bestimmt. Die Realisierung von künstlichen Wesen bietet deshalb eine willkommene Gelegenheit, die Gültigkeit solcher Prinzipien auch außerhalb der Biologie zu testen. Vielleicht lassen sich ja Existenzformen schaffen, die ganz anders sind als alles, was die Natur bietet. Oder wären Roboter bei vergleichbarer Morphologie ihren biologischen Geschwistern zwangsläufig ähnlich? Würde sich etwa ein Wesen mit dem Körper eines Hundes auch automatisch wie ein Hund bewegen?

Auf solche Fragen können künstliche Systeme Antworten liefern – sofern wir nur geschickt genug vorgehen. Vor allem dürfen wir die Antwort nicht »aus Versehen« in einen Entwurf mit hineinpacken. Eine wichtige Rolle spielt, wie wir sehen werden, das Phänomen der Emergenz: das spontane Entstehen höherer Funktionen, die in den Einzelheiten des Systems gar nicht angelegt sind. Sobald wir die richtigen Prinzipien des Lebens gefunden haben, sollten sich unsere künstlichen Systeme durch einen Grad an Autonomie, Kreativität, Flexibilität und Natürlichkeit in ihren Bewegungsformen auszeichnen, wie wir ihn von Lebewesen kennen.

Bei der Frage nach Gegenwart und Zukunft der Roboter wandert der Blick oft nach Japan, wo maschinellen Wesen eine fast kindliche Begeisterung entgegengebracht wird. Hier sind die meisten von ihnen schon im Einsatz. So steht in Japan knapp die Hälfte aller Industrieroboter, die mit Schwung und unbestechlicher Präzision nicht nur zentnerschwere Autoteile zusammensetzen, sondern auch winzigste Bauteile auf Leiterplatten lö-

## In Kürze

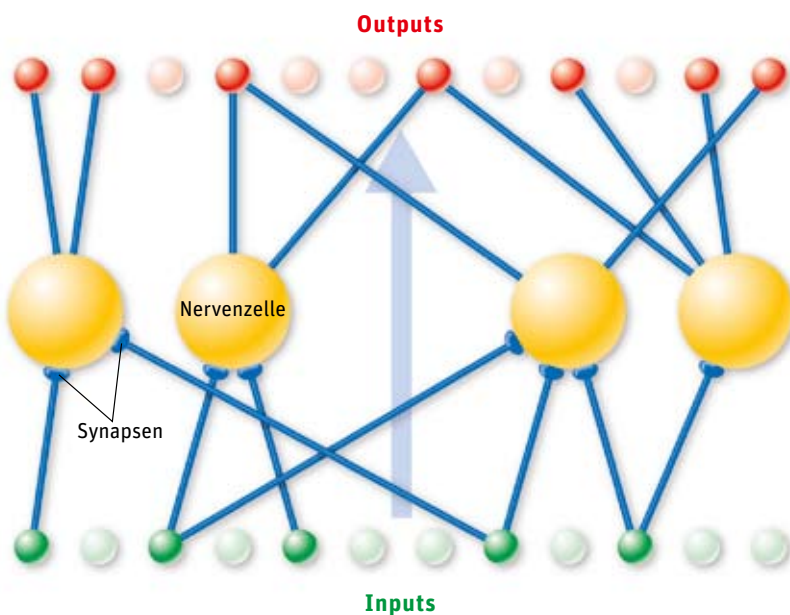
► Heutige Roboter sind mit einem möglichst umfassenden **Satz von Verhaltensregeln** für jede Eventualität ausgestattet. Das macht sie unflexibel im Verhalten und anfällig gegenüber unvorhergesehenen Situationen.

► Außerdem berechnen derzeitige Roboter im Millisekundentakt jeden Parameter neu. Dadurch bewegen sie sich meist **langsam und eher unnatürlich**.

► Neue Bestrebungen gehen dahin, Roboter so zu konstruieren, dass die Physik ihres Körpers ihre Bewegungen zum großen Teil kontrolliert, was den Rechenaufwand stark verringert und die Bewegungen fließender macht.

► Mit einem **Selbstmodell in Form eines neuronalen Netzes**, das in einer zeitemgekehrten Welt angelehrt wird, können solche Roboter die in der Mechanik ihres Körpers schlummernden Möglichkeiten auch selbst entdecken und kreativ zur Entfaltung bringen.

Die Grundlage des »Gehirns« selbst lernender Roboter bilden neuronale Netze. Das gezeigte einfache Beispiel besteht aus einer einzelnen Schicht von nur vier Nervenzellen (gelbe Kreise). Bei den Eingabepunkten ankommende Werte (Inputs) werden durch die Synapsen (blaue Kreise) in sämtliche Neuronen eingespeist und dabei mit der Effektivität der jeweiligen Synapse multipliziert. Jede Nervenzelle addiert alle so erhaltenen Werte, modifiziert die Summe nach einer vorgegebenen Regel und schickt das Ergebnis (Output) an einen oder mehrere Ausgabepunkte.



ten. Solche Maschinen sind aber auch schon dabei, ins Alltagsleben vorzudringen – man denke nur an Sonys Roboterhund Aibo als Spielgefährten.

Tatsächlich verlangt die vergreisende Gesellschaft nach Servicerobotern, die Alte und Kranke pflegen oder im Haushalt unterstützen können. Wie weit der Weg dahin aber noch ist, beweist allein die Tatsache, dass es selbst in Japan noch keinen kommerziell erfolgreichen Roboter für Normalverbraucher gegeben hat. Viele ehrgeizige Projekte wie Aibo oder der humanoide Roboter Qrio wurden inzwischen auch aus Kostengründen eingestellt. Dabei haben Roboter in Japan ein ausgesprochen positives Image – wohl nicht zuletzt auf Grund der Shinto-Religion, in der die Grenze zwischen dem Belebten und Leblosen zum Teil verschwimmt. Für Japaner ist die Vorstellung einer denkenden und fühlenden Maschine deshalb nicht so irritierend wie für viele Bewohner des Abendlands.

### Grenzen der Roboter von heute

Hinter dem mangelnden Erfolg von Aibo und Co. steckt ein tiefer liegendes Problem. Roboter sind auch heute noch den ursprünglichen Ansätzen in der künstlichen Intelligenz verhaftet, die darin Maschinen zum Ausführen von Handlungen sah, welche auf einer abstrakten Ebene ausgedacht wurden. Der Programmierer stattet sie folglich mit einem möglichst umfassenden Satz von Verhaltensregeln aus, die schon im Vorfeld jede Eventualität berücksichtigen sollen. Das macht Roboter zwar – zumindest in der Theorie – äußerst verlässlich, aber letztlich auch unflexibel im Verhalten und verwundbar. Die Welt ist zu komplex, um sie in ein Regelwerk zu pressen,

und jede nicht von den Regeln erfasste Situation kann zur Katastrophe führen. Schon sicheres Gehen oder gar Rennen erfordert für heutige Roboter-Zweibeiner daher ein einigermaßen ebenes Terrain; plötzlich auftauchende Hindernisse führen schnell zum Sturz.

Die Überwindung dieses Missstands ist ein Nahziel der aktuellen Robotik, zusammengefasst in dem Begriff der *embodied artificial intelligence*. Hier stehen die mechanisch-physikalischen Eigenschaften des Roboters, sein Embodiment, im Mittelpunkt. Die Intelligenz – beispielsweise bei der Planung und Ausführung einer Bewegung – tritt nicht als abstraktes Produkt eines umfassenden Regelsatzes für alle möglichen Situationen auf. Vielmehr handelt es sich um eine Eigenschaft, die in gewisser Weise schon im Körper selbst steckt oder zumindest angelegt ist und sich nur in Einheit mit ihm ausprägen kann. Statt die Welt vollständig zu formalisieren, versucht die neue Richtung in der Robotik folglich, geschickt körperliche Gegebenheiten auszunutzen, um den rechnerischen Aufwand beim Generieren der Bewegung zu minimieren.

Das bekannteste Beispiel für ein System, dessen Verhalten vom Embodiment dominiert wird, ist der so genannte Passivläufer: eine schlichte Metallkonstruktion, die Hüften und Beine eines Menschen in schematischer Weise nachbildet. Auf eine schiefe Ebene gestellt, vollführt das mechanische Gestell von ganz allein eine elegante Gehbewegung, weil es durch die Schwerkraft nach vorn umfallen will, der Sturz aber durch das gerade unbelastete und dadurch nach vorn schwingende Bein abgefangen wird, was das andere Bein freimacht und so weiter. Die Konstruktion sorgt für das richtige Timing dieses periodisch wiederholten Vorgangs. Der so erzeugte Gang wirkt viel natürlicher und ist deutlich energieeffizienter als die Gehbewegungen aller bekannten Roboter, bei denen ein Computer im Millisekundentakt mit gewaltigem Aufwand jede Gelenkwinkeländerung berechnet. Diese Rechenoperationen werden hier automatisch von der Physik des Körpers selbst realisiert, weshalb man von *morphological computation* spricht.

Das Ziel der neuen Forschungsrichtung besteht nun darin, die in der Morphologie eines Körpers steckenden Potenziale durch zusätzliche Ansteuerungen so zu ergänzen und zur Entfaltung zu bringen, dass sich aktive Bewegungsformen mit kleinstem Aufwand und minimalem Energieeinsatz gestalten lassen. Nicht konkrete Regeln für jede Situation bestimmen das Verhalten eines solchen Roboters. Ausschlaggebend ist vielmehr seine Gestalt in Verbindung mit einer passenden An-

ordnung der Sensoren und einer sinnvollen Verkoppelung mit der inneren Dynamik seines »Gehirns«, das die richtigen Impulse an den Körper schickt und damit die *morphological computation* in Gang setzt und unterhält. Dieses Vorgehen tritt an die Stelle der klassischen Programmierung des Roboters.

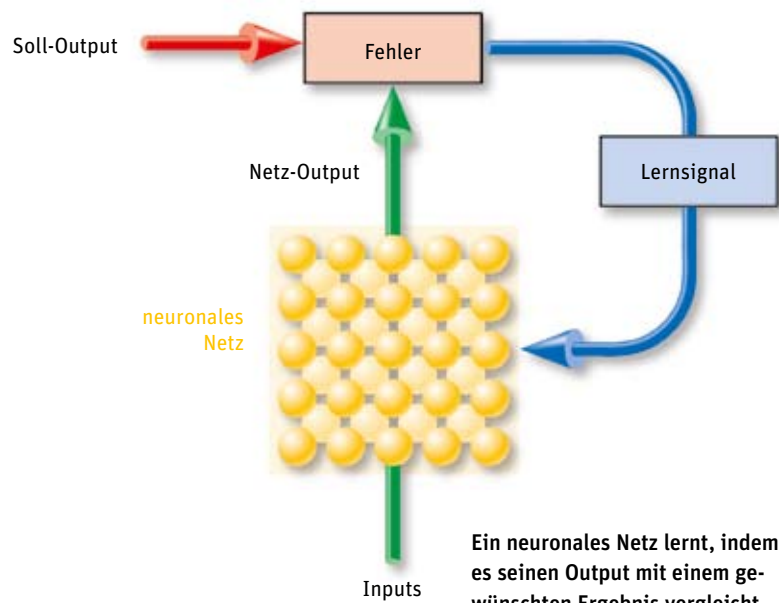
Das Prinzip wurde in vielen Beispielen schon erfolgreich erprobt. So spaziert der Passivläufer, geeignet mit Motoren und einer Steuerungseinheit ausgerüstet, auch auf einer horizontalen Fläche elegant daher (Spektrum der Wissenschaft 9/2006, S. 15). Desgleichen können künstliche Hände komplexe Objekte viel geschickter ergreifen, wenn sie statt starrer, präzise ansteuerbarer Fingerglieder weiche, flexible und damit menschenähnliche Strukturen haben (Spektrum der Wissenschaft 5/2001, S. 60).

Das Prinzip der *morphological computation* bringt die Roboter ihren biologischen Vorbildern näher. Die resultierenden hoch spezialisierten Maschinen sind robuster gegen Störungen als bisherige Lösungen und erreichen ihre Ziele mit erheblich geringerem Aufwand. Ihre Entwicklung erfordert weniger den vorausschauenden Programmierer als den kreativen Designer, der sie auf den gewünschten Zweck hin trimmt, so dass möglichst viel der Rechenlast von der Physik des Körpers übernommen wird.

### Einfühlung in den eigenen Körper

Uns beide interessiert allerdings eine noch grundlegendere Frage. Lassen sich auch Roboter realisieren, welche die in der Mechanik ihres Körpers schlummernden Möglichkeiten selbst entdecken und kreativ zur Entfaltung bringen? Zunächst ist etwa eine Laufmaschine ja nur eine Menge mechanischer Bauteile. Diese sind verbunden durch Gelenke, die von Motoren angetrieben werden. Außerdem gibt es Sensoren, die körpereigene Kenngrößen wie die aktuellen Gelenkwinkel zurückmelden sowie Auskunft über die Umwelt geben. Bei Energiezufuhr kann dieses aktive physikalische System fast unendlich viele verschiedene Bewegungen ausführen. Wir wollen ihm nun eine Art Gehirn verpassen, das es befähigt, sich in den vorgefundenen Körper einzufühlen. Indem es die *morphological computation* startet, sorgt es dafür, dass der Roboter quasi von selbst zu den ihm eigenen Bewegungs- und Existenzformen findet.

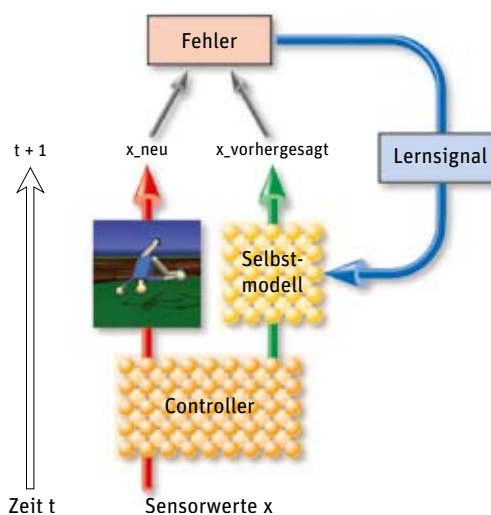
In den Gehirnen von Lebewesen spielen neuronale Netze eine entscheidende Rolle. Sie bestehen aus Ensembles von Nervenzellen, die jeweils über synaptische Kontaktstellen Signale von anderen Neuronen sowie Sensoren empfangen, verarbeiten und weiterleiten. In



Ein neuronales Netz lernt, indem es seinen Output mit einem gewünschten Ergebnis vergleicht. Die Abweichung zwischen beiden bildet den Fehler. Der Lernalgorithmus passt die synaptischen Effektivitäten der Neuronen in einer Weise an, dass der Fehler minimiert wird. Dieser Lernschritt wiederholt sich für jeden neuen Input.

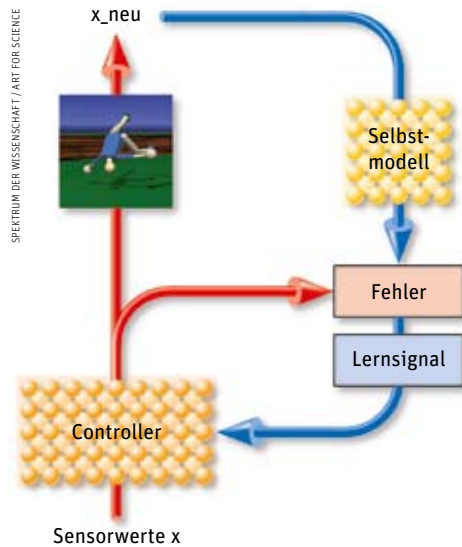
eine mathematische Sprache übersetzt, kann man sich die einlaufenden Daten vereinfacht als Spannungswerte vorstellen, die jeweils mit einem Faktor – der Effektivität der beteiligten Synapse – multipliziert und danach im Neuron aufsummiert werden. Dieses leitet das Ergebnis, geeignet begrenzt, als Output an nachgeschaltete Nervenzellen (oder die Muskeln beziehungsweise Motoren) weiter.

Werden die derart modellierten Neurone zu künstlichen Netzen verknüpft, lässt sich damit jede Funktion realisieren, die zu einem Input einen gewünschten Output liefert. Entscheidend für praktische Anwendungen ist, dass ein solches Netz diese Funktion anhand von Beispielen erlernen kann. Dabei werden seine Parameter, also die Effektivitäten der beteiligten Synapsen, nach einem bestimmten Schema schrittweise angepasst. Für die Robotik ist das ideal, weshalb künstliche neuronale Netze seit vielen Jahren als lernfähige Ein-



Ein autonomer Roboter enthält neben einem Controller, der gemessene Sensorwerte in Befehle an die Motoren umsetzt, ein neuronales Netz, das anhand der Steuerbefehle die nächsten Sensorwerte vorhersagt und mit denen vergleicht, die sich aus den real beobachteten Motoraktionen ergeben. Die Abweichung dient als Lernsignal für das neuronale Netz, so dass seine Vorhersage immer genauer wird. Dieses Netz bildet somit ein Selbstmodell, welches das Verhalten des Roboters zunehmend besser beschreibt.

Genauso wie das Selbstmodell das Verhalten des Roboters abzubilden lernt, kann man dem Roboter beibringen, sein Verhalten am Selbstmodell auszurichten. Dazu lässt man dieses nach Ausführung einer Motoraktion zu den neuen Sensorwerten passende Steuerbefehle ermitteln und vergleicht sie mit den tatsächlichen Befehlen des Controllers. Die Abweichung zwischen beiden dient nun als Lernsignal für den Controller, damit er Steuersignale erzeugt, die besser mit den Werten des Selbstmodells übereinstimmen.



heiten für die Steuerung und Modellierung dienen. Ein Roboter kann damit seine Fähigkeiten im Prinzip selbst erlernen und muss nicht erst aufwändig programmiert werden.

Für das »Gehirn« unserer Kunstwesen verwenden wir zwei neuronale Netze. Das eine fungiert als Steuerungseinheit (Controller), die aus den aktuellen Sensorwerten die neuen Signale für die Motoren berechnet. Das andere sagt voraus, welche Sensorwerte sich aus den neuen Motorsignalen ergeben werden. Damit dient es als Modell des Embodiments – also der mechanisch-physikalischen Eigenschaften – unseres Roboters. Sind nur »propriozeptive« Sensoren involviert, die körpereigene Kenngrößen liefern und nichts über die Umwelt aussagen, so kann man von einem Selbstmodell sprechen. Das Netz startet ohne jegliches Vorwissen, verbessert aber in jedem Zeitschritt seine Vorhersagefähigkeit durch Lernen.

Mit Hilfe des Modells lassen sich die Abläufe in der realen Welt »in Gedanken« durchspielen, was einer vorausschauenden Handlungsplanung dienen kann. Diese innere Repräsentation des realen Embodiments bezeichnet der Philosoph Thomas Metzinger von der Universität Mainz als Embodiment zweiter Ordnung. Sie spielt zweifellos eine wichtige Rolle in biologischen Systemen mit gewissen kognitiven Fähigkeiten.

Die Umsetzung von Sensorwerten in Motoraktionen durch das neuronale Netz der Steuerungseinheit ist ein erster Schritt, um das Verhalten des Roboters in kontrollierte Bahnen zu lenken. Stellen wir uns ein humanoides Kunstwesen vor, das 18 aktive Gelenke hat. Das Controller-Netzwerk bestehe dabei aus einer einzigen Schicht von Motorneuronen, die jeweils mit jedem Sensor synaptisch verkoppelt sind. Daraus ergeben sich  $18 \times 18 = 324$  anpassbare Parameter. Als Sensorwerte sollen

zunächst nur die aktuellen Gelenkwinkel in den Controller eingespeist werden. Dieser modifiziert sie gemäß seinen Parameterwerten und leitet das Ergebnis als Signale an die Motoren weiter. Der Roboter bewegt entsprechend seine Arme und Beine, was zu neuen Sensorwerten führt, die der Controller wiederum in Motorsignale umsetzt. Dieser Rückkoppelungskreis, die so genannte sensomotorische Schleife, wird in der Praxis etwa 10- bis 50-mal pro Sekunde durchlaufen.

Die Steuerung mit neuronalen Netzen sorgt ganz automatisch für das Embodiment und damit die Verankerung des Verhaltens in den mechanisch-physikalischen Eigenschaften des Roboters; denn die Sensorwerte als Grundlage dieses Verhaltens stehen zwangsläufig in Einklang mit den physikalischen Gesetzen. Zum Beispiel können sich die Gelenkwinkel eines stark belasteten Arms nicht beliebig schnell verändern und nur unvollständig an die Sollwerte annähern. Das moderiert wiederum den Verlauf der Motorwerte, so dass die Bewegungen nicht roboterhaft eckig, sondern fließend aussehen.

### Werde, was du bist

Doch es gibt noch ein anderes grundlegendes Problem. Wie sich im Experiment, aber auch bei der theoretischen Analyse herausstellte, führen fast alle Parameterkombinationen zu wenig sinnvollen Verhaltensweisen: Meist landen die Neurone in ihrem Sättigungsbereich. Unser humanoider Roboter erstarrt dann völlig verrenkt in extremen Gelenkwinkelpositionen. Die gesuchten »natürlichen« Bewegungsformen entsprechen eben nur winzigen Inseln in dem 324-dimensionalen Parameterraum.

Wie kann sich das Kunstwesen auf die Suche nach diesen Inseln begeben, ohne schon vorab über ein vollständiges Modell seines eigenen Verhaltens zu verfügen? Um herauszufinden, was seine Bewegungsformen sind, braucht es als notwendige, wenn auch keineswegs hinreichende Bedingung die Möglichkeit zur Selbstwahrnehmung. Dazu verhilft ihm das ständig mitlernende Selbstmodell. Damit kann er sich allmählich eine innere Vorstellung vom Verhalten seines Körpers in der Welt aufbauen und sie ständig verbessern. Wenn der Roboter eigenständig seine Fähigkeiten entwickeln soll, muss er zunächst einmal sein Verhalten mit den unbewussten Vorstellungen, die er (qua Selbstmodell) von sich hat, in Einklang bringen; in gewissem Sinn muss er also werden, was er (in seiner unbewussten Vorstellung von sich selbst) schon ist.

Das lässt sich in der Praxis relativ leicht realisieren. Der Controller muss dabei lernen, Verhaltensweisen zu generieren, die den Vor-

### ZENTRALE BEGRIFFE

**Embodiment:** Gesamtheit der mechanisch-physikalischen Eigenschaften eines Roboters

**embodied artificial intelligence:** eine Form der künstlichen Intelligenz, welche die mechanisch-physikalischen Eigenschaften eines Roboters maximal ausnutzt

**Embodiment zweiter Ordnung:** innere, modellhafte Repräsentation des realen Embodiments

**Emergenz:** das spontane Entstehen von höheren Funktionen, die in den Einzelheiten des Systems nicht angelegt sind

**morphological computation:** Berechnungen, die ein Roboter auf Grund seines Embodiments gleichsam automatisch oder von selbst ausführt

FORTSETZUNG AUF S. 93

»»



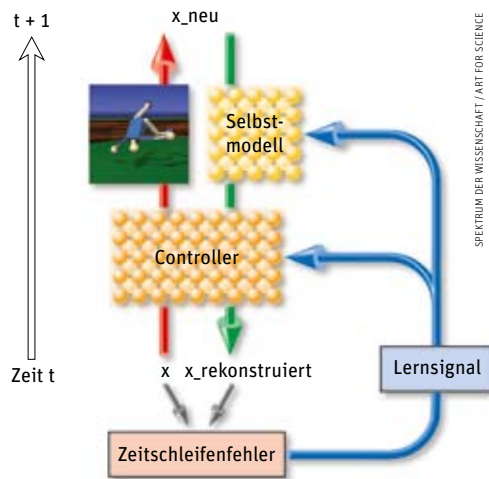
hersagen des Selbstmodells möglichst nahekommen. Zur Erläuterung wollen wir eines unserer gravitationsgetriebenen Vehikel betrachten. Obwohl das Gerät äußerlich wenig mit einem herkömmlichen Roboter zu tun hat, macht es die Rolle des Embodiments besonders klar. Es handelt sich um einen zylindrischen Körper mit zwei Kugeln im Innern, die sich von Servomotoren auf zwei senkrecht zueinander stehenden Achsen verschieben lassen. Dadurch verlagert sich der Schwerpunkt des Zylinders, und er fängt an zu rollen. Wegen seiner Masse reagiert er allerdings nur sehr träge. Das Gehirn muss sich darauf einstellen und das richtige »Taktgefühl« entwickeln, um die Walze gezielt zu bewegen.

Wenn wir ihm nun die Kontrolle übergeben, erleben wir zunächst eine Enttäuschung. Die Walze bleibt nämlich einfach liegen. Genau betrachtet überrascht das nicht; denn in diesem Fall sind die Sensorwerte konstant, was das Selbstmodell am besten darstellen kann. Versetzen wir der Walze jedoch einen Stoß, geschieht etwas Interessantes. Der Zylinder beginnt allmählich immer schneller zu rollen, bremst nach Erreichen einer gewissen Höchstgeschwindigkeit ebenso zielstrebig bis zum Stillstand ab und wiederholt den gleichen Vorgang, nur in entgegengesetzter Richtung.

Wie eine genauere Analyse zeigt, resultiert dieses Verhalten aus dem Spannungsfeld zwischen realem und virtuellem Embodiment. Unser recht einfaches Selbstmodell braucht Zeit, um das Verhalten des Zylinders bei einer bestimmten Geschwindigkeit zu erlernen. Der ist inzwischen aber schon wieder schneller oder langsamer geworden. Wie sich herausstellt, regelt sich diese Beziehung allmählich ein, so dass sich nach längerer Zeit ein Zustand mit fester Geschwindigkeit – im allgemeinen ungleich null – herausbildet, der dann für immer erhalten bleibt.

Im übertragenen Sinn kann man sagen, dass der Roboter in dieser »Selbstfindungsphase« in mehr oder weniger definierter Weise seinen Bewegungsraum absucht. Er entwickelt also gleichsam von sich aus eine gewisse Neugier, die aber bald wieder erlischt. Auch Experimente mit komplexeren Robotern ergaben meist das Nichtstun oder stereotypes Handeln als vorherrschende Seinsweise – zumindest in einer statischen Welt. Das ist, wie gesagt, nicht wirklich überraschend, denn die (unmittelbaren) Folgen des Nichtstuns kann das Selbstmodell natürlich am besten vorhersagen.

Ganz allgemein zeigt ein Roboter, der dem Imperativ »Werde, was du bist« gehorcht, keinen eigenen Innovationsdrang und auch kein dauerhaftes Neugierverhalten. Jeder Versuch, Neues zu wagen, wird schnell unterdrückt,

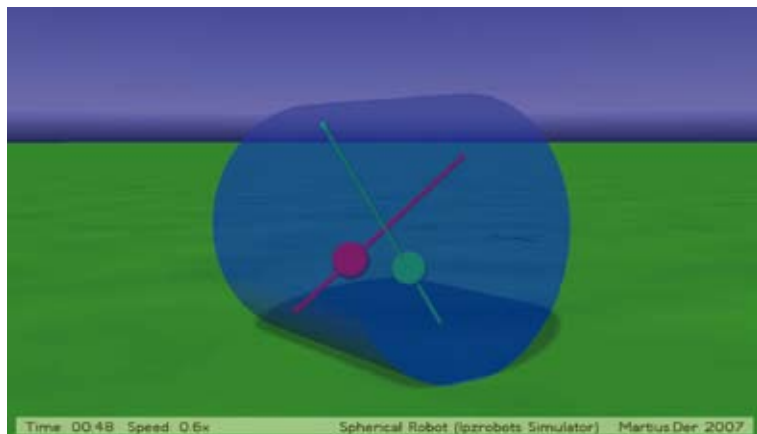


weil er Wissen über das Unbekannte voraussetzt. Trotzdem wurde ein Fortschritt gegenüber der früheren Situation erzielt, in der das Kunstwesen ohne diesen Imperativ ebenfalls in einem unveränderlichen Zustand erstarre. Den Übergang ins Nichtstun realisiert der Roboter nun auf seine eigene – um nicht zu sagen: persönliche – Weise und je nach seinen Kenntnissen, die er bis dahin über sich und seinen Körper erworben und im Selbstmodell abgespeichert hat. Wäre Zur-Ruhe-Kommen das Ziel, könnte man sagen, dass er gelernt

Bei gegenseitiger Anpassung von Controller und Selbstmodell gelangt ein Roboter nach dem Durchlaufen vieler möglicher Zustände letztlich in einen stabilen Endzustand. Das lässt sich vermeiden, wenn man den Lernvorgang rückwärts in der Zeit ablaufen lässt. Dafür muss das Selbstmodell, statt aus den alten Sensorwerten die neuen vorherzusagen, aus den neuen die alten rekonstruieren und mit den tatsächlichen vergleichen. Die Abweichung zwischen beiden wird nun durch Anpassung von Controller und Selbstmodell minimiert.

## EINE SELBST LERNENDE WALZE

**Was passiert, wenn man** einen Controller, der sein Verhalten am Selbstmodell des Roboters ausrichtet, mit einem Selbstmodell kombiniert, das sich dem Verhalten des Roboters kontinuierlich anzupassen versucht? Gut beobachten lässt sich das an einer Walze mit zwei Gewichten in ihrem Inneren, die von Servomotoren längs zweier Achsen verschoben werden können. Wenn man den Zylinder anstößt, beschleunigt er zunächst, bremst dann, stoppt und beginnt sich in die andere Richtung zu bewegen. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrfach, so dass die Walze hin- und herrollt, bis sie irgendwann bei einer gleichmäßigen Bewegung endet. Der Grund dafür ist, dass das Selbstmodell dem veränderlichen realen Verhalten des Zylinders hinterherhinkt und dieser mit seinen Anpassungen an das Selbstmodell ebenso wenig nachkommt.



RAUF DER: MPT FÜR MATHEMATIK IN DEN NATURWISSENSCHAFTEN, LEIPZIG UND GEORG MARTIUS, MPT FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION, GÖTTINGEN



SIMULATIONEN DIESER DOPPELSEITE: BALF, IFFER, MPI FÜR MATHEMATIK IN DEN NATURWISSENSCHAFTEN, LEIPZIG UND GEORG MARTIUS, MPI FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION, GÖTTINGEN

Künstliche Wesen mit zeitunggekehrtem Lernen zeigen aus sich heraus einen Drang, das ganze Spektrum ihrer Bewegungs- und Verhaltensmöglichkeiten zu erkunden. Roboterhunde können so zum Beispiel wie aus purem Spieltrieb ohne Anleitung über einen Zaun klettern. Schlangenförmige Kunstwesen winden sich aus ihrem Behältnis. Humanoide Roboter probieren manchmal einen Salto oder verhalten sich, als wollten sie aus beengenden Situationen ausbrechen. Treffen zwei von ihnen aufeinander, vollführen sie eine Art Ringkampf.

hat, die speziellen mechanisch-physikalischen Gegebenheiten seines Körpers im Sinn einer *morphological computation* optimal zum Erreichen dieses Ziels einzusetzen.

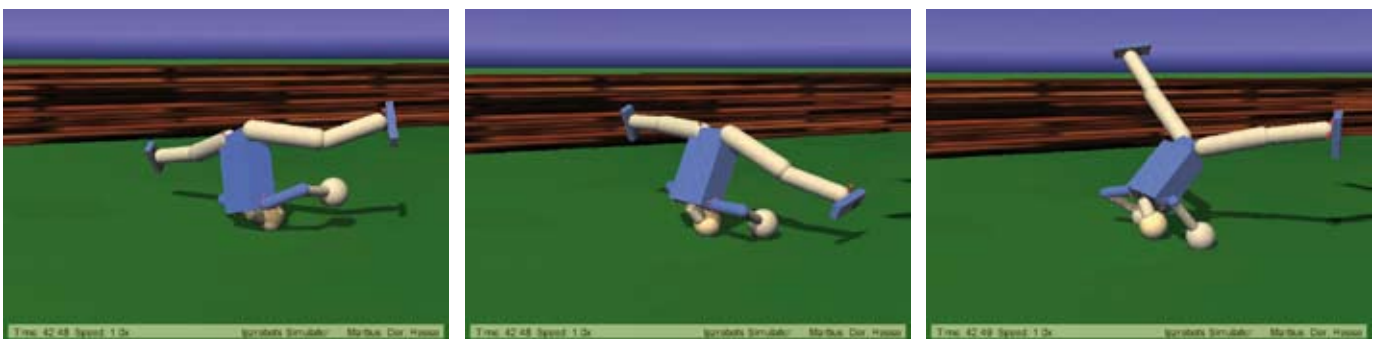
Der Versuch eines Ausgleichs zwischen innerer und äußerer Welt scheint mehr oder weniger zwangsläufig zur Stabilisierung des Verhaltens in fixen Zuständen zu führen. Das erinnert an den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der das Schicksal jedes (hinreichend komplexen) abgeschlossenen Systems festlegt. Gnadenlos verheißt er den Zerfall jeglicher Ordnung in Raum und Zeit. Damit bestimmt er die Richtung des Zeitpfeils und sorgt dafür, dass sich die Zeit nicht zurückdrehen lässt.

**Werde, was du sein kannst**

Unser Roboter lebt damit eigentlich in der falschen Welt. Das ist schade, denn nach obigem Prinzip angelernt, könnte er in einem zeitunggekehrten Kosmos fantastische Dinge vollbringen. Wir brauchen uns dazu nur vorzustellen, einen Film seines Verhaltens in der »normalen« Welt rückwärts abzuspielen. Der

sonst aufs Nichtstun erpichte Roboter würde plötzlich von sich aus interessante, ihm gemäße Aktivitäten entfalten. Untätigkeit oder Verharren in Verhaltensstereotypen erschiene instabil und würde einer gesunden Neugier weichen.

Offenbar ist die Kombination von Leben und Lernen in Welten entgegengesetzter Zeitrichtung eine produktive Angelegenheit. Natürlich lässt sich in der physikalischen Realität, in der unser Roboter lebt, der Zeitpfeil nicht umkehren. Zum Lernen aber können wir ihn sehr wohl in eine zeitunggekehrte Welt schicken. Das ist sogar relativ einfach; denn mit dem Selbstmodell lässt sich die Dynamik nicht nur vorwärts, sondern fast genauso gut auch rückwärts in der Zeit modellieren. Wie vorher berechnet der Controller aus den Sensorwerten die neuen Motorwerte und schickt sie an den Roboter, der sich entsprechend verhält. Ergebnis sind neue Sensorwerte. Im Unterschied zu vorher sagt das Selbstmodell jedoch nicht sie voraus, sondern rekonstruiert aus ihnen die vorangegangenen Sensorwerte



» FORTSETZUNG VON S. 90

**Paradigma:** Der erkenntnistheoretische Ausdruck beschreibt ein wissenschaftliches Denkmuster samt den zugehörigen Grundannahmen, Fragestellungen, experimentellen Vorgehensweisen und Deutungen von Versuchsergebnissen. Meist spiegelt ein Paradigma einen allgemein anerkannten Konsens wider.

**sensorische Schleife:** Zyklus, in dem der Controller des Roboters auf der Basis von Sensorwerten Motoraktionen veranlasst, welche zu neuen Sensorwerten führen, die dann wieder Ausgangspunkt für neue Motoraktionen sind

**Zeitschleife:** Zyklus, bei dem aus neuen Sensorwerten, die aus einer Motoraktion folgen, die vorangegangenen Sensorwerte rekonstruiert und mit denen verglichen werden, auf denen die Motoraktion tatsächlich beruhte

**Zeitschleifenfehler:** Abweichung zwischen den aus den neuen Sensorwerten rekonstruierten und den tatsächlichen alten Sensorwerten; ihre Minimierung verhilft dem Roboter zu einem Verhalten, bei dem er seine Möglichkeiten von sich aus erprobt

und vergleicht sie mit den tatsächlichen. Die Abweichung zwischen beiden ist nun die Größe, die es zu minimieren gilt. Da die Schrittfolge vom alten Sensorwert zum neuen und dann zurück zum (rekonstruierten) alten eine Zeitschleife darstellt, nennen wir die zu minimierende Größe den Zeitschleifenfehler.

Indem der Controller lernt, diesen Fehler zu verringern, und sich dabei in jedem Zeitschritt ein wenig verbessert, gestaltet er das von ihm gesteuerte Verhalten in der zeitumgekehrten Modellwelt stabiler. In der realen Welt dagegen wird das Verhalten mehr in Richtung Instabilität getrieben. Freilich geschieht das nicht irgendwie, sondern nach dem Wissen, das intern im Selbstmodell schon repräsentiert ist. Damit bleibt die Destabilisierung unter Kontrolle, und die Gefahr, dass das System ins Chaos abdriftet, wird vermieden.

Trotzdem bedeutet die Destabilisierung in der realen Welt auch immer einen Schritt ins Ungewisse. Auf diese Weise werden neue dynamische Aspekte des mechanisch-physikalischen Systems, also des Roboterkörpers, versuchsweise angeregt, was potenziell neue Verhaltensmuster hervorbringt. Dabei lernt das Selbstmodell immerzu mit und passt sich so ständig den neuen Bedingungen an. Insgesamt entwickelt der Roboter ganz aus sich heraus einen auf die Erkundung seiner Möglichkeiten gerichteten Drang zur Aktivität: Er bleibt nicht auf einer Entwicklungsstufe stehen, sondern probiert aus, was er alles sein kann.

Mathematische Untersuchungen zeigen, dass die Minimierung des Zeitschleifenfehlers den Roboter genau in den Bereich zwischen Ordnung und Chaos treibt, in dem nach Ansicht vieler Wissenschaftler auch lebende Systeme agieren. Das skizzierte, zunächst recht abenteuerlich wirkende Vorgehen konnte in den vergangenen Jahren in ein robustes Lernverfahren umgesetzt werden, das sich bei vielen Anwendungen sowohl mit realen Robotern als auch in realistisch simulierten virtuellen Welten bewährt hat.

Für den Nachweis der Allgemeingültigkeit unseres Prinzips haben wir uns eine Reihe von

recht stringenten Vorgaben ausgedacht. Zunächst einmal soll unser »Gehirn« nicht speziell auf den zugehörigen Körper zugeschnitten sein. Nur die Zahl der Motorneurone und die der sensorischen Inputs wird individuell angepasst; im Übrigen bleibt das neuronale Netzwerk für alle Roboter, an die es angeschlossen wird, strukturell gleich. Unser Lernverfahren sorgt dann dafür, dass (fast) jeder beliebige Roboter in seiner Umgebung mit der Zeit in spielerischer Weise Bewegungsformen entwickelt, die für sein jeweiliges Embodiment – also seine Gestalt sowie motorische und sensorische Ausstattung – als natürlich erscheinen.

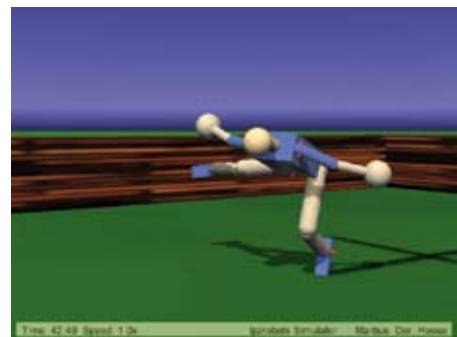
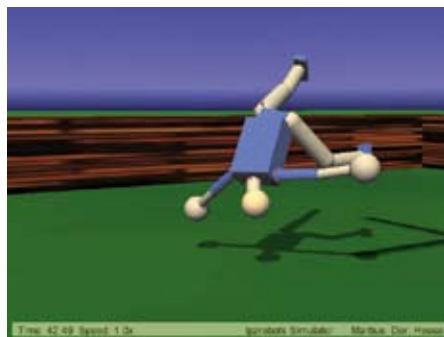
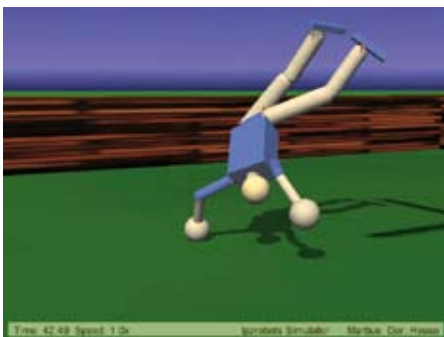
### Das Zeitschleifenprinzip in Aktion

Lassen wir das Gehirn unserer Walze nach dem neuen Prinzip lernen, dann spielt die Maschine wieder ihre verschiedenen Möglichkeiten durch. Allerdings beschleunigt sie jetzt auch aus der Ruhelage heraus scheinbar zielgerichtet – das Nichtstun ist erwartungsgemäß instabil geworden. Sie endet auch nicht in einem festen Zyklus wie zuvor, sondern bleibt immer innovativ. Analog verhalten sich Kugelroboter mit drei zueinander senkrechten Achsen und unterschiedlicher Sensorik. Allerdings entwickeln sie noch wesentlich komplexere Bewegungsmuster, die auf unserer Videoseite im Internet (<http://robot.informatik.uni-leipzig.de/videos/>) zu sehen sind.

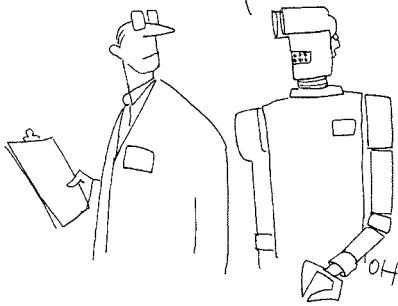
Dort finden sich auch noch viele weitere Beispiele. Der geeignete Betrachter mag in den Bewegungsformen eine gewisse eigenständige Lebendigkeit erkennen. In der Tat bewegt sich eine hundeförmige Maschine nach einiger Zeit hundertypig. Verpflanzt man ihr Gehirn in eine Schlange (mit entsprechender Anzahl von Sensoren und Motoren), so entwickelt dieses neue Wesen sehr bald ganz andere, ihm gemäße Bewegungsformen, die durchaus schlangenartig anmuten.

Oft haben uns unsere Roboter zum Staunen gebracht. So probieren die von uns entwickelten Humanoiden in der Simulation völlig aus sich heraus sogar Überschläge, Kopf-

**Ein humanoider Roboter macht spontan einen nie zuvor gelernten Rückwärtsüberschlag.**



UND WER HAT IHNEN DEN  
FREIEN WILLEN EINPROGRAMMIERT?



**Ralf Der** (links) war Professor am Institut für Informatik der Universität Leipzig und gehört nach seiner Emeritierung dem Leipziger Max-Planck-Institut für Mathematik in den Naturwissenschaften an. Er beschäftigt sich mit der Theorie neuronaler Netze und ihrer Anwendung in der Robotik sowie mit Selbstorganisation und Informationstheorie. **Nihat Ay** leitet die Gruppe »Informationstheorie Kognitiver Systeme« am Max-Planck-Institut für Mathematik in den Naturwissenschaften und ist Privatdozent für Mathematik an der Universität Leipzig. Als externer Professor des Santa Fe Institute (New Mexico) wirkt er an der Theoriebildung zum Thema Komplexität und Robustheit von Systemen mit.

**Ay, N., Polani, D.:** Information Flows in Causal Networks. In: *Advances in Complex Systems* 11, S. 17–41, 2008.

**Der, R. et al.:** Predictive Information and Emergent Cooperativity in a Chain of Mobile Robots. In: *Proceedings ALifeXI*, MIT Press, 2008.

**Der, R. et al.:** Rocking Stumper and Jumping Snake from a Dynamical System Approach to Artificial Life. In: *Journal of Adaptive Behavior* 14, S. 105–115, 2006.

**Der, R.:** Self-Organized Acquisition of Situated Behavior. In: *Theory in Biosciences* 120, S. 1–9, 2001.

Weblinks zum Thema finden Sie bei [www.spektrum.de/artikel/1017411](http://www.spektrum.de/artikel/1017411).

stand und elementare Kletterbewegungen. Solche emergenten Bewegungsformen sind offensichtlich durch das jeweilige Embodiment des Roboters bestimmt.

Wunder gibt es aber auch hier nicht. Natürlich würden wir uns wünschen, dass die Schlange zu kriechen und der Hund zu laufen oder gar zu rennen anfängt. Aber solche hochspezifischen Bewegungsformen sind unter einem extremen Selektionsdruck in Jahrmillionen der Evolution entstanden und bilden nur einen winzigen Ausschnitt aus dem Spektrum sämtlicher Bewegungsformen, die zu einem Wesen passen. Deshalb kann man nicht erwarten, dass unsere Roboter sie unter der Unzahl von Möglichkeiten bevorzugen. Es handelt sich eben »nur« um neugierige, verspielte Wesen. Obwohl sie uns immer wieder mit ausgefallenen Bewegungsmustern überraschen, deren Natürlichkeit und Eleganz mit klassischen Ansätzen kaum zu erreichen wäre, reproduzieren sie nichts davon gezielt für einen bestimmten Zweck – etwa um möglichst schnell voranzukommen.

### Informationstheoretische Ansätze

Unser Verfahren hat auch interessante Bezüge zur modernen Komplexitätsforschung. In jüngster Zeit gab es hier neue Entwicklungen, die auf die Informationstheorie zurückgreifen und in der Informationsgeometrie eine elegante Formulierung gefunden haben.

Die aufeinander folgenden Sensorwerte eines Roboters lassen sich als Zeichenkette schreiben. Der US-Mathematiker Claude E. Shannon hat die in einer solchen Kette steckende Information mit der relativen Häufigkeit der einzelnen Zeichen verknüpft. Jedes von ihnen enthält demnach umso mehr Information, je seltener es vorkommt.

Die Shannon-Information erreicht ihr Maximum, wenn alle Zeichen, in unserem Fall also alle Sensorwerte, gleich häufig auftreten. Das aber bedeutet, dass sich der Roboter völlig chaotisch verhält. Für unseren Humanoiden ist deshalb eine andere Art von Information relevant, die in der Zeitstruktur seiner Sensorwerte steckt. Es handelt sich um diejenige, die man aus der Kenntnis der Vergangenheit nutzen kann, um den zukünftigen Verlauf der Zahlenfolge vorherzusagen.

Warum ist diese so genannte prädiktive Information bei einem komplexen Verhalten am höchsten? Um das zu verstehen, wollen wir zwei Extremfälle betrachten. Den einen ver-

körpert der völlig chaotische Roboter, der eine praktisch zufällige Abfolge von Sensorwerten produziert. Diese hat zwar eine sehr hohe Shannon-Information. Für die Vorhersage des zukünftigen Verlaufs, der wiederum allein vom Zufall bestimmt wird, ist sie aber praktisch wertlos. Den anderen Extremfall stellt der völlig untätige Roboter dar, dessen Sensorwerte sich überhaupt nicht ändern. Seine Zukunft lässt sich zwar zu 100 Prozent vorhersagen, aber dazu muss man kaum etwas wissen. Die prädiktive Information der vergangenen Sensorwerte ist deshalb ebenfalls praktisch gleich null.

Der Maximalwert der prädiktiven Information muss also bei einem Verhalten zwischen den beiden Extremen liegen – dort, wo Zufall und Gesetzmäßigkeit sich in etwa die Waage halten. Das aber entspricht genau dem Verhaltensbereich, der sich aus dem Zeitschleifenprinzip ergibt. Genaueren Untersuchungen zufolge sind die Maximierung der prädiktiven Information und die Minimierung des Zeitschleifenfehlers im Wesentlichen äquivalent.

Vielleicht sind wir damit einem allgemeinen Prinzip auf die Spur gekommen. Wie unsere Experimente zeigen, sollten künstliche Wesen besonders kreativ, autonom und entwicklungsfähig sein, wenn die prädiktive Information ihrer Sensorwerte maximal wird. Ähnliches könnte für natürliche Wesen gelten. Dann wäre die Maximierung der prädiktiven Information oder verwandter Informationsmaße auch ein Grundprinzip der Biologie.

Die von uns entwickelten Strategien verhelten beliebig, mit Sensoren und Motoren ausgestatteten Maschinen zu einer Art Eigenleben. Ein immer gleichartig konstruiertes und auf dieselbe Weise funktionierendes »Gehirn« entwickelt ein Gespür dafür, wie sich die natürlichen Bewegungsformen des jeweiligen Körpers zur Entfaltung bringen lassen. Das geschieht in spielerischer Weise ohne vorgegebenen Zweck oder von außen gesteckte Ziele. So entstehen und vergehen die Verhaltensformen in einer immer währenden, scheinbar zufälligen Abfolge. Unser Robotergehirn ist beliebig kreativ, aber genauso vergesslich.

Für eine Höherentwicklung müssen stabilere Bewegungsmuster in einem Langzeitgedächtnis abgespeichert werden. Mit ihnen als Bausteinen können dann auch zunehmend komplexere Verhaltensweisen entstehen. Außerdem bietet sich so die Möglichkeit, den selbstbestimmten Entwicklungsprozess von außen durch Lob und Tadel in gewünschte Bahnen zu lenken. Erste Ergebnisse haben wir gemeinsam mit Georg Martius vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen schon erzielt. ◀





## WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

## Die große Welt im Blick

Frank Holl bietet einen Auszug aus dem Gesamtwerk des Universalgelehrten Alexander von Humboldt – in dessen eigenen Worten.



Auch wenn Alexander von Humboldt (1769–1859) als Autor dieses Buchs genannt wird: Er hat es so nicht geschrieben. Vielmehr hat der Literaturwissenschaftler und Historiker Frank Holl Originalzitate Humboldts (teils aus unveröffentlichtem Material) durch eigene Texte zu einem neuen Werk verbunden. So kann der Leser die frische, reiche Sprache Humboldts genießen, ohne die unzähligen Bände des Gesamtwerks lesen zu müssen.

Besser als eine ausführliche Biografie zeigt dieser opulente, farbenfreudige Prachtband die Bedeutung, die Humboldt für seine Zeit gehabt hat, und warum sein Werk heute noch nachlebt. Holl hatte auch keine eigentliche Biografie im Sinn; in der Tat gewinnt die Lesbarkeit durch die Abwesenheit eines wissenschaftlichen Apparats und den sehr sparsamen Einsatz von Fußnoten. Aber eine Zeittafel und ein Verzeichnis der Werke Humboldts hätte er seinen Lesern doch gönnen sollen.

Von der Jugend des preußischen Offizierssohns Alexander erfahren wir vor allem, dass sie nicht glücklich war. Sein Privatleben wird ausgeklammert. Wir können schließen, dass Humboldt kein Familienleben und kein herkömmliches Liebesleben hatte.

Hingegen führt sein Interesse an der Natur rasch zu ersten Beobachtungen in Botanik und Geologie und, nach einem Studium in Göttingen, zu Publikationen und frühen Ehren. Mit 23 Jahren wird er Oberbergmeister, zwei Jahre später Bergrat (Mitglied der Münz- und Bergwerksbehörde) im preußischen Staatsdienst. Diese Stellung gibt ihm finanzielle Sicherheit und ermöglicht ihm die ersten naturwissenschaftlichen Versuche.

In seinen Bemühungen um die Wohlfahrt und Ausbildung der Bergarbeiter und ihrer Kinder zeigt sich seine pädagogische und soziale Ader, in seinen ersten Begegnungen mit Goethe und Schiller seine Kontaktfreudigkeit zu den Großen seiner Zeit. Goethe verehrt ihn, Schiller beurteilt ihn sehr kritisch: Seine Erfolge habe er vor allem seinem großen Maul zu verdanken, meint er später.

Als 1796 Humboldts reiche Mutter stirbt, wird er finanziell unabhängig und quittiert sofort den Staatsdienst. Sein Ziel ist nun

Paris, die Hauptstadt der Aufklärung, seine Sehnsucht die weite Welt.

In Paris nimmt Humboldt Kontakt zu allen französischen Forschern und Naturwissenschaftlern auf, welche die Terrorherrschaft nach der Revolution überlebt haben, und betreibt die Vorbereitungen zu seiner schon lange erträumten Weltreise. Zufällig lernt er den Mediziner und Botaniker Aimé Bonpland (1773–1858) kennen, wählt ihn zu seinem Begleiter und findet in ihm einen wertvollen und bescheidenen Kameraden und einen Gehilfen bei dem so wichtigen Bestimmen von Pflanzen. In Jena besorgt er sich die nötigen geodätischen und astronomischen Instrumente und erlernt ihre Bedienung.

Der Start in die Welt verzögert sich, vor allem aus kolonialpolitischen Gründen. Doch als der Generalpass für alle spanischen Besitzungen in Mittel- und Südamerika vorliegt, ist die Bahn frei, und am 5. Juni 1799 segelt das Schiff mit der Expedition vom spanischen Hafen La Coruña ab. Fünf Jahre lang sind die zwei nun unterwegs, bis sie am 3. August 1804 in Bordeaux wieder europäischen Boden betreten.

Bei der Betrachtung der Reiseroute ist man erstaunt, wie klein eigentlich die bereiste Fläche ist: Neben Mexiko und Kuba haben die beiden vor allem den Nord- und Westrand des Amazonasbeckens besucht. Humboldt machte daraus aber die tropische Welt schlechthin, mit ihren Strömen und Hochgebirgen und mit den alten und neuen Kulturen. Aus seinen Untersuchungen und Beschreibungen erschließt sich auch für uns wirklich die Welt der Tropen. Diese Kraft der Verallgemeinerung ist eine der Stärken Humboldts.

Der Privatgelehrte war nicht in erster Linie Entdecker – Mittelamerika und das nördliche Südamerika waren schon intensiv

**Indianische Bergarbeiter in Guanajuato (Holzstich von 1870). »Unglückliche Abkömmlinge eines Geschlechts, das man seines Eigentums beraubte. Wo hat man Beispiele, dass eine ganze, ganze Nation alles Eigentum verlor?«, notierte Humboldt in seinem Tagebuch.**

bereist und kolonisiert –, sondern einer der ersten und größten wissenschaftlichen Reisenden, und wohl der fruchtbarste. Damit wurde er zum Wegbereiter der modernen Geophysik und Ökologie.

Humboldt reiste immer mit wenig Gepäck – außer seinen Instrumenten – und wenig Hilfspersonal. Er verpflegte sich vom Land, mit Hilfe von Tauschwaren. Seine Tagebücher füllte er mit Skizzen und lebendigen Beschreibungen von humorvollen Indianern, satten Tigern und gefräßigen Piranhas. Seine Meinung über die Kolonialherrschaft, über die Sklaverei in Kuba und die Behandlung der Indianer durch die christlichen Missionare durfte er später nur in gemilderter Form publizieren, denn sein Unternehmen war auf das Wohlwollen der Kolonialbehörden angewiesen.

Was er zum Verhältnis von Mensch und Natur und zu Klima und Vegetation notierte, waren Grundlagen der Ökologie im modernen Sinne. So stellte er angesichts einer gerodeten Landschaft fest, dass mit der Entwaldung nicht nur Holz verloren geht, sondern auch Wasser.

Einige Unternehmungen stechen aus seinen Berichten hervor. Die so eindrücklichen farbigen Illustrationen dazu stammen allerdings nicht von ihm, sondern wurden später nach seinen Angaben von bewährten Künstlern erstellt. Einer von ihnen, Ferdinand Bellermann, bereiste dazu die Reiseroute nachträglich selbst noch einmal.



Ein Höhepunkt seiner fünfjährigen Reise ist die Bestätigung, dass das Stromsystem des Orinoko tatsächlich mit dem des Amazonas durch eine Gabelung des Orinoko verbunden ist, wie schon vermutet wurde. Mit dem Chimborazo (6267 Meter) will Humboldt den nach damaligem Wissen höchsten Berg der Erde besteigen, muss aber wegen der Schneeverhältnisse und des Sauerstoffmangels 390 Meter unterhalb des Gipfels umkehren. Immerhin ist es die bis dahin höchste Bergbesteigung. Die Beschreibung dieses Abenteuers und der umliegenden Kordillern füllte bei der späteren Auswertung allein ein ganzes Buch.

Im Januar 1804 verkaufen die Reisenden in Mexiko-Stadt den Großteil ihrer Instrumente und kehren über Havanna und die

USA – mit einem Besuch bei Präsident Thomas Jefferson – nach Hause zurück.

Nun beginnt die Auswertung und Illustration des riesigen Materials, die Jahrzehnte in Anspruch nimmt und in einem Gesamtwerk von 29 Bänden mündet. Diese erschienen aber zu verschiedenen Zeiten, in verschiedenen Sprachen (Deutsch und Französisch) und werden andauernd umgearbeitet und neu zusammengestellt. Bis heute gibt es keine geordnete Gesamtausgabe von Humboldts Weltreise.

Spätere Leistungen Humboldts sind eine Vorlesungsreihe mit dem Titel »Kosmos« sowie eine Reise durch Russland und Sibirien. 1845 nimmt er in Angriff, was die Krönung seines Lebenswerks werden soll: das Buch »Kosmos, Entwurf einer physischen

Weltbeschreibung«. Vor dessen Vollendung stirbt er, müde, ausgelaugt, weltberühmt und bewundert.

Das Werk Alexander von Humboldts ist ein später Höhepunkt der Aufklärung und ein Ausgangspunkt für alle modernen Erdwissenschaften.

Felix Thommen

Der Rezensent hat an der ETH Zürich Forstingenieur studiert, war Leiter eines Kreisforstamts im Kanton Zürich und ist seit 1993 im Ruhestand.

Alexander von Humboldt

### Mein vielbewegtes Leben

Ein Forscher über sich und seine Werke

Herausgegeben von Frank Holl. Eichborn, Frankfurt am Main 2009. 288 Seiten, € 29,95



## STRAFRECHT

# Willensfreiheit, Schuld und Strafe

Muss auf Grund der modernen Hirnforschung das Strafrecht geändert werden?

Viele Hirnforscher würden vermutlich folgender Aussage zustimmen: Der so genannte freie Wille ist eine Illusion, die sich umso mehr verflüchtigt, je genauer die Wissenschaft die neuronalen Prozesse betrachtet, die eine Handlung ausmachen. Insbesondere Gerhard Roth und Wolf Singer haben diese Position öffentlichkeitswirksam vertreten und damit eine lebhaftige Debatte ausgelöst. Nachdem der Pulverdampf der ersten Polemik sich verzogen hat, wird ein recht komplizierter Frontverlauf zwischen Leugnern und Verteidigern der Willensfreiheit sichtbar. Die drei hier zu besprechenden Bücher untersuchen die Frage unter dem Aspekt, welche praktischen Folgen all das für unser Rechtssystem haben kann.

Eine mich überzeugende Abwägung von Für und Wider gelingt dem Philosophen Michael Pauen (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 1/2009, S. 54). Auf der einen Seite führt ein absolut freier Wille schon aus rein begrifflichen Gründen zu Widersprüchen: Wenn ich von einem Augenblick zum anderen völlig spontan einmal dies, einmal das tue, verliere ich sogar mir selbst gegenüber jede Kontrolle, und nie kann persönliche Kontinuität entstehen. Wir setzen für eigene und fremde Taten selbstverständlich Gründe voraus; das heißt, auch ganz ohne Hirnfor-

schung haben für uns Handlungen immer Ursachen, sind also determiniert. Auf der anderen Seite hält Pauen nichts davon, das, was wir normalerweise mit Willensfreiheit meinen, also das bewusste Abwägen zwischen Handlungsalternativen, als pure Illusion zu betrachten. Auch wenn letztlich dabei naturgemäß immer neurologische Prozesse ablaufen, brauchen wir zum Verständnis einer Tat deren persönlichkeitspsychologische Gründe und Motive. Insofern besteht für Pauen kein Widerspruch zwischen Handlungsfreiheit und Naturkausalität.

Auf diese Weise behält auch der Begriff der Verantwortung seine Berechtigung, und der strafrechtliche Schuld-begriff wird im Prinzip beibehalten, ist allerdings im Licht hirneurologischer Erkenntnisse einzuschränken. Gerade besonders abscheuliche Delikte hängen nachweislich oft mit angeborenen oder früh erworbenen neuronalen Schädigungen zusammen. Dies führt zum »Schuldparadoxon« (Gerhard Roth): Just bei schwersten Verbrechen, die förmlich nach drakonischer Strafe schreien, liegen besonders starke mildernde Umstände vor.

Die hier skizzierte Position zum Problem von Willensfreiheit und Strafrecht vertreten Pauen und Roth gemeinsam in einem schmalen Suhrkamp-Bändchen sowie –

zusammen mit dem Strafrechtsprofessor Ernst-Joachim Lampe – ausführlicher als Herausgeber eines umfangreichen Sammelbands. Während diese beiden Bücher sich sehr um seriöse Problemanalysen bemühen, kommt bei der Aufsatzsammlung »Entmoralisierung des Rechts« die Polemik nicht zu kurz, und das sorgt für beste Unterhaltung. Herausgeber sind außer Gerhard Roth der Philosoph und Managerberater Klaus-Jürgen Grün sowie der als Fernsehmoderator bekannt gewordene Journalist, Jurist und Philosophiedoktorand Michel Friedman.

In dem Büchlein wird Pauen an mehreren Stellen als jemand genannt, der sich scheut, die nötigen radikalen Konsequenzen aus der modernen Hirnforschung zu ziehen. Das wirft die pikante Frage auf, wie Roth darüber wirklich denkt.

Klaus-Jürgen Grün hat mit Versöhnung gegensätzlicher Standpunkte nichts im Sinn. In einer glänzenden Tour de Force postuliert er: Durch die moderne Hirnforschung – als einen Kronzeugen zitiert er Roth – bleibt vom Konzept des freien Willens nichts mehr übrig. Den Widerstand gegen diese Konsequenz ortet Grün unter »Funktionären der Geisteswissenschaften und des kirchlichen Glaubens«. Insbesondere, so Grün, stünden Christian Geyer, Redakteur der »Frankfurter Allgemeinen Zeitung« und seinerseits Herausgeber eines älteren Suhrkamp-Bands zum Thema, sowie der Philosoph Robert Spaemann dem Opus Dei nahe. Diese katholische Laienorganisation wird von Kritikern als sektenartiger Geheimbund beschrieben, der blinden Gehorsam und extreme Selbstkasteiung fordert.



Michel Friedman will klären, was ohne Willensfreiheit von Moral und strafrechtlicher Schuld übrig bleibt. Er argumentiert mit Nietzsches Moralkritik und den Resultaten der Hirnforschung gegen den herkömmlichen Schuldbegriff, plädiert für einen neurobiologisch aufgeklärten Humanismus und schließt: »Es ist der Mensch mit seiner gesamten soziologischen und biologischen Vorgeschichte und nicht allein die abstrakte Handlung des Täters, die wir mit Strafe belegen, um künftig weniger strafen zu müssen.«

Die Debatte um den freien Willen ist zwar noch lange nicht zu Ende, aber sie artet zurzeit in einen Streit um ideologisch aufgeladene Worte wie Freiheit und Schuld aus. Freiheit ist ein hohes Gut, aber es sind nicht die Naturgesetze, die sie gefährden.

Schuld ist ursprünglich ein religiöser Begriff: Wer eine böse Tat begeht, macht sich schuldig vor Gott und muss dafür bestraft werden. Im säkularisierten Strafrecht besteht Schuld – oder vielleicht besser Verantwortung? – im bewussten Übertreten der Gesetze, die das Zusammenleben regeln, und davor schützt sich die Gesellschaft durch Sanktionen.

Die Hirnforschung, so ein Fazit aus allen drei Büchern, kann helfen, das individuelle Ausmaß der Schuld zu bestimmen, Prävention und Therapie zu verbessern und dadurch den Schutz der Gemeinschaft vor egoistischer Gewalt zu erhöhen.

*Michael Springer*

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Michael Pauen und Gerhard Roth

**Freiheit, Schuld und Verantwortung**

Grundzüge einer naturalistischen Theorie der Willensfreiheit

Suhrkamp, Frankfurt am Main 2008.  
191 Seiten, € 10,-

Ernst-Joachim Lampe, Michael Pauen,  
Gerhard Roth (Hg.):

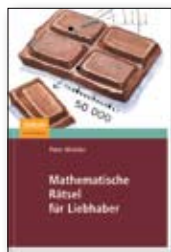
**Willensfreiheit und rechtliche Ordnung**

Suhrkamp, Frankfurt am Main 2008.  
400 Seiten, € 14,-

Klaus-Jürgen Grün, Michel Friedman,  
Gerhard Roth (Hg.):

**Entmoralisierung des Rechts**

Maßstäbe der Hirnforschung für das Strafrecht  
Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2008.  
192 Seiten, € 14,90



**MATHEMATIK**

**Nicht für jedermann**

Diese Rätsel sind wahrhaft harte Kost; aber sie machen richtig Spaß.

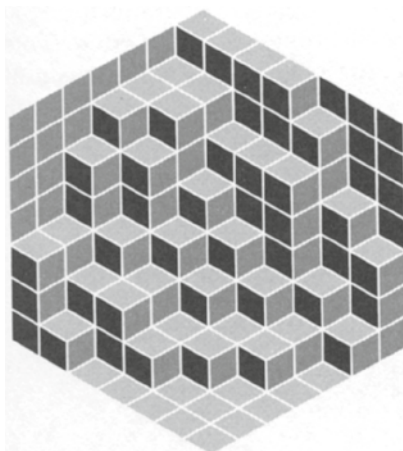
Wie findet man heraus, mit welchem der drei Lichtschalter im Keller man die drei Lampen auf dem Dachboden einschalten kann? Und das alles mit nur einem Versuch. So praktisch motiviert beginnen die »Mathematischen Rätsel für Liebhaber« von Peter Winkler.

In der Einleitung (»Diese Rätsel sind nicht für jedermann«) fordert der Autor vom Leser eine gewisse Kondition im Anwenden mathematischer Definitionen und Werkzeuge. Anders als üblich ist das kein leerer Satz; denn Winkler, zurzeit Professor für diskrete Mathematik und Wahrscheinlichkeitsrechnung am Dartmouth College in New Hampshire, fordert den Leser mit jedem Problem aufs Neue. Mich zumindest hat er an meine Denkgrenzen gebracht.

Jedes der elf – nach steigendem Anspruch geordneten – Kapitel beginnt mit einer kleinen Einleitung und einer Begründung, warum die folgenden Rätsel sich gut unter die jeweilige Überschrift, zum Beispiel »Algorithmen«, ordnen lassen. Dann wird die erste Aufgabe mitsamt der Lösung vorgestellt, so dass der Leser schon eine Vorahnung erhält, mit welcher Methodik man die anschließenden Probleme lösen könnte. Es folgen gut ein Dutzend Rätsel, deren Lösungen, zum Teil mit verschiedenen Lösungswegen, am Ende des Kapitels stehen.

Das Buch gipfelt in einer bunten Sammlung von ungelösten Rätseln. Dafür hat die deutsche Ausgabe nicht nur auf Winklers Originalwerk »Mathematical Puzzles: A Connoisseur's Collection« zurückgegriffen, sondern auch auf dessen 2007 erschienenen Nachfolger »Mathematical Mind-Benders«. So kommt der deutsche Leser in den Genuss von inzwischen gefundenen Lösungen – und neuen Rätseln.

Neben den rein mathematischen Kapiteln »Zahlen«, »Geometrie« und »Kombinatorik« gibt es auch »Spiele«, »Erkenntnis« und »Harte Nüsse«, deren Probleme ohne mathematische Begriffe formuliert sind, aber dennoch mit mathematischen Methoden gelöst werden. Immerhin würde ange-



wandte Logik bei diesem oder jenem Rätsel auch ausreichen.

Die Aufgabentexte sind generell kurz und sehen beim ersten Lesen manchmal viel leichter aus, als sie sind; dafür sind die Lösungen zum Teil ausufernd. So kann auch der nicht allwissende Leser die zugehörigen Gedankengänge im Detail verfolgen. Wer eine bessere Lösung als die abgedruckte oder – bei einem ungelösten Rätsel – überhaupt eine findet, ist eingeladen, in direkten Kontakt mit dem Autor zu treten. So lebt das Buch weiter und entwickelt sich fort. Auf Peter Winklers Homepage <http://math.dartmouth.edu/~pw/> findet sich eine Sammlung von Korrekturen und neuen Antworten.

Der Text besticht durch eine klare, präzise formulierte Sprache. Peter Winkler legt sehr großen Wert auf die genaue Motivation und die Herkunft der Rätsel. Jede Quelle wird angegeben. Hin und wieder stößt ein Problem sogar an die gegenwärtigen Grenzen der mathematischen Erkenntnis, und seine Lösung nutzt jüngst erzielte Forschungsergebnisse.

Ein Lob an die Übersetzung, die dem Leser kaum holprige Sätze auf den Teller legt und ihm die Illusion verschafft, dass das

**»Ein großes regelmäßiges Sechseck wird aus einem Dreiecks-Gitternetz ausgeschnitten und mit Rhomben (Paaren aus zwei Elementardreiecken) gekachelt. Beweise, dass von jeder der drei Orientierungen gleich viele Rhomben vorkommen müssen.« Im Lösungsteil bringt das Buch nur dieses Bild, als »Beweis ohne Worte«.**

Buch im Original auf Deutsch verfasst worden sei.

Winkler will vor allem Mathematiker und mathematisch gut vorgebildete Leser ansprechen. Dieser zu Beginn geäußerten Maxime bleibt er durchgehend treu und setzt stellenweise viel voraus. Und wer diese Vor-

kenntnisse nicht mitbringt, aber genügend Interesse, um sich einzuarbeiten, findet dank der klaren Sprache und der guten Struktur einen Einstieg in das Buch.

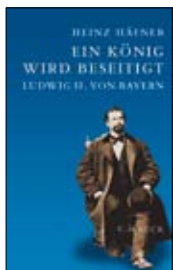
Lars Jeschio

Der Rezensent studiert Mathematik und Philosophie an der Freien Universität Berlin.

Peter Winkler

### Mathematische Rätsel für Liebhaber

Aus dem Englischen  
von Harald Höfner und Brigitte Post.  
Spektrum Akademischer Verlag,  
Heidelberg 2008. 238 Seiten, € 17,95



PSYCHIATRIE

## Der Tod des Märchenkönigs

Heinz Häfner beleuchtet die romantische und tragische Geschichte Ludwigs II. von Bayern aus der Sicht der modernen Psychiatrie.

Die überlieferte Behauptung, König Ludwig II. von Bayern (1845–1886), der »Märchenkönig«, sei verrückt gewesen, scheint auf den ersten Blick durchaus plausibel. Da bringt der König seine Zeit und sein Geld mit der Förderung des Komponisten Richard Wagner und dem Bau romantischer Schlösser wie Neuschwanstein durch und vernachlässigt darüber gröblich seine Repräsentationspflichten. Ultimativ fordert er von seinen Ministern Millionen und Abermillionen für den Bau seiner Schlösser, mit der Begründung, wenn er die bereits hoch verschuldeten Projekte nicht mehr durchführen dürfe, sei ihm alle Lebensfreude genommen. (So hat sich mein Jüngster früher auch geäußert, wenn man ihm die Bauklötze wegnahm; aber seit er vier Jahre alt ist, haben sich diese Mätzchen gelegt.) Er missbraucht sein Amt, um sich Reitersoldaten in großer Zahl als Lustknaben zuführen zu lassen. In der Hauptstadt lässt er sich kaum noch blicken; seine nähere Umgebung verschreckt er durch Willkür, herrisches Gebärde und Anwendung körperlicher Gewalt.

Ein Gutachten, unterzeichnet von vier Medizinern, die sich sämtlich in Amt und (vom König verliehenen) Würden befinden, bescheinigt seiner Majestät »jene Form von Geisteskrankheit, die den Irrenärzten aus Erfahrung wohl bekannt mit dem Namen Paranoia (Verrücktheit) bezeichnet wird«; daher seien »Allerhöchstdieselben als verhindert an der Ausübung der Regierung zu betrachten und wird diese Verhinderung nicht nur länger als ein Jahr, sondern für die ganze Lebenszeit andauern«. Diese Lebenszeit dauert dann nur noch wenige Tage; denn nachdem Ludwig auf Grund dieses Gutachtens in Gewahrsam genommen und entmündigt worden ist, nimmt er sich durch Ertrinken im Starnberger See das Leben und

reißt seinen Arzt Bernhard von Gudden, den Verfasser des Gutachtens, mit in den Tod.

So lautet die offizielle Version; daneben grassieren die merkwürdigsten Verschwörungstheorien. Und nun rüttelt der renommierte Psychiater Heinz Häfner, ehemaliger Chef des Zentralinstituts für Seelische Gesundheit in Mannheim, an einer zentralen Säule des bisherigen Geschichtsbilds: König Ludwig sei gar nicht verrückt gewesen.

Da in Häfners Augen die Historiker nicht genug von Psychiatrie verstehen, um die Sache richtig beurteilen zu können, musste er selbst im fremden Fach wildern – und tat das mit großer Akribie. Mit Hilfe des Historikers Felix Sommer, der aus der Arbeit an diesem Fall seine Dissertation gemacht hat, betrieb er so umfangreiche historische Quellenarbeit, dass der Leser stellenweise zu ermüden droht. Da die romantische und tragische Figur König Ludwigs schon zu seinen Lebzeiten und erst recht nach seinem Tod die Gemüter erregte, ist die Quellenlage ungewöhnlich gut, obwohl das Geheime Hausarchiv der Familie Wittelsbach den Forschern den Zugang zu wichtigen Dokumenten verwehrte.

Über das Gutachten seines Fachkollegen kommt Häfner zu einem vernichtenden Urteil. Bernhard von Gudden hat es nicht nur unterlassen, seinen königlichen Patienten persönlich zu befragen; er hat eine Sammlung von wilden Beschuldigungen, die Ludwigs Widersacher gezielt zum Zweck seiner Diffamierung herbeigeschafft hatten, ungeprüft für bare Münze genommen und als Indizien der Verrücktheit gewertet, obgleich eine harmlose Interpretation weit näher gelegen hätte. Schlimmer noch: Er hat, bevor er überhaupt zum Gutachter bestellt wurde, seinen Auftraggebern das erwünschte Ergebnis zugesichert. Spätestens als er dem

soeben festgenommenen König persönlich begegnete und sich ausführlich mit ihm unterhielt, musste für ihn die Falschheit seines Urteils offensichtlich werden.

Dagegen setzt Häfner eine Art Zweitgutachten – eigentlich ein aussichtsloses Unterfangen, wenn man den Patienten nicht mehr untersuchen kann. Aber da von Gudden das auch nicht getan hat, verfügt der zweite Gutachter über nicht weniger Material als der erste. Häfner rekonstruiert ein detailreiches Bild des Königs und seiner Zeit, das für sich genommen schon interessant zu lesen ist, und weist nach, dass die für die Zeitgenossen so befremdlichen Verhaltensweisen Ludwigs in dessen eigener geistiger Welt völlig konsequent erscheinen.

Das anmaßende, herrische Gebärde und die mangelnde Bereitschaft, mit der adligen Gesellschaft zu verkehren? Erklären sich mühelos aus der Tatsache, dass Ludwig bereits mit 18 Jahren, nur mangelhaft auf seine Rolle vorbereitet, den Thron bestieg und namentlich Ludwig XIV. von Frankreich als Vorbild verehrte. Schon damals war zwar die absolute Monarchie ein Auslaufmodell; wenn aber der König in dieser für ihn vorteilhaften Vorstellung verharrte, ist das nicht unbedingt als Realitätsverlust, sondern als konservative Grundhaltung zu bezeichnen.

Ein absoluter Herrscher genießt traditionell auch sexuelle Freiheiten, von denen Prinz Charles nur träumen kann, und Ludwig war keineswegs der einzige Herrscher, der diese Freiheiten mit Angehörigen des gleichen Geschlechts auslebte. Dass er es mit den Soldaten tat, die seinem Oberbefehl unterstanden, erfüllt zwar den – damals schon strafbaren – Tatbestand der »Unzucht mit Abhängigen«; aber verrückt ist es nicht.

Das Misstrauen gegen die eigene Verwandtschaft und die von ihm selbst berufenen Minister? War nicht krankhaft, son-

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)  
per E-Mail: [shop@wissenschaft-online.de](mailto:shop@wissenschaft-online.de)  
telefonisch: 06221 9126-841  
per Fax: 06221 9126-869



dern höchst realistisch. Die waren es doch, die seine Absetzung betrieben.

Selbst sein Suizid ist nicht als Akt geistiger Umnachtung zu deuten. Im Gegenteil: Am Beispiel seines unstreitig verrückten Bruders Otto hatte er erlebt, welch schreckliches und entwürdigendes Schicksal ihn erwartete, wenn er in einer geschlossenen Irrenanstalt untergebracht würde, und daraufhin den Tod als die erstrebenswertere Alternative vorgezogen. Und gerade von dem Mann, der ihn in diese Lage gebracht hatte, wollte er sich am Sterben nicht hindern lassen. Wahrscheinlich hat er seinen Arzt bewusstlos geschlagen und damit indirekt dessen Tod herbeigeführt.

Einzig der exzessiven und finanziell ruinösen Bautätigkeit mag Häfner, wenn auch zögernd, Krankheitswert zuweisen. Sie sei möglicherweise als »nicht stoffgebundene Sucht« zu klassifizieren, vergleichbar dem Zustand der Leute, die von den Spielautomaten nicht lassen können.

Was muss uns an diesen Einzelheiten heute noch interessieren? Dass die Absetzung Ludwigs II. ein höchst gesetzwidriger Akt war, und zwar sowohl nach damaligen als auch nach heutigen Maßstäben? Na ja – einen absoluten Herrscher abzusetzen ist per definitionem nie legal; gleichwohl pflegt man den zu preisen, der sein Volk von einem unerträglichen Machthaber befreit, und über den juristischen Aspekt der Sache gnädig hinwegzusehen. Ludwig II. war eindeutig eine Fehlbesetzung in seinem Amt, seine Eskapaden drohten den Ruf des Königshauses und der Monarchie zu ruinieren, und sein Onkel Prinzregent Luitpold, der seine Absetzung betrieb und nach seinem Tod vertretungsweise seinen Thron bestieg, hatte ein persönliches Interesse daran, der Verschwendungssucht seines Neffen Einhalt zu gebieten: Seine zahlreiche Verwandtschaft wollte standesgemäß versorgt sein. Aber unerträglich? Er hat ja noch nicht einmal Leute umbringen lassen. Selbst das Kriegführen war ihm 1870/71 zuwider, was seine Widersacher als Mangel an nationaler

**In der einem Bühnenbild aus dem 1. Akt von Wagners »Walküre« nachempfundenen Hundinghütte (bei Schloss Linderhof) veranstaltete Ludwig mit jungen Männern altgermanische Trinkgelage.**

Gesinnung und dann auch gleich als Indiz für Verrücktheit interpretierten.

Für den Psychiater Häfner interessanter sind die Lage der Psychiatrie im späten 19. Jahrhundert und ihr Missbrauch zur Eliminierung missliebiger Personen. Und ausgerechnet für diesen Punkt gibt die Geschichte um Ludwig II. wenig her. Zwar war damals die Seelenheilkunde in einem wahrhaft fürchterlichen Zustand, schon aus Mangel an geeigneten Therapien. Aber schon damals gab es etablierte Standards für die Begutachtung. Dass von Gudden so krass gegen sie verstoßen hat, ist nicht dem Stand der Wissenschaft zuzuschreiben; zu seinen Motiven kann auch Häfner nur Mutmaßungen anbieten.

Zu allem Überflus fördert die akribische Arbeit des Autors selbst über den Oberbösewicht von Gudden noch sehr Positives zu Tage: Er war es, der die bei den Insassen der Anstalten häufig auftretenden »Othämatome« (Blutergüsse in der Umgebung der Ohren) nicht, wie damals üblich, als Symptom einer Geisteskrankheit, sondern zutreffend als Folge der vom Personal verabreichten Schläge diagnostizierte und in den von ihm geleiteten Anstalten einen humaneren Umgang durchsetzte.

Das Wegschließen von Dissidenten in der Sowjetunion und anderswo mit psychiatrischen Diagnosen ist da eine ganz andere Geschichte.

*Christoph Pöppe*

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Heinz Häfner

**Ein König wird beseitigt**  
Ludwig II. von Bayern

C.H.Beck, München 2008. 544 Seiten, € 38,-

**Interaktive Lern-CD**

Interaktives Lernspiel  
zu Astronomie und Raumfahrt  
ab 10 Jahren

**Abenteuer  
im Weltall**

INFO-  
Programm  
gemäß  
§ 14  
JUSchG

herausgegeben von  
**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

in Kooperation mit  
Klaus Tschira Stiftung  
Gemeinnützige GmbH

KTS

JUGENDSOFTWAREPREIS 2008

**ABENTEUER IM WELTALL**

Begleiten Sie in diesem Lernspiel den kleinen Außerirdischen Sparky in einem Raumschiff quer durch unser Sonnensystem. Hier heißt es verschiedene Missionen erfüllen, Aufgaben lösen und Rätsel knacken.

Zusätzlich können Sie Ihr Wissen über das Universum und die Geschichte der Raumfahrt anhand von über 60 Lernmodulen in Form von Texten, Aufgaben, Schaubildern und Zeittafeln testen und vertiefen.

Ab 10 Jahren; € 9,90 (zzgl. Versand)  
Schullizenz: € 98,-  
Systemvoraussetzungen: PC mit CD-Laufwerk, Microsoft Windows XP oder Vista

[www.spektrum.com/sparky](http://www.spektrum.com/sparky)

in Kooperation mit  
Klaus Tschira Stiftung  
Gemeinnützige GmbH

KTS

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand



TLB DER BADEN-WÜRTTEMBERGISCHEN HOCHSCHULEN GMBH

## Partner für Patente

Das Technologie-Lizenz-Büro in Karlsruhe ist die älteste Patentverwertungsagentur für Hochschulen in Deutschland. Sie hilft Wissenschaftlern, ihre Erfindungen zu schützen und zu vermarkten.

### ÜBER DAS TLB

Das Technologie-Lizenz-Büro der Baden-Württembergischen Hochschulen wurde 1987 als Pilotprojekt an der Universität Karlsruhe gegründet und ist seit 1995 für alle baden-württembergischen Hochschulen zuständig; seit 1998 firmiert es als GmbH. Die 15 Mitarbeiter, davon acht Innovationsmanager, sorgen für die schutzrechtliche Absicherung von Erfindungen aus den Hochschulen des Bundeslands und vermitteln diese an Unternehmen. Das TLB war der erste Dienstleister dieser Art, heute gibt es in fast allen Bundesländern weitere Patentverwertungsstellen für Hochschulen, wobei das TLB gemessen an den Erlösen die erfolgreichste ist.

### Von Bernd Müller

Wissenschaftler werden immer patentfreudiger, sagen Statistiken, doch mit der Kommerzialisierung ihrer Erfindungen sind sie oft überfordert. Deshalb haben fast alle Bundesländer in den letzten Jahren Patentverwertungsagenturen als Dienstleister für die Hochschulen gegründet. Die älteste Einrichtung dieser Art ist das Technologie-Lizenz-Büro (TLB) der Baden-Württembergischen Hochschulen GmbH in Karlsruhe.

120 bis 160 Erfindungsmeldungen erreichen das TLB jedes Jahr. Stammen sie aus der Physik oder den Ingenieurwissenschaften, sind sie ein Fall für Florian Schwabe (Foto), selbst promovierter Physiker und seit 1995 dabei. Der Leiter des Bereichs Physical Science nutzt einen vierseitigen Fragebogen, um eine Erfindung zu bewerten, und recherchiert teils in Datenbanken nach ähnlichen Ideen. »Chancen haben nur Erfindungen, die sich deutlich von bestehenden Patenten und Produkten unterscheiden und ein ausreichendes wirtschaftliches Potenzial erkennen lassen.« Nur ein Viertel der beim TLB eingehenden Meldungen schafft es zum Patent, nur ein Viertel wiederum davon ist auch kommerziell erfolgreich.

Ein eifriger Erfinder ist Thomas Schimmel, Professor für Physik an der

Universität Karlsruhe. An 20 Patenten ist er bereits beteiligt, der größte Coup könnte seine »Photolubrikation« werden, eine Lichtsteuerung der Reibungseigenschaften von Oberflächen. »Zwischen Haften und Gleiten umschalten zu können, hat so großes Anwendungspotenzial, dass die Frage nicht lautet, ob es auf den Markt kommt, sondern wann«, ist Schwabe überzeugt. Noch ist das Patent nicht erteilt, der gesamte Prozess dauert üblicherweise etwa drei Jahre. Ein erstes Unternehmen aus der Schmierstoffindustrie hat allerdings bereits angekündigt, die Lizenz erwerben zu wollen.

Nach dem Arbeitnehmererfindergesetz erhält der Erfinder dann 30 Prozent der Lizenzeinnahmen, 40 Prozent gehen an seinen Geldgeber – bei Schimmels Projekt also an die Landesstiftung Baden-Württemberg, die das Projekt gefördert hat. Bleiben 30 Prozent für das TLB. Insgesamt erlöst es jedes Jahr zwischen einer und zwei Millionen Euro aus Lizenzen. Für die Bewertung und Patentanmeldung der Erfindung erhält das Büro außerdem ein festes Honorar von 4000 Euro.

Mehr als 50 Prozent der Lizenznehmer sind mittlerweile deutsche Firmen; noch vor wenigen Jahren waren es überwiegend ausländische Unternehmen, die sich für Entwicklungen made in Germany interessierten. Schwabe und sein Team stehen den Wissenschaftlern auch

zur Seite, wenn es um Rahmenverträge für Erfindungen aus Industrieprojekten geht. »Das nimmt zu, weil die Industrie versucht, Patente direkt über gemeinsame Projekte abzugreifen.«

Insgesamt sind Wissenschaftler heute patentfreudiger als noch vor zehn Jahren; eine Ausnahme bilden Informatiker. »Viele glauben, man könne Software nicht patentieren, aber das stimmt nicht. Wenn sie Teil der technischen Lösung ist – und das trifft auf 80 bis 90 Prozent der Fälle zu –, ist das durchaus rechtens.« Diese Botschaft versucht Schwabe in Vorträgen zu vermitteln, und tatsächlich steigt die Zahl der Meldungen nach solchen Veranstaltungen. Insgesamt aber sieht Schwabe viel Nachholbedarf: »Weil ein Studium zu wenig Zeit für Kurse über Patentfragen lässt, kennen sich leider die wenigsten Hochschulabsolventen damit aus.« <

**Bernd Müller** arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Esslingen.



**Mit Engagement in die Zukunft.  
Wachsen Sie mit uns zusammen!**

**Mit Naturwissenschaften  
an die Spitze!**

**Starten Sie mit uns**

- im Direkteinstieg
  - im Traineeprogramm
  - als Werkstudent/in
  - als Praktikant/in
- oder schreiben Sie Ihre Abschlussarbeit mit sanofi-aventis in Deutschland.

sanofi-aventis ist ein weltweit führendes pharmazeutisches Unternehmen, das mit Niederlassungen in über 100 Ländern für die ständige Verbesserung von Gesundheit und Lebensqualität der Menschen arbeitet.

**Unsere Kernbereiche:**

- Herz-Kreislauf / Thrombose
- Stoffwechsel / Diabetes
- Krebs
- Innere Medizin
- Zentrales Nervensystem
- Impfstoffe



In Deutschland arbeiten 10.000 Menschen in der Forschung und Entwicklung neuer Medikamente, produzieren Wirkstoffe, fertigen und vermarkten Arzneimittel für Millionen Menschen weltweit. sanofi-aventis steht als vertrauensvoller Partner für den medizinischen Fortschritt.

Finden auch Sie die passende Herausforderung bei uns. Aktuelle Stellenanzeigen und die Möglichkeit für Ihre Initiativbewerbung finden Sie unter

[www.sanofi-aventis.de/karriere](http://www.sanofi-aventis.de/karriere)

AVS 903 09 019a

Besuchen Sie uns im Internet  
[www.sanofi-aventis.de](http://www.sanofi-aventis.de)



**sanofi aventis**

Das Wichtigste ist die Gesundheit

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**naturejobs**

*Spektrum der Wissenschaft and Naturejobs have joined forces. Now, with Naturejobs, you can place your jobs, courses, announcements and events in Spektrum as well as Nature, extending your reach among scientists, academics and students in Germany, Austria and Switzerland.*

For more information, please contact *Naturejobs*:

**Hildi Rowland**

**T:** +44 (0)20 7014 4084

**E:** [h.rowland@nature.com](mailto:h.rowland@nature.com)

**Kerstin Vincze**

**T:** +44 (0)20 7843 4970

**E:** [k.vincze@nature.com](mailto:k.vincze@nature.com)

[www.naturejobs.com](http://www.naturejobs.com)

nature publishing group 

## Geschwister der Sonne

Einzelgängerin wie heute war unsere Sonne nicht immer. Denn einst wurde sie in einem Sternhaufen geboren. Nun suchen Forscher nach ihren stellaren Geschwistern

RON MILLER

### WEITERE THEMEN IM MÄRZ

#### Masse mit Klasse

Das System physikalischer Einheiten bedarf der Runderneuerung. Künftig sollen selbst Kilogramm und Ampere über Naturkonstanten definiert sein. Und zwar auf zehn Milliardstel genau

#### Leben auf der Erde

Es gibt neue Hinweise darauf, wie sich erste Organismen aus unbelebter Materie gebildet haben könnten

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:  
[www.spektrum.com/newsletter](http://www.spektrum.com/newsletter)



GENZYME CORPORATION

#### Künstliche Gewebe

Seit Jahren schon wird etwa künstliche Haut zur Heilung von Verbrennungswunden gezüchtet. Inzwischen stehen weitere Gewebe vor der Einführung: für Knorpel, Blutgefäße, Blase, Knochen und Herzmuskel

DINA IVERIGHI

#### Nachrichten vom Hobbit

Neue Analysen zeigen, dass die Minimenschenart von der Insel Flores in Indonesien noch seltsamer war als bisher gedacht. Manche Grundsätze der Evolutionstheorie müssen überdacht werden

