

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

AUGUST 2016

8/16 Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

ERNÄHRUNG

**CRISPR/Cas revolutioniert die Landwirtschaft**

PALÄO BIOLOGIE

**Die Riesenvögel der Urzeit**

TECHNOLOGIE

**Nanomotoren lernen laufen**



**Quanten-  
gravitation**

Von der Theorie zur  
experimentellen Prüfung

8,20 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.  
D6179E



## Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur € 0,92 pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69.





Hartwig Hanser  
Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.de

## Technik im Aufwind

**N**ein, die Editorials von »Spektrum der Wissenschaft« sind keine Fortsetzungsromane. Trotzdem greife ich die bereits in den letzten beiden Heften an dieser Stelle erwähnte Leserbefragung noch einmal auf. Denn neben der lebhaft in den Leserbriefen diskutierten Zusammensetzung unserer Abonnenten (eine kleine Auswahl finden Sie auf S. 95) ergab sich noch ein weiterer überraschender Befund: Das Interesse an den Themenbereichen Computer, Informationstechnologie und Technik ist heute weit größer, als es sich in früheren derartigen Umfragen darstellte.

Bisher gab es hier eine klare Rangfolge der am häufigsten angekreuzten Interessengebiete: an erster Stelle Physik und Astronomie, gefolgt von Biowissenschaften und Hirnforschung, und dann erst einmal eine ganze Weile lang nichts. Inzwischen sieht es zwar noch ähnlich aus – doch es gibt eine Ausnahme: Die technischen Fächer, früher unter »ferner liefen«, liegen mit den Lebenswissenschaften gleichauf. Das stellt für uns Redakteure geradezu eine Revolution dar, denn traditionell schienen unsere Leser und Leserinnen Artikel über Grundlagenforschung ganz klar solchen zu neuen Entwicklungen aus den Ingenieur- und Computerwissenschaften vorzuziehen.

Woran liegt die erstarkte Neugierde bezüglich Technik und IT? Ist inzwischen unser Alltag derart von Hightech und digitalen Anwendungen durchdrungen, dass deren rasant zunehmende Relevanz neuen Wissensdurst auf diesem Gebiet entfacht? Zu der Erklärung würde die explosionsartige Vermehrung technisch orientierter Studien- und Ausbildungsgänge in den letzten Jahren passen, die natürlich auch einem entsprechend hohen Bedarf an Fachkräften geschuldet ist.

Dem Bedürfnis nach zusätzlichem Technologie-Knowhow wollen wir gern gerecht werden – ohne Abstriche an unserer gewohnten umfangreichen und tief gehenden Berichterstattung aus der Welt der Grundlagenforschung zu machen. In dieser Ausgabe haben wir Ihnen daher gleich ein ganzes Technik-Paket geschnürt, das die inhaltliche Bandbreite aktueller Trends anhand ausgewählter Beispiele aufzeigt. Ab S. 64 geht es um das Problem, dass zukünftige Quantencomputer heutige Verschlüsselungsmethoden mit Leichtigkeit aushebeln dürften. Daher versuchen Kryptologen schon jetzt, neue Chiffrierwege zu entwickeln, die ihrerseits ebenfalls Quanteneffekte nutzen. Näheres über aktuelle Entwicklungen in der Nanotechnologie, winzige Maschinen in diesem Maßstab zu konstruieren, erfahren Sie ab S. 72. Und schließlich stellen wir ab S. 78 eine lasergestützte Methode vor, die ausgerechnet jene Wissenschaft gern verwendet, die sich lieber um längst vergangene Epochen kümmert: die Archäologie. Dabei durchleuchten so genannte LiDAR-Systeme von Flugzeugen aus das dichte Blätterdach etwa von Regenwäldern und entdecken so bisher unbekannte Reste von Ansiedlungen.

Mit technophilen Grüßen Ihr

### AUTOREN IN DIESEM HEFT



Die US-amerikanischen Forscher **Daniel Ksepka** (links) und **Michael Habib** begeistern sich für die Evolution der Vögel und erstellen Modelle zum Flugvermögen der ausgestorbenen Riesenarten (S. 18).



**Sabine Hossenfelder** untersucht, welche Experimente Physikern verraten könnten, ob die Gravitation quantisiert ist – und auf welche Weise. Denn noch gibt es viele unterschiedliche Ansätze für eine Theorie der Quantengravitation (S. 32).



Der Physiker und Philosoph **Hartmut Hecht** hat den größten Teil seines Berufslebens damit verbracht, die unzähligen naturwissenschaftlichen, medizinischen und technischen Schriften von Leibniz aufzuarbeiten. Ab S. 42 stellt er dessen wichtigste physikalische Leistungen vor.

3 Editorial

6 Spektrogramm

Artenwanderung in der Nordsee • China führt im Supercomputing • Neandertaler als Architekten • Chirale Moleküle im All • Entzündete Mückenstiche fördern schwere Infektionen • Warum die Venus ihr Wasser verliert

9 Bild des Monats

Glühender Gasriese

10 Forschung aktuell

Quantenexperimente aus dem Computer

Ein Algorithmus designt raffinierte Versuche

Alter Zwergmensch

Der »Hobbit« *Homo floresiensis* entstand schon lange vor dem *Homo sapiens*

Das Kernproblem der Erde

Messungen der Wärmeleitfähigkeit von Eisen widersprechen sich

SPRINGER'S EINWÜRFE

Moral der Maschinen

Bald werden autonome Fahrzeuge über Leben und Tod entscheiden

18



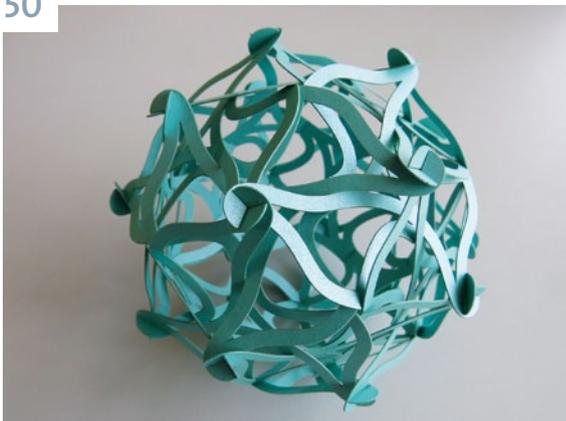
JAMES GURNEY

26



LENNART NILSSON / TT

50



RINUS ROELOFS

..... BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ 18 Riesenvögel der Urzeit

Warum starben die größten flugfähigen Vögel vor 3 Millionen Jahren aus? Und wie konnten sie überhaupt fliegen?

*Daniel T. Ksepka und Michael Habib*

26 Zur richtigen Zeit am richtigen Ort

Spezielle Gene und Proteine sorgen dafür, dass sich die Körperzellen während der Entwicklung richtig anordnen.

*Paul N. Adler und Jeremy Nathans*

..... PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

40 Rundum verborgen

Nanostrukturen können transparente Objekte entspiegeln und diese so nahezu unsichtbar machen.

*H. Joachim Schlichting*

..... MENSCH & KULTUR

SERIE »LEIBNIZ – DER LETZTE UNIVERSALGELEHRTE« TEIL 3

42 Die perfekte Wasseruhr und das Prinzip der kleinsten Wirkung

Leibniz steht als Physiker zu Unrecht in Newtons Schatten.

*Hartmut Hecht*

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

50 Unendliche uniforme Polyeder

Die erstaunlichen Werke des Künstlers Rinus Roelofs.

*Christoph Pöppe*

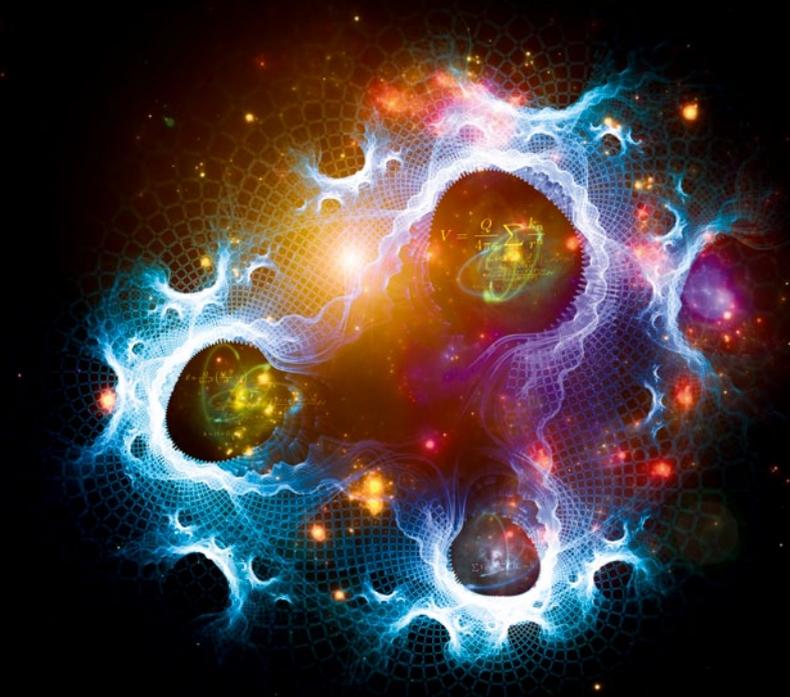
..... ERDE & UMWELT

▶ 54 Gentechnik im Tarnmantel

In der Landwirtschaft vollzieht sich eine Revolution:

Die genomeditierende Methode CRISPR/Cas hält Einzug.

*Stephen S. Hall*



► TITELTHEMA

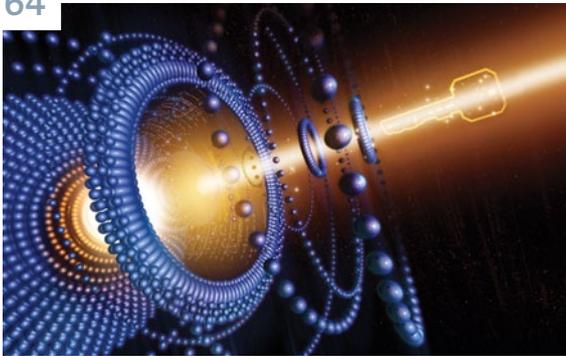
PHYSIK

## 32 Die Quantengravitation auf dem Weg zur Wissenschaft

Sabine Hossenfelder

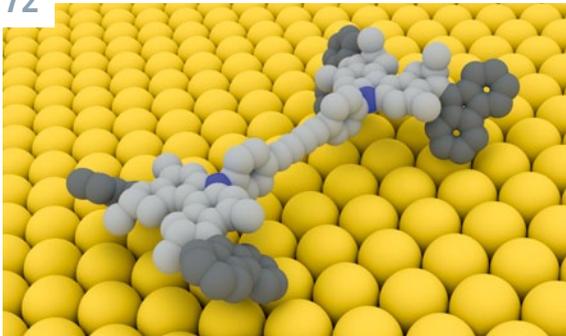
Wie funktioniert die Schwerkraft auf Quantenebene? Lange war diese Frage eher ein mathematisches Problem als ein physikalisches, denn kaum eine Theorie schien je überprüfbar. Doch das könnte sich demnächst ändern.

64



KENN BROWN, MONOLITHIC STUDIOS

72



KARL-HEINZ ERNST / EIDGENÖSSISCHE MATERIALPRÜFUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALT (EMPA)

TECHNIK & COMPUTER

### 64 Quantencomputer als Kodeknacker

Heutige Verschlüsselungsmethoden werden den Quantencomputern der Zukunft nicht standhalten. Kann es dann überhaupt noch sichere Codes geben?

Tim Folger

► 72 Nanomotoren lernen laufen

Chemiker haben Moleküle für verschiedenste grundlegende Aufgaben entworfen. Nun beginnen sie, diese Bauteile zu winzigen Apparaturen zu kombinieren.

Mark Peplow

### 78 Archäologie aus der Luft

Mit hunderttausenden Laserpulsen pro Sekunde machen LiDAR-Systeme die Überreste alter Kulturen sichtbar.

William E. Carter, Ramesh L. Shrestha und Juan Carlos Fernandez-Diaz

Nach S. 84 finden Sie eine Sonderpublikation der DECHEMA, der Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.



### 84 Wissenschaft im Rückblick

Vom Druckanzug für Tiefseetaucher zur Antibiotikaresistenz

### 85 Rezensionen

Jim Al-Khalili: Chaostheorie • Fred Pearce: Die neuen Wilden • Jörg Riecke: Geschichte der deutschen Sprache • Katharina Schüller: Statistik und Intuition u. a.

### 94 Leserbrief/Impressum

### 96 Futur III

Anna Zumbro: Das Museum des Nichts

### 98 Vorschau

Titelmotiv: iStock / agsandre

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

KLIMAWANDEL

# Artenwanderung in der Nordsee

Der Klimawandel könnte sich gravierend auf die Tierwelt in der Nordsee auswirken. Einer neuen Abschätzung zufolge werden in den kommenden Jahrzehnten mehr als 60 Prozent der benthischen (in der Bodenzone lebenden) Tierarten in andere Meeresregionen abwandern.

Wissenschaftler um Michael Weirter von Senckenberg am Meer, einer Außenstelle des Senckenberg Forschungsinstituts in Wilhelmshaven, haben für 75 benthische Spezies modelliert, wie sich deren Verbreitungsgebiete bis zum Jahr 2099 ändern werden. Als Grundlage dienten die prognostizierten Veränderungen des Szenarios A1B des International Panel on Climate Change (IPCC). Demnach werden die bodennahen Temperaturen in der Nordsee bis 2099 um bis zu 5,4 Grad steigen und der Salzgehalt am

Meeresgrund durchschnittlich um 1,7 Prozent. Diese Prognosen korrelierten die Forscher mit eigenen Langzeitmessungen und ließen die Daten in die Software Maxent einfließen, die Tier- und Pflanzenhabitats und ihre Änderungen zu modellieren erlaubt.

Laut den Berechnungen werden 64 Prozent der abwandernden Arten nach Norden migrieren und 36 Prozent nach Süden – jeweils um bis zu 100 Kilometer. Stark betroffen wird die Fauna der südlichen Nordsee und der Deutschen Bucht sein; dort erwartet das IPCC auch die höchsten Temperaturanstiege. Im Zuge der Wanderbewegungen werden die Verbreitungsgebiete vieler Spezies schrumpfen, prognostiziert das Modell. Mit weitreichenden Folgen: Verschwinden etwa Arten, die das Sediment durchwühlen, wird weniger organisches Material ab-



SENCKENBERG

**Wird künftig wahrscheinlich weiter nördlich heimisch sein: der Seestern *Ophiotrix fragilis*.**

gebaut, was sich auf Wasserqualität und Fischbestände auswirkt. Die Forscher erwarten, dass sich in den frei werdenden Lebensräumen invasive Arten wie die Pazifische Felsenauster ansiedeln.

*Estuar. Coast. Shelf S.* 175, S. 157–168, 2016



## Mehr Aktualität!

Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

TECHNIK

# China führt im Supercomputing

Der leistungsfähigste Supercomputer der Welt steht in China: »TaihuLight« am Nationalen Supercomputerzentrum in Wuxi bringt es auf 93 Petaflops oder 93 Milliarden Rechenoperationen pro Sekunde. Das zeigt die aktuelle Top-500-Liste der Hochleistungsrechner, die auf der International Supercomputing Conference (ISC) in Frankfurt vorgestellt wurde. China führt die Liste aber nicht nur qualitativ an, sondern auch quantitativ: Langzeit Spitzenreiter USA ist noch 165-mal vertreten, China dagegen 167-mal.

Die Hardware des TaihuLight, allen voran die ShenWei-Prozessoren, wurde in China entwickelt und produziert. Das beendet Spekulationen darüber, ob China auf westliche Technologie angewiesen sei, um im Supercomputing mithalten zu können. Die USA haben selbst zu dieser Entwicklung beigetragen,

indem sie chinesische Supercomputingzentren mit einem Embargo von amerikanischen Highend-Prozessoren belegten und so die chinesischen Bemühungen um entsprechende eigene Produkte ankurbelten.

Der schnellste europäische Rechner findet sich auf Platz acht der Liste. Es ist der »Piz Daint« (6,2 Petaflops) am Schweizer Nationalen Hochleistungsrechenzentrum in Lugano. Direkt danach folgt die am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart stationierte Maschine »Hazel Hen« (5,6 Petaflops).

TaihuLight soll unter anderem für Klimamodellierung, lebenswissenschaftliche Forschung und Datenanalyse dienen. Medienberichten zufolge plant China derweil, einen Rechner mit einer Trillion Rechenoperationen pro Sekunde bis zum Jahr 2020 zu bauen.

*top500.org, 20.06.2016*

## Neandertaler als Architekten

In der Bruniquel-Höhle im südwestlichen Frankreich haben Forscher offenbar ein Bauwerk der Neandertaler entdeckt. Es besteht aus abgebrochenen Stalagmiten, also Tropfsteinen, die vom Boden emporwachsen. Die rund 400 Stücke sind zu Mäuerchen aufgeschichtet und ergeben zwei Einfassungen: eine größere mit 7 Meter Länge und 4,50 Meter Breite sowie eine kleinere mit einem Durchmesser von rund 2 Metern. Dazwischen liegen mehrere Tropfsteinstapel, die Brandspuren zeigen und vermutlich als Feuerstellen dienen.

Uranisotop-Datierungen ergeben, dass die Konstruktion rund 176 000 Jahre alt ist, wie die Forscher um Jacques Jaubert von der Universität de Bordeaux schreiben. Damals war Europa von Neandertalern bewohnt, nach heutiger Kenntnis aber von keiner anderen Menschenart. Somit kommt nur *Homo neanderthalensis* als Urheber in Frage. Dass die Anlage durch Zufall entstand oder von Tieren hinterlassen wurde, kann als ausgeschlossen gelten.

Das Bauwerk birgt keine Reste von Alltagsgegenständen oder menschliche Knochen und war deshalb wohl weder Wohn- noch Begräbnisstätte. Vermutlich diente es einem kultischen Zweck. Es liegt etwa 330 Meter tief im Höhleninneren und damit in völliger Dunkelheit.

Der Fund zeigt, dass Neandertaler den Umgang mit Feuer beherrschten, kulturell aktiv waren und ein erstaunlich komplexes Verhalten an den Tag legten. Denn eine solche

Anlage an einem derart unzugänglichen Ort zu errichten, erfordert Ausdauer, Kooperation und Planung. Der Eingang zur Höhle wurde noch in der Altsteinzeit verschüttet und erst 1990 wiederentdeckt. Die Konstruktion blieb deshalb viele Jahrtausende lang unberührt.

*Nature* 534, S. 111–114, 2016



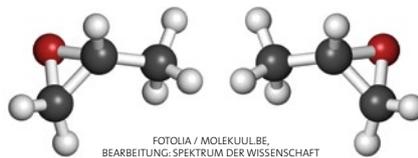
ETIENNE FABRE / SASC (SOCIÉTÉ SPÉCIFIQUE ARCHÉOLOGIQUE DE CAUSSE)

Ein Forscher nimmt Messungen in der Bruniquel-Höhle vor. Dort gibt es ein Bauwerk, das wohl von Neandertalern stammt.

## Chirale Moleküle im All

Erstmals haben Forscher chirale Moleküle im interstellaren Raum außerhalb unseres Sonnensystems entdeckt. Der Fund ist ein Mosaikstein zur Beantwortung der Frage, wie das Leben auf der Erde entstand. Denn in der Biochemie von Lebewesen spielen solche Moleküle eine große Rolle.

Chirale Moleküle existieren in mehreren räumlichen Anordnungen, die (ganz oder in Teilen) wie Bild und Spiegelbild aussehen und sich nicht zur Deckung bringen lassen. Diese Formen stimmen zwar in wesentlichen Eigenschaften überein, etwa in Schmelz-, Siedepunkt und chemischem Reaktionsverhalten. Sie haben aber meist unterschiedliche physiologische Wir-



kungen. So kann eine Form giftig und die andere harmlos sein. Lebewesen bevorzugen von chiralen Naturstoffen in der Regel nur eine Form. Beispielsweise stellen Organismen ihre Proteine aus L-Aminosäuren, nicht aus D-Aminosäuren her. Wie das evolutionär entstand, ist bis heute nicht geklärt.

Die Wissenschaftler um Brett A. McGuire vom California Institute of Technology (USA) untersuchten die Sternentstehungsregion Sgr B2 nahe dem Milchstraßenzentrum mit Hilfe des Green-Bank-Radioteleskops in West Virginia (USA) und des Parkes-Radioteleskops in Australien. Die aufgenom-

Propylenoxid existiert in zwei Formen (grau: Kohlenstoff, weiß: Wasserstoff, rot: Sauerstoff).

menen Spektren liefern deutliche Hinweise darauf, dass die Region Sgr B2 große Mengen des chiralen Moleküls Propylenoxid enthält, das in zwei geometrischen Varianten existiert. Die Messungen erlauben allerdings keinen Rückschluss auf die jeweilige Häufigkeit. Fotochemisch selektive Vorgänge, die von zirkular polarisiertem Licht angetrieben werden, könnten zur Anreicherung der einen oder anderen Form führen, wie sie in heutigen Lebewesen oft zu beobachten ist, vermuten die Forscher. Künftige Messungen sollen hier weitere Aufschlüsse geben.

*Science* 352, S. 1449–1452, 2016

MEDIZIN

## Entzündete Mückenstiche fördern schwere Infektionen

Manche Mücken übertragen Viren, wenn sie stechen – die Gelbfiebersmücke (*Aedes aegypti*) etwa das Zika-Virus. Wie stark sich das Opfer dabei infiziert, hängt davon ab, wie sehr sich die Einstichstelle entzündet. Je intensiver die Entzündung, desto besser vermehren und verbreiten sich die Viren und umso wahrscheinlicher kommt es zu einer schweren Infektionskrankheit, wie Clive McKimmie von der University of Leeds und seine Kollegen schreiben.

Die Wissenschaftler infizierten Mäuse mit Semliki-Forest-Viren (SFV) – Nagetierpathogenen, die durch Stechmücken übertragen werden. Brachten die Forscher das Virus in Hautstellen ein, an denen zuvor *Aedes aegypti* gestochen hatte, fiel die Infektion deutlich schwerer aus als beim Einbringen in nicht gestochene Hautareale. Es ließ sich dann wesentlich mehr virale RNA in der Haut der Mäuse nachweisen, die Erreger verbreiteten sich schneller im Körper, und die betroffenen Tiere starben häufiger.

Weitere Versuche klärten, warum das so ist. Die Schwellung an der Einstichstelle hält die Viren in der Haut gefan-



CDC / JAMES GATHANY

Gelbfiebersmücken übertragen diverse Krankheitserreger, darunter das Gelbfieber-, das Denguefieber- und das Zika-Virus.

gen und fördert so die Infektion der dortigen Körperzellen. In das gestochene Areal wandern verstärkt Neutrophile ein – weiße Blutkörperchen, die zur angeborenen Immunabwehr gehören. Dies lockt wiederum myeloische Zellen des Blutbildenden Systems an, in denen sich die Viren vermehren.

Unterdrückten die Forscher die Entzündungsreaktion an der Einstichstelle, infizierten sich die Mäuse lange nicht so stark. Der Übertragung von Zika- und anderen Viren durch Stechmücken lässt sich somit entgegenwirken, indem man die Stiche mit entzündungshemmenden Salben behandelt.

*Immunity* 44, S. 1455–1469, 2016

ASTRONOMIE

## Warum die Venus ihr Wasser verliert

Die Venus ist sehr wasserarm. Glyn Collinson vom NASA Goddard Space Flight Center und sein Team haben jetzt offenbar den Grund dafür gefunden: Elektrische Kräfte schleudern Wasserstoff- und Sauerstoffionen aus der Atmosphäre des Planeten ins All. Das dafür verantwortliche elektrische Feld in der Ionosphäre der Venus ist rund fünfmal stärker als das in der irdischen Ionosphäre. Darauf deuten Messdaten der europäischen Raum-

sonde »Venus Express« hin, die von 2006 bis 2014 um den Planeten kreiste.

Obwohl die Atmosphäre der Venus viel dichter ist als die der Erde, enthält sie deutlich weniger H<sub>2</sub>O. Ihr Wasserdampfgehalt beträgt nur ein Zehn- bis Hunderttausendstel des irdischen. Lange Zeit hatten Forscher angenommen, der Sonnenwind habe die ionisierten Wassermoleküle der Venusatmosphäre entrissen. Ein anderer Effekt ist jedoch wichtiger, wie die Ergebnisse

von Collinson und seinen Kollegen zeigen: Das Magnetfeld der Sonne beschleunigt Elektronen in der Ionosphäre weg von dem Himmelskörper, die dann positiv geladene, schwerere Ionen in der Atmosphäre quasi hinter sich herziehen. Zwischen ihnen entsteht dabei ein Polarisationsfeld, das es Wasserstoff-, Sauerstoff- und anderen Ionen erleichtert, das Schwerefeld der Venus zu verlassen.

Das Polarisationsfeld schlägt sich in den Messdaten von »Venus Express« nieder. Collinson und Kollegen spekulieren, es erhalte seine Stärke durch die größere Nähe zur Sonne und die dadurch intensivere Energieübertragung solarer Photonen auf die Elektronen in der Ionosphäre. Diese Erkenntnisse sind wahrscheinlich auf andere Planeten in Sternennähe übertragbar und sollten deshalb bei der Suche nach erdähnlichen Exoplaneten berücksichtigt werden, so das Forscherteam.

*Geophys. Res. Lett.*

10.1002/2016GL068327, 2016



NASA / GODDARD / CONCEPTUAL IMAGE LAB, KRISTOFER NIM

Ein Polarisationsfeld entreißt der Venusatmosphäre positiv geladene Teilchen wie Sauerstoff- und Wasserstoffionen, was diese Illustration in Form von Strahlen darstellt.

## GLÜHENDER GASRIESE

Die Infrarotaufnahme des Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte zeigt Wolkenstreifen in der stark veränderlichen Atmosphäre von Jupiter. Wärmere Bereiche leuchten hell, während die übrigen Zonen dichter und kühler sind. Solche Beobachtungen bei verschiedenen Wellenlängen helfen dabei, die Abläufe auf dem größten Planeten unseres Sonnensystems besser zu verstehen.

# Quantenexperimente aus dem Computer

Ein neuer Algorithmus entwickelt komplizierte quantenmechanische Versuchsanordnungen, auf die Forscher bislang nicht gekommen sind.

VON MARIO KRENN

Um Quantenphänomene besser zu verstehen und die Vorhersagen der Theorie zu überprüfen, sind Laborversuche unerlässlich. Die Gesetze auf der Größenordnung von Lichtteilchen und Atomen sind jedoch derart seltsam und unintuitiv, dass es schwierig ist, neue Experimente zu konzipieren. Ihre Designer müssen Effekte miteinander kombinieren, von denen jeder einzelne der Alltagserfahrung widerspricht. Irgendwann scheitert dabei zwangsläufig die menschliche Vorstellungskraft.

Das mussten wir, Quantenphysiker in der Gruppe von Anton Zeilinger an der Universität Wien, vor einiger Zeit selbst feststellen. Wir wollten eine komplexe, niemals zuvor erzeugte Art von Quantenverschränkung im Labor untersuchen. Normalerweise betrifft das Phänomen der Verschränkung zwei Teilchen, deren mögliche Zustände an-

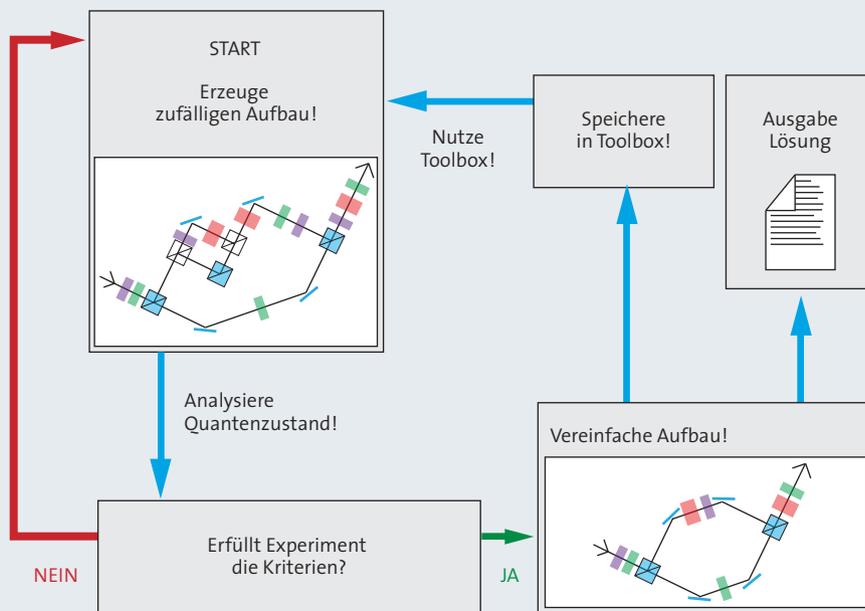
einandergekoppelt sind und die erst bei einer Messung auf einen davon festgelegt werden. Bei unserem Versuch wollten wir nun sogar drei Photonen miteinander verschränken, die gemeinsam eine von drei Eigenschaften annehmen sollten. Anschaulich gesprochen sind dann alle drei Photonen entweder rot, grün oder blau, und die Messung des ersten Lichtteilchens würde sofort die Farbe der anderen zwei bestimmen. Im tatsächlichen Experiment benutzten wir allerdings nicht die Wellenlänge, sondern eine andere Eigenschaft der Photonen, ihren Drehimpuls.

Wir versuchten, uns einen passenden Aufbau auszudenken, der diesen Zustand erzeugt. Zu unserer Überraschung war das gar nicht so einfach. Sämtliche Experimente, die wir anhand unserer früheren Erfahrungen ausprobiert hatten, funktionierten nicht.

Nachdem wir mehrere Wochen lang verzweifelt immer ausgefalleneren Ideen bemüht hatten, wurde uns klar: Ein grundsätzlich anderer Ansatz war nötig. Erfahrung und Intuition brachten uns offenbar nicht weiter. Sollten wir es stattdessen mit zufälligen Kombinationen probieren? Das ist jedoch etwas, was ein Computer auch kann – noch dazu viel schneller als ein Mensch.

Als mir das klar wurde, schrieb ich einen entsprechenden Algorithmus (*Physical Review Letters* 116, 090405, 2016). Das Programm sollte auf eine Art Werkzeugkasten zugreifen, der alle optischen Bauelemente aus unserem Labor enthält. Spiegel ändern den Pfad des Lichts, Strahlteiler trennen ihn in zwei Teile, Hologramme manipulieren den Drehimpuls der Photonen, Kristalle erzeugen Photonenpaare, Polarisatoren manipulieren die Schwingungs-

## Algorithmus »Melvin«



**Der Algorithmus »Melvin«** findet Versuchsaufbauten, die einen bestimmten Quantenzustand erzeugen. Das Programm beginnt damit, optische Elemente zufällig anzuordnen, und prüft, ob das Experiment das gewünschte Ergebnis liefert. Falls nein, beginnt Melvin mit einer neuen Anordnung. Wenn ja, vereinfacht er zunächst unnötig umständliche Stücke im Aufbau und schreibt die Lösung dann in eine Datei. Außerdem speichert er sie in einem Baukasten, auf den er bei zukünftigen Designs zugreifen kann, sofern der Quantenzustand dort als Teilschritt erneut sinnvoll ist.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH MARIO KRENN



Auf der Grundlage von Computerberechnungen entstanden bereits erfolgreiche Labortests. Das Foto zeigt einen Abschnitt eines von »Melvin« konzipierten Experiments.

MEHUL MALIK, UNIVERSITÄT WIEN, MIT FOT. GEN. VON KARO KREIN

richtung, Detektoren registrieren einzelne Lichtteilchen. Aus solchen und mehr Elementen kann der Algorithmus zufällig wählen und sie auf einem virtuellen optischen Tisch aufstellen. Dann berechnet der Computer den resultierenden Quantenzustand und analysiert dessen Eigenschaften. Sollte es sich um den von uns gesuchten Effekt handeln, schreibt er das entsprechende Experiment in eine Datei und teilt es uns so mit. Anderenfalls geht er das nächste zufällige Experiment an (siehe »Algorithmus »Melvin««, links).

Als der Code fertig war, startete ich den Algorithmus abends. Am nächsten Morgen, nach einigen hunderttausend untersuchten experimentellen Varianten, gab es tatsächlich eine Datei »solution.txt« auf meinem Rechner. Sie enthielt den Aufbau, den wir wochenlang gesucht hatten! Doch er war noch sehr kompliziert – viele der verwendeten Teile erfüllten gar keinen Zweck, andere Operationen waren zu umständlich. Es dauerte einen ganzen Tag, um gemeinsam mit meinem Kollegen Radek Lapkiewicz den ersten vertrackten Vorschlag von »Melvin« – so nennen wir den Algorithmus – zu vereinfachen.

Aber auch eine solche Verbesserung lässt sich automatisieren. Daher habe ich die Regeln dafür direkt in die nächs-

te Version des Programms geschrieben. Sobald ein Experiment einmal die von uns gesuchten Eigenschaften besitzt, versucht Melvin anschließend, den Aufbau selbstständig zweckmäßiger zu organisieren.

### Der Zufall hilft, wenn Intuition irreführt

Der Versuch schien mathematisch perfekt zu funktionieren. Es war für uns aber sehr schwierig zu verstehen, warum. Was waren die Tricks, die das Programm gefunden hatte und die wir übersahen? Eine auffallende Eigenschaft des Aufbaus ist seine Asymmetrie. Normalerweise, so interpretiert es der Leiter unserer Arbeitsgruppe Anton Zeilinger, würden menschliche Designer erfahrungsgemäß davon ausgehen, dass sich die Symmetrie eines gesuchten Quantenzustands auch in der Anordnung der optischen Bauteile widerspiegeln müsste. Hier schien die Intuition jedoch in die Irre zu führen.

Melvin hingegen hatte unser erstes Problem erstaunlich gut gelöst. Nun wollten wir nach allgemeineren Quantenzuständen suchen. Und tatsächlich hat das Programm inzwischen Konzepte für mehr als 50 Quantensysteme mit unterschiedlich verschränkten Photonen gefunden.

Die meisten dieser vorgeschlagenen Experimente sind, obwohl rechnerisch gut nachvollziehbar, intuitiv schwierig zu verstehen. Außerdem enthalten sie experimentelle Techniken, an die wir davor noch nicht gedacht hatten. Dazu gehört eine geschickte Kombination von einem Kristall mit einem Strahlteiler und einem Hologramm, welche die Anzahl der verschränkten Eigenschaften erhöht, zum Beispiel von zwei Farben auf vier. Bei einer weiteren Technik, die in fast allen der 50 gefundenen Experimente vorkommt, wird eines der produzierten Photonen direkt zu einem Detektor geleitet, ohne es zuerst mit einem optischen Bauelement interagieren zu lassen. Dieser überraschende Kniff umgeht eine technische Schwierigkeit, die viele unserer Versuche hat scheitern lassen.

Als meine Kollegen Mehul Malik und Manuel Erhard in unseren Labors einen von Melvins Vorschlägen erfolgreich umsetzten, demonstrierten sie damit erstmals die eingangs erwähnte Drei-Photonen-Verschränkung, die sich in der Praxis beispielsweise für eine neue Art der Quantenkryptografie eignen könnte (*Nature Photonics* 10, S. 248–252, 2016).

Nachdem die Suche nach komplex verschränkten Quantensystemen sehr

gut funktioniert hat, haben wir Melvin noch vor ein weiteres Problem gestellt, das wir selbst nicht lösen konnten. Dabei handelt es sich um eine so genannte zyklische optische Transformation. Durch einen solchen Vorgang würde beispielsweise ein rotes Photon zu einem grünen, ein grünes zu einem blauen und ein blaues zu einem roten. Diese Art von Umwandlung ist wichtig, um spezielle verschränkte Zustände zu erzeugen und mit ihnen zu arbeiten.

Tatsächlich hat Melvin mehrere unterschiedliche zyklische Transformationen gefunden, die mit dem Drehimpuls und der Polarisierung von Photonen arbeiten. Auch eines dieser Experimente wurde kürzlich erfolgreich umgesetzt – von meinem Kollegen Florian Schled-

erer (*New Journal of Physics* 18, 043019, 2016) – und wird seitdem als Basiselement in anderen Experimenten angewendet.

Um immer effizienter zu arbeiten, lernt Melvin aus Erfahrung. Hat der Algorithmus einmal eine Lösung für ein spezielles Teilproblem, speichert er sie in einer Toolbox. Bei neuen Durchläufen kann er dann auf diesen Baukasten zurückgreifen, komplexere Lösungen systematisch aufbauen und so schneller weitere nützliche Experimente erzeugen.

Die Ideen von Melvin lassen sich auf unterschiedlichste Quantensysteme anwenden und könnten Experimentatoren auf neue Tricks für die praktische Umsetzung bringen. Damit würden

physikalische Phänomene im Labor überprüfbar, die sich zuvor nur mit Hilfe abstrakter Gleichungen lösen und in Computersimulationen untersuchen ließen. Die vielleicht aufregendste Erweiterung des Programms wäre, nicht mehr vordefinierte Kriterien zu benutzen, sondern den Algorithmus selbstständig erkennen zu lassen, was überhaupt interessante Eigenschaften sind. Dazu müssten wir aber zuerst verstehen, was menschliche Wissenschaftler spannend finden, um diese Denkweise dann einem Computer beizubringen. Das wäre wohl schon an sich eine faszinierende Herausforderung.

---

**Mario Krenn** ist Physiker und Doktorand an der Universität Wien.

## MENSCHENEVOLUTION

# Der »Hobbit« lebte lange vor dem *Homo sapiens*

Herkunft und Bedeutung des vergleichsweise jungen *Homo floresiensis* sind nach wie vor umstritten. Viel ältere Fossilien besagen nun, dass der indonesische Zwergmensch schon vor vielen hunderttausend Jahren auf Flores lebte.

VON AIDA GÓMEZ-ROBLES

Als 2004 die Existenz des »Hobbit« genannten *Homo floresiensis* bekannt wurde, warfen die Zwergmensch der indonesischen Insel Flores völlig neue Fragen zur Menschenevolution auf. Manche Experten äußerten von vornherein Zweifel daran, dass die in der Liang-Bua-Höhle gefundenen Überreste eines unbekanntes, kleinhirnigen Homininen – darunter das Skelett eines nur einen Meter großen Individuums – wirklich eine eigene, ausgestorbene Menschenart repräsentieren, wie die Entdecker behaupten (siehe SdW 1/2005, S. 14). Könnte es sich nicht vielmehr um einen *Homo sapiens* handeln, also einen modernen Menschen, der entweder krankheitsbedingt kleinwüchsig war oder zu einer Population mit besonders kleinen Individuen gehörte?

Sollte der Hobbitfund aber tatsächlich von einer weiteren Homininenart zeugen, wird es erst richtig spannend. Denn die Einordnung des Flores-Menschen in den menschlichen Stammbaum war bislang völlig unklar, schon weil dieser Hominine viele anatomische Besonderheiten aufweist. Einig waren sich die Forscher von Anfang an lediglich darin, dass nur mehr Fossilien von Flores weiterhelfen würden. Besonders Funde von anderen Stellen der Insel und möglichst aus noch früherer Zeit seien nötig. Genau diesen Wunsch erfüllt nun ein internationales Team um die Anthropologen Gerrit D. van den Bergh und Adam Brumm, die unter anderem an der University of Wollongong (New South Wales, Australien) arbeiten (*Nature* 534, S. 245–248 und S. 249–253, 2016). Die Grabungsstelle,

Mata Menge, liegt rund 75 Kilometer vom Gebiet Liang Bua entfernt. Und nach den Datierungen sind die neuen Fossilien rund 700 000 Jahre alt – wohingegen der Hobbit des ersten Funds zwar nicht, wie anfangs angenommen, vor 18 000 Jahren lebte, aber immerhin vor weniger als 100 000 Jahren.

Während sich viele Paläoanthropologen nach der Entdeckung des Liang-Bua-Skeletts schnell damit anfreundeten, dass wir es hierbei mit einer wenn auch reichlich merkwürdigen weiteren alten Menschenart zu tun haben (siehe SdW 4/2010, S. 64), strengten die Gegner dieser Auffassung eigene Studien an, in denen sie die Fossilien auf Anzeichen für Erkrankungen untersuchten. In einer neueren Arbeit von 2014 etwa heißt es, unter anderem die Kleinwüchsigkeit und der auffallend kleine Schä-

del sowie andere spezifische Ausprägungen könnten dafür sprechen, dass es sich in Wirklichkeit um einen modernen Menschen handelt, und zwar einen Angehörigen der auch heutzutage kleinwüchsigen Inselbevölkerung, der unter dem Down-Syndrom litt.

### Indizien für uralte Wurzeln des Flores-Menschen

Die jetzt gefundenen Fossilien von mindestens drei verschiedenen Individuen widerlegen solche Deutungen zweifelsfrei: Sie umfassen ein Unterkieferfragment, ein schwer einzuordnendes Schädelbruchstück und sechs Zähne. *Homo floresiensis* ist demnach unbedingt als eigene Art anzusehen. Mehr noch – diesen Homininen muss es bereits vor mehr als 700 000 Jahren gegeben haben. Van den Bergh, Brumm und ihre Kollegen haben die neuen Fundstücke akribisch vermessen und mit den entsprechenden Teilen anderer Homininenarten verglichen. Demnach finden sich derart kleine Zähne außer beim *H. floresiensis* sonst nur noch beim *Homo sapiens*. Der moderne Mensch existierte damals allerdings noch längst nicht und erreichte die südostasiatische Inselwelt erst vor rund 50 000 Jahren, kommt für diese Fossilien also keinesfalls in Frage. Für eine



Der Flores-Mensch muss tapsig gegangen sein: Er hatte Riesenfüße (oben) und kurze Beine (unten ein Schienbein). Sein kurzer, großer Zeh stand nach vorne.

WILLIAM JUNGERS / NATIONAL ARCHAEOLOGY RESEARCH CENTER, ARKENAS

enge Beziehung zwischen dem zuerst gefundenen Hobbit und den neu entdeckten – viel älteren – Überresten spricht laut den Forschern außerdem, dass beide Gruppen in einer vergleichbaren Savannenvegetation lebten. Mehr noch: Beide stellten offenbar ähnliche Werkzeuge her. Es scheint somit, als hätten diese Technologien dort über einige Jahrhunderttausende Bestand gehabt.

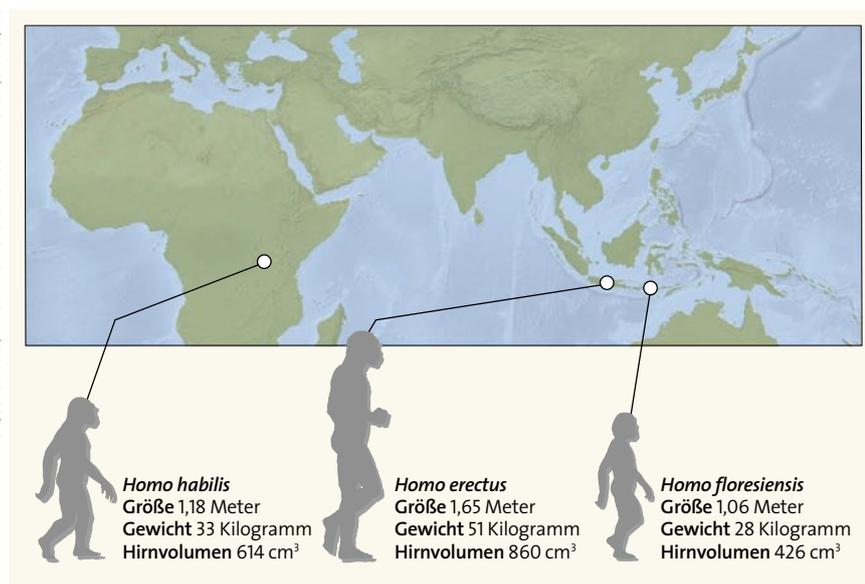
Die neue Entdeckung bringt die Spekulationen über den Ursprung von *Homo floresiensis* nun erst richtig in Gang. Im Prinzip bieten sich dafür zwei

Möglichkeiten an. Die eine wäre, dass er vom *Homo erectus* abstammt, der einst in Südostasien verbreitet war. Dieser war allerdings deutlich größer als der Hobbit; Letzterer müsste folglich als Inselpopulation verzweigt sein. Derartige ist für verschiedene Tiere durchaus bekannt: Bei fehlenden Fressfeinden und der auf Inseln oft knappen Nahrung kann eine Art rasch beträchtlich kleiner werden.

Als alternative Erklärung dazu überlegen die Forscher, ob sich die Linie der Flores-Menschen bereits von einem viel urtümlicheren Homininen abzweigte. Das könnte *Homo habilis* gewesen sein, einer der frühesten Vertreter unserer Gattung mit einem noch relativ kleinen Gehirn. Oder jener Urahn war sogar ein kleiner *Australopithecus*. In diesen beiden Szenarien hätten bereits vor rund zwei Millionen Jahren ziemlich primitive Homininen Afrika verlassen. Hierfür gibt es jedoch bisher nicht den geringsten Anhaltspunkt in Form von Fossilien oder archäologischen Hinterlassenschaften.

Laut dem Team um van den Bergh und Brumm sprechen das Aussehen eines unteren Backenzahns und Merkmale des Unterkieferstücks von Mata Menge für eine nähere Verwandtschaft mit *H. erectus* als mit *H. habilis*. Wie ich und andere 2015 nachgewiesen haben, können untere Backenzähne zwar tatsächlich auf Verwandtschaftsverhältnisse zwischen verschiedenen Homini-

NATURE, GÓMEZ-ROBLES, A. THE DAWN OF HOMO FLORESIENSIS. IN: NATURE 534, S. 188-189, 2016



Noch ist nicht klar, ob der »Hobbit« vom groß gebauten, sicherlich bereits recht intelligenten *Homo erectus* Asiens abstammte oder von einem primitiveren Homininen wie dem *Homo habilis*.

nen hinweisen. Jedoch weckten beim ersten Hobbitskelett hauptsächlich andere Körperteile den Verdacht, dass der *H. floresiensis* auf eine recht urtümliche Art zurückgeht. Von diesen Körperpartien fanden sich in Mata Menge aber bisher keine Knochen.

Manche Anthropologen halten eine Abstammung vom *H. erectus* schon deswegen für nicht möglich, weil die Körpergröße in kurzer Zeit extrem hätte abnehmen müssen. Insbesondere das im Vergleich geradezu winzige Gehirn wäre überverhältnismäßig geschrumpft. Grundsätzlich kann das Phänomen allerdings bei Säugetieren vorkommen, die auf Inseln verzweigen, wie ein ausgestorbenes Zwergflusspferd von Madagaskar beweist.

Ein noch schwerwiegenderer Einwand gegen die Abstammung von einem primitiven Homininen ist: Anthropologen trauen es dem *Homo habilis* oder gar noch älteren Arten einfach nicht zu, von Afrika bis nach Südostasien gelangt zu sein. Somit will keine der Erklärungen für den Hobbit, die ihnen bisher einfallen, zum derzeitigen Bild von der Menschenevolution passen.

Nach van den Bergh, Brumm und Kollegen könnten die Homininen von Mata Menge von einer Population ab-

stammen, die vor rund einer Million Jahren auf Flores an der Fundstätte Wolo Sege Steinwerkzeuge hinterließ. Sie vermuten, dass ein normal großer *Homo erectus* jene Artefakte fertigte. Es bleibt abzuwarten, ob dort eines Tages nicht doch Fossilien von kleinen Menschen aus dieser Zeit auftauchen. Bis dahin wäre zu fragen, ob es biologisch überhaupt möglich ist, dass der Körper und vor allem das Gehirn in nur 300 000 Jahren so stark schrumpfen.

### Zu enger Blickwinkel?

Außenstehenden mag die Zeitspanne ziemlich lang erscheinen. Von den Homininen kennt man jedoch kein zweites Beispiel ähnlich starker Größenabnahme in so kurzer Zeit. Noch fehlt eine vergleichende quantitative Analyse für Evolutionsraten bei verschiedenen Homininen, die auch den *Homo floresiensis* mit bewertet.

Meines Erachtens sollte man aber auch andere Säugetiere betrachten, denn bei ihnen haben sich mitunter in wesentlich kürzerer Zeit noch extremere Zwergformen herausgebildet. Auf Inseln geschieht das manchmal in einem geradezu rasanten Tempo. Außerdem ist es möglich, dass die Gründerväter und -mütter der neuen Art keine

besonders typischen Vertreter ihrer Ursprungsart waren. *H. floresiensis* weist eine merkwürdige Mixtur archaischer und modernerer Merkmale auf. Vielleicht entwickelte sich die Art aus sehr wenigen Individuen, die gar nicht alle vorherrschenden Merkmale der Ursprungspopulation mitbrachten.

Manch ein Szenario, das aus einem anthropozentrischen Blickwinkel völlig abwegig wirkt, entpuppt sich als normal, sofern wir nur über unseren Tellerand blicken. Dass sich auf Inseln rasch Zwergformen entwickeln, ist für Säugetiere nicht ungewöhnlich. Auch Gründereffekte, bei denen sich besondere Merkmale herauschälen, sind nicht selten. Und Tiere, die sich nicht gerade durch viel Verstand auszeichnen, können weiteste Strecken wandern. Nach meiner Erfahrung würde es sich auch beim Hobbit lohnen, jenseits der Homininen zu denken.

---

Die Paläoanthropologin **Aida Gómez-Robles** arbeitet an der George Washington University in Washington, D. C., am Center for the Advanced Study of Human Palaeobiology.

---

© nature Publishing Group

[www.nature.com](http://www.nature.com)

Nature 534, S. 188–189, 9. Juni 2016

## GEOPHYSIK

# Das Kernproblem der Erde

Messungen der Wärmeleitfähigkeit von Eisen bei extremen Drücken und Temperaturen werfen ein neues Licht auf die Eigenschaften des Erdkerns – und auf seine Vergangenheit.

VON DAVID DOBSON

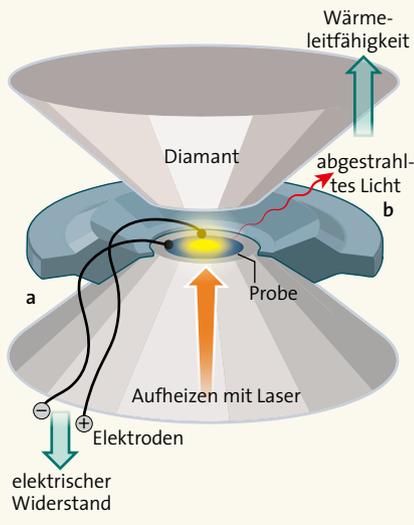
**E**in wenig funktioniert der Erdkern wie ein Nachtspeicherofen: Kristallisiert das flüssige Eisen aus dem riesigen äußeren Erdkern und reichert sich im festen inneren Teil an, wird Energie frei. Sie erwärmt unseren Planeten und wirkt so dem langsamen Auskühlen im eisigen Weltall entgegen. Eine weitere Konsequenz der inneren Dynamik ist das magnetische Feld der Erde. Es entsteht durch Konvektionsvorgänge im

äußeren Erdkern. Wie viel Energie dafür zur Verfügung steht, hängt entscheidend davon ab, wie gut das Erdinnere die Wärme direkt leitet und bis in den Erdmantel überträgt.

2012 lieferten numerische Simulationen dieser Vorgänge sehr hohe theoretische Werte für die Leitfähigkeit vom flüssigen Eisen im äußeren Kern. In dieser Region würde die Hitze also schnell nach außen transportiert. Das löste eine

große Kontroverse aus, denn es hätte zur Folge, dass alle bis dahin akzeptierten Modelle für die Entstehung und das Verhalten des irdischen Magnetfelds falsch wären. Der daran beteiligte feste Erdkern wäre weniger als eine Milliarde Jahre alt und damit wesentlich jünger, als man annahm. Nun präsentierten zwei Forschergruppen um Kenji Ohta vom Tokyo Institute of Technology und Zuzana Konôpková vom Deutschen

## Messen unter Extrembedingungen



Unter dem enormen Druck einer Diamantstempelzelle haben Forscher Eisen auf mehrere tausend Grad Kelvin erhitzt, um die Wärmeleitfähigkeit von Metall im Erdkern zu ermitteln. Ein Team hat Elektroden (a) angeschlossen, mit ihnen den elektrischen Widerstand direkt gemessen und damit indirekt die Wärmeleitfähigkeit berechnet. Andere Physiker verwendeten einen ultrakurzen Laserpuls und untersuchten dessen Wirkung durch die Eigenschaften des ausgesandten Lichts der heißen Probe (b).

Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg Ergebnisse von Experimenten, bei denen sie das Verhalten von heißem Eisen unter solch extremen Bedingungen erstmals direkt untersuchten (*Nature*

534, S. 95–98 und S. 99–101, 2016). Beide Forscherteams haben die Gültigkeit der 2012 simulierten Werte mit unterschiedlichen Methoden überprüft – und erhielten verschiedene Resultate.

Die zwei Gruppen verwendeten so genannte Diamantstempelzellen, mit denen sich äußerst hohe Drücke erreichen lassen, sowie Laserstrahlen, mit denen sie ihre Proben zusätzlich erhitzen. So stellten sie die Verhältnisse im Erdkern nach. Hier enden die Ähnlichkeiten allerdings bereits.

Die Wissenschaftler um Ohta bestimmten den elektrischen Widerstand von Eisendrähten. Um ihre Messung in einen Wert für die Wärmeleitfähigkeit des flüssigen Eisens im äußeren Erdkern umzurechnen, wendeten die Autoren auf ihre Daten ein theoretisches Modell an, die »Widerstandssättigung«. Diese besagt, dass der elektrische Widerstand bei hohen Temperaturen ein Plateau erreicht. Das wiederum erlaubte ihnen, das so genannte Wiedemann-Franz-Gesetz anzuwenden. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen thermischer und elektrischer Leitfähigkeit bei Metallen, der näherungsweise proportional zur Temperatur ist. Die beiden getroffene-

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

## KOMPAKT

THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ!



€ 4,99  
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:  
[www.spektrum.de/kompakt](http://www.spektrum.de/kompakt)

Hier QR-Code per  
Smartphone scannen!



## Problematische Moral der Maschinen

### Wir sind dabei, Entscheidungen über Leben und Tod an autonome Fahrzeuge zu delegieren. Was heißt das im konkreten Einzelfall?

**P**olizist Del Spooner hasst die humanoiden Roboter, die anno 2035 das Straßensbild beherrschen. Den Grund erklärt der Film »I, Robot« mit einer Rückblende: Als bei einem Unfall sowohl Spooner als auch ein kleines Mädchen zu ertrinken drohten, rettete ein vorbeikommender Roboter ihn statt des Mädchens, weil er Spooners Überlebenschancen deutlich höher einstuft als ihre.

Ein ähnliches ethisches Dilemma ist inzwischen nicht mehr Sciencefiction, sondern höchst aktuell, seit autonome Fahrzeuge – vorläufig noch auf Teststrecken – tausende Kilometer zurücklegen. Angenommen, direkt vor einem selbstfahrenden Auto laufen Kinder auf die Straße. Das Lenkprogramm steht nun vor der Wahl, in den Gegenverkehr oder auf den dicht bevölkerten Gehsteig auszuweichen – oder die Kinder zu überfahren (Spektrum der Wissenschaft 10/2015, S. 82).

Die Entscheidung liegt letztlich beim Programmierer, der Prioritäten setzt. Sind Kinder schutzwürdiger als Erwachsene? Dürfen Sachschäden gegen Verletzungen aufgerechnet werden? Ab welcher Anzahl wahrscheinlich überfahrener Passanten steuert das Programm lieber in den Gegenverkehr und riskiert eine Massenkarambolage mit schwer absehbaren Folgen?

Solange Menschen am Steuer sitzen, mögen sie zwar durch Verkehrserziehung und Fahrschule mehr schlecht als recht auf solche Vorkommnisse vorbereitet sein, aber erst nach einem Unfall überprüfen Gutachter oder Gerichte das Verhalten der Beteiligten. Die Autoindustrie wirbt damit, dass intelligent agierende Fahrzeuge kritische Situationen von vornherein richtig einschätzen werden.

Oberstes Ziel sollten möglichst wenige Todesopfer sein, so der Konsens. Doch nun stellte ein Team um den Sozialpsychologen Iyad Rahwan vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge knapp 2000 Teilnehmer einer Onlinebefragung vor ein extremes Dilemma: Plötzlich blockiert eine größere Menschengruppe die Straße und lässt einem Auto mit mehreren Insassen nur die Wahl, entweder die Gruppe zu töten oder durch ein Halsbrecherisches Ausweichmanöver die Insassen zu opfern (*Science* 352, S. 1573–1576, 2016).

Generell sprachen sich auch hier die Befragten für eine Programmierung aus, welche die Opferzahl minimiert – was in diesem Fall den Tod der Insassen bedeutete. Doch die Antworten lauteten anders, wenn gefragt wurde: Würden Sie so ein »altruistisches« Programm selbst dann vorziehen, wenn es ein intelligentes Auto zu kaufen gäbe, das dem Schutz der Insassen oberste Priorität einräumt? Nun favorisierten die Befragten die Anschaffung eines Fahrzeugs mit »egoistischem« Verhalten.

Das ist, wie der bekannte Abgasskandal, ein schönes Beispiel für die typische Schiefelage zwischen abstraktem Gemeinwohl und konkretem Eigennutz: Wer wäre nicht für Abgaskontrolle und Klimaschutz – aber bitte nicht auf Kosten der Motorleistung eines teuer erworbenen Autos! Ebenso würde die Industrie, falls autonome Fahrzeuge marktreif würden, vermutlich offen oder unter der Hand Programme anbieten, die dem Käufer kompromisslosen Rundumschutz versprechen.

Die übernächste Generation echt autonomer Autos wird vermutlich schon mit Algorithmen ausgestattet sein, die aus Fehlern und Beinahe-Unfällen lernen und sich im Prinzip sogar vor einem Gericht verantworten könnten. Vielleicht würde ein wirklich intelligentes Programm sich dann damit verteidigen, dass die eigentliche Ursache der meisten Unfälle im Straßenverkehr der private Autobesitz sei – und für Carsharing sowie bessere öffentliche Verkehrsverbindungen plädieren.



Michael Springer

nen Annahmen fußen auf einer soliden theoretischen Grundlage und haben sich zumindest bei niedrigen Drücken auch experimentell bewährt. Die Forschergruppe um Ohta erhielt nun hohe Werte für die elektrische Leitfähigkeit, welche die Wissenschaftler in eine Wärmeleitfähigkeit von etwa 90 Watt pro Meter und Kelvin übersetzten. Sie stimmt recht gut mit den Ergebnissen der Simulationen von 2012 überein.

### Andere Methode, anderes Resultat

Konôpková und ihr Team maßen die Wärmeleitfähigkeit hingegen direkt, indem die Physiker einen Hitzeimpuls dabei beobachteten, wie er eine feste Eisenprobe durchquerte. Dazu hatten sie diese auf einer Seite mit einem nur wenige Nanosekunden kurzen Laserpuls auf hohe Temperaturen gebracht. Sowohl die Zeit, welche der Impuls zum Durchqueren der Probe benötigt, als auch seine Abschwächung hängen einerseits von der Wärmeleitfähigkeit des Eisens ab, andererseits von derjenigen des festen umgebenden Mediums, das den Druck von der Diamantstempelzelle auf die Probe überträgt und diese zugleich nach außen thermisch isoliert. Dafür mussten die Forscher die Temperaturverteilung in der Stempelzelle sorgfältig mathematisch modellieren. Anschließend konnten sie die Wärmeleitfähigkeit der Eisenprobe bestimmen, indem sie die Helligkeit und die Wellenlänge des Leuchtens des weiß glühenden Mediums vermaßen. Sie erhielten einen Wert von rund 30 Watt pro Meter und Kelvin. Er passt zu den Vorhersagen, die vor den Simulationen von 2012 gemacht worden waren, liegt jedoch erheblich unter den Ergebnissen von Ohta.

Das stellt uns vor die Frage, wie die widersprüchlichen Resultate in Einklang zu bringen sind. Gab es vielleicht unerkannte Probleme? Die extrem kurzen Laserpulse von Konôpková's Team könnten beispielsweise die Eisenprobe einen kurzen Moment lang aufgeschmolzen haben, ohne dass dies im Experiment hätte auffallen müssen. Dann würde die für den Phasenübergang notwendige Energie als eine Art

thermischer Puffer wirken (analog zum eingangs erwähnten Kristallisations-effekt, der unsere Erde warm hält). Man würde eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit messen. Das könnte erklären, warum die von Konôpková bestimmten Werte für die Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur und insbesondere nahe der Schmelztemperatur so stark absinken.

Oder aber Ohta hat möglicherweise den Wärmeverlust in seinen Elektroden unterschätzt, wodurch die tatsächliche Proben temperatur größer gewesen wäre, als das Team ermittelt hat. Dann hätte der elektrische Widerstand nur scheinbar ein Plateau erreicht, während er in Wirklichkeit weiter anstieg. Alternativ könnte die Proportionalitätskonstante, welche das Verhältnis zwischen thermischer und elektrischer Leitfähigkeit angibt, bei derart extremen Verhältnissen ungeahnt stark von der Tem-

peratur abhängen. Das wäre eine besonders spannende Erklärung, denn dann wären zuvor nicht beobachtete, fundamental neue physikalische Effekte am Werk.

Von dieser Diskrepanz abgesehen sind beide Untersuchungen für sich genommen herausragende experimentelle Leistungen. Die Wissenschaftler haben grundlegende Eigenschaften von Proben vermessen, die unter mehr als einer Million Atmosphären Druck stehen, kleiner als ein Stecknadelkopf und heißer als 4000 Kelvin sind. Obendrein unterscheiden sich die Methoden stark. Dennoch weichen die Ergebnisse nur um den Faktor drei voneinander ab!

Aber der Teufel steckt im Detail. Bereits diese Differenz hat dramatische Konsequenzen für unser Verständnis von der Dynamik der Erde und insbesondere den Zeitpunkt, an dem unser Planet einen festen Kern und damit

vermutlich auch ein stabiles Magnetfeld entwickelte. Folgt man den Simulationen von 2012 und den Messungen von Ohta, dürfte das erst vor 700 Millionen Jahren geschehen sein. Das fiel etwa mit dem Auftreten der ersten komplexen Lebensformen zusammen. Mit den Werten von Konôpková wäre bereits vor drei Milliarden Jahren ein fester Kern möglich gewesen. Auf jeden Fall sind aber weitere experimentelle und theoretische Anstrengungen nötig, um diese Diskrepanz zu beseitigen und mehr über die physikalischen Verhältnisse zu lernen, die im Inneren der Erde herrschen.

---

**David Dobson** ist Geowissenschaftler am University College London.

---

© nature Publishing Group

[www.nature.com](http://www.nature.com)

Nature 534, S. 45, 2. Juni 2016

Anzeige



In compliance with § 94 Sec. 2 Z 1 of the Austrian Universities Act, the Faculty of Social Sciences, Economics and Business at the Johannes Kepler University of Linz is announcing a faculty opening for a permanent position as a university professor for Sustainable Transportation Logistics

The Faculty of Social Sciences, Economics and Business at the Johannes Kepler University of Linz invites applications for a permanent position of

## Professor for Sustainable Transportation Logistics with a focus on "Physical Internet" (f/m)

to begin on October 1, 2016. The faculty opening is in accordance with § 98 of the Austrian Universities Act and an evaluation will be conducted after a four-year period.

The successful candidate will be expected to support the growth and expansion of research in the field of the "Physical Internet" and include this topic in all subdivision areas of research and teaching. Research should focus on how the logistical flow of goods will be organized in the future based on the use of the Physical Internet to attain sustainable, positive, economic, ecological and socially relevant effects. Accordingly, the successful candidate will be expected to conduct an equal amount of application-oriented and basic research in logistics and information sciences. In teaching, the successful candidate will be expected to create and expand on a new area of study that will be integrated into existing degree programs at the Johannes Kepler University. The successful candidate will also be expected to be willing to assume administrative tasks at the university and take part in university committees. See <http://www.jku.at/professuren> for detailed information about the position.

Applicants for the position must have (a) post-doctorate work (venia docendi, authorization to teach) or comparable post-doctorate qualifications preferably in Business Administration with a focus on Transport Logistics and/or Information Sciences, (b) experience conducting basic research with a focus on logistics and/or information sciences, (c) experience at all levels of academic teaching, (d) a publication list and list of academic presentations/lectures in accordance with international standards, (e) active connections to real-world practice, demonstrated by a list of completed or ongoing projects in cooperation with companies, (f) experience in acquiring external funding and (g) international experience and networking. In addition to key professional qualifications, the successful candidate should also possess a strong social skill set.

Based on a voluntary basis agreement regarding salary, there is minimum salary according to the collective agreement. Contingent upon the current position (present salary) is an annual gross salary (minimum salary as stated in the collective agreement plus voluntary additional payments) of € 80,000 to € 100,000.

The Johannes Kepler University wishes to increase the proportion of women on the academic faculty and for this reason especially welcomes applications by qualified women. If applicants are equally qualified, a woman will be given preference for this position. At the time of submitting the application, the applicant must not have been employed at an Austrian university for at least the past three years.

Prospective applicants interested in the position are requested to electronically send an application in adherence to the stated criteria, together with the requested documentation (all relevant documents, publication list, list of courses held etc.) to the Rector of the Johannes Kepler University of Linz ([bewerbung@jku.at](mailto:bewerbung@jku.at)) by August 31, 2016. If documents cannot be sent electronically, they are to be sent in triplicate and should arrive at the Rector's office no later than one week after the end of the application deadline.



[www.jku.at/ausschreibungen](http://www.jku.at/ausschreibungen)

Rector Univ.-Prof. Dr. Meinhard Lukas  
Johannes Kepler Universität  
4040 Linz, Österreich





Segelnde Vögel mit Flügelspannen von bis etwa sieben Meter machten im Tertiär weltweit die Meeresgebiete unsicher.

EVOLUTION

# Riesenvögel der Urzeit

Die größten flugfähigen Vögel starben vor 3 Millionen Jahren aus – nach 50 Millionen Jahren unbestrittener Herrschaft der Lüfte. Aber warum? Und wie konnten sie bei ihren Ausmaßen überhaupt fliegen?

Von Daniel T. Ksepka und Michael Habib



**H**eute beherbergt das malerische, weite Hafengebiet der geschichtsträchtigen Stadt Charleston in South Carolina eine bunte Vielfalt an Meeresvögeln. In den Flussmündungen fischen Kormorane und Pelikane, auf den vorgelagerten Inseln nisten Möwen und Reiher. Aber vor 25 Millionen Jahren beherrschten hier wahre Ungetüme den Himmel: Vögel mit Schwingen länger als die Flügel mancher Leichtflugzeuge, bewehrt mit großen, von spitzen Zähnen gesäumten Schnäbeln.

Ausgerechnet auf einem Erweiterungsgelände des internationalen Flughafens der Stadt fanden der Paläontologe Al Sanders, damals Kurator am Charleston Museum, und seine Mitarbeiter schon 1983 Fossilien, die nach ihrer Einschätzung eindeutig von einem Riesenvogel stammten. Doch die Wissenschaftler hatten damals anderes zu tun. So wanderten die Fundstücke ins Lager.

Erst 30 Jahre später deckte einer von uns (Ksepka) ihre Bedeutung auf: Es handelte sich dabei um Überreste des größten bisher gefundenen flugfähigen Vogels. Ich benannte ihn nach seinem Entdecker *Pelagornis sandersi*. Diese neue Spezies gehört zur ausgestorbenen Familie der Pseudozahnvögel oder Pelagornithiden, einer artenreichen, einst weltweit verbreiteten Gruppe sehr großer Seevögel.

Dass diese Vogelfamilie vormals im Luftraum eine herrschende Rolle spielte, wissen Paläontologen seit mehr als 150 Jahren. Doch die wenigen bruchstückhaften Fossilien reichten bisher nicht aus, um sich ein deutliches Bild von ihrer Lebensweise oder gar Flugkunst zu machen. Zudem war unklar, wieso sie überhaupt solche Riesenarten hervorbrachte. Manche dieser Fragen lassen sich nun durch die Untersuchungen an *P. sandersi* besser beantworten. Die Arbeiten des Zweiten von uns (Habib) zum Flugvermögen anderer kolossaler Vögel trugen dazu erheblich bei.

Nach jüngsten Erkenntnissen erlangten die Pseudozahnvögel bald nach dem Untergang der Dinosaurier Bedeutung – streng genommen sind die Vögel selbst Nachfahren einer Dinosaurierlinie. Gleichzeitig mit den Dinosauriern waren auch die ihnen nahe verwandten Flugsaurier (Pterosaurier) ausgestorben, zu denen ebenfalls gigantische Arten zählten. Anscheinend konnten sich die Pseudozahnvögel in

einem Teil von deren Lebensraum einrichten. Dabei scheint ihre Größe den Untersuchungen zufolge eine Anpassung an die Nahrungssuche über dem offenen Meer gewesen zu sein. Trotzdem – nach Meinung der Experten hätte es so große flugfähige Vögel aus physikalischen Gründen eigentlich gar nicht geben dürfen!

Als der französische Paläontologe Édouard Lartet 1857 einen knapp 60 Zentimeter langen fossilen Oberarmknochen eines Vogelflügels beschrieb, dachte er an einen urtümlichen Albatros. Er nannte das Tier *Pelagornis miocaenus*, also schlicht »Meeresvogel aus dem Miozän«, das etwa vor 23 bis vor 5,3 Millionen Jahren lag. Mit solchen Flügeln wäre jener Albatros allerdings doppelt so riesig gewesen wie die größeren modernen Arten. Das hielten die Fachleute damals nicht für möglich.

### Ein Fossil als Weltkriegsopfer

1873 beschrieb der englische Anatom Richard Owen, einer der bedeutendsten Vogelexperten seiner Zeit, den merkwürdigen Schädel eines anderen Riesenvogels, den er *Odontopteryx toliapica* nannte und keiner lebenden Vogelgruppe zuzuordnen vermochte. Es schien sich vielmehr um einen Vertreter einer bisher übersehenen, erst jetzt erkannten eigenen Gruppe sehr großer Arten zu handeln. Später zeigten neue vollständigere Fossilien von *Pelagornis miocaenus*, dass der erwähnte Oberarmknochen von eben diesen Vögeln stammt.

Nach und nach tauchten mehr Fossilien dieser Gruppe auf, und einige verschwanden auch wieder. Einen besonders gut erhaltenen Schädel, der möglicherweise aus dem Nordseegebiet kam, hatte die Universität Königsberg einem brasilianischen Seemann abgekauft. Er gehörte offenbar zu einer neuen Art, die 1910 *Pseudodontornis longirostris* getauft wurde. Doch der Schädel ging in den Wirren des Zweiten Weltkriegs verloren, in dem Königsberg zerstört wurde.

In den nächsten Jahrzehnten entdeckten »Fossiljäger« weitere Arten. Hierzu zählen *Pelagornis orri* aus Kalifornien und *Pelagornis chilensis* aus Chile. Dabei wurden endlich zusammengehörige Skelettteile gefunden. An ihnen konnten sich Forscher nun allmählich an das Aussehen dieser Riesenvögel herantasten und daraus auf ihre Lebensweise schließen. Was dabei herauskam, widersprach jeder Vorstellung – zuvorderst der lange und recht dicke zahnbewehrte Schnabel.

Der Urvogel *Archaeopteryx*, der vor rund 150 Millionen Jahren zur Zeit der Dinosaurier lebte, trug noch »richtige« Zähne in den Kiefern. Doch schon vor dem Untergang der Riesenreptilien vor rund 65 Millionen Jahren bildeten die Vögel keine Zähne mehr aus. Aber die Pelagornithiden entwickelten einen Ersatz: Statt echter im Kiefer verwurzelter Zähne aus Zahnschmelz und Dentin wuchs bei ihnen entlang dem Schnabelrand direkt aus den oberen und unteren Kieferknochen je eine lange Reihe hohler Spitzen. Diese Schein- oder Pseudozähne waren verschieden groß und in einem regelmäßigen Muster arrangiert (siehe Bild rechts). Vor und hinter jedem großen spitzkegelförmigen Zahn saß jeweils eine kurze »Nadel«. Und immer zwei solche kleinen Nadeln bildeten zusammen mit einem halblangen, dünnen Zahn in

#### AUF EINEN BLICK

##### DER GRÖSSTE FLUGVOGEL ALLER ZEITEN

**1** Nach dem Untergang der Dinosaurier und Flugsaurier stieg eine höchst eigenartige Vogelgruppe zur Herrschaft über den Meeren auf: die **Pelagornithiden** oder **Pseudozahnvögel**. Manche von ihnen hatten doppelt so weite Flügelspannen wie Albatrosse.

**2** Die Fossilien der erst kürzlich entdeckten besonders großen Art ***Pelagornis sandersi*** geben Auskunft, wie diese Vögel lebten, sich ernährten, an Land fortbewegten und vor allem flogen.

**3** Ein Rätsel ist ihr **Aussterben**. Möglicherweise trugen schwer wiegende **Klimaumschwünge** durch veränderte Meeresströmungen dazu bei.

der Mitte einen Dreierpack zwischen zwei der großen Kegeltzähne. Die Pseudozähne dürften wie der Schnabel moderner Vögel von einer dünnen Hornschicht überzogen gewesen sein und halfen wohl mindestens beim Packen von Beute.

Der Schnabel war zugleich bemerkenswert beweglich, vermutlich um große Beutetiere zu fassen. So ermöglichte ein kräftiges Gelenk am Ansatz des Oberschnabels, ihn hochzuklappen. Beim Unterschnabel waren die beiden Kieferhälften vorn nicht zusammengewachsen, sondern über ein dehnbare Gelenk verbunden. Auch das Kiefergelenk spricht dafür, dass diese Vögel ihren Schnabel zum Beutefang weit öffnen und seitlich dehnen konnten.

Selbst ihr Körperskelett war unter Vögeln einzigartig. Sie besaßen dermaßen abgeflachte Flügelknochen, dass manche

Paläontologen bei Skelettrekonstruktionen die Ellbogenseite des Oberarmknochens irrtümlich an der Schulter anbrachten. Hohlknochen sind zwar für alle flugfähigen Vögel charakteristisch, doch die Pseudozahnvögel trieben das auf die Spitze. Sämtliche ihrer Flügelknochen hatten extrem dünne Wände – gerade für große Vögel beim Fliegen eine entscheidende Gewichtsersparnis. Allerdings brechen so leichte Knochen etwa bei Kollisionen eher als stärkere. Ein Fluginvalid war sicherlich dem Tod geweiht, weil er sich kein Futter mehr beschaffen konnte.

Noch am normalsten, zumindest in ihrer Form, wirken die Beinknochen. Gegenüber den Ausmaßen der Flügelknochen erscheinen sie allerdings lächerlich klein. Jedoch waren ihre Wände verstärkt, und auch die gestauchte Form machte sie vermutlich recht kräftig und widerstandsfähig. Man könnte sich vorstellen, dass ein Pseudozahnvogel beim Laufen auf dem Boden wenig elegant aussah – wie viele moderne Seevögel ebenso. Vermutlich musste er aber nur zum Flugstart ein kurzes Stück rennen.

Dass die Pelagornithiden eine höchst ungewöhnliche Gruppe darstellen, stand bereits fest, als 2014 meine (Ksepkas) Arbeit über *P. sandersi* erschien. Die neue Art aus Charles-

**Die falschen »Zähne« der Pelagornithiden waren hohl und nicht besonders stark. Weiche Tiere zu fangen vermochten die Riesenvögel mit Hilfe der Pseudozähne dennoch. Das Bild zeigt den fast kompletten fossilen Schädel mit Schnabel ihrer größten Art, *Pelagornis sandersi*, aus verschiedenen Blickwinkeln. Mitsamt Schnabel misst der Kopf fast 60 Zentimeter Länge.**



## Größer, als die Physik erlaubt

Theoretisch dürfte es einen flugfähigen Vogel dieser Größe gar nicht geben. Doch *Pelagornis sandersi* besaß Anpassungen, die ihn flugtauglich und damit zum bisher größten bekannten fliegenden Vogel machten. Vermutlich segelte er hauptsächlich und nutzte dabei entweder starke Winde wie Albatrosse oder ließ sich weite Distanzen tragen wie Fregattvögel. Nicht nur die Fläche der Flügel im Verhältnis zum Körpergewicht, das heißt ihre Flächenbelastung, war dafür entscheidend, sondern auch ihre Form: die »Flügelstreckung«, also die große Länge der Flügel bei einer geringen Breite.

### Schulter

Das Schulterblatt war winzig relativ zur Körpergröße. Vermutlich hatten sich die Muskeln vom Rücken zum Flügel stark zurückgebildet, als die Vogelgruppe im Lauf ihrer Evolution darauf verzichtete, mit kräftigem Flügelschlag zu fliegen. Dazu passt der fast quadratische Kopf des Oberarmknochens, der einer Rotation im Schultergelenk – also Flügelschlag – entgegenstand, dafür aber dazu beitrug, die Flügel beim Gleitflug zu stabilisieren.

### *Pelagornis sandersi* Flügelspanne bis etwa 7 Meter

Die sehr langen, schmalen, spitz auslaufenden Flügel – im Prinzip ähnlich wie bei Albatrossen – ergaben eine hohe »Streckung« (siehe oben) und eine mittlere Flächenbelastung der Flügel. Sicherlich konnte der Vogel gut weite Strecken segeln.

### *Argentavis magnificens* Flügelspanne: um die 6 Meter

Vorher galt dieser Vertreter der Teratornithiden als größter jemals flugfähiger Vogel. Vermutlich besaß er ähnliche Flügel wie Kondore mit geringer Streckung und gefächerten Enden.



### Flügel

Die Flügelknochen waren papierdünn und zugleich steif. Das sparte viel Gewicht, gab den Flügeln aber dennoch genug Widerstandskraft gegen starken Wind.

### Beine

Die kurzen, dicken Beine erlaubten zwar keinen eleganten Gang, jedoch zumindest einen kurzen Anlauf, um in die Luft zu starten. Die vermutlich vorhandenen Schwimmhäute sprechen dabei eher für Starts auf dem Wasser.



### Prachtfregattvogel, *Fregata magnificens*

Der größte Fregattvogel wiegt bei einer Flügelspannweite von fast 2,50 Metern nur 1,5 Kilogramm. Durch die hohe Flügelstreckung und geringe Flächenbelastung kann er langsamer und in größerer Höhe segeln als Albatrosse. Diese fliegen nah über dem Wasser, Fregattvögel kreisen in bis zu 2,5 Kilometer Höhe.

### Großtrappe, *Otis tarda*

Mit bis zu 18 Kilogramm Körpergewicht der Männchen zählt die Art zu den schwersten der heutigen flugfähigen Vögel. Die afrikanische Riesentrappe wiegt nur wenig mehr. Großtrappen haben einen sehr langsamen, gleichmäßigen Flügelschlag. Die langen, breiten Flügel mit einer Gesamtspanne über 2,50 Meter weisen eine mittlere Streckung und Flächenbelastung auf.



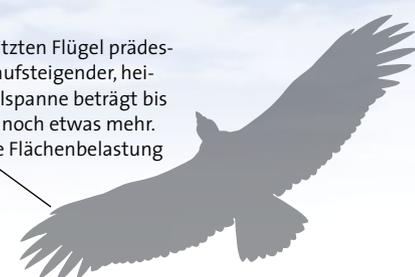
### Hausperling

Durch die niedrige Flügelstreckung, mittlere Flächenbelastung und die abgerundeten Flügel kommt er gut in dichter Vegetation zurecht.



### Kalifornischer Kondor

Die breiten, am Ende geschlitzten Flügel prädestinieren dafür, in vom Land aufsteigender, heißer Luft zu segeln. Die Flügelspanne beträgt bis 3 Meter, beim Andenkondor noch etwas mehr. Die Streckung ist niedrig, die Flächenbelastung mittelgroß.



### Stockente

Die spitzen Flügel mit einer Spannweite von um die 90 Zentimeter, deren hohe Streckung und Flächenbelastung erlauben schnelles Fliegen, jedoch kein gutes Manövrieren. Die Ente kann weit ziehen, aber weder einem Falken entkommen noch elegant landen.



### Rubinkehlkolibri

Er zählt mit bis zu 11 Zentimeter Flügelspanne zu den kleinsten Vögeln. Die Flügelstreckung ist gering, die Flächenbelastung hoch. Mit den kurzen, buttermesserförmigen Flügeln kann er auf der Stelle »schweben«.

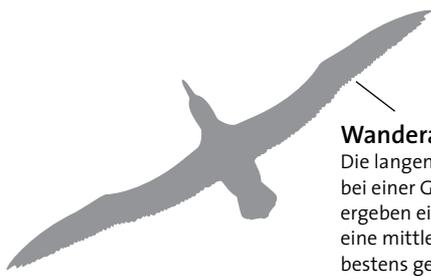


### Kragenhuhn, *Bonasa umbellus*

Das nordamerikanische Rauhfußhuhn hat kurze, breite, gerundete Flügel. Entsprechend niedrig ist deren Streckung und hoch die Flächenbelastung. Der Vogel kann rasch auffliegen und entkommen, doch keine weiten Strecken zurücklegen.

### Wanderalbatros

Die langen, schmalen, spitz auslaufenden Flügel – bei einer Gesamtspanne von rund 3,50 Metern – ergeben einen hohen Streckungswert und eine mittlere Flächenbelastung: Alles in allem ein bestens gerüsteter segelnder Meeresvogel. Unter den heutigen Vögeln kommt er darin *Pelagornis* noch am nächsten.



### Mauersegler, *Apus apus*

Die Flügelform gleicht der von Albatrossen. Der wendige, flinke Vogel wiegt aber nur rund 40 Gramm und hat eine Spannweite von gut 40 Zentimetern. Abgesehen von der Brutzeit hält er sich immer in der Luft auf, vorwiegend über Land. Dabei baut er in den schnellen Gleitflug kürzere Schlagphasen ein.



ILLUSTRATION: RAUL MARTIN; SILHOUETTEN: DAISY CHUNG

ton stellte dennoch alles bisher Bekannte in den Schatten: Allein der Oberarmknochen maß fast einen Meter. Zuvor hatten Biophysiker als größtmögliche Flügelspannweite eines segelnden Meeresvogels 5,10 Meter berechnet; bei höheren Maßen wäre ein Vogel angeblich zu schwer zum Fliegen. Doch für *P. sandersi* kalkulierte ich eine Spannweite bei sehr vorsichtiger Schätzung von mindestens 6 Metern. Dass dies ein Vogel war und er tatsächlich fliegen konnte, bezeugen schon allein die Knochen seiner Gliedmaßen und mehr noch deren oft hauchdünne Wände: Die Fossilien musste man mit größter Vorsicht konservieren, damit sie nicht sofort zerfielen. Der ebenfalls erhaltene Schädel mit seinen charakteristischen Scheinzähnen am Schnabel lässt keinen Zweifel daran, dass dieses Tier zu den Pseudozahnvögeln zählte.

Mit den vorzüglichen Fossilien von Charleston und unter Zuhilfenahme von Überresten anderer Pseudozahnvögel lässt sich das Aussehen von *Pelargonis sandersi* nun im Detail rekonstruieren. Mitsamt Federn muss die Flügelspanne nach meinen Schätzungen zwischen 6,06 und 7,38 Meter betragen haben, abhängig unter anderem von der für die Schwungfedern angenommenen Länge. Bei den heutigen flugfähigen Vögeln hält der Wanderalbatros mit gut 3,20 Metern den Rekord. Die ausgestorbenen, geierähnlichen Teratornitiden, die eine Zeit lang als unübertroffen galten, reichten nach neuen Erkenntnissen selbst mit ihrer größten Spezies, *Argentavis magnificus*, lange nicht an *P. sandersi* heran. Nach dem Umfang seiner Beinknochen müsste Letzterer über 20 und könnte vielleicht sogar an die 40 Kilogramm gewogen haben. Das ist zwar erheblich mehr als die etwa acht Kilogramm des Wanderalbatros. Doch der Körper von *P. sandersi* war im Verhältnis zu den Flügeln klein, ja geradezu zierlich, und der Knochenbau besonders grazil.

Die Flugweise ausgestorbener Tiere zu rekonstruieren, ist heute noch knifflig. Allerdings stehen uns dafür mittlerweile recht ausgeklügelte Analysemethoden zur Verfügung. Wir zogen für unsere Berechnungen sowohl Studien an heutigen Vögeln als auch Gesetzmäßigkeiten der Aerodynamik heran. Angesichts ihrer unglaublich langen Flügel dürften die Pseudozahnvögel vor allem gesegelt sein. Um Auftrieb zu erzeugen, mussten sie also nicht damit schlagen. Stattdessen hielten sie ihre Flügel ausgebreitet und nutzten den Wind oder aufsteigende warme Strömungen. Die heutigen segelnden Vögel verwenden verschiedene Tricks, um sich in der Luft zu halten. Benutzten *P. sandersi* und seine Verwandtschaft eine dieser Techniken?

Geier, darunter die Kondore, besitzen recht breite Flügel im Verhältnis zum Körpergewicht. Je größer die relative Flügelfläche, umso niedriger ist deren so genannte Flächenbelastung, also die Kraft, die eine bestimmte Fläche erfährt. Außerdem können Geier die Federn an den Flügelspitzen auseinanderspreizen und so den Luftwiderstand vermindern. Beides zusammen erlaubt ihnen, über dem Land aufsteigende warme Luftströmungen auszunutzen, um sich in die Höhe zu schrauben und lange oben zu kreisen. Für ihre Art des Segelns benötigen sie nicht so lange Flügel wie See-

vögel, was ihnen in felsigem und baumbewachsenem Gelände zugutekommt.

Die räuberischen, äußerst wendigen, ebenfalls ziemlich großen Fregattvögel segeln in anderer Weise. Als Seevögel tropischer und subtropischer Zonen nutzen sie die Thermik über dem Meer aus. Dazu sind sie mit schmaleren, spitz auslaufenden Flügeln ausgestattet, deren Gesamtspanne bei manchen Arten fast zweieinhalb Meter beträgt. Sie zählen zu den am leichtesten gebauten lebenden Vögeln, was sich ebenso in der außerordentlich geringen Flächenbelastung der Flügel widerspiegelt. Dadurch können sie in großer Höhe weite Distanzen gleiten, um dann plötzlich hinabzustürzen und dicht an der Wasseroberfläche Beute zu schlagen, zum Beispiel fliegende Fische oder davonspritzende Fischschwärme.

### Das Beste von Albatros und Fregattvogel

Völlig anders machen es Albatrosse. Sie besitzen zwar auch sehr lange, schmale, spitz auslaufende Flügel; doch sie sind relativ zur Flügelfläche schwerer als Fregattvögel. Deswegen benötigen sie zum Segeln kräftigen Wind. Nach dem Prinzip des dynamischen Segelflugs nutzen sie Scherwinde über dem Wasser: und zwar gleich gerichtete, aber in einzelnen Höhenschichten verschieden starke Winde. Nahe der Meeresoberfläche stellen sie sich gegen den dort schwächeren Wind, lassen sich von ihm hochtragen und machen dann eine Schleife, so dass der heftigere Wind, der in größerer Höhe herrscht, sie ein weites Stück mitnimmt. Dabei sinken sie langsam wieder tiefer – und der Zyklus beginnt von vorn. Diese Technik des beständigen Auf und Ab vermittelt ihnen genug Energie, sie ohne Flügelschlag schnell weit zu befördern. Ein besonderer Albatros legte 2004 neun Stunden lang ohne Pause durchschnittlich 127 Kilometer stündlich zurück, in dem Fall begünstigt durch einen Sturm von der Antarktis her.

Nach unseren Untersuchungen könnten die Pseudozahnvögel je nach Situation beide letztgenannten Techniken verbunden haben. Dieses Muster findet sich bei heutigen Vögeln nicht. Aerodynamisch betrachtet hatten sie eine hohe Flügelstreckung – was bedeutet: Die Flügel waren sehr lang und schmal. Trotzdem bildeten sie relativ viel Fläche. Dank dessen konnte eine große Art wie *P. sandersi* bei kräftigem Wind vermutlich ähnlich wie Albatrosse im dynamischen Segelflug Schleifen ziehen und dabei die Windenergie ausnutzen, um zuerst hoch und dann weit getragen zu werden. Und dank der großen Fläche und der hohen Flügelstreckung war dieser Vogel bei ruhiger See zudem fähig, wie Fregattvögel mit wenig Anstrengung tausende Kilometer am Stück zurückzulegen. Für die größten Arten betrug unserer Berechnung zufolge die effizienteste Fluggeschwindigkeit 40 Kilometer pro Stunde. Wahrscheinlich konnte *P. sandersi* bei Windstille von 45 Metern Flughöhe aus bereits mehr als einen Kilometer weit ohne Flügelschlag gleiten.

Wir vermuten, dass dieser größte aller Flugvögel die meiste Zeit in der Luft zubrachte. Doch mindestens zum Nisten musste er ab und zu landen – und irgendwann wieder auffliegen. Früher glaubten manche Forscher, dass er mit seinen ge-

drungenen, auffallend kurzen Beinen schlecht starten konnte. Wie erst vollständigere Fossilfunde von Arten wie *P. chilensis* und *P. sandersi* zeigten, passten die Beinproportionen der Pelagornithiden jedoch gut zu ihrem ziemlich kompakten Körper. Wie Habibs Analysen dazu, die er auf einem internationalen Paläontologentreffen vorstellte, ergaben, vermochte *Pelagornis* durchaus kurze Strecken zu rennen, und zwar wohl besonders gut auf dem Wasser. Höchstwahrscheinlich besaßen diese Vögel Schwimmhäute. Die Beinknochen der im Verhältnis zur Flügelfläche nicht allzu schweren Tiere erscheinen immerhin stark genug für eine ausreichend kräftige Bemuskelung, um die nötige Geschwindigkeit zum Abheben zu erreichen. An Land mag *P. sandersi* eher unbeholfen gelaufen sein, doch auf dem Wasser dürften dem Vogel fantastische Starts gelungen sein.

Warum wurden die Pelagornithiden überhaupt dermaßen riesig? Groß zu sein hat – nicht nur für Vögel – auch Nachteile: Beispielsweise steigt der Futterbedarf, zum Nisten beanspruchen größere Arten oft ausgedehntere Gebiete, und häufig bilden sie nur ziemlich kleine Populationen. Dennoch muss sich ein Gigantismus für verschiedene Flugtiere ausgezahlt haben. Unsere Zeit ohne wirkliche Riesenformen in der Luft ist eher eine Ausnahme, denn in den letzten 120 Millionen Jahren beherrschten meistens irgendwelche von ihnen den Himmel.

Zu den Vorteilen zählt, dass Langstreckenflüge effizienter werden, weil man für die gleiche Strecke weniger Energie verbraucht als eine kleinere Art. Zudem hat man Zugriff auf größere Beute und kann kleineren Vertretern Nahrung sogar stehlen. Insbesondere hat ein großes Tier weniger Fressfeinde. Besonders in der Luft muss es kaum jemanden fürchten.

Die Flugsaurier oder Pterosaurier beherrschten die Lüfte während des Erdmittelalters viele Millionen Jahre lang. Sie existierten etwa zeitgleich mit den Dinosauriern und starben vor rund 65 Millionen Jahren auch mit ihnen aus. Flugsaurier der Meere erbeuteten wahrscheinlich Fische und verschiedene wirbellose Tiere. Ihr Körperbau weist sie als hervorragende Langstreckenflieger aus. Als diese lange sehr erfolgreiche Tiergruppe unterging, wurden ihre diversen »ökologischen Nischen« sozusagen frei. Eine davon war die der großen Meeressegler.

Eben diese Rolle ergriffen anscheinend ungefähr zehn Millionen Jahre später die Pseudozahnvögel. Das vermuten Forscher, weil man ihre Fossilien fast nur von Sedimenten ozeanischer Umwelten kennt. Demnach dürften sie hauptsächlich Meerestiere gefressen haben. Ihre Pseudozähne am Schnabelrand waren jedoch lange nicht so stark wie richtige Zähne, so dass sie sich vermutlich bevorzugt an weiches Getier wie Tintenfische und Aale hielten, die sie an der Wasseroberfläche erwischten. Womöglich jagten sie aber auch anderen Vögeln ihre Beute ab. Zumindest tun das manche heutigen großen Meeresvögel regelmäßig. Raubmöven etwa, wie die bussardgroße Skua, drangsalieren andere Vögel so lange in der Luft, bis diese Futter wieder hervorwürgen. Die Pelagornithiden waren in diesem Ökosystem die bei Weitem

größten Vögel. Vorstellbar sind sie außerdem als Nesträuber von Küken, ein Verhalten, das von Skuas, Riesensturmvögeln und sogar einigen Pelikanen bekannt ist.

Die Pelagornithiden blieben jedoch nicht die einzigen Riesenvögel des Tertiär, welche die sozusagen vakanten ökologischen Rollen der Pterosaurier ausfüllten. Vor rund 23 Millionen Jahren kamen die schon erwähnten Teratornithiden hinzu, die erst vor 11 700 Jahren, am Ende des Pleistozäns, ausstarben, also viel später als die Pseudozahnvögel. Sie besaßen allerdings verhältnismäßig kürzere, breitere Flügel und einen schwereren Körper. Vermutlich flogen und jagten sie eher wie Kondore.

Die letzten Pelagornithiden lebten vor etwa drei Millionen Jahren, im Pliozän. Bisher bleibt rätselhaft, warum sie nach 50 Millionen Jahren plötzlich völlig verschwanden. Im Pliozän bildete sich die Landbrücke von Panama zwischen Nord- und Südamerika. Damit änderten sich die Strömungen in Atlantik und Pazifik gravierend. Doch man kann sich schwer vorstellen, wieso ausgerechnet dieses Ereignis und seine Auswirkungen eine erfolgreiche Gruppe ausradieren konnten, die zuvor etliche einschneidende Wandlungen des Klimas, der Meeresströmungen und Tierwelten überstanden hatte.

Waren die Pseudozahnvögel zuletzt womöglich überspezialisiert? Anfangs hatten sie nur die Größe von Albatrossen. Diese kleineren Vertreter verschwanden aber mit der Zeit, und schließlich gab es nur noch riesige Arten. Vielleicht waren jene Giganten viel mehr als kleinere Seevögel an sehr spezielle Ernährungsstrategien und Windverhältnisse angepasst. Ihr Erfolg wäre ihnen dann letztlich zum Verhängnis geworden. ~

## DIE AUTOREN



**Daniel T. Ksepka** (links) arbeitet als Paläontologe und wissenschaftlicher Kurator am Bruce Museum in Greenwich (Connecticut). Er erforscht die Evolution von Vögeln und Reptilien. **Michael Habib** ist

Anatom und an der University of Southern California in Los Angeles tätig. Er untersucht die Biomechanik ausgestorbener Tiere, darunter von Vögeln und Flugsauriern.

## QUELLEN

**Habib, M.:** Constraining the Air Giants: Limits on Size in Flying Animals as an Example of Constraint-Based Biomechanical Theories of Form. In: *Biological Theory* 8, S.245–252, 2013

**Ksepka, D. T.:** Flight Performance of the Largest Volant Bird. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111, S. 10624–10629, 2014

## LITERATURTIPP

**Dyke, G.:** Zeitgenossen der Dinosaurier. In: *SdW* 1/2011, S. 30–35  
*Erkenntnisse zur Abstammung der modernen Vögel*

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1414905](http://www.spektrum.de/artikel/1414905)

# Zur richtigen Zeit am richtigen Ort

Einen Körper aufzubauen, ist nicht einfach. Spezielle Gene und Proteine sorgen dafür, dass sich die Zellen während der Entwicklung richtig anordnen. Sonst drohen Fehlbildungen.

Von Paul N. Adler und Jeremy Nathans

**O**b Fisch, Frosch oder Mensch: Sie alle beginnen ihre Existenz mit einer einzigen Zelle, aus der letztlich ein höchst organisierter und komplizierter Organismus hervorgeht. Die befruchtete Eizelle teilt sich in zwei, vier, acht Zellen – und nach wenigen Wochen sind es bereits Zehntausende. Zu diesem Zeitpunkt hat der ursprünglich kugelförmige Zellhaufen eine längliche Form angenommen, ist an einem Ende ausgebeult und dicker, und über die ganze Länge verläuft eine flache Furche. Bald darauf wird diese tiefer, ihre Wände neigen sich einander zu, bis sich die Zellen berühren und zusammenkleben. Damit entsteht ein langes, hohles Rohr, aus dem sich später am verdickten Ende das Gehirn und auf der anderen Seite das Rückenmark entwickelt.

Damit die Zellen sich in einem Embryo derart präzise anordnen können, müssen sie irgendwie spüren, wo sie sich im Verhältnis zum übrigen Organismus befinden und wo in diesem vorn und hinten, oben und unten ist. In den letzten Jahrzehnten sind wir und andere Entwicklungsbiologen der Frage nachgegangen, wie dieses Orientierungssystem der Zellen funktioniert. Dabei haben wir eine entscheidende Komponente entdeckt: ein System aus mehreren Proteinen, die in jeder Zelle gemeinsam eine Art Miniaturkompass bilden. Ohne diesen könnten sich Herz, Lunge, Haut und andere Organe nicht richtig entwickeln. Verändert sich eines der fraglichen Proteine beim Menschen durch eine Mutation, sind schwere Geburtsfehler die Folge.

Zwar gibt es noch viele unbeantwortete Fragen zur Funktionsweise des Orientierungssystems, doch lassen bereits unsere bisherigen Entdeckungen grundlegende Entwicklungsprozesse im Tierreich in einem neuen Licht erscheinen. Am meisten wissen wir bisher über die Funktion des zellulären Kompasses in Epithelzellen. Sie bedecken gewöhnlich eine Gewebeoberfläche, indem sie Schichten von der Dicke

lediglich einer Zelle bilden. Dabei kann jede dieser Zellen mit Hilfe der von uns und anderen Forschern gefundenen Proteine spüren, in welche Richtung im Körper ihre jeweiligen Begrenzungen zeigen.

Wissen die Zellen eines Organismus, wo sie sich in diesem befinden, profitiert das Lebewesen von einem entscheidenden evolutionären Vorteil: Seine Gewebe, gerade auch die komplexer aufgebauten, müssen nicht mehr in alle Richtungen symmetrisch sein. Stattdessen können sich einzelne Teile davon spezialisieren. Beispielsweise erkennen die haarförmigen Zilien am einen Ende des Schneckengangs im Ohr hohe Frequenzen, die am anderen Ende niedrige. Eine solche Asymmetrie einer Gewebeschicht bezeichnen Forscher als planare Polarität.

Die Gene, deren Proteinprodukte für die planare Polarität sorgen, ähneln sich sehr auch bei entwicklungsgeschichtlich weit voneinander entfernten Arten, etwa zwischen Säugetieren und Insekten. Entsprechend sind die zugehörigen Gene sehr alt: Sie entstanden schon vor mehr als 500 Millionen Jahren im Zuge der damaligen Herausbildung des Tierreichs.

Vieles, was wir über die planare Polarität wissen, haben Forscher seit Mitte des 20. Jahrhunderts durch Studien an In-

**Die Entwicklung eines Menschen wird anfangs unter anderem durch die Polarität neu entstehender Zellen gesteuert. Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen im Uhrzeigersinn den Querschnitt eines Spermiums, das sich noch im Hoden befindet (1) und wie es sich der viel größeren Eizelle nähert (2). 22 Tage nach der Befruchtung (3) haben die Zellen der Neuralleiste (gelb) noch nicht jene Röhre geformt, aus der später Gehirn und Rückenmark hervorgehen. Diese beiden Organe sind dann sechs Wochen nach der Befruchtung deutlich zu erkennen (4).**



sekten herausgefunden. Der Einfachheit halber konzentrierten sie sich mit ihren Experimenten nicht auf innere Organe, sondern auf die leichter zugängliche harte Außenhaut (Cuticula), die man bei den meisten ausgewachsenen Insekten findet. Ausgeschieden wird die Cuticula von einer unmittelbar darunter liegenden Schicht weicherer Epithelzellen, der Epidermis.

Im Mikroskop zeigt sich die Außenseite der Cuticula als klar geordnete Landschaft aus Leisten und Schuppen, die in regelmäßigen Abständen mit Haaren und Borsten versehen ist. Manche dieser Auswüchse sprechen auf Druckveränderungen oder chemische Substanzen an und tragen so dazu bei, dass die Tiere auf ihre Umwelt reagieren können. Außerdem sind solche Haare oder Borsten fast immer parallel zu ihren Nachbarn angeordnet, so dass alle Spitzen in die gleiche Richtung weisen. An den Flügeln zeigen die Haare vom Körper weg, am Rumpf weisen sie in die vom Kopf abgewandte Richtung. Wie die Wände des entstehenden Neuralrohrs wissen anscheinend auch diese Zellen, wo vorn und hinten liegt. Außerdem scheinen sie ermitteln zu können, in welcher Richtung der Abstand zu anderen Geweben kleiner (proximal) oder größer (distal) ist.

Wie Peter Lawrence von der University of Cambridge, Michael Locke von der University of Western Ontario und andere schon vor über 40 Jahren mit einer Reihe bahnbrechender Experimente nachweisen konnten, tauschen Zellen solche Richtungsinformationen untereinander aus. Die Forscher schnitten damals bei Wanzen der Gattungen *Rhodnius* und *Oncopeltus* winzige Hautquadrate aus jener Epidermisschicht heraus, die das Außenskelett hervorbringt. Sie drehten die Stückchen dann um 180 Grad und pflanzten sie am Bauch der Insekten wieder in die Epidermis ein.

Nun könnte man annehmen, dass die Leisten oder Borsten, die in der Cuticula aus dem verdrehten Transplantat

wuchsen, im Vergleich zu ihrer Umgebung in die entgegengesetzte Richtung wiesen. Aber nach der nächsten Häutung, als die Insekten ihr altes Außenskelett abgelegt und ein neues aufgebaut hatten, beobachteten die Wissenschaftler eine verblüffende Veränderung: An den Grenzen des verpflanzten Quadrats bildeten sich wunderschöne Wirbel. Deren Verteilung zufolge hatten benachbarte Zellen ihre Orientierung jeweils so angepasst, dass die Unterschiede möglichst gering blieben. Offensichtlich konnten die Zellen sich also darüber verständigen, in welche Richtung ihre Leisten und Borsten

zeigen sollten. Aber wie machten sie das?

Um die dahinterstehenden zellulären und molekularen Mechanismen aufzuklären, brauchte man eine neue Taktik – einen genetischen Ansatz statt chirurgischer Eingriffe. Und wenn es um Genetik geht, ist kein anderes Insekt so gut erforscht wie die bereits seit 1910 eingehend untersuchte Taufliege *Drosophila melanogaster*.

Seit den 1980er Jahren beschäftigten sich einige Wissenschaftler, darunter auch einer von uns (Adler), näher mit der Gewebepolarität bei Taufliegen. Dazu identifizierten wir mutierte Taufliegen mit defektem Polaritätssystem, die wir daraufhin genauer analysierten. Das ermöglichte uns Rückschlüsse auf die normale Funktion des Systems. So weisen etwa die Haare auf den Flügeln von *Drosophila* genau wie die am Bauch der Wanzen einheitlich in die gleiche Richtung, in diesem Fall zum äußeren Flügelende. Bei Mutationen in einem Gen namens *frizzled* sehen die Fliegen dagegen völlig unfrisiert aus: Viele Haare zeigen in falsche Richtungen. Ein ähnliches Muster erzeugen Mutationen in dem Gen *dishevelled*. Die Übereinstimmungen deuten darauf hin, dass beide Gene zum gleichen System gehören, das die Orientierung der Zellen kontrolliert.

Seit den 1980er Jahren beschäftigten sich einige Wissenschaftler, darunter auch einer von uns (Adler), näher mit der Gewebepolarität bei Taufliegen. Dazu identifizierten wir mutierte Taufliegen mit defektem Polaritätssystem, die wir daraufhin genauer analysierten. Das ermöglichte uns Rückschlüsse auf die normale Funktion des Systems. So weisen etwa die Haare auf den Flügeln von *Drosophila* genau wie die am Bauch der Wanzen einheitlich in die gleiche Richtung, in diesem Fall zum äußeren Flügelende. Bei Mutationen in einem Gen namens *frizzled* sehen die Fliegen dagegen völlig unfrisiert aus: Viele Haare zeigen in falsche Richtungen. Ein ähnliches Muster erzeugen Mutationen in dem Gen *dishevelled*. Die Übereinstimmungen deuten darauf hin, dass beide Gene zum gleichen System gehören, das die Orientierung der Zellen kontrolliert.

### Sechs Gene steuern die Zellpolarität

Zwei Forschergruppen haben die Frage systematisch untersucht, wie sich *frizzled*, *dishevelled* und andere Mutationen bei Taufliegen auf verschiedene Teile der Cuticula auswirken; die eine wurde von David Gubb und Antonio García-Bellido geleitet, die damals an der Universidad Autónoma de Madrid arbeiteten, die andere von Adler. Wie wir und andere letztlich herausfanden, gibt es bei *Drosophila* sechs Gene, die als Schlüsselkomponenten an dem Polaritätssystem mitwirken. Zwei davon, die Adler 1998 isolierte, verhalten sich ganz ähnlich wie *frizzled*. Mutationen in einem dieser Gene lassen eine Reihe von Haarwirbeln entstehen, die an die Pinselstriche in Gemälden von Vincent van Gogh erinnern. Deshalb gab er einem Gen den Namen *van Gogh*, das andere nannte er nach einem von dessen berühmtesten Bildern *starry night*.

Ein weiterer Schritt zur Aufklärung der zellulären Grundlagen planarer Polarität bei *Drosophila* war schon einige Jah-

## Mutationen in einem dieser Gene lassen Haarwirbel entstehen, die an die Pinselstriche von van Gogh erinnern

### AUF EINEN BLICK

#### JEDE ZELLE HAT IHREN PLATZ

**1** Alle **Tierzellen** müssen wissen, wo sie sich im Verhältnis zum übrigen Körper befinden. In den letzten Jahrzehnten konnten Wissenschaftler einige entscheidende Proteine identifizieren, mit deren Hilfe Zellen spüren, in welcher **Richtung** im Tier vorn oder hinten, oben oder unten sind.

**2** Diese **Gewebepolaritätsproteine** sind so wichtig, dass sich die zugehörigen Gene in der guten halben Milliarde Jahre seit ihrer Entstehung kaum verändert haben; sie finden sich in Taufliegen und Mäusen ebenso wie in Menschen.

**3** Ihre Wirkung lässt sich etwa an **Haarwuchsmustern** untersuchen. Laut einem Modell verbreiten die Proteine Informationen über die Position im Körper mittels **Anziehungs- und Abstoßungseffekten** quer durch Zellschichten.



SCIENCE SOURCE / ANATOMICAL TRAVELOGUE

Das computergenerierte Bild zeigt deutlich die Neuralrinne eines 22 Tage alten menschlichen Embryos. Aus den seitlichen Verdickungen gehen später die Skelettmuskeln und Knochen hervor.

re früher gelungen. Lily Wong, die damals als Doktorandin in Adlers Labor arbeitete, untersuchte die Entwicklung der Flügel und wollte wissen, wie sich die Haare dabei anordnen und wie Mutationen der Gewebepolaritätsgene diesen Prozess beeinflussen. Sie stellte fest: Jede Zelle bildet an ihrem äußersten Ende ein Haar, und bei Mutationen, durch die sich die Polarität ändert, verschiebt sich der Entstehungsort der Haare. Daher stellten Wong und Adler die Hypothese auf, dass die polaritätsbestimmenden Proteine an einem Signalweg mitwirken, der die Struktur des Zytoskeletts bestimmt – jenes Geflechts aus polymerisierten Proteinen, das Form und Bewegungen der Zelle steuert.

Die lokale Signalübermittlung von Zelle zu Zelle konnte Charles R. Vinson nachweisen, der damals ebenfalls Doktorand in Adlers Labor war. Er erzeugte in einem sich normal entwickelnden Flügel kleine Stellen mit mutiertem *frizzled*-Gen. Dadurch drehten benachbarte, nicht mutierte Zellen die

Orientierung ihrer Haare um ungefähr 180 Grad. Dagegen wurden normale Zellen, die von dem mutierten Abschnitt weiter entfernt waren, nicht beeinflusst. Laut der Interpretation von Vinson und Adler steuert demnach das Polarityssystem die Orientierung der Zellen durch Signale, die nur auf kurze Entfernungen wirken. Ein über größere Strecken wirkender Faktor, beispielsweise ein chemischer Gradient, scheint hierfür nicht erforderlich zu sein.

Die Idee, Polaritätsproteine könnten die Ausbildung des Zytoskeletts steuern, brachte einige Forscher darauf, die genaue Verteilung dieser Moleküle in der Zelle zu studieren. Tatsächlich kommen sie dort nicht gleichmäßig vor, können also auf den verschiedenen Seiten einer Zelle unterschiedliche Wirkungen haben.

Bis 2005 hatten Tadashi Uemura von der Universität Kyoto in Japan, Jeffrey Axelrod von der Stanford University, Marek Mlodzik von der Icahn School of Medicine at Mount Sinai sowie David und Helen Strutt von der University of Sheffield in England eine Reihe verblüffender Verteilungsmuster gefunden. So sammeln sich in der Einzelschicht an der Flügeloberfläche von Taufliegen die Van-Gogh-Proteine in jeder einzelnen Zelle bevorzugt auf jener Seite, die dem Rumpf am nächsten ist. Frizzled-Proteine reichern sich dagegen auf der gegenüberliegenden Seite an, dem Flügelende zu. Die Produkte von *starry night* findet man wiederum auf beiden Seiten der Zellen.

### Ein komplexes Wechselspiel von Anziehung und Abstoßung

Die asymmetrische Verteilung legte ein Modell für die Funktionsweise des Orientierungsmechanismus nahe, das auch von einer großen Zahl experimenteller Befunde gestützt wird. Es geht von zwei Typen von Wechselwirkungen zwischen den Van-Gogh- und Frizzled-Proteinen aus: gegenseitige Anziehung und Abstoßung. So ziehen beispielsweise die Van-Gogh-Proteine auf der körpernahen Seite der Zellen anscheinend die direkt gegenüberliegenden Frizzled-Proteine in der Nachbarzelle an. Innerhalb derselben Zelle dagegen stoßen Van-Gogh- und Frizzled-Proteine einander ab, so dass sie auf den entgegengesetzten Seiten der Zelle zu liegen kommen. Die Mechanismen der hypothetischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte kennen wir noch nicht; sie werden derzeit intensiv erforscht.

Wie breiten sich laut diesem Modell Richtungssignale in einer Zellgruppe aus? Angenommen, in einer einlagigen Zellschicht sind die Proteine für planare Polarität in jeder einzelnen Zelle mehr oder weniger zufällig verteilt. Nun fügt man an der linken Seite eine neue Reihe von Zellen an, in denen sich die Van-Gogh-Proteine links und die Frizzled-Proteine rechts aufhalten. Dann würden die Frizzled-Moleküle in der neuen Zellreihe die bis dahin zufällig verteilten Van-Gogh-Proteine in der nächsten Reihe nach links ziehen (siehe Kasten »Gegensätzliche Pole«).

In der zweiten Reihe würde sich Frizzled daraufhin auf der rechten Seite der Zellen anreichern, weit weg vom sich links

sammelnden Van Gogh. Die Frizzled-Proteine der zweiten Zellreihe würden dann ihrerseits die Van-Gogh-Moleküle der benachbarten dritten Reihe anziehen. Auf diese Weise könnte sich das asymmetrische Verteilungsmuster der Gewebepolaritätsproteine von einer Reihe zur nächsten durch die gesamte Zellschicht fortpflanzen.

Das Modell sagt insbesondere voraus, dass die asymmetrische Verteilung der Proteine sehr stabil sein sollte: Tanzt eine Zelle aus der Reihe, indem sich die Polaritätsproteine in ihr nicht richtig verteilen, bringen Signale ihrer Nachbarn auf beiden Seiten sie wieder auf Kurs.

Angeregt durch die Experimente von Gubb und Adler mit *Drosophila* suchten andere Wissenschaftler wie Jeremy Nathans auch bei Wirbeltieren nach Genen für planare Polarität. Ihre Experimente und nachfolgende umfangreiche Genomsequenzierungen brachten überall im Tierreich bemerkenswert ähnliche Polaritätsgene ans Licht. Bei Pflanzen scheint es hingegen keine derartigen Gene zu geben. Die hübschen Muster vieler Blüten und anderer Pflanzenorgane dürften also durch völlig andere Polaritätssysteme entstehen.

Säugetiere besitzen aus bisher ungeklärten Gründen mehrere Versionen jedes Polaritätsgens von *Drosophila*.

Beim Menschen und anderen Säugern gibt es zum Beispiel drei *starry-night*-Gene, Tauflieden besitzen nur eines. Auch die Gene *frizzled* und *dishevelled* liegen jeweils in mehreren Kopien vor.

Nathans versucht herauszufinden, wie das System der planaren Polarität bei Säugetieren im Detail funktioniert. Als geeigneter Ausgangspunkt erwiesen sich wiederum verschiedene Strukturen der Haut, etwa die Haare. Anders als im Flügel der Taufliege entspringt ein Haar beim Menschen nicht einer einzelnen Zelle, sondern einem Follikel mit Dutzenden oder Hunderten von Zellen. Und im Gegensatz zu den jeweils benachbarten Zellen des Insektenflügels berühren sich die Haarfollikel des Menschen nicht unmittelbar; sie sind meist durch Dutzende von Hautzellen getrennt.

Aber trotz solcher Unterschiede führt das Inaktivieren von Polaritätsgenen bei Insekten und Säugetieren zu ganz ähnlichen Resultaten. Im Jahr 2004 schaltete Nino Guo, der damals als Doktorand in Nathans Labor arbeitete, das Gen *Frizzled 6* bei Mäusen mit gentechnischen Methoden aus. Daraufhin waren die Haarfollikel nicht mehr parallel zueinander ausgerichtet, sondern bildeten eine Reihe

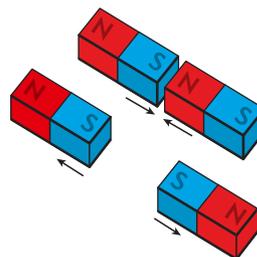
## Die hübschen Muster vieler Blüten und anderer Pflanzenorgane dürften durch völlig andere Polaritätsgene entstehen

### Gegensätzliche Pole

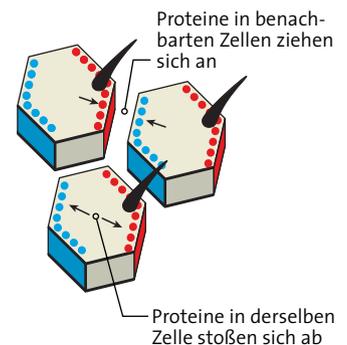
**Magnete lagern sich so zusammen**, dass entgegengesetzte Pole (hier: rot und blau) sich anziehen, während gleiche Pole sich abstoßen. Etwas Ähnliches könnte sich in Epithelzellen abspielen, die typischerweise eine Einzelzellschicht bilden. Einige Orientierungsproteine stoßen einander ab, wenn sie sich in derselben Zelle befinden, und ziehen sich an, wenn sie in benachbarten Zellen vorkommen (ganz rechts). Solche negativen und positiven Interaktionen lassen die unten dargestellten blauen und roten Bereiche entstehen.

Da die Proteine sich von einer Reihe zur nächsten abwechselnd abstoßen und anziehen, breitet sich das asymmetrische Muster aus, bis die gesamte Zellschicht polarisiert ist.

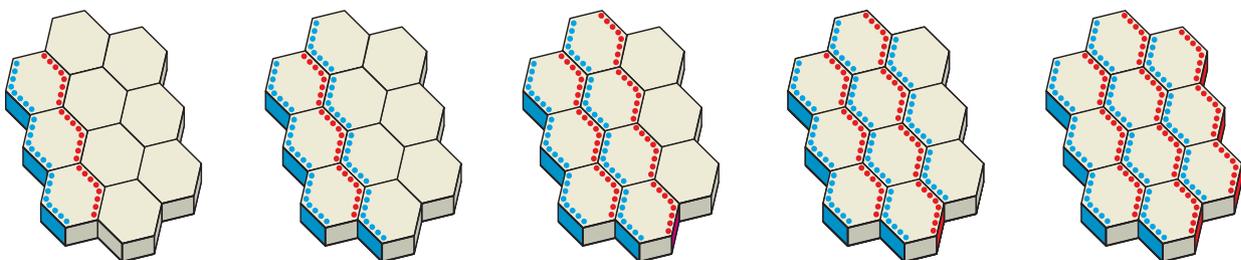
#### Polarität in Magneten



#### Polarität in Epithelzellen



Ausbreitung des Polaritätsmusters mit der Zeit →

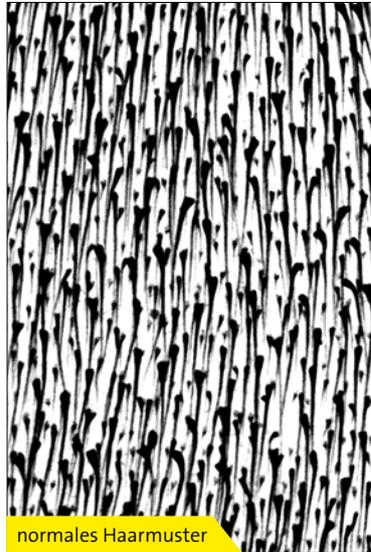


Epithelzellschicht

JEN CHRISTIANSEN

## Ordnung muss sein

**Was ihre Haut angeht**, haben Fische, Vögel und Säugetiere ein wichtiges Merkmal gemeinsam: Egal ob die Außenseite ihres Körpers nun von Schuppen, Federn oder Haaren bedeckt ist, immer organisiert sie sich nach einem regelmäßigen Muster, das den Tieren unter anderem einen besseren Schutz gegen die Elemente verschafft. Forscher haben ein halbes Dutzend Gene isoliert, mit denen die Zellen Richtungen erfassen und so bestimmte Muster ausprägen können. Beispielsweise wachsen die Haarzellen einer Maus parallel zueinander wie im linken Foto. Ist dagegen eines dieser Polaritätsgene (*Frizzled 6*) mutiert, bilden die Haare Wirbel (rechts).



MIT FRODL. GEN VON JEREMY NATHANS

von Wirbeln, die stark an die Muster auf den Flügeln der *Drosophila*-Mutanten erinnerten (siehe Kasten »Ordnung muss sein«).

Die vielleicht größte Überraschung stellte sich jedoch ein, als man in Nathans Labor der Frage nachging, wie die Nervenzellen im Säugetiergehirn miteinander verknüpft sind. Die wichtigsten Leitungsbahnen in diesem komplexen Netzwerk werden bereits während der Embryonalentwicklung angelegt.

Einzelne Neurone senden Axone aus – Fasern, die im Gehirn große Entfernungen überbrücken. Diese wachsen auf festgelegten Wegen auf ihre Zielpunkte zu. Nathans und sein Kollege Yanshu Wang von der Johns Hopkins University School of Medicine wiesen nach, dass das Gen *Frizzled 3* entscheidend daran mitwirkt, die Axone durch das Labyrinth des embryonalen Nervengewebes zu dirigieren. In Mäusen ohne *Frizzled 3* fanden die Axone ihren Weg nicht mehr und wuchsen in die falsche Richtung.

Als Nächstes wollte Nathans Arbeitsgruppe herausfinden, ob das Gen *Frizzled 6*, das für die Verteilung der Haare derart wichtig ist, *Frizzled 3* ersetzen kann und umgekehrt. An gentechnisch veränderten Mäusen konnten die Forscher beobachten, dass *Frizzled 3* einen voll funktionsfähigen Stellvertreter für *Frizzled 6* abgibt und bei dessen Abwesenheit ein normales Haarmuster erzeugt. Umgekehrt konnte *Frizzled 6* aber nur teilweise die Rolle von *Frizzled 3* beim Auswachsen von Axonen übernehmen. Die Polaritätssysteme in der Haut und im Gehirn von Mäusen ähneln sich also, sind aber nicht identisch.

Die Zellpolarität spielt im Leben aller Wirbeltiere einschließlich des Menschen eine wichtige Rolle, und das von den ersten Tagen der Embryonalentwicklung bis hin zu jedem einzelnen Atemzug während des ganzen Lebens. Dabei transportieren die Zilien in unseren Atemwegen nämlich

sich ansammelnden Schleim immer nur in eine Richtung: nach oben und aus dem Brustkorb heraus.

Unter den vielen genetischen Veränderungen, die zu der unglaublichen Vielgestaltigkeit des Tierreichs geführt haben, waren auch solche in Erbfaktoren, die Polarität signalisieren. Diese Gengruppe und die zugehörigen Proteine erwiesen sich im Lauf der letzten halben Milliarde Jahre als so erfolgreich, dass Tiere sich ihrer seither bedienen, um die verschiedensten evolutionären Herausforderungen zu meistern. ~

### DIE AUTOREN



**Paul N. Adler** (links) ist Professor für Biologie an der University of Virginia. **Jeremy Nathans** ist Professor für Molekularbiologie und Genetik, Neurowissenschaft und Augenheilkunde an der Johns Hopkins University School of Medicine

und forscht daneben am Howard Hughes Medical Institute.

### QUELLEN

**Adler, P.N.:** Planar Signaling and Morphogenesis in *Drosophila*. In: *Developmental Cell* 2, S. 525–535, 2002

**Wang, Y. et al.:** When Whorls Collide: The Development of Hair Patterns in *Frizzled 6* Mutant Mice. In: *Development* 137, S. 4091–4099, 2010

### LITERATURTIPP

**Kuziora, M., McGinnis, W.:** Kontrollgene für den Körperbauplan. In: *Spektrum der Wissenschaft* 4/1994, S. 38  
*Überblick über die genetische Regulation der Körpergestalt während der Entwicklung.*

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1411556](http://www.spektrum.de/artikel/1411556)

# Die Quantengravitation auf dem Weg zur Wissenschaft

Wie funktioniert die Schwerkraft auf Quantenebene? Lange war diese Frage eher ein mathematisches Problem als ein physikalisches, denn kaum eine Theorie schien überprüfbar. Doch dank hochpräziser Experimente und neuer Beobachtungsmethoden könnten sich demnächst verschiedene Effekte messen lassen.

Von Sabine Hossenfelder

»E in Physik ist jemand, der Probleme löst, von denen du nichts wusstest, mit Methoden, die du nicht verstehst.« Der Spruch steht auf einem T-Shirt, das mir meine Mutter einmal zum Geburtstag geschenkt hat. Ich trage es gelegentlich, wenn ich meinen Bruder ärgern will; er ist Ingenieur.

Dabei trifft die Aussage eigentlich eher einen wunden Punkt der modernen Physik: Dort sind viele Probleme weit entfernt vom täglichen Leben. Hinter offenen Fragen verbirgt sich oft nur ästhetisches Unbehagen, sozusagen mangelnde Eleganz.

Da sind zum Beispiel die Massen der Elementarteilchen im Standardmodell der Teilchenphysik – eine Reihe von Zahlen, die Forscher gemessen haben, aber nicht erklären können. Vielleicht gibt es eine solche Erklärung, vielleicht auch nicht. Das ist ein ästhetisches Problem, denn das Modell funktioniert ausgezeichnet. Oder die kosmologische Konstante in der allgemeinen Relativitätstheorie, die dazu führt, dass sich das Universum immer schneller ausdehnt. Für die Beobachtung dieses Phänomens gab es 2011 einen Nobelpreis. Doch wieso hat diese Konstante gerade diesen Wert und nicht irgendeinen anderen? Und wieso hat sie über-

haupt einen, und ist nicht null, wie lange vermutet wurde? Auch das ist ein Problem, das wir uns selbst gemacht haben – man könnte ja einfach damit zufrieden sein, dass die so erweiterten Formeln den Kosmos nun gut beschreiben.

Wir Physiker haben noch Schwierigkeiten einer vollkommen anderen Art: Manchmal gibt es Situationen, in denen sich grundlegende Konzepte selbst widersprechen.

Zu einem dieser besonderen Probleme gehörte beispielsweise die Suche nach dem Higgs-Boson. Das Standardmodell funktioniert nämlich bei hohen Energien nicht mehr. Für alles, was passieren kann, sagt es dann Wahrscheinlichkeiten voraus, die sich nicht mehr auf eins summieren – kompletter Quatsch. Wir nennen das »intern inkonsistent«. Das Higgs-Boson war die einfachste Lösung des Problems, und tatsächlich auch die richtige. Wäre es nicht gefunden worden, hätte etwas anderes, fundamental Neues passieren müssen, um diese Inkonsistenz zu vermeiden.

Es gibt in der Hochenergiephysik noch ein Problem, das nicht ästhetischer Natur ist, sondern eine Inkonsistenz, die bestehende Theorien unter gewissen Umständen gänzlich unbrauchbar macht: die Frage, wie die Gravitation quantisiert wird. Und sie ist derzeit ungelöst.

Das Standardmodell der Teilchenphysik spart die Gravitation aus. Diese ist letztlich nicht nötig, weil die Schwerkraft zwischen einzelnen Elementarteilchen so winzig ist, dass sie nie gemessen wurde und wohl auch niemals direkt messbar sein wird. Wenn man berechnen will, was bei Teilchenkollisionen passiert, spielt die Gravitation keine Rolle. Das Standardmodell ist eine so genannte Quantenfeldtheorie. Das bedeutet insbesondere, dass die Teilchen und Felder, die es beschreibt, der Quantenmechanik unterliegen. Beispielsweise sind alle Vorhersagen lediglich Wahrscheinlichkeiten. Man kann nicht sagen, was genau geschieht, sondern nur, wie gewiss es ist, dass etwas Bestimmtes passiert. Und die Teilchen in diesen Quantenfeldtheorien können in Zuständen verweilen, bei denen sie an zwei Orten gleichzeitig sind. Wenn man

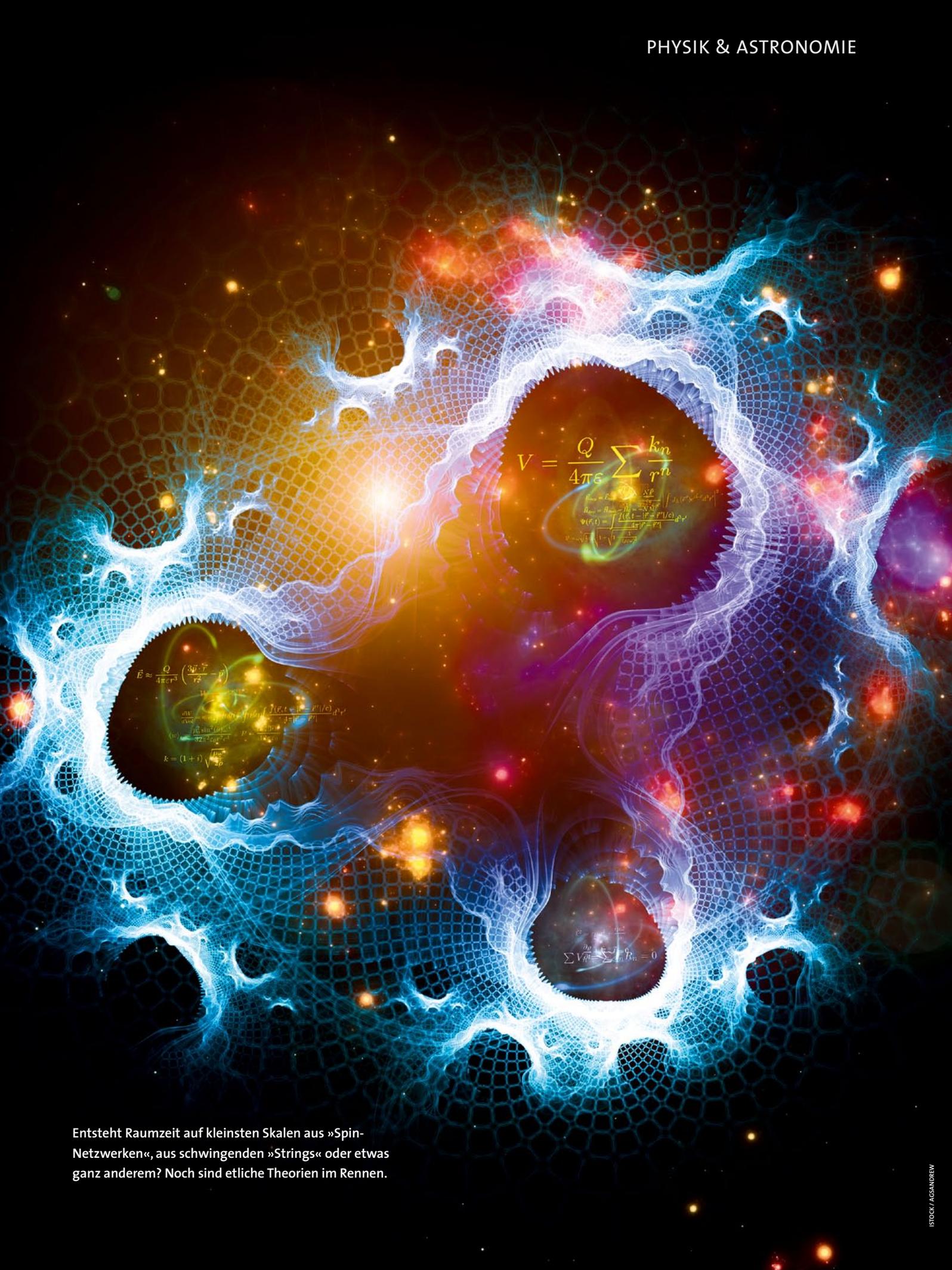
## AUF EINEN BLICK

### VOM MODELL ZUR MESSUNG

**1** Bei kleinsten Längenskalen und extremen Energien wirken sich **Quantenmechanik** und **Gravitation** ähnlich stark aus. Wissenschaftler suchen daher nach einer Theorie, die beide Effekte gemeinsam beschreibt.

**2** Physiker entwickelten **verschiedene Hypothesen**, prüften bisher aber vor allem, ob sie mathematisch funktionieren.

**3** Technologische Fortschritte könnten es bald ermöglichen, erstmals auch im **Experiment** zu testen, wie die Gravitation quantisiert ist.



Entsteht Raumzeit auf kleinsten Skalen aus »Spin-Netzwerken«, aus schwingenden »Strings« oder etwas ganz anderem? Noch sind etliche Theorien im Rennen.

dann aber misst, findet man das Objekt immer nur an einer der Positionen. Physiker nennen das den Kollaps der Wellenfunktion.

Die Gravitation hingegen wird von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie beschrieben. Das ist eine klassische Theorie, die nicht quantisiert ist. Bei ihr gibt es keine solche Unschärfe, und das Gravitationsfeld kann nicht an zwei Orten gleichzeitig sein, um sich bei einer Messung plötzlich für einen zu entscheiden. Nun haben jedoch alle Teilchen eine Energie. Und was Energie besitzt, erzeugt wiederum Schwerkraft. Wenn wir ein Quantenteilchen beschreiben möchten, das an keinem bestimmten Ort ist, wo ist dann sein Gravitationsfeld? Es sollte, wie das Teilchen, zur selben Zeit an verschiedenen Stellen sein. Das geht allerdings nicht, weil die Gravitation keine Quantentheorie ist. Das ist inkonsistent.

Neben diesem Beispiel gibt es andere Gründe, aus denen Physiker schlussfolgern, dass wir eine Theorie der Quanten-

gravitation brauchen. So treten in der klassischen allgemeinen Relativitätstheorie Singularitäten auf. Das sind Orte, an denen die Energiedichte und auch die Raumkrümmung unendlich groß werden. So etwas widerspricht allen physikalischen Vorstellungen und sollte nicht vorkommen.

Eine Analogie gibt es in der Hydrodynamik, wenn man beschreibt, wie sich ein Tropfen Wasser vom Hahn löst. Ganz oben, wo er abreißt, läuft die Oberfläche zu einer Spitze zusammen. Mathematisch ist das eine Singularität. Wenn man das Wasser als eine Flüssigkeit beschreibt, ist das aber bloß eine Näherung für ganz viele miteinander wechselwirkende Teilchen. Tatsächlich besteht der Abreißpunkt aus einzelnen Wassermolekülen und keiner unendlich scharfen Spitze.

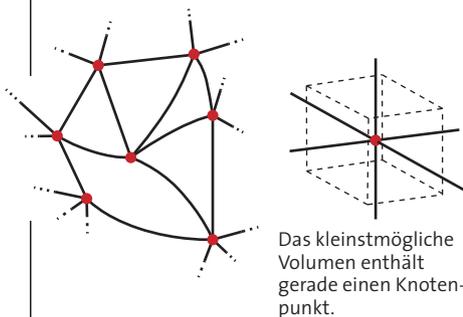
Diese Unendlichkeit in der Hydrodynamik zeigt also nur, dass das Bild der Flüssigkeit lediglich eine näherungsweise Beschreibung ist und bei kurzen Abständen nicht mehr angewandt werden darf. In der Gravitation, so nehmen wir an,

## Viele Ansätze zur Quantengravitation

Physiker haben zahlreiche Modelle entwickelt, um Quantenmechanik und Gravitation zusammenzuführen. Einige der am häufigsten diskutierten stellen wir hier vor.

### Schleifenquantengravitation

Spin-Netzwerke bestimmen die Geometrie des Raums.

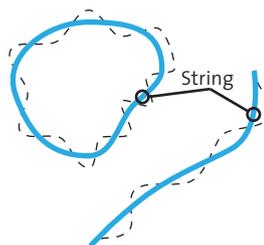


Das kleinstmögliche Volumen enthält gerade einen Knotenpunkt.

Bei dem Modell erzeugen hypothetische, gewundene Gebilde durch ihr Zusammenwirken die Raumzeit. Dadurch ist diese nicht mehr glatt, sondern durch Schleifen und deren Knoten in Größenordnungen der Plancklänge quantisiert. Die Knoten des Netzwerks ähneln mathematisch den Spins von Elementarteilchen, daher sprechen Physiker auch vom Raum als »Spin-Netzwerk«. Das auch Loop-Quantengravitation genannte Modell ist seit seinen Anfängen in den 1970er und 1980er Jahren bereits weit entwickelt und zählt unter Theoretikern zu den aussichtsreichsten Kandidaten.

### Stringtheorie

Die Stringtheorie verwendet als fundamentale Objekte eindimensionale »Strings« (englisch für Saiten). Da es keine punktförmigen Objekte mehr gibt, werden unendlich große Werte automatisch vermieden. Typisch ist das Auftreten zahlreicher Extra-dimensionen neben den uns bekannten vier. Sie müssten dann auf Skalen »kompaktifiziert« (mathematisch eingerollt) werden, die wir experimentell noch nicht beobachten können. Es sollten weitere Teilchen vorkommen, etwa im Rahmen der »Supersymmetrie« verschiedene extrem schwere Partner zu den bereits bekannten Elementarteilchen. Der Nachweis solcher Objekte würde die Stringtheorie unterstützen, war aber bislang erfolglos.



Alle Phänomene und Teilchen ergeben sich aus eindimensionalen Strings und deren Schwingungszuständen.

### Kausale dynamische Triangulation



Der Raum wird aus Dreiecken aufgebaut. Es sind nur Kombinationen zulässig, deren Zeitrichtung übereinstimmt.



Die wahrscheinlichste Form entsteht durch Überlagerung aller möglichen Anordnungen.

Diese Theorie baut die Raumzeit aus vierdimensionalen Dreiecken als kleinsten Bausteinen auf (daher Triangulation). Dabei werden nur solche Dreiecke verknüpft, welche in die gleiche zeitliche Richtung weisen (daher kausal). Die einzelnen Elemente der Raumzeit organisieren sich dann von selbst. Dieses Modell erinnert an Strukturbildung, wie sie auch auf größeren Skalen in der Natur stattfindet, oder an eine Simulation in einem Computerprogramm, wo stark variable mikroskopische Elemente al-

ist das ähnlich. Wenn wir im Mittelpunkt Schwarzer Löcher Singularitäten finden, weist das darauf hin, dass die Theorie dort zusammenbricht und etwas Fundamentaleres gebraucht wird – die Quantengravitation.

### Das Problem mit den Unendlichkeiten

Warum Schwarze Löcher uns die Grenzen unserer Theorie aufzeigen, sieht man auch am so genannten Informationsparadoxon (siehe »Die Feuerwand am Horizont«, SdW 9/15, S. 34). Benutzt man die Quantenfeldtheorien des Standardmodells gemeinsam mit der unquantisierten Gravitation, können Schwarze Löcher durch die Quanteneffekte der Materie verdunsten. Das ist die »Hawkingstrahlung«. Durch sie werden Schwarze Löcher kleiner und verschwinden irgendwann ganz. Die Strahlung enthält außer ihrer Temperatur keine weitere Information: Egal woraus das Schwarze Loch entstand, am Ende ist immer dieselbe Strahlung übrig. Aus

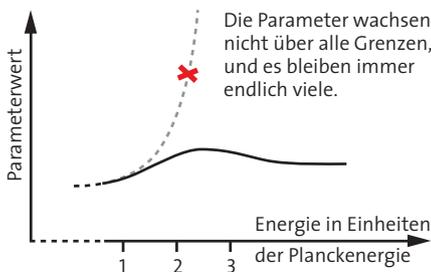
dem Endzustand kann man, außer auf die Masse, nicht mehr auf die Anfangsbedingungen schließen. So ein unumkehrbarer Vorgang darf aber in einer Quantenfeldtheorie nicht vorkommen. Vermutlich muss die Gravitation quantisiert werden, um dieses Problem zu lösen.

Wir Physiker haben also gute Gründe, wieso wir versuchen, eine Theorie der Quantengravitation zu finden. Es ist indes extrem schwierig, das mathematisch widerspruchsfrei durchzuführen. In den 1940er Jahren gelang es, die Elektrodynamik zu quantisieren. Davon motiviert entwickelten bereits in den 1960er Jahren unter anderem Bryce DeWitt und Richard Feynman analog eine »perturbative Quantengravitation«. Leider stößt man hier auf unendlich große Ergebnisse. Ähnliches passiert zwar schon in der Quantenelektrodynamik, dort kann man hingegen solche Unendlichkeiten herausrechnen und erhält messbare, endliche Zahlen. Bei dieser Methode, der »Renormierung«, muss man für jede Unendlichkeit, die

lein auf Grund gewisser Verknüpfungsvorschriften und Rahmenbedingungen am Ende zu einem stabilen Zustand gelangen.

### Asymptotisch sichere Gravitation

Wenn man, ähnlich wie bereits bei anderen Kräften, auch bei der Gravitation eine Quantenfeldtheorie verwendet, funktioniert das bei sehr hohen Energien nicht – es müssten unendlich viele Parameter bestimmt werden. Doch möglicherweise genügt es, selbst im Grenzfall unendlich hoher Energien nur eine endliche Anzahl von Werten zu ermitteln, die ihrerseits alle endlich bleiben. Die Theorie wäre dann »asymptotisch sicher«. Dieser Gedanke gewann mit Arbeiten der deutschen Physiker Christof Wetterich und Martin Reuter an Bedeutung, nachdem diese in den 1990er Jahren passende theoretische Werkzeuge entwickelten. Allerdings sind die prinzipiell erforderlichen unendlichdimensionalen Berechnungen nicht möglich, was Vereinfachungen nötig macht.



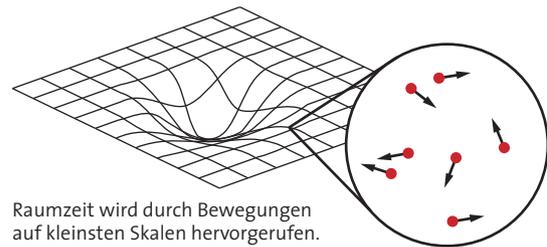
### Emergente Gravitation

Das Verhalten von Flüssigkeiten, die aus unzähligen mikroskopischen Teilchen mit vielen Freiheitsgraden bestehen, lässt sich mit Hilfe der Strömungsmechanik beschreiben.

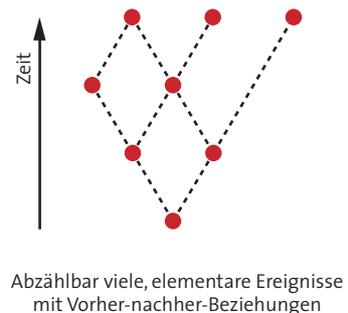
Diese Gesetze haben mit den molekularen Komponenten des Systems nichts mehr zu tun. Der analoge Ansatz bei der emergenten Gravitation ist, die Raumzeit und ihre Krümmungen aus dem Zusammenspiel elementarer Bausteine und ihrer Kräfte herzuleiten. Die Idee geht auf den sowjetischen Physiker Andrei Sacharow zurück, der 1967 davon ausging, andere Felder würden die Schwerkraft durch Vakuum Anregungen erzeugen – ähnlich wie beispielsweise ein magnetisches Feld elektrische Ströme induziert. Daher wird die Theorie auch induzierte Gravitation genannt.

### Kausale Mengen

Bei kausalen Mengen ist die Raumzeit nicht kontinuierlich, sondern besteht aus vielen diskreten Punkten – auf genügend kleinen Skalen verschwindet sie gewissermaßen. Physikalische Vorgänge lassen sich aus Ordnungsprinzipien innerhalb der Punktmengen herleiten. Elemente werden kausal miteinander verknüpft,



so dass sich etwa für die möglichen Bewegungen von Teilchen eine Art Stammbaum ergibt. Das Volumen einer Raumregion ließe sich durch einfaches Abzählen ermitteln. Dieses Modell geht von relativ wenigen Voraussetzungen aus und führt dennoch zu überprüfbar Ergebnissen. Beispielsweise sagten Anhänger der Theorie bereits in den 1990er Jahren eine kosmologische Konstante in der richtigen Größenordnung vorher – lange bevor die Expansion im realen Universum entdeckt wurde. Viele Detailfragen zur physikalischen Dynamik sind aber noch offen.



## Astronomische Effekte

Wenn die Gravitation quantisiert ist, beeinflusst das möglicherweise astronomische Beobachtungen. Das jeweils rechte Bild deutet an, was Quantengravitation bei fernen Strahlungsquellen verursachen könnte, im Vergleich zu den links davon dargestellten bisherigen Messungen. Noch ließen sich jedoch keine eindeutigen Auswirkungen nachweisen.

Teleskopbilder weit entfernter Quasare



Interferenzringe



Interferenzeffekte verschwinden mit zunehmender Distanz.

man loswerden will, einen neuen Parameter einführen, der dann experimentell bestimmt wird. In der Quantenelektrodynamik braucht man dafür die Masse und die Ladung des Elektrons, und damit ist die Theorie bereits komplett.

In der perturbativen Quantengravitation funktioniert das nicht: Man bekommt beliebig viele über alle Grenzen große Werte. Will man die abziehen, muss man unendlich viele Parameter einführen. Die kann man nicht sämtlich experimentell bestimmen – und daher kann die Theorie keine Vorhersagen machen. Das macht sie als fundamentale Beschreibung unbrauchbar.

Nun funktionieren aber selbst nichtrenormierbare Theorien bei niedrigen Energien oft recht gut. Das liegt daran, dass man hier nur einige wenige der zahlreichen Unendlichkeiten berücksichtigen muss. Und diese kann man dann wie gehabt loswerden, indem man passende Messgrößen einführt und per Experiment bestimmt. Betrachtet man dann hingegen höhere Energien, kommen die Unendlichkeiten zurück, und die Theorie bricht zusammen. Für die perturbative Quantengravitation passiert das bei der so genannten Planckenergie im Bereich von etwa  $10^{15}$  Teraelektronenvolt. Das sind 15 Zehnerpotenzen mehr als das, was der LHC liefern kann.

Jenseits der Planckenergie brauchen wir also eine bessere Theorie, die nicht zu internen Widersprüchen führt – eine »vollständige« Theorie. Im Gegensatz dazu ist die perturbative Quantengravitation eine »effektive« Theorie. Sie kann bei niedrigen Energien zutreffende Zahlen liefern, ist jedoch als fundamentales Modell ungeeignet, weil sie darüber hinaus keine sinnvollen Vorhersagen macht. Und wie eine vollständige Theorie der Quantengravitation aussehen soll, das wissen wir – mehrere Jahrzehnte, nachdem das Problem erstmals diskutiert wurde – immer noch nicht.

Das Problem mit den unendlich vielen Unendlichkeiten tauchte in den 1930er Jahren schon einmal auf. Damals bereitete der Betazerfall von Atomkernen den Wissenschaftlern Kopfzerbrechen. Der bedeutende Physiker Enrico Fermi (1901–1954) hatte dafür eine Theorie entwickelt, welche die Beobachtungen sehr gut beschreiben konnte, aber genau dem gleichen Problem der Nichtrenormierbarkeit unterlag wie heute die perturbative Quantengravitation. Ab einer bestimmten Energie, die zu jener Zeit experimentell unerreichbar war, lieferte das Modell Unsinn.

Fermis nicht weniger bekannter Kollege Werner Heisenberg (1901–1976) war damals der Meinung, diese Unendlich-

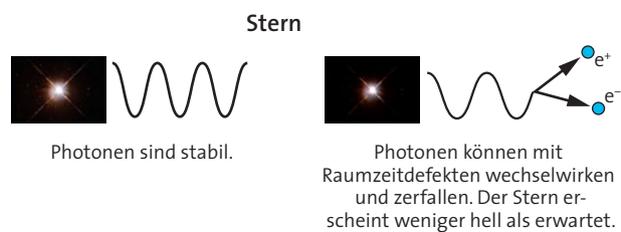
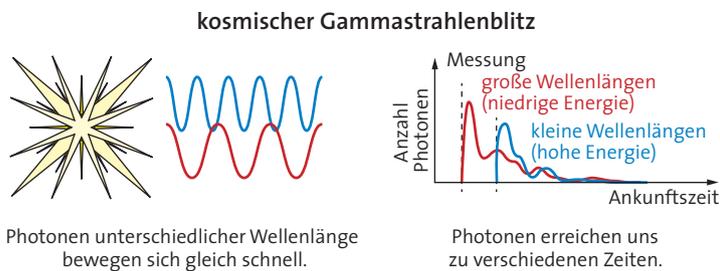
keiten würden bedeuten, dass bei Teilchenkollisionen ab der problematischen Energie sehr viele Teilchen auf einmal produziert werden. Als Lösung ging er von einer minimalen Länge aus, die von keiner Messung unterschritten werden könne. Heisenbergs Vorschlag war eine direkte ideologische Fortsetzung seiner Unschärferelation, durch die man den Ort und die Geschwindigkeit eines Teilchens nicht gleichzeitig beliebig gut bestimmen kann – je genauer man eine der beiden Größen misst, desto ungenauer wird die andere. Eine minimale Länge, so Heisenbergs Idee, würde dazu führen, dass die Unendlichkeiten gar nicht erst auftauchen. Es wäre dann schlicht unmöglich, Energie genügend stark zu fokussieren, um eine Situation hervorzurufen, in der die Theorie zusammenbricht.

### Ein massives Austauschteilchen ist auch keine Lösung

Wir wissen heute, dass Heisenberg hier falsch lag. Die Fermi-theorie des Betazerfalls ist lediglich eine effektive Theorie. Ihre Vervollständigung ist die Quantenfeldtheorie der elektroschwachen Kernkraft, in der die Unendlichkeiten nicht mehr auftauchen. Die Skala, bei der die Fermi-theorie nicht mehr funktioniert, ist gerade die Ruhemasse des W-Bosons, eines Austauschteilchens der elektroschwachen Wechselwirkung. Bei Energien, die mehr als der Masse dieses Teilchens entsprechen, muss man berücksichtigen, dass es dann entstehen kann. Bei niedrigeren Energien braucht man das nicht, und Fermis Theorie ist eine gute Näherung.

Für die Vervollständigung der perturbativen Quantengravitation benötigen wir allerdings eine andere Lösung als ein massives Austauschteilchen. Das liegt daran, dass die Gravitation im Gegensatz zur elektroschwachen Kernkraft eine »langreichweitige Wechselwirkung« ist. Das heißt, man kann sie auch bei großen Abständen weiterhin messen. Bei langreichweitigen Wechselwirkungen müssen die vermittelnden Teilchen aber leicht sein. Tatsächlich wissen wir schon, dass das Austauschteilchen der Quantengravitation, das Graviton, eine sehr geringe Masse haben muss – wenn überhaupt eine. Beispielsweise kann man aus der Ausbreitung von Gravitationswellen darauf schließen, wie groß sie höchstens sein darf. Die direkten Messungen von Gravitationswellen 2015 haben gezeigt: Das Graviton muss noch viel leichter sein als Neutrinos, die bislang masseärmsten Teilchen im Standardmodell.

Die grundsätzliche Idee einer minimalen Länge wird in der Quantengravitation heute jedoch tatsächlich benutzt,



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH SABINE HOSSENFELDER

denn sie kann sich generell vieler Unendlichkeiten annehmen und diese endlich machen. Wie erwähnt tauchen die Probleme bei hohen Energien auf. In der Quantenmechanik ist nun jedes Teilchen auch eine Welle und umgekehrt, und hohe Energien entsprechen kurzen Wellenlängen. Die Unendlichkeiten treten also bei sehr kleinen Distanzen in Erscheinung – sie liegen bei etwa  $10^{-35}$  m, der so genannten Plancklänge. Das wäre beispielsweise die Wellenlänge von Teilchen, wenn man diese bis zur Planckenergie beschleunigen und miteinander kollidieren lassen könnte. Um die Gravitation vollständig zu quantisieren, versucht man, solche kurzen Abstände grundsätzlich vermeiden. Und eine minimale Länge macht genau das.

In der Theorie der Schleifenquantengravitation (siehe »Viele Ansätze zur Quantengravitation«, S. 34/35) beispielsweise gibt es endlich große Bauteile von Oberflächen und Volumen. Ihre Seitenlängen entsprechen etwa der Plancklänge. In der Stringtheorie wiederum vermeidet man ultrakurze Abstände durch die Strings selbst, denn diese haben immer eine Ausdehnung. In der »kausalen dynamischen Triangulation« wird die Raumzeit angenähert mit Bausteinen, die dreieckige Seitenteile haben. Vertreter der »asymptotisch sicheren Gravitation« (ASG) argumentieren, dass die Gravitation renormierbar ist, jedoch in einer komplizierten Art und Weise, die man in der perturbativen Quantengravitation nicht merkt. Es gibt einige Hinweise, dass man auch in der ASG wieder so etwas wie eine minimale Länge findet.

Derzeit studieren Physiker noch weitere Ansätze, zum Beispiel solche, die versuchen, die Raumzeit wie eine Flüssigkeit zu beschreiben. Das ist die so genannte emergente Gravitation. Oder die »kausalen Mengen«, in denen die Raumzeit eigentlich nicht existiert und es nur sehr viele Punkte gibt.

In all diesen Theorien kommt letztlich eine minimale Länge vor, wenn auch auf manchmal sehr unterschiedliche Art. Einige Philosophen finden das Konzept der kleinstmöglichen Abstände sehr interessant, weil diese Eigenschaft der Quantengravitation darauf hinzuweisen scheint, dass es sich hier tatsächlich um eine »letzte« Theorie handeln könnte: Auf kürzeren Distanzen, so suggeriert die Idee, gäbe es schlicht nichts Neues mehr zu sehen.

Die verschiedenen, unter Theoretikern aktuell kursierenden Ansätze zur Quantengravitation haben außer einer kleinstmöglichen Länge jedoch noch etwas anderes gemeinsam: Sie sind experimentell vollkommen unbestätigt.

Als ich um die Jahrtausendwende Physik studierte, hat sich niemand ernsthaft mit der Möglichkeit beschäftigt, eines Tages die Quantengravitation zu testen. Es wurde allgemein angenommen, solche Experimente wären sowieso nicht machbar. Anstatt nach messbaren Effekten zu suchen, konzentrierten sich die Forscher daher ausschließlich auf mathematische Konsistenz.

Ich fand dies immer etwas verstörend. Auf Grund mathematischer Plausibilität allein kann man keine wissenschaftliche Theorie konstruieren. Immerhin sind viele Zusammenstellungen mathematisch konsistenter Axiome möglich, die mit der Realität nichts zu tun haben. Und eine Theorie, die keinen Bezug zu Beobachtungen herstellt, ist für mich keine Naturwissenschaft. Daher wandte ich mich in meiner Forschung der Frage zu, wie man denn die Quantengravitation experimentell testen kann.

### Eine unerhört schwache Kraft

Dieses Unterfangen ist so schwierig, weil die Gravitation von allen bekannten Wechselwirkungen die schwächste ist. Sie macht sich nur deshalb in unserem täglichen Leben so prominent bemerkbar, weil sie im Gegensatz zu allen anderen nicht neutralisiert werden kann. Sie summiert sich also auf. Doch wenn man die Gravitationskraft mit der elektrischen Kraft zwischen elementaren Teilchen vergleicht, zum Beispiel zwischen zwei Elektronen, dann ist sie 40 Größenordnungen geringer. Man sieht das bereits an einem kleinen Küchenmagnet: Das Feld von diesen wenigen Gramm Metall reicht aus, um sich gegen die Anziehung des ganzen Planeten Erde festzuhalten!

Wieso die Gravitation so schwach ist, weiß niemand genau (eines der anfangs erwähnten ästhetischen Probleme, das so genannte Hierarchieproblem). Da die Gravitationskraft aber bei hohen Energien zunimmt, kann man extrapolieren, wann ihre Quanteneffekte vergleichbar stark werden wie die übrigen Quantenphänomene. Das passiert bei der Planckenergie.

Nun ist die Planckenergie gigantisch groß und wir werden sie in unseren Teilchenbeschleunigern nicht erreichen können. Wobei das Problem nicht die Energie selbst ist – sie entspricht etwa dem Brennwert einer Tankfüllung Benzin –, sondern die Tatsache, dass man sie auf ein einzelnes Teilchen umsetzen muss. Will man in einer Teilchenkollision mit messbarer Wahrscheinlichkeit ein Graviton produzieren, bräuchte man einen Beschleuniger etwa von der Größe der

ganzen Milchstraße. Und wollten wir ein anderswo produziertes Graviton direkt messen, müsste der Detektor so groß wie Jupiter sein. Zudem müsste er um einen Neutronenstern kreisen, wo ausreichend viele Gravitonen produziert werden. Auch das werden wir in absehbarer Zeit nicht schaffen.

Abschätzungen wie diese nährten den Pessimismus, wir würden Quantengravitation nie experimentell untersuchen können. Tatsächlich war der Grund, warum ich an der Phänomenologie der Quantengravitation arbeite, lange Zeit nicht, dass ich dachte, jemand würde zu meinen Lebzeiten wirklich etwas messen. Ich dachte einfach, man muss ja irgendwann wenigstens anfangen, darüber nachzudenken. Mittlerweile habe ich jedoch den Eindruck, ich war vielleicht zu pessimistisch.

Das Argument, man könne die Quantengravitation nicht testen, weil es so schwierig ist, Gravitonen zu produzieren und zu messen, ist sehr kurzfristig. Man kann die Quantisierung einer Theorie nämlich auch indirekt untersuchen, ohne die zugeordneten Quanten direkt zu detektieren. In der Quantenelektrodynamik genügt bereits eine simple Beobachtung: Atome sind stabil. Denn wenn die Elektrodynamik unquantisiert wäre, ginge das nicht. Dann müssten die Elektronen nämlich Strahlung abgeben, während sie um den Atomkern sausen und schließlich mit ihm zusammenstoßen. Die elementare Tatsache also, dass es beständige Materie gibt, sagt uns schon, dass die Elektrodynamik nicht klassisch sein kann. Und dazu muss man keine direkte Messung von Quanten machen.

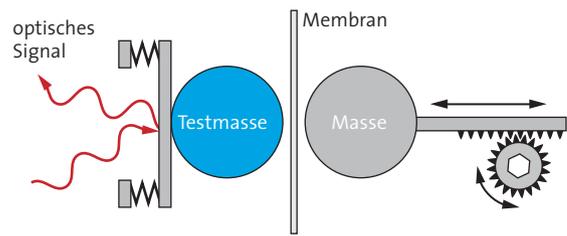
### Auswirkungen einer quantisierten Raumzeit

Während des letzten Jahrzehnts haben Physiker daher nach Möglichkeiten gesucht, wie man die Quantengravitation indirekt testen kann. Von den existierenden theoretischen Ansätzen kann man leider bisher keine messbaren Vorhersagen ableiten. Man bedient sich daher so genannter phänomenologischer Modelle. Diese erlauben es, Prognosen für das Auftreten von gewissen vermuteten Eigenschaften der Quantengravitation aufzustellen – wie zum Beispiel die minimale Länge.

Wenn diese durch so etwas wie ein reguläres Netzwerk oder ein Gitter zu Stande kommt, führt das zu einem Konflikt mit Einsteins spezieller Relativitätstheorie. Diese beschreibt eine Längenkontraktion für bewegte Objekte, aber eine minimale Länge sollte nicht kontrahieren. Wenn man so ein Gitter voraussetzt, muss man daher die spezielle Relativitätstheorie abändern – mit beobachtbaren Konsequenzen. Dann verliert zum Beispiel ein Elektron, das durch den leeren Raum fliegt, Energie durch »Vakuum-Tscherenkow-Strahlung«. Danach kann man suchen; gefunden wurde dieser Effekt nicht.

Wir wissen also heute, dass die spezielle Relativitätstheorie in der Quantengravitation mit großer Genauigkeit gelten muss, und damit ist die Idee von der Raumzeit als reguläres Netzwerk sehr wahrscheinlich falsch. Ansätze wie die Stringtheorie oder die ASG ermöglichen die minimale Länge je-

## Die Schwerkraft von Milligramm



Dank nanotechnologischer Fortschritte ließe sich die Gravitationswirkung kleinster Objekte mit wenigen Milligramm Masse womöglich direkt messen. Bei einem kürzlich vorgeschlagenen Experiment würde sich die Schwingung einer beweglich gelagerten Masse (grau) gravitativ auf eine Testmasse übertragen (blau, durch eine Membran von anderen Einflüssen abgeschirmt) und optisch ausgelesen werden.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MARKUS ASPENMEYER

doch anders, und diese Theorien lassen sich mit derartigen Beobachtungen nicht überprüfen. In der Schleifenquantengravitation wiederum ist bisher unklar, wie genau die spezielle Relativität überhaupt eingebaut ist.

Ein anderer messbarer Effekt kommt von der Idee, dass sich die Raumzeit wie eine Flüssigkeit verhält. In diesem Fall kann es zu einer Dispersion von Licht kommen, das heißt, verschiedene Farben im Spektrum des Lichts breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus (siehe »Astronomische Effekte«, S. 36/37). Dieses Auseinanderlaufen ist winzig klein. Aber je weiter das Licht reisen muss, desto größer wird der Laufzeitunterschied der Farben. Man kann nach ihm zum Beispiel in Strahlung suchen, die von fernen Gammastrahlenexplosionen kommt. Aufgespürt hat man auch hier nichts.

Eine andere Möglichkeit ist es, nach Fluktuationen der Raumzeit zu schauen, die in einer Quantentheorie auftreten sollten. Man kann das zum Beispiel machen, indem man sich die Interferenzmuster von weit entfernten Quasaren ansieht. Fluktuationen würden solche Muster verwischen. Entdeckt wurde – nichts.

Nun klingt das alles sehr negativ. Doch selbst von Nullergebnissen können wir eine Menge lernen. So wissen wir nun immerhin, dass eine Theorie der Quantengravitation solche Effekte nicht hervorrufen darf.

Ein recht neuer Vorschlag ist, dass man testen kann, ob die Raumzeit fundamental ist oder aus etwas anderem besteht. In letzterem Fall sollte die kontinuierliche Struktur der Raumzeit, die wir in der allgemeinen Relativitätstheorie benutzen, nicht vollkommen perfekt sein. Es entstehen Defekte, ähnlich wie in Kristallen – nur dass sie sowohl im Raum als auch in der Zeit punktförmig wären. Anderenfalls stünden sie in Konflikt mit der speziellen Relativitätstheorie, und das wollen wir ja vermeiden. Solche Raumzeitdefekte würden sich, unter anderem, in dem Verwischen von Interferenzrin-

gen bemerkbar machen, jedoch nur bei sehr langen Wellenlängen. Danach gesucht hat bisher noch niemand. (Ich arbeite daran. Oder zumindest sollte ich das tun.)

### Spuren im Nachhall des Urknalls?

Anstatt nach Phänomenen bei niedrigen Energien zu suchen, kann man Nachwirkungen von extrem energiereichen Effekten nachspüren, wie sie beim Urknall und nahe des Zentrums Schwarzer Löcher auftreten sollten. Vom frühen Universum sehen wir heute noch ein Nachklingen in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Deren Temperaturfluktuationen spiegeln die Materieverteilung kurz nach dem Urknall wider. Mit Quantengravitation hat das zunächst nichts zu tun. Aber wenn die Raumzeit selbst wackelt, hinterlässt das Spuren in diesen Fluktuationen. So etwas können Gravitonen bewirken, und von denen hätte es im jungen Universum jede Menge geben sollen. Man kann versuchen, aus den Mustern der Hintergrundstrahlung darauf zu schließen, ob es damals Gravitonen gab. Dann wüssten wir, dass die Gravitation zumindest früher quantisiert gewesen sein muss.

Das ist eine sehr schöne Idee, die derzeit noch unter zwei Problemen leidet. Erstens ist das Signal, welches die Gravitonen in der Hintergrundstrahlung hervorrufen, für derzeitige Experimente zu schwach. 2014 behauptete das Team der BICEP2-Kollaboration, den Einfluss von Raumzeitfluktuationen im frühen Universum gemessen zu haben. Es stellte sich dann heraus, dass diese vermeintliche Entdeckung durch Staub in unserer Galaxie zu Stande kam. Astronomen versuchen weiterhin, ein echtes Signal zu finden.

Das zweite Problem mit der Idee, aus der Hintergrundstrahlung etwas über Quantenfluktuationen abzulesen, ist: Letztere lassen sich nur schwer von nichtquantisierten zufälligen Schwankungen unterscheiden. Mögliche Methoden, solche Daten zu analysieren, werden gerade erst entwickelt.

Ein sehr viel spekulativerer Gedanke ist, dass man quantengravitative Effekte direkt beobachten könnte, wenn kollabierende Materie kein Schwarzes Loch formt, sondern eine »nackte« Singularität. Diese wäre nicht von einem Horizont verborgen. Zumindest theoretisch und auch einigen Computersimulationen zufolge könnten solche Phänomene tatsächlich auftreten. Ob und wie man nach so etwas suchen kann, ist ein aktuelles Forschungsthema.

Aber der vielleicht interessanteste Beitrag zu der Frage, wie man Quantengravitation experimentell testen kann, kam in den letzten Jahren nicht aus der Astronomie oder der Teilchenphysik, sondern aus einem komplett anderen Gebiet: der Quantenoptik. Dank erstaunlicher technologischer Fortschritte ist es inzwischen einerseits möglich geworden, Objekte mit immer größeren Massen in Quantenzustände zu versetzen und diese Zustände sehr lange von Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung abzuschirmen, die sie wieder zerstören würden. Andererseits lassen sich zudem immer kleinere Kräfte mit extrem hoher Präzision vermessen.

So kann man zum Beispiel heute schon eine kleine Scheibe zwischen zwei Spiegeln mit dem Lichtdruck von einem

Laser delokalisieren. Dann ist das Plättchen an zwei Orten gleichzeitig – also in einem richtigen Quantenzustand. Der Versuch funktioniert bis zu einer Masse von etwa einem Nanogramm. Das klingt nicht nach viel, aber im Vergleich zu den Massen elementarer Teilchen ist das gigantisch groß.

Und mittlerweile haben findige Experimentatoren um Markus Aspelmeyer in Wien eine Methode gefunden, mit der es bald möglich sein könnte, die Gravitationskraft von winzigen Massen bis hinunter zu einem Milligramm zu messen. Die Forscher bedienen sich dabei mikroskopisch kleiner und enorm sensibler Detektoren (siehe Illustration links). Diese lassen sich mit nanotechnologischen Verfahren herstellen, die es erst seit einigen Jahren gibt.

Bislang hat niemand solche Technologien miteinander kombiniert, um das Gravitationsfeld eines massiven Quantenzustands zu vermessen. Und ein Milligramm ist auch deutlich mehr als ein Nanogramm. Doch dieses Gebiet schreitet rapide voran. Ich halte es durchaus für möglich, dass wir in den nächsten 10 bis 20 Jahren einfach ausmessen können, ob die Gravitation Quanteneigenschaften hat. Noch vor einem Jahrzehnt hielt niemand eine solche Art Experiment für machbar.

Nun würde man dabei nur die schwachen Gravitationsfelder testen, also den Bereich der perturbativen Quantengravitation. Über die vollständige Theorie könnte man dabei wohl nur wenig lernen. Trotzdem: Mit einem erfolgreichen Experiment würde die Quantengravitation von der Philosophie zur Wissenschaft befördert.

In der Wissenschaftsgeschichte gibt es zahlreiche Beispiele für Forscher, die gewisse Messungen für unmöglich hielten. Etwa das Aufspüren von Lichtablenkung an der Sonne oder die Detektion von Gravitationswellen. Der langfristige technische Fortschritt hat sich von solchem Pessimismus glücklicherweise bisher nicht aufhalten lassen. Clevere Erfinder lösen eben manchmal Probleme, von denen sie nichts wissen, mit Methoden, an die Physiker nicht gedacht hätten. ~

### DIE AUTORIN



**Sabine Hossenfelder** ist theoretische Physikerin und arbeitet am Frankfurt Institute for Advanced Studies, einer Einrichtung für interdisziplinäre Grundlagenforschung. Ihr derzeitiges Projekt wird unterstützt vom Foundational Questions Institute (FOXi). Sie bloggt unter [backreaction.blogspot.com](http://backreaction.blogspot.com)

### QUELLEN

- Hossenfelder, S.:** Minimal Length Scale Scenarios for Quantum Gravity. In: Living Reviews in Relativity 16, 2013
- Hossenfelder, S.:** Phenomenology of Space-Time Imperfection. II. Local Defects. In: Physical Review D 88, 124031, 2013
- Schmölle, J. et al.:** A Micromechanical Proof-of-Principle Experiment for Measuring the Gravitational Force of Milligram Masses, arXiv:1602.07539, 2016

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1414906](http://www.spektrum.de/artikel/1414906)

# Rundum verborgen

Selbst transparente Objekte verraten sich oft noch durch Lichtreflexionen. Nanostrukturen können die Oberflächen entspiegeln und so nahezu unsichtbar machen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Unsichtbar zu sein, ist ein alter Menschheitstraum. In der Tierwelt ist der Natur das Kunststück an mancher Stelle schon fast gelungen. So wird etwa beim Glasflügelschmetterling (siehe Foto rechte Seite) deutlich: Die beste Strategie ist letztlich eine besonders gute Durchsichtigkeit.

Transparente Gegenstände, etwa solche aus Glas, kann man recht ungestört durchblicken. Trotzdem nimmt man sie normalerweise wahr, weil sie das Umgebungslicht brechen und reflektieren. Bei jedem Übergang von einem Medium in ein anderes geschieht das umso stärker, je mehr sich deren Brechungsindizes voneinander unterscheiden. Trifft sichtbare Strahlung von Luft auf Glas, wirft dieses bereits bei senkrechtem Einfall vier Prozent davon zurück. Bei größeren Winkeln wächst der Anteil; bei 45 Grad sind es ungefähr zwölf Prozent.

Verringern kann man diese verräterischen Spiegelungen nur, indem man die Brechungsindizes von umgebendem Medium und Gegenstand einander annähert. Stellt man beispielsweise ein Glasobjekt ins Wasser, ist es bereits schwieriger wahrzunehmen, weil der Unterschied zwischen den Werten von Wasser (1,33) und Glas (etwa 1,5) wesentlich kleiner ist als der vom Glas zur Luft (1). In Olivenöl, dessen optische Dichte fast der eines darin versenkten Glasobjekts gleicht, ist dieses nur noch mit großer Mühe zu erkennen (siehe rechtes Foto unten sowie »Transparenz durch Nässe«, SdW 6/2015, S. 42).

Daher trifft man die meisten fast unsichtbaren Lebewesen auch im Wasser an, von Quallen über Salpen bis hin zu bestimmten Garnelenarten. Landtiere haben es wesentlich schwerer, den großen Unterschied zum Brechungsindex der Luft zu überbrücken.



Ein transparentes Weinglas ist nur durch die Reflexionen des Umgebungslichts zu sehen (links). Wenn die Brechungsindizes verschiedener Medien sehr ähnlich sind (hier: Olivenöl und Glas), sind sie optisch kaum noch voneinander zu unterscheiden (rechts).



Ist es dein Traum nicht,  
einmal unsichtbar zu sein?

Rainer Maria Rilke (1875–1926)



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT · NACH H. JOACHIM SCHLICHTING

Die Nanostruktur des Mottenauges erzeugt einen fast kontinuierlichen Übergang des Brechungsindex von der Luft zur massiven Oberfläche.

Obwohl Reflexionen unabdingbar sind, um transparente Objekte zu erkennen, sind sie oft auch störend: Man kann durch Schaufensterscheiben kaum hindurchsehen, wenn sich die helle Außenwelt darin spiegelt, und auch bei Objektivlinsen von Kameras oder bei Brillen ist ungewolltes Streulicht ärgerlich.

Es gibt seit längerem technische Verfahren, um Gläser zu entspiegeln. Die entscheidende Idee ist, das reflektierte Licht durch destruktive Interferenz auszuschalten. Dazu bedampft man die Oberfläche mit einer dünnen Schicht, deren Dicke ein Viertel der Wellenlänge des Lichts beträgt. Beim Übergang zwischen den Medien wird die Welle jeweils teilweise zurückgeworfen und durchgelassen. Wegen des Gangunterschieds der an der oberen und unteren Grenzschicht reflektierten Teilwellen verschieben sich die Berge und Täler um eine halbe Wellenlänge, also genau so, dass sie sich bei der Überlagerung auslöschen.

Wenn die Amplituden der beiden Teilwellen allerdings nicht gleich groß sind, bleibt eine Restintensität übrig. Um das zu verhindern, sollte der Brechungsindex der Beschichtung gleich dem geometrischen Mittel der Werte



Die Flügelflächen des Glasflügelmetterlings sind transparent und reduzieren obendrein Lichtreflexe.

FOTOLIA / MARENWISCHNEWSKI

von Luft und Glas sein. Ein weiteres Problem ist, dass sich das weiße Licht aus vielen Wellenlängen zusammensetzt. Man muss daher mehrere Lagen auftragen, um für möglichst viele Farben optimal zu entspiegeln. Immerhin schafft man es auf diese Weise, die Reflexion von vier auf weniger als ein halbes Prozent zu reduzieren.

### Glanzfrei dank Struktur

Diese technische Lösung kommt in der Tierwelt allerdings nicht vor. Die Natur bekommt die Reflexe völlig anders und wesentlich effektiver in den Griff. Ein System winziger Buckel überzieht die zu entspiegelnden Oberflächen, sowohl beim Glasflügelmetterling als auch beispielsweise bei den Augen einiger nachtaktiver Motten wie dem Mittleren Weinschwärmer.

Entscheidend ist dabei, dass die aus einzelnen Erhebungen mit rund 100 Nanometer Dicke bestehende äußere Schicht wesentlich schmäler ist als die Wellenlänge des Lichts. Wären die Strukturen zehnmal so groß, würden sie das Licht stark diffus reflektieren, und die Oberfläche erschiene weiß und undurchsichtig wie Mattglas. Der Nanocharakter der Höcker indessen macht sich beim Übergang von Licht

aus der Luft ins biologische Material so bemerkbar, dass der Brechungsindex sukzessive verändert wird.

Mikroskopisch gesehen ist die optische Dichte eines Objekts mit rauer Oberfläche der durchschnittliche volumengewichtete Brechungsindex seiner Bestandteile. Eine feste Substanz aus 20 Prozent Luft und 80 Prozent Chitin etwa hat effektiv einen Wert von  $0,2 \cdot 1 + 0,8 \cdot 1,5 = 1,4$ .

Bei Noppen, die nach unten breiter werden (siehe Illustration links oben) kommt das einfallende Licht zunächst auf der Höhe der Spitzen an, die nur einen kleinen Bruchteil der Fläche einnehmen. Dann ist der Wert noch nahe dem der Luft. Nähert sich das Licht der durchgehenden Oberfläche, nehmen die Höcker zunehmend mehr Fläche ein, so dass sich der effektive Brechungsindex dem des Materials angleicht. Er geht kontinuierlich von dem der Luft zu dem des Materials über – es tritt keine Brechung im klassischen Sinn und damit auch so gut wie keine Reflexion des Lichts auf.

Die Motte profitiert von der praktisch verlustfreien Transmission, da ihr Auge so mehr Licht einfängt. Außerdem kommt es zu einem Tarn-effekt, indem verräterische Reflexio-

nen der verhältnismäßig großen Augen unterdrückt werden. Analog blitzt der Glasflügelmetterling nicht in der Sonne auf.

Nanoforscher lernen von diesen natürlichen Entspiegelungsstrategien und haben für Displays und andere Oberflächen bereits Verfahren entwickelt, die den Effekt nutzen. Der Wissenschaft gelingt also dank der Sichtbarmachung des Unsichtbaren inzwischen auch erfolgreich die Unsichtbarmachung des Sichtbaren. ~

### DER AUTOR



**H. Joachim Schlichting** war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

### QUELLE

**Siddique, R.H. et al.:** The Role of Random Nanostructures for the Omnidirectional Anti-Reflection Properties of the Glasswing Butterfly. In: Nature Communications 6, 6909, 2015

Dieser Artikel und Links im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1414907](http://www.spektrum.de/artikel/1414907)

# Die perfekte Wasseruhr und das Prinzip der kleinsten Wirkung

Als Physiker steht Gottfried Wilhelm Leibniz im Schatten Isaac Newtons – zu Unrecht, wie seine nachgelassenen Schriften zeigen.

Von Hartmut Hecht

Die Physik hat, wie jede andere Wissenschaft auch, ihre Ahnengalerie. Für den Übergang von der Statik zur Dynamik, also den Beginn der Physik im modernen Sinn, nehmen darin Galileo Galilei und seine Schule, Christiaan Huygens sowie vor allem Isaac Newton Ehrenplätze ein. Letzteren lässt der berühmte Vers des Dichters Alexander Pope (1688–1744)

*Nature and Nature's Laws lay hid in Night  
God said, Let Newton be! And all was Light*

sogar fast gottgleich erscheinen.

Von Leibniz dagegen weiß die Physikgeschichtsschreibung wenig zu berichten. Die traditionellen Darstellungen, von Ferdinand Rosenberger (1845–1899) über Edmund Hoppe (1854–1928) bis in die Gegenwart, erwähnen ihn vor allem als einen der Stammväter des Energieerhaltungssatzes (siehe unten) und des Prinzips der kleinsten Wirkung. Der Physiologe und wortmächtige Redner Emil du Bois-Reymond (1818–1896) hat diese Sicht 1870 bündig auf den Begriff gebracht, indem er in dem Vortrag »Leibnizsche Gedanken in der neu-

*Neben seinen tiefgründigen philosophischen Überlegungen machte sich Leibniz auch sehr praktische »neue Gedanken darüber, wie der Schall gebildet, durch die Luft ausgebreitet und im Hörorgan ausgedrückt werde«, so der Titel eines zwölfseitigen Manuskripts. Insbesondere glaubte er herausgefunden zu haben (gelb unterlegter Text), »warum derjenige, der mit der Kraft des Schalls ein Glas zerbrechen will, zur Oktav desjenigen Tons aufsteigt, den er durch Anschlagen des Glases ermittelt«.*

eren Naturwissenschaft« feststellte: »Seine Schriften sind reich an glücklichen Blicken in die ferne Zukunft der Wissenschaft; aber in solcher Divination zeigt sich mehr sein natürliches Genie, als dass sich die Stärke einer Denkmethode daran bewährte.«

Die Frage nach Leibnizens Bedeutung für die Physikgeschichte wäre daher ziemlich schnell beantwortet – wenn da nicht die vielen Aufzeichnungen wären, von denen die Forschung mangels Verfügbarkeit bislang kaum Kenntnis genommen hat. Erst seit diese im Rahmen der Edition sämtlicher Schriften und Briefe des Universalgelehrten (Spektrum der Wissenschaft 9/2011, S. 48) allmählich zugänglich werden, kommt langsam die Diskussion darüber in Gang.

Leibniz selbst hatte in einer berühmten Sentenz gegenüber Vincent Placcius geäußert: »Scilicet qui me non nisi editis novit, non novit.« »Wer mich nur aus meinen gedruckten Schriften kennt, der kennt mich nicht.« Genau dies fand der Physikhistoriker Ernst Gerland (1838–1910) bestätigt, als er 1906 die erste Edition einer Auswahl von Schriften Leibnizens vorlegte, die speziell naturwissenschaftlichen und technischen Gegenständen gewidmet war, insbesondere der Pneumatik, Akustik, Optik und mechanischen Bewegungslehre. Gerland konnte zeigen, dass Leibniz nicht nur in Bezug auf die Formulierung grundlegender Prinzipien der Physik ernst zu nehmen ist, sondern auch als Forscher am Detail einiges zu bieten hat (Bild rechts). So stellte er in seinen Arbei-

## DIE SERIE IM ÜBERBLICK

### LEIBNIZ, DER UNIVERSALGELEHRTE

- |          |   |                    |
|----------|---|--------------------|
| Teil 1 ▶ | PHILOSOPHIE<br>Die vernünftig geordnete Welt<br><i>Hans Poser</i>   | Juli 2016          |
| Teil 2 ▶ | MATHEMATIK<br>Vertreibung der Gespenster<br><i>Thomas Sonar</i>   |                    |
| Teil 3 ▶ | PHYSIK<br><b>Die perfekte Wasseruhr<br/>und das Prinzip der kleinsten Wirkung</b><br><i>Hartmut Hecht</i> | <b>August 2016</b> |
| Teil 4 ▶ | TECHNIK<br>Rechen- und Chiffriermaschine<br><i>Klaus Badur</i>  | September 2016     |



ten zur Akustik die Mechanik der Schallausbreitung mittels longitudinaler Luftschwingungen dar, womit er sich als physikalischer Kopf auf der Höhe seiner Zeit präsentierte.

Doch auch Gerland war, seiner Zeit entsprechend, von der alles überragenden Bedeutung Newtons so überzeugt, dass er glaubte, Leibniz habe sich durch Newtons einschlägige Ausführungen in den »Philosophiae naturalis principia mathematica« zu seinen akustischen Ausarbeitungen anregen lassen. Diese Vermutung kann als widerlegt gelten, seit die Göttinger Akademie der Wissenschaften im Rahmen der oben genannten Edition insbesondere den Briefwechsel mit dem Helmstedter Medizinprofessor Günther Christoph Schelhammer (1649–1716) aufgearbeitet hat.

Newton und Leibniz, die beiden geistigen Giganten des 17. Jahrhunderts, haben nicht nur in der Mathematik an gleichartigen Problemen gearbeitet. Auch in der Physik wetteiferten sie um die beste Lösung der aktuellen Forschungsfragen, und auch dort ging es nicht ohne Prioritätsvorwürfe ab. Als Leibniz im Jahr 1689 in den »Acta Eruditorum«, der führenden deutschen Gelehrtenzeitschrift dieser Zeit, seine Resultate über die Bewegung in widerstehenden Medien veröffentlichte, glaubte Newton darin gut versteckt seine eigenen Forschungsergebnisse wiederzuentdecken. Und in der Tat hatte Leibniz nur die Ergebnisse seiner Untersuchungen mitgeteilt, die mathematischen Herleitungen jedoch zurückgehalten, die über die Eigenständigkeit seines Ansatzes hätten Auskunft geben können. Auch hier wissen wir inzwi-

schen aus den nachgelassenen Schriften, dass Leibniz durch eigene Forschungen zu seinen Ergebnissen gekommen war.

Mit den Bemühungen um die Herausgabe der naturwissenschaftlichen, medizinischen und technischen Schriften als Reihe VIII der Akademie-Ausgabe wird unser Bild von dem Universalgelehrten zunehmend vollständiger. Es zeigt sich, dass Leibniz, parallel zu Newton und im Widerstreit mit ihm, ein alternatives Konzept der Physik auf den Weg gebracht hat, das für deren weitere Entwicklung nicht folgenlos blieb.

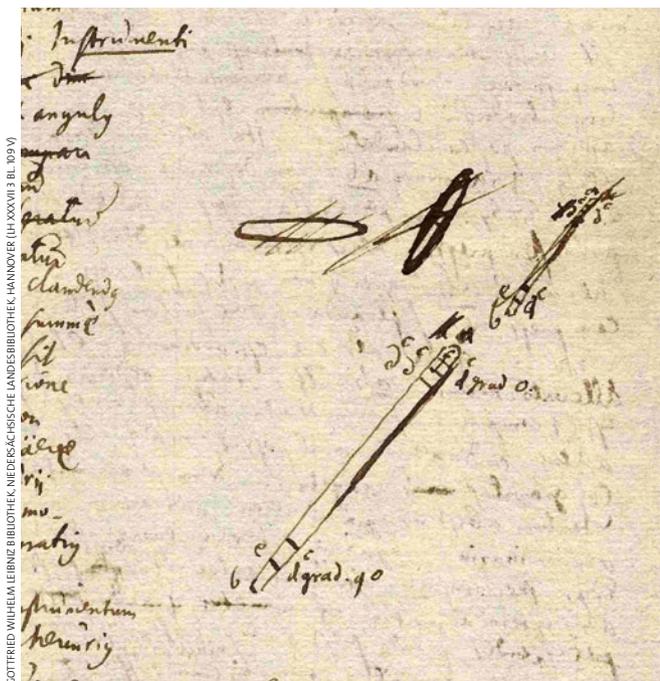
### Frühe Pariser Entdeckungen

Von März 1672 bis November 1676 weilte Leibniz in Paris, dem seinerzeit neben London bedeutendsten Zentrum der Wissenschaft. Sein Mentor in dieser Zeit war kein Geringerer als Christiaan Huygens (1629–1695). Leibniz unterhielt freundschaftliche Beziehungen zu dem genialen Experimentator Edme Mariotte (um 1620–1684) und lernte den gleichaltrigen Denis Papin (1647–um 1712) kennen, der durch seine Erfindungen des Dampfkochtopfs, einer frühen Dampfmaschine und eines Unterseeboots von sich reden machte. Mit beiden verband ihn später ein lebenslanger Briefwechsel.

Der junge Leibniz war nicht ganz unvorbereitet nach Paris gekommen. In seinem Gepäck hatte er zwei Arbeiten, die »Theoria motus abstracti« (»Theorie der abstrakten Bewegung«) und die »Hypothesis physica nova« (»Neue physikalische Hypothese«), in denen er die von Huygens 1668 aufgestellten Regeln für den elastischen Stoß zum Ausgangspunkt einer systematischen Schau physikalischer Phänomene machte. Ein tieferes Verständnis der Naturwissenschaften erlangte er allerdings erst im Kontakt mit der Pariser Gelehrtenwelt, und davon profitierte er ein Leben lang. Jedenfalls formulierte er in dieser Zeit die Forschungsprobleme und -prinzipien, auf die er immer wieder zurückkam.

Seine Interessen reichten von der Optik und der Pneumatik über Mechanik und Bewegungslehre bis hin zu Problemen der Navigation und des Magnetismus. Noch 300 Jahre danach ist es faszinierend, in seinen Aufzeichnungen auf Entdeckungsreise zu gehen, denn sie überraschen nicht nur mit heute ungewohnten Ideen. Die Entwürfe, Notizen und Marginalien lassen darüber hinaus die Intensität und Leidenschaft erahnen, mit der sich der Mittzwanziger für die Welt der experimentellen Naturforschung öffnete.

Man kann das beispielhaft an den »Experimenta nova« Otto von Guericques (1602–1686) nachvollziehen. Noch im Erscheinungsjahr 1672 hat Leibniz das Buch gelesen und so umfangreiche Auszüge daraus angefertigt wie aus kaum einem anderen Werk. Dabei waren es nicht so sehr die spektakulären Vakuumexperimente wie die mit den »Magdeburger Halbkugeln« oder Guericques Luftpumpe, die es ihm angetan hatten, denn die kannte er schon aus den Editionen Caspar Schotts (1608–1666). Vielmehr enthielt Guericques Buch den Entwurf eines Weltbilds, das der herrschenden cartesianischen Auffassung widersprach. Während die Cartesianer sich den



Das Instrumentum inclinationum ist ein beiderseits luftdicht verschlossenes Glasrohr, in dem ein Quecksilberpfropfen je nach den aktuellen Druckverhältnissen verschiedene Positionen einnehmen kann. Leibniz hat in dieser Skizze die Extrempositionen 0 und 90 Grad zwar notiert, aber das Rohr nicht nochmals in der jeweils richtigen Lage gezeichnet.

Raum nur als »Plenum«, das heißt als von irgendetwas erfüllt vorstellen konnten, postulierte Guericke das Vakuum als realen physikalischen Zustand. Zusammen mit den Schriften zur Pneumatik von Blaise Pascal (1623–1662) und Christiaan Huygens bilden die »Experimenta nova« die Textbasis für Leibnizens erste Auseinandersetzung mit der seinerzeit modernen Naturforschung.

Die genannten Autoren konnten auf umfangreiche Datenbestände verweisen, die sie aus reproduzierbaren Versuchsreihen in und außerhalb von Vakuumkammern (»Rezipienten«) gewonnen hatten. Über die Gesetzmäßigkeiten, denen die faszinierenden Vakuumphänomene folgten, und deren Ursachen waren sich jedoch die Praktiker ebenso uneinig wie die Gelehrten.

Um zwischen den konkurrierenden Theorien eine Entscheidung herbeizuführen, entwarf Leibniz ein geniales Experiment: Man fülle in eine Art Reagenzglas etwas Quecksilber, und zwar derart, dass das flüssige Metall wie ein Pfropfen auf einer Luftsäule liegt. Das obere Ende verschließe man daraufhin luftdicht, und fertig ist ein Instrument, in dem ein Quecksilberpfropfen die Luft über sich und unter sich so voneinander trennt, wie in einer Wasserwaage die Flüssigkeit links und die rechts der Luftblase voneinander getrennt sind (Bild links).

Kippt man das Gerät aus seiner ursprünglich vertikalen Stellung in eine Schräglage, so wandert der Quecksilberpfropfen innerhalb der Röhre. Mit Hilfe dieser Beobachtung wollte Leibniz den Ursachen der Vakuumphänomene auf den Grund gehen. Insbesondere erwartete er Aufschluss darüber, ob die Verlagerung des Quecksilberpfropfens allein von der Kompression der Luft unterhalb des Pfropfens, von einer Dehnung der Luft darüber oder von beiden verursacht werde.

Leibniz berechnete für jede der drei Hypothesen, welche Höhe die Unterseite des Pfropfens bei Neigung der Röhre einnehmen müsste, und schlug vor, diese theoretischen Werte als Skala an der Außenseite des Instruments anzubringen, das er »Instrumentum inclinationum« (Neigungsinstrument) nannte. Durch bloßes Ablesen der Skalen könnte man dann unter den drei konkurrierenden Theorien die richtige ermitteln: »Veritas hoc experimento comprobari aut falsitas revinci potest.« »Die Wahrheit kann durch dieses Experiment bestätigt oder ein Irrtum widerlegt werden.« Dies ist ein Musterbeispiel für das, was die Philosophen ein »Experimentum crucis« (Kreuzwegexperiment) nennen, weil es eine Entscheidung für einen von mehreren Wegen der Erkenntnis herbeiführt. Heute gilt dieses Experiment als Nachweis für das nach seinen Entdeckern Robert Boyle (1626–1692) und Edme Mariotte benannte Gesetz, das besagt, dass bei unveränderter Temperatur das Produkt aus Druck und Volumen einer Gasmenge konstant ist – anschaulich demonstriert dadurch, dass in Leibnizens Instrument die Höhe des Pfropfens über der Tischebene, auf der die Röhre ruht, für alle Neigungen gleich bleibt. Unter wohldefinierten Versuchsbedingungen lassen sich also funktionale Beziehungen experimentell verifizieren oder falsifizieren.

## AUF EINEN BLICK

### LEIBNIZ UND DIE PHYSIK

**1** Erst durch die noch immer andauernde Aufarbeitung seiner umfangreichen Aufzeichnungen wird klar, dass Leibniz **wesentliche Beiträge zur Physik** seiner Zeit geleistet hat.

**2** Getreu seinem Wahlspruch »**Theoria cum praxi**« suchte und fand er zu jeder neuen Idee Anwendungen mit praktischem Nutzen.

**3** Sein Versuch, die ganze Physik aus einem **Optimalitätsprinzip** (»**die beste aller möglichen Welten**«) herzuleiten, scheiterte, weil ein brauchbarer Energiebegriff noch nicht verfügbar war.

**4** Erst heute erkennen wir seine Überlegungen als Vorläufer des **Prinzips der kleinsten Wirkung**, das zur Begründung der Physik sogar den newtonschen Bewegungsgleichungen vorgezogen wird.

Auffällig ist die Vielzahl der Experimente, die Leibniz vorschlägt, und einzigartig ihre Darstellung durch Zeichnungen (siehe »Ein Gedankenexperiment zum Vakuum«, S. 47). Er bringt die unterschiedlichsten Phänomene zusammen und versucht, deren gemeinsame Ursachen zu finden – in diesem Fall ein vergebliches Unterfangen, wie wir heute wissen: Die molekularen Kräfte, die der Adhäsion zu Grunde liegen, passen nicht in den Rahmen der Vakuumphysik. Die Methode selbst aber, durch Gedankenexperimente und deren Variation Aufschluss zu gewinnen, hat Leibniz an diesem Gegenstand zu einem Forschungsinstrument entwickelt. Hier geht es nicht, wie beim Experimentum crucis, um die Bestätigung oder Widerlegung einer Theorie, sondern um das Auffinden eines gemeinsamen Prinzips für mehrere Theorien.

Eine der berühmtesten Sentenzen Leibnizens lautet »theoria cum praxi«. Die Einheit von Theorie und Praxis ist ihm, wie sich bereits in den frühen Schriften zeigt, ein Grundanliegen und in seinen naturwissenschaftlichen Aufzeichnungen stets präsent. So erblickt er in seinem Instrumentum inclinationum nicht nur eine elegante Methode zur Bestätigung einer Naturgesetzlichkeit. Da sich mit ihm die vertikale Lage präzise auszeichnen lässt – als diejenige, in welcher der Abstand zwischen dem unteren Ende der Röhre und dem Quecksilberpfropfen minimal ist –, sieht er Anwendungen in Geografie, Seefahrt und Architektur, aber auch in Mechanik und Geometrie, bis hin zu einer Möglichkeit, Fernrohre zu justieren.

Im Zusammenhang mit seinen Studien zur Funktionsweise des Siphons entwickelt Leibniz die Idee einer genau gehenden Wasseruhr (»Clepsydra«, siehe »Entwurf einer genau gehenden Wasseruhr«, S. 48). Sie ist ein gutes Beispiel dafür, wie Leibniz ganze Prozessabläufe automatisiert. Denn seine Clepsydra löst nicht nur das Problem aller Wasseruhren, einen konstanten Auslauf zu gewährleisten. Leibniz schließt an seine Konstruktion auch ein Zählwerk an und zeichnet damit den Zeitfluss sozusagen automatisch auf.

Die automatische Registrierung von Beobachtungsdaten ist vor allem für das Funktionieren selbstregulierender Sys-

teme wichtig, wie sie Leibniz in seinen Entwürfen zur Technik des Harzer Bergbaus vorsah. Indem er auf diese Weise den Beobachter und Kontrolleur ersetzt, erschließt er sich neue technische Möglichkeiten. So entwirft er auch eine Maschine, die automatisch den Kurs eines Schiffs notiert, diesen auf eine Seekarte überträgt, die Abweichungen vom vorgesehenen Kurs berechnet und schließlich das Schiff wieder auf Kurs bringt.

Das dafür als »Instrumentum longitudinum« (Längengradinstrument) konzipierte Gerät ist Teil seiner frühen Überlegungen zur Längengradbestimmung, die wiederum zu einer umfassenderen Strategie für eine verbesserte Navigation auf See gehören. Seine Clepsydra soll dabei als genau gehende Schiffsuhr dienen. Und wieder hat er einen Zusatznutzen im Sinn: Mit dem neuen Instrument sollen die Tafeln der Loxodromen (Linien konstanten Kompasskurses) von Simon Stevin (1548–1620) und Pierre Hérigone (1580–1643) verbessert werden.

Diese Form der praktischen Nutzbarmachung von Erkenntnissen ist fest in Leibnizens Wissenschaftskonzeption verankert. Sie liefert auch die entscheidenden Impulse für sein Engagement zur Selbstregulierung ganzer technologischer Abläufe im Harzer Bergbau. Hier zeigt sich Leibniz als ideenreicher Erfinder und virtuoser Tüftler, der sein Talent auch an der Konstruktion eines Perpetuum mobile erprobte.

### Vom Perpetuum mobile zur Energieerhaltung

Heute sind wir schnell geneigt, solche Projekte mit einem milden Lächeln abzutun. Schließlich sagt uns der Energieerhaltungssatz, dass es keine Maschine geben kann, die ständig Energie liefert, ohne sie von außen zu beziehen. Über solche Kenntnisse verfügte Leibniz freilich noch nicht. Er hat allerdings den Weg dahin geebnet, und dieser Weg führt über das Perpetuum mobile.

Ganz am Beginn steht die Idee zu einer pneumatischen Maschine, deren Konstruktionsplan er 1672 dem seinerzeit berühmten Projekteentwickler und späteren Unternehmer in kurmainzischen Diensten Johann Daniel Crafft (1624–1697) unterbreitete und deren Kenntnisnahme dieser mit den Worten bestätigte:

*Ich nachssbenanter bekenne dass mir heut dato H. Dr. Leibnitz gegenwertiges Vorhaben des Motus perpetui gezeiget. Verspreche hergegen, dafern etwas daran ist, ihme auch meine inuenta et experimenta bona fide zue communiciren. Vnd solle keiner von bejiden etwass demen andern zue schaden, sondern alles communicato consilio thun. Mayntz den 14ten Junij 1671. Joh. Daniel Crafft manu propria.*

Die Maschine, von der hier etwas geheimnistuerisch die Rede ist, enthält als zentrales Element eine Art Blasebalg (»follis«), der durch beständiges Aufsteigen und Absinken in einer Flüssigkeit eine Bewegung erzeugt. Zunächst liegt der zusammengefaltete Blasebalg auf dem Grund des Flüssigkeitsbeckens. Durch Einblasen von Luft bekommt er Auftrieb

und steigt an die Oberfläche. Dort angekommen, wird er zusammengedrückt und sinkt wieder auf den Grund, wo der ganze Kreislauf von vorn beginnt. Es ist in der Tat nicht auf den ersten Blick zu sehen, dass das Aufblasen am Boden mehr Energie erfordert, als das Ablassen an der Oberfläche einbringt, so dass auch der von Leibniz bis ins Detail geschickt ausgetüftelte Mechanismus nicht den grundlegenden Mangel der Konstruktion beheben konnte.

Nur wenige Jahre später, in seiner Pariser Zeit, gibt Leibniz zwar den Gedanken eines Perpetuum mobile nicht auf, er formuliert aber das Problem neu. Statt das Interesse auf eine raffiniert ausgedachte und hinsichtlich ihrer Konstruktion einzigartige Maschine zu richten, konzentriert er sich nun auf die Formulierung einer allgemeinen Theorie periodischer Bewegungen.

Einige unter den Pariser Manuskripten zu Themen der Mechanik dokumentieren diesen Übergang. Darin gelangt Leibniz zu der Erkenntnis, dass man für die Herstellung einer kontinuierlichen Bewegung zwei nicht aufeinander reduzierbare Kräfte benötigt, »ut inveniatur ratio restituendi vim restituentem, aliunde quam per restituendam«. »Der Grund für die Reproduktion der wiederherstellenden Kraft ist in einer anderen als der wiederherzustellenden Kraft zu suchen.« Aus dieser Einsicht folgt, dass ein Perpetuum mobile der traditionellen Art unmöglich ist, denn in diesem müsste ein und dieselbe Kraft das Kunststück einer sich periodisch wiederholenden Bewegung vollbringen.

Eine schöne Illustration seiner eigenen Überlegungen präsentiert Leibniz in dem Entwurf eines »Horologium ventaneum perpetuum«, einer vom Wind angetriebenen, permanent laufenden Uhr. Leibniz hat sie 1675 in Paris ausgearbeitet und 1688 zur Vorbereitung einer Audienz bei Kaiser Leopold I. den Grundgedanken zusammengefasst:

*Viele haben den Motum perpetuum gesucht, aber wie er ins gemein gesucht wird, also daß zum exempel eine Uhr auß eigner krafft sich wieder aufziehe, ist er ganz unmöglich, und laufft gegen das axioma generale potentiarum, denn so müste effectus seyn potentior sua causa integra; aber es finden sich mittel daß die Uhren und andere Wercke durch potentias insensibiles in Natura latentes ohne Menschliches Zuthun wieder aufgezoogen werden. Dergleichen Zweyerley von mir ausgesonnen, das eine so das admirabelste, vor eine kleine taschen Uhr; so nicht leicht auszufinden; das andere ist nicht so künstlich, aber von großern ansehen; wie nehmllich ein großer Potentat etwa einen obeliscum oder pyramidem tanquam gloriae suae monumentum aufrichten, und eine Uhr darauf sezen lassen könne, da niemand könne hinauf dar zu kommen als durch eigne gerüste, und die sich doch nicht allein allezeit (wiewohl durch eine unvermerckte Euserliche krafft) selbst stelle, sondern auch, welches am verwunderungswürdigsten nach der Sonne selbst corrigire. Und also viele jahre ohne anrühren fortgehen, und nicht leicht wandelbar werden kondte. Diese invention ist eine von den Memorabelsten.*

Im Prinzip soll die Zeiger nicht etwa der Wind antreiben, sondern vielmehr ein Gewicht anheben, das dann seinerseits durch Absinken – mit stets gleich bleibender Kraft – die Zeiger bewegt. Offensichtlich genügt es nicht, die »Kraft« bereitzustellen, das heißt die Windenergie einzufangen. Es muss auch die »Ordnung«, in diesem Fall die Position der Gewichte, wiederhergestellt werden, damit auf die Dauer eine periodische, also sich stets wiederholende Bewegung ablaufen kann.

Vor diesem Hintergrund erklärt er ein mechanisches Perpetuum mobile für unmöglich, weil es auf der Fiktion der bloßen Ersetzung von verbrauchter Kraft beruhe und somit den Gesichtspunkt der Ordnung außer Acht lasse. Umgekehrt liefert die ausschließliche Berücksichtigung von Ordnungsbeziehungen zwar ein ideales Perpetuum mobile, jedoch kein praktikables, weil alles Körperliche einen zusätzlichen Aufwand erfordert, der für die Maschine selbst erbracht werden muss.

Unter diesen Voraussetzungen hat Leibniz 1686 in den »Acta Eruditorum« den Begriff der »lebendigen Kraft« einge-

führt und als  $mv^2$  definiert – eine Größe, die bis auf den Faktor  $\frac{1}{2}$  der kinetischen Energie entspricht und allgemein als Leibnizens Beitrag zur Formulierung des Energieerhaltungssatzes angesehen wird.

Am Rand sei erwähnt, dass der heute in der Wissenschaftssprache etablierte Terminus »Dynamik« (»dynamica«) auf Leibniz zurückgeht und dass er mit seiner Winduhr aus dem Jahr 1675 erstmals in der Geschichte der Wissenschaften den Gedanken der Speicherung von Energie aufgeworfen hat.

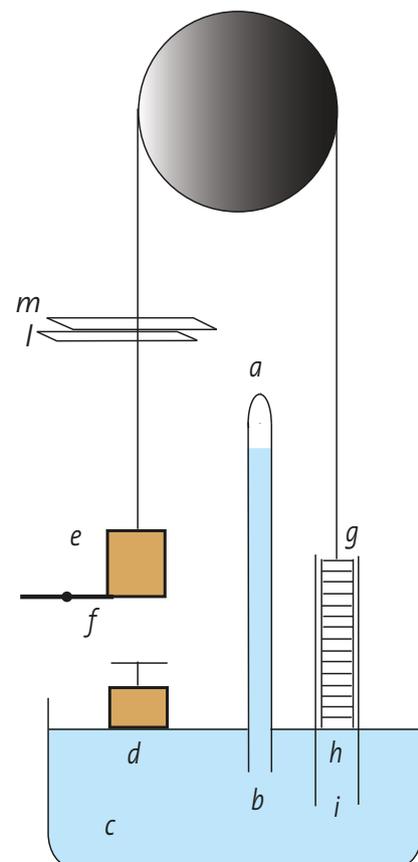
Ordnung und Größe hatte Leibniz 1674 eingeführt, indem er noch sehr vage von zwei Kräften redete. Später spricht er von Kausal- und Finalursachen. Für das Wirken der Letzteren wird der Raum als bloße Ordnungsbeziehung vorausgesetzt. Und zwar sind diese Beziehungen von besonderer Art, denn jeder Raumpunkt ist in ihnen im höchsten Grad bestimmt (le plus déterminé). Die Ordnung ist optimal im Sinn der besten aller möglichen Welten (vergleiche Teil I dieser Serie, Spektrum der Wissenschaft 7/2016, S. 52). Damit hängt es zu-

## Ein Gedankenexperiment zum Vakuum

Im Inneren eines (nicht gezeichneten) Vakuumrezipienten befinden sich eine torricellische Röhre *ab*, eine Vakuumpumpe *gi* und Adhäsionsplatten *ml*. Beginnt man nun, die Luft aus dem Rezipienten auszupumpen, sinkt die in der Röhre befindliche Flüssigkeit ab und fließt in das Gefäß *c*. Dadurch wird der Schwimmkörper *d* angehoben und drückt den Hebel *f*. Daraufhin wird das Gewicht *e* aus seiner Arretierung befreit, fällt herab und zieht dabei den Pumpenkolben *gh* nach oben. Der wiederum zieht die Flüssigkeit mit nach oben, und zwar, so Leibniz, unabhängig davon, ob der Rezipient evakuiert wurde oder nicht. Also werde die Pumpe im Vakuum genau so sicher arbeiten wie unter Normalbedingungen, und der Luftdruck könne nicht die Ursache für das Ansaugen der Flüssigkeit in der Pumpe sein. Ähnlich argumentiert Leibniz, dass es nicht der Luftdruck sei, der die Adhäsionsplatten zusammenhält.

Die Skizze bezieht sich auf drei verschiedene Experimente (von 19, die er in dem zugehörigen Text beschreibt). Die Elementarordnung könnten gar nicht alle zugleich Verwendung

finden. Leibniz führt sie trotzdem alle zusammen auf, weil er nicht die Analyse der Einzelerperimente im Sinn hat, sondern das Auffinden einer gemeinsamen Ursache für alle auftretenden Phänomene.

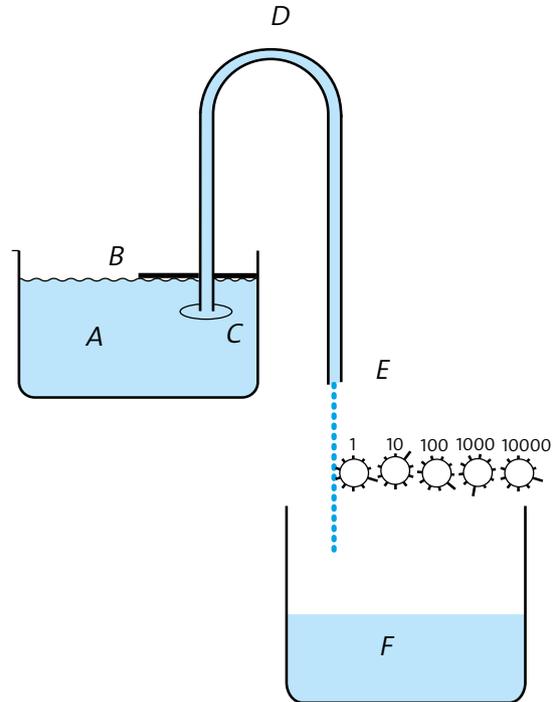
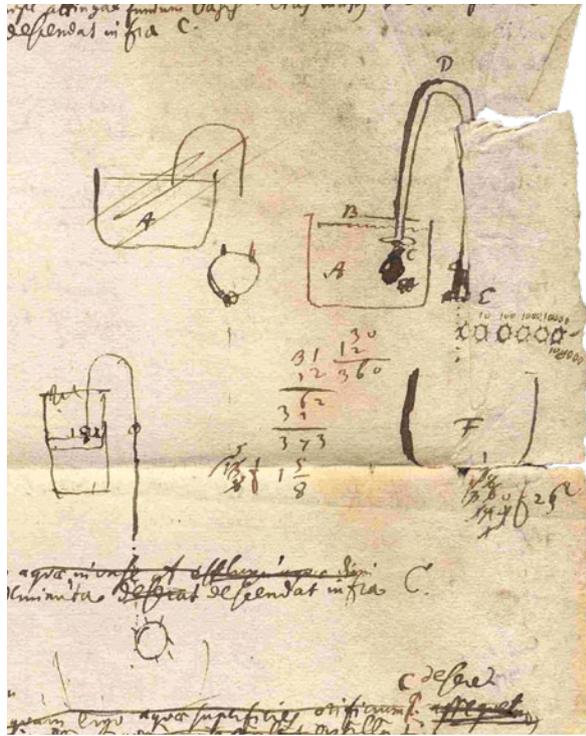


UNIKS; COTTFRIED WILHELM LEIBNIZ BIBLIOTHEK, NIEDERSÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK, HANNOVER (Df-XXXVII 3 Bl. 02 R); RECHTIS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: HARTMUT HECHT

## Entwurf einer genau gehenden Wasseruhr

Die Einlassöffnung **C** des U-Rohrs **D** ist an dem Schwimmer **B** befestigt. Das ganze Rohr sinkt mit zunehmendem Wasserverbrauch im Behälter **A** ab, mit dem Effekt, dass unabhängig vom

Wasserstand in **A** der Druck am Rohrende **E** und damit die Rate, mit der die Tropfen fallen, stets konstant ist. Zahnräder mit Zehnerübertrag bilden ein Zählwerk für die Tropfen.



LINKS: GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ, BIBLIOTHEK, NIEDERSÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK, HANNOVER (U-XXXVII) 13. BL. 96. R; RECHTS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: HARTMUT HECHT

sammen, dass für Leibniz Optimierungsvorstellungen in der Physik eine bedeutende Rolle spielen, und das unterscheidet ihn von Newton.

Leibniz hat, wie die neuere Forschung zeigt, sowohl hinsichtlich der allgemeinen Grundlagen der Physik als auch in Bezug auf die Erklärung besonderer Phänomene Bedeutendes geleistet. Warum ist dann aber in den Darstellungen der Physik und ihrer Geschichte so wenig davon zu finden?

Eine erste Antwort liegt sofort auf der Hand: Die Texte waren nicht verfügbar. Wenn Leibniz ein Problem gelöst hatte, war für ihn die Sache erledigt. Auf eine Publikation hat er meist verzichtet, sogar fertig ausgearbeitete Manuskripte nicht in Druck gegeben; der Text auf S. 43 ist ein Beispiel. Leibniz hat selbst des Öfteren betont, dass er mehr an Methoden denn an Lösungen von Detailproblemen interessiert sei, weil Methoden eine ganze Schar von Lösungen liefern.

Doch diese Erklärung greift zu kurz. Die Zeitgenossen konnten Leibnizens Ideen kennen, denn mit seinen zirka 1300 Korrespondenzpartnern hat er selbstverständlich auch Themen aus der Physik diskutiert. Die bereits erwähnte Diskussion mit Schellhammer, aber auch der Gedankenaustausch mit Mariotte über die Bruchfestigkeitstheorie, sind Beispiele dafür mit bis heute gültigen Resultaten. Solche Briefe wurden nicht selten kopiert und als Auszüge in den

wissenschaftlichen Journalen abgedruckt, in denen Leibniz auch publiziert hat.

Eine zweite Erklärung wäre: Leibniz war seiner Zeit zu weit voraus und konnte nicht auf Zustimmung in der Gelehrtenrepublik rechnen, so dass er lieber ganz auf die Bekanntmachung seiner Ergebnisse verzichtete. Ähnliches hatte ja schon Emil du Bois-Reymond vermutet. Das trifft zwar für die Determinantentheorie aus der Mathematik nachweislich zu; doch als grundsätzliche Erklärung scheint sie doch eher vom Geniekult motiviert zu sein als von den historischen Tatsachen.

### Newton versus Leibniz?

Ich schlage vor, sich für eine Erklärung an der Kontroverse mit Newton über die Infinitesimalrechnung zu orientieren, die bekanntlich in einem Prioritätsstreit eskalierte. Wie wir heute wissen, sind die beiden Kontrahenten zwar zu vergleichbaren Ergebnissen gelangt, aber auf völlig unterschiedlichen Wegen. Newton bezog sich für seine Methode der Fluxionen und Fluenten auf die Realität physikalischer Bewegungen, während Leibniz seinen »calculus« auf dem Kontinuumsbegriff aufbaute.

In der Physik liegen die Dinge auf geradezu faszinierende Weise ähnlich. Bei der Bewegung in widerstehenden Medien,

in der Akustik und beim optischen Brechungsgesetz stimmen die Ergebnisse so gut überein, dass der Verdacht des Plagiats aufkam; gleichwohl hatten die beiden Geistesgrößen ein grundverschiedenes Verständnis von der Physik als Wissenschaft.

Newton hatte seine Physik auf den berühmten drei Gesetzen aus dem ersten Buch der »Principia« begründet: Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung, solange keine äußere Kraft auf ihn einwirkt; die Änderung der Bewegungsgröße (Masse mal Geschwindigkeit oder auch Impuls) ist der bewegenden Kraft proportional; und »actio = reactio«. Das Bewegungsproblem in der Physik war für ihn die Aufgabe, bei gegebener Kraft (die ihrerseits von den Positionen der Körper abhängen kann) die Bahnkurve eines Körpers zu bestimmen.

Für Leibniz dagegen ist das grundlegende Gesetz der Physik nicht als Bewegungsgleichung formuliert, sondern als Erhaltungssatz der Größe  $mv^2$ . Leibniz versucht also mit Hilfe einer einzigen Erhaltungsgröße, der »lebendigen Kraft«, das Bewegungsproblem auf mathematische Begriffe zu bringen, und darin besteht sein entscheidendes Defizit im Vergleich zu Newton. Denn der Erhaltungssatz für die lebendige Kraft liefert eine einzige Gleichung; man benötigt aber drei, um die Bewegung als raumzeitliche Veränderung zu beschreiben. Das ist bei Newton gegeben, denn Kraft und Impuls sind Vektoren mit drei Komponenten. Leibniz dagegen muss in der Metaphysik Zuflucht suchen: Erst mit dem Prinzip der Wahl der besten aller möglichen Welten gewinnt seine Darstellung die erforderliche Eindeutigkeit. Das hat Leibniz immer wieder den Vorwurf eingebracht, als Metaphysiker Physik zu treiben. Und damit geriet er gegenüber Newton ins Hintertreffen.

Dennoch ist sein Ansatz nicht ohne Wirkung geblieben. Als Hermann von Helmholtz (1821–1894) den Energieerhaltungssatz in voller Allgemeinheit herleitete, bemerkte er:

Leibniz stellte nun folgenden Satz auf, der sich bei der Betrachtung verschiedener Bewegungsvorgänge unter der Wirkung einer gewissen dadurch ausgezeichneten Klasse von Kräften bestätigt hatte, dass nämlich die Summe der lebendigen Kräfte in einem Massensystem allemal wieder dieselbe wird, wenn die sämtlichen Theile des Systems im Laufe ihrer Bewegung in die gleiche Lage zu einander zurückkehren.

Später verallgemeinerte er seine Ergebnisse in der Feststellung:

Für die letzten principiellen Fragen der Wissenschaft, der eigentlichen und berechtigten Philosophia naturalis, wie die Physik von den Engländern immer noch genannt wird, ist der Umstand von hoher Wichtigkeit, dass in den beiden allgemeinsten Gesetzen von der Constanz der Energie und von der kleinsten Action nur noch von den beiden Formen der Energie als den ganzen Verlauf der Naturprocesse bestimm-

menden Grössen die Rede ist, nicht mehr von Bewegungskräften und Kraftcomponenten, welche letzteren nur noch als abgeleitete Rechnungswerthe erscheinen. Alles Geschehen wird dargestellt durch das Hin- und Herfluthen des ewig unzerstörbaren und unvermehrbaaren Energievorraths der Welt, und die Gesetze dieses Fluthens sind vollständig zusammengefasst in dem Satze der kleinsten Action.

Eine solche, allein auf Erhaltungsgrößen beruhende Physik hatte Leibniz konzipiert und damit – nach Helmholtz – nicht nur einen eigenständigen, sondern einen allgemeineren Standpunkt in der Physik formuliert. Von diesem aus mussten die newtonschen Bahnkurven und Kraftgleichungen als etwas Abgeleitetes erscheinen.

Diesen Schritt können wir heute nachvollziehen. In der Tat lässt sich die gesamte Physik aus einem Extremalprinzip, dem »Prinzip der kleinsten Wirkung«, herleiten. Gerade in der Quantenmechanik ist diese Formulierung häufig einleuchtender und fruchtbarer als die über die Bewegungsgleichungen.

Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698–1759), zur Zeit Friedrichs des Großen der berühmte Präsident der Berliner Akademie der Wissenschaften, hat das Prinzip der kleinsten Wirkung als ein allgemeines Naturprinzip ausgesprochen. Joseph Louis Lagrange (1736–1813) hatte es erstmals stringent formuliert. Der Baseler Gelehrte Johann Samuel König (1712–1757) schrieb Leibniz die Urheberchaft zu und löste damit einen Prioritätsstreit aus. Die Diskussion darüber beschäftigt die Wissenschaftshistoriker bis heute. Unabhängig davon ist festzuhalten, dass das Prinzip der kleinsten Wirkung Vorstellungen, die Leibniz mit dem Postulat einer optimalen Welt verband, im physikalischen Sinn interpretiert.

Erst mit diesem Wissen wird sichtbar, dass in der Physik wie in der Mathematik Leibnizens Ansatz gleichberechtigt neben dem Newtons steht. ∞

## DER AUTOR



**Hartmut Hecht** hat Physik und Philosophie an der Humboldt-Universität Berlin studiert. Er ist seit 1984 auf dem Gebiet der Leibniz-Edition und -Forschung tätig. Von 2001 bis 2013 war er Leiter der Berliner Arbeitsstelle der Leibniz-Edition, an der die naturwissenschaftlichen, medizinischen und technischen Schriften herausgegeben werden.

## QUELLEN

**Leibniz, G.W.:** Nachgelassene Schriften physikalischen, mechanischen und technischen Inhalts. Hrsg. von Ernst Gerland. Teubner, Leipzig 1906, Nachdruck Georg Olms, Hildesheim 1995  
**Leibniz, G.W.:** Sämtliche Schriften und Briefe, Reihe VIII: Naturwissenschaftliche, medizinische und technische Schriften, Band 2: 1668–1676. Bearbeitet von Hartmut Hecht, Eberhard Knobloch, Paolo Rubini, Harald Siebert und Sebastian W. Stork. Erscheint im September 2016 bei DeGruyter, Berlin

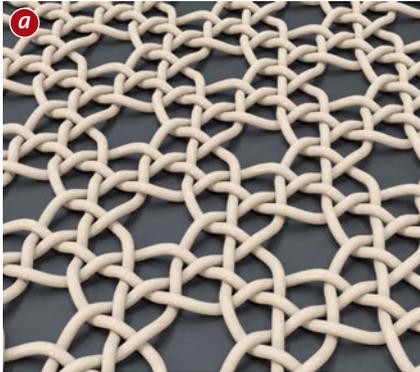
Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1414908](http://www.spektrum.de/artikel/1414908)

KUNST

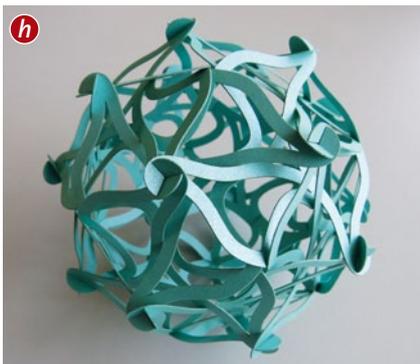
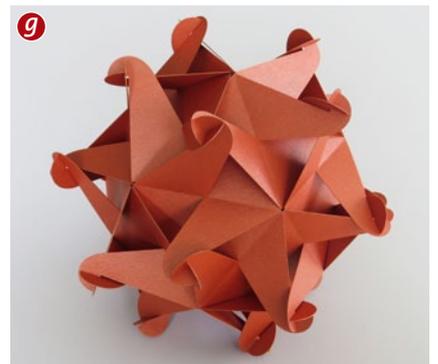
# Unendliche uniforme Polyeder

Der niederländische Künstler Rinus Roelofs hat eine neue Klasse geometrischer Gebilde entdeckt.

VON CHRISTOPH PÖPPE



Rinus Roelofs fügt zahlreiche Exemplare ein und desselben Einzelteils zu größeren Strukturen zusammen: Periodisch geknotete Seile bedecken die Ebene entsprechend einer Parkettierung aus Drei- und Sechsecken (a). Drei-, Vier- und Fünfsterner sind an ihren Spitzen unendlich oft verknüpft (b). Drei leicht gewellte Flächen umschlingen einander (c); vier Ebenen durchdringen sich (d). Flexible Streifen ergeben ein kugelförmiges Gebilde auf der Basis des (archimedischen) Ikosaederstumpfs (besser bekannt als Fußball, e). Die zahlreichen unregelmäßigen Fünfecke, die durch »unterirdische« Streifen miteinander verbunden sind, lassen ihre Herkunft vom (archimedischen) schiefen Dodekaeder kaum noch erkennen (f). Die Flächen verschiedener Körper (g, h, i, k) hat Roelofs mit Auswüchsen und »Ohren« versehen, die sich gegenseitig beklemmen und das ganze Gebilde ungeklebt zusammenhalten; in g erkennt man ein Ikosaeder, in k abermals ein schiefes Dodekaeder.



ALLE ABBILDUNGEN: RINUS ROELOFS

Rinus Roelofs aus Hengelo in den Niederlanden arbeitet mit sehr verschiedenen Materialien. Aber einerlei, ob seine Werke aus Papier, Holz, Stahlblech oder Stein bestehen, alle zeigen die Faszination ihres Urhebers für mathematische Strukturen. Er entwirft sie stets am Computer und setzt sie dann über ein Laserschneidegerät, einen 3-D-Drucker oder auf anderen Wegen in die Realität um – mit der Konsequenz, dass sich so etwas wie eine »Handschrift« oder ein individueller »Pinselstrich« in seinen Werken nicht bemerkbar machen kann. Im Gegenteil: Der Produktionsprozess legt eine Herstellung aus lauter gleichen Teilen nahe – und die Herausforderung besteht darin, dieser Einschränkung zum Trotz das Endprodukt verwirrend kompliziert und zugleich ansehnlich zu gestalten.

Wenn es insbesondere um Objekte geht, die aus identischen Teilen zusammengesetzt sind, ist der Weg zu den platonischen und den archimedischen Körpern nicht weit. Das sind jene räumlichen Gebilde mit maximaler beziehungsweise fast maximaler Regelmäßigkeit, die von lauter regelmäßigen Vielecken begrenzt werden und bei denen alle Ecken gleich sind in dem Sinn, dass die unmittelbare Umgebung jeder Ecke gleich aussieht. So ist zum Beispiel ein archimedisches Körper namens (3, 4, 5, 4) dadurch gekennzeichnet, dass jeder Ecke ein Drei-, ein Vier-, ein Fünf- und ein Viereck anliegen – in dieser Reihenfolge (Spektrum der Wissenschaft Spezial PMT 4/2013 »Physikalische Unterhaltungen«, S. 53). Für platonische Körper sind darüber hinaus auch alle Seitenflächen gleich, während bei den archimedischen zum Beispiel Drei-, Vier- und Fünfecke gemischt vorkommen dürfen. Wegen ihrer Regelmäßigkeit bieten sich beide Sorten Körper für eine Zusammensetzung aus identischen Bauteilen geradezu an (siehe Bilder links).

Und es gibt noch mehr von ihnen. Das gilt selbst unter der verschärften Bedingung, dass die Ecken nicht nur gleich aussehen, sondern innerhalb des Gesamtkunstwerks auch gleichwertige

Plätze einnehmen müssen, oder formal korrekt ausgedrückt: Zu je zwei Ecken gibt es eine Kongruenzabbildung, die den ganzen Körper auf sich selbst und die eine Ecke auf die andere abbildet. Das gilt nicht nur für die platonischen und die archimedischen Körper, sondern auch für die unendlich vielen Prismen und Antiprismen (siehe unten) – und darüber hinaus für Gebilde, welche die klassischen Geometer gar nicht in Erwägung gezogen haben, weil sie unendlich ausgedehnt und daher unter keinen Umständen vollständig realisierbar sind. Diese »unendlichen platonischen« (oder gar archimedischen) Körper sind noch längst nicht in allen Einzelheiten erforscht (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 66). Nun ist Roelofs bei seinen künstlerischen Untersuchungen auf eine Klasse von ihnen gestoßen, die bisher anscheinend noch niemand ernsthaft untersucht hat.

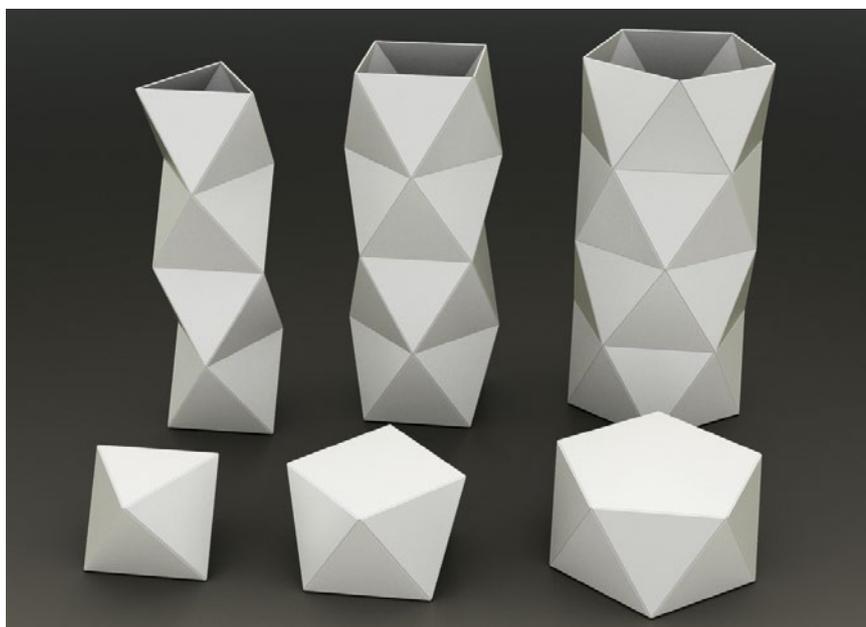
### Stapel aus Antiprismen

Es beginnt ganz harmlos mit einem sogenannten Antiprisma: ein regelmäßiges Vieleck auf dem Boden, ein genau gleiches ein Stück darüber und beide miteinander durch abwechselnd stehende und liegende gleichseitige Dreiecke verbunden. Wenn man lauter Exemplare dieses Körpers aufeinander stapelt, verschwinden Boden- und Deckelflächen im Inneren des Stapels, und es bleiben nur gleichseitige Dreiecke übrig, welche die Wände einer leicht zerknitterten Röhre bilden (Bild

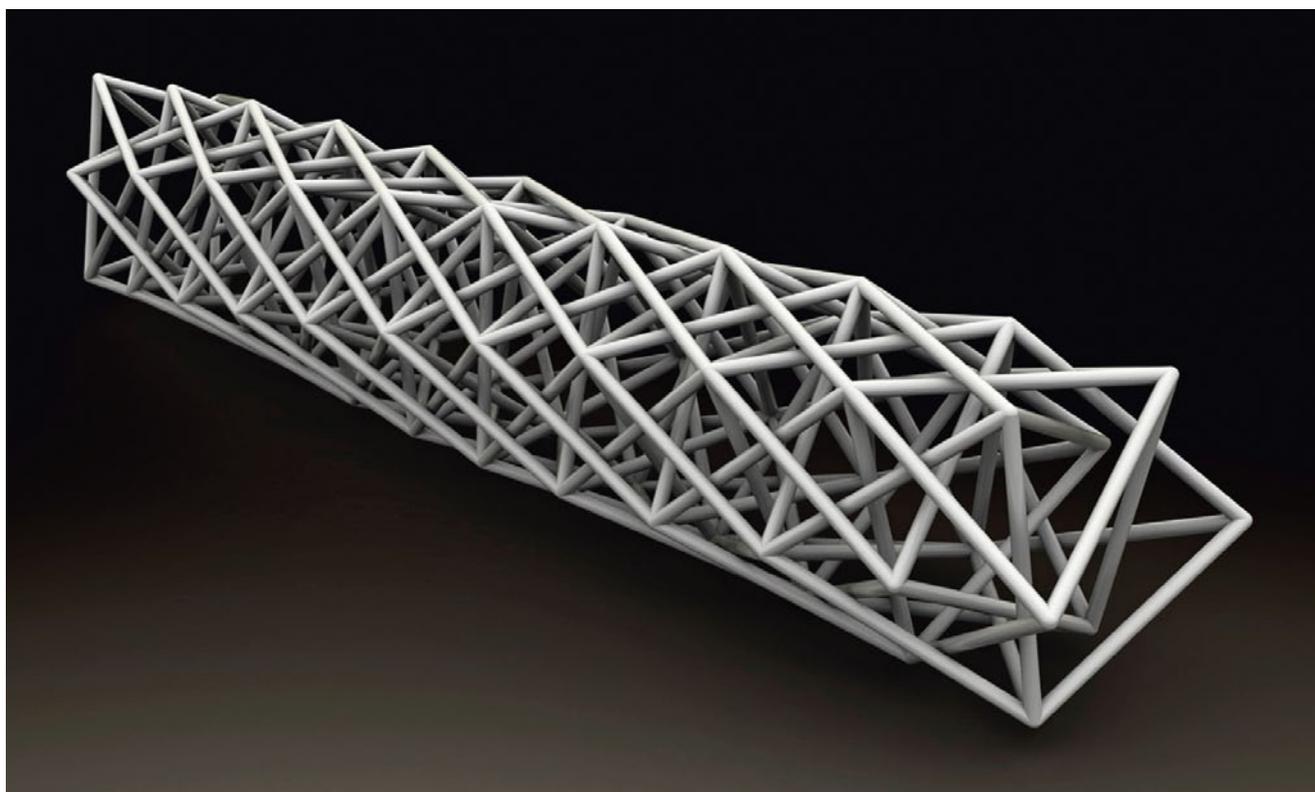
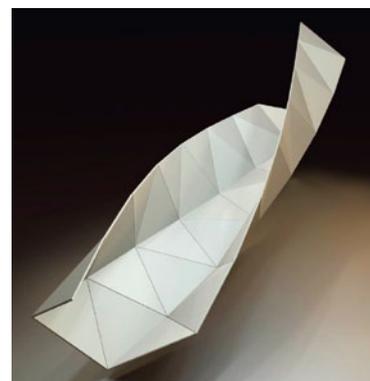
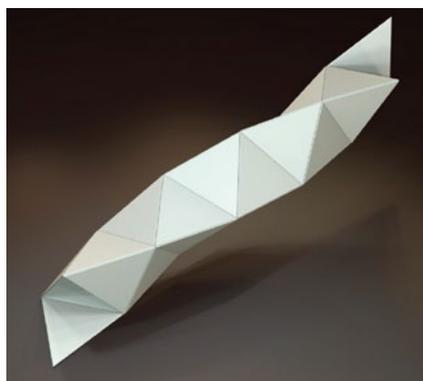
**Lauter identische Hölzer in der Form eines verallgemeinerten Kleiderbügels sind bequem und platzsparend zu transportieren. Erst am Ausstellungsort hängt Rinus Roelofs sie zu einem dreifach periodischen Kunstwerk zusammen (oben). Das Polyeder aus Stahlblech (unten) steht vor einem Einkaufszentrum in Elbląg (Polen). Es besteht »eigentlich« (von den Löchern abgesehen) aus lauter gleichseitigen Dreiecken, die einander durchdringen. In Roelofs Nomenklatur ist es ein 5-2(1) (siehe Bildunterschrift auf S. 52).**



ALLE ABBILDUNGEN: RINUS ROELOFS



Das Bild links zeigt Stapel aus drei-, vier- und fünfseitigen Antiprismen. Das dreiseitige Antiprisma ist besser bekannt unter dem Namen Oktaeder. Ein Tetraederstapel lässt sich ebenfalls aus einem Streifen Dreieckspapier falten (unten). Ganz unten ein computergeneriertes Kantenmodell des unendlichen uniformen Polyeders, das Roelofs mit 8-3(1) bezeichnet: Wenn Papier sich selbst durchdringen könnte, würde man einen acht Dreiecke breiten Streifen zu einer dreilagigen Röhre zusammenrollen und die beiden langen Kanten um eine Dreiecksseitenlänge versetzt aneinanderkleben.



ALLE ABBILDUNGEN: RINUS ROELOFS

links, oben). An jeder Ecke treffen sich genau sechs Dreiecke – so viele, wie auch in der Ebene präzise aneinanderpassen. Also kann man diese »zylindrischen« Körper sehr einfach herstellen, indem man ein Dreiecksmuster in ein rechteckiges Stück Papier geeigneter Breite ritzt, dieses Rechteck zur Röhre zusammenrollt und entlang der langen Kante zusammenklebt, und zwar so, dass stets ganze Dreiecksseiten aneinander zu liegen kommen.

Ähnlich, wenn auch nicht ganz so ordentlich, lassen sich Tetraeder stapeln. Das Ergebnis zeichnet sich durch einen eleganten Hüftschwung aus, und man klebt die langen Kanten des Papiers – das drei Dreiecksstreifen enthält – nicht mehr gerade, sondern versetzt zusammen (Bild links, Mitte). Das geht auch mit mehr als drei Streifen, und je schief man sie zusammensetzt, desto knitriger wird das Endergebnis.

### Polyeder mit einander durchdringenden Flächen

Was nun folgt, ist mit echtem Papier unmöglich, aber in der mathematischen Abstraktion kein Problem. Man wickle den Papierstreifen so eng zusammen, dass eine doppel- oder gar dreilagige Röhre entsteht, und klebe dann die rechte und die linke Kante – mehr oder weniger schief – aneinander. Dafür müsste sich das Papier selbst durchdringen, und die Dreiecke würden einander teilweise verdecken. Aber so etwas ist den Geometriefachleuten geläufig. Ihnen kommt es nicht in erster Linie auf das Volumen an, das die Grenzflächen eines Polyeders einschließen. Vielmehr genügt es, wenn diese Flächen – die jetzt nicht mehr unbedingt ein Inneres vom Äußeren trennen – entlang ihrer Seiten miteinander verbunden sind. Genauer: Jeder Seite einer Fläche liegt exakt eine Seite einer anderen Fläche an, und diese gemeinsamen Seiten heißen dann Kanten des Polyeders. Keine Kante hängt »in der Luft«, an keiner liegen drei oder mehr Flächen an.

Polyeder, die diese mildere Definition erfüllen und von regelmäßigen Vielecken berandet sind, heißen unifor-



FOTO: RINUS ROELOFS

Roelofs hat 104 geschlitzte Dreiecke aus wetterfestem Baustahl zu 26 Tetraedern vereint. Das Kunstwerk hält ohne weitere Befestigungsmittel zusammen.

me Polyeder. Von ihnen gibt es überraschend viele. Wenn man die platonischen und archimedischen Körper sowie diverse Prismen und Antiprismen nicht mitzählt, bleiben immer noch 57 Stück. Das liegt vor allem daran, dass man zum Beispiel auch das Pentagramm (den Fünfstern) zu den regelmäßigen Vielecken zählen darf. Ein Polyeder mit derartigen, nichtkonvexen Seitenflächen hat unvermeidlich verdeckte Teilflächen.

Entsprechend nennt Roelofs seine Gebilde aus einander durchdringenden gleichseitigen Dreiecken unendliche uniforme Polyeder. Nachdem er sie am Computer konstruiert und einige von ihnen in Papier realisiert hatte, stellte er zu seinem Erstaunen fest, dass die Fachleute sich ihrer noch nicht angenommen hatten. Unendliche zylindrische uniforme Polyeder aus gleichseitigen Dreiecken sind ein noch weitgehend unbeackertes Forschungsgebiet.

Vom künstlerischen Standpunkt aus ist die Selbstdurchdringung eine Herausforderung besonderer Art. Wie soll man eine Struktur sichtbar machen, die zu wesentlichen Teilen im Verborgenen liegt? Roelofs hat Lösungen gefunden: einerseits in Form von Kantenmodellen (Bild links, unten), andererseits in-

dem er die Dreiecke mit Löchern versieht (Bild S. 51 unten). Am Ende stellt sich heraus, dass geeignet geschlitzte Dreiecke, als Papier oder auch aus Blech, sich zu einem Polyeder zusammenschieben lassen, das ohne weiteres Kleben, Schweißen oder Schrauben zusammenhält. Und schon nutzt Roelofs das einmal entdeckte Prinzip für andere Skulpturen (Bild oben). ☞

#### DER AUTOR



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

#### QUELLEN

**Roelofs, R.:** The Discovery of a New Series of Uniform Polyhedra. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1308/1308.2474.pdf>  
**Roelofs, R.:** Helical Tiling – Columns Built with Flat Tiles. [www-rech.telecom-lille.fr/smi2015/fase/FASE/9.pdf](http://www-rech.telecom-lille.fr/smi2015/fase/FASE/9.pdf)

#### WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1414909](http://www.spektrum.de/artikel/1414909)

# Gentechnik im Tarnmantel

CRISPR/Cas ist gerade dabei, die Landwirtschaft zu revolutionieren. Die Methode entzieht der alten Kritik an gentechnisch veränderten Organismen den Boden, weil sie ohne das Einpflanzen artfremden Erbguts auskommt. Und doch rollt eine fieberhafte Debatte auf uns zu, wie damit umzugehen ist.

Von Stephen S. Hall

Die etwa 100 Landwirte, die sich im Festsaal des Hotels Mendenhall Inn (Chester County, Pennsylvania) drängeln, haben vermutlich wenig Ahnung von Genome Editing. Dafür kennen sie sich bestens mit Pilzen aus. Zusammen züchten sie durchschnittlich 500 Tonnen Speisepilze pro Tag. Und nehmen damit eine dominante Stellung auf dem einschlägigen US-Markt ein, der 1,2 Milliarden Dollar schwer ist.

Etliche Pilze, die diese Landwirte in den Handel bringen, werden allerdings nach kurzer Zeit braun und verderben in den Verkaufsregalen. Denn sie reagieren extrem empfindlich auf Berührungen. Schon das einmalige, behutsame Anfassen beim Ernten und Einpacken kann ein Enzym aktivieren, das den Verfall beschleunigt. Das Ergebnis ist ein schleimiges, vergammelndes Erzeugnis, das niemand kaufen möchte.

An diesem Herbstmorgen 2015 möchte der Biologe Yinong Yang im Mendenhall Inn den Pilzzüchtern eine Lösung für das Problem vorschlagen. Yang, Professor für Pflanzenpathologie an der Pennsylvania State University, ist nach

eigenem Bekunden zwar kein Pilzexperte. Das hielt ihn aber nicht davon ab, das Genom von *Agaricus bisporus* zu verändern, dem Zweisporigen Egerling und in der westlichen Welt bekanntesten Speisepilz. Dabei nutzte Yang ein neues Werkzeug zum Schneiden und Verändern von DNA-Molekülen, die CRISPR/Cas-Methode (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2015, S. 22).

Die Pilzzüchter im Saal haben wahrscheinlich noch nie etwas von CRISPR/Cas gehört. Die Relevanz dieses genomeditierenden Verfahrens wird ihnen aber schlagartig klar, als Yang zwei Fotos präsentiert. Das eine zeigt einen braunen, verrotteten Champignon. Das andere einen makellos weißen Pilz, dessen Erbgut mit CRISPR/Cas verändert worden ist. Alle Beteiligten begreifen sofort, welches wirtschaftliche Potenzial hierin liegt: Von *Agaricus bisporus* kommen hunderttausende Tonnen jährlich auf den Markt. Das hat auch Yangs Universität verstanden, die ein vorläufiges Patent an seiner Arbeit anmeldete.

In den nicht einmal vier Jahren seit ihrer Entdeckung hat die CRISPR/Cas-Methode bereits Wissenschaftsgeschichte geschrieben. Sie ist ein revolutionäres Werkzeug mit enormem biomedizinischen Potenzial, weit reichenden bioethischen Implikationen, verbissenen Patentstreits und milliardenschweren Auswirkungen auf Medizin und Landwirtschaft. Forschungslabore und Biotechunternehmen entwickeln daraus in atemberaubendem Tempo neue Therapien für Erbkrankheiten wie die Sichelzellanämie und die Beta-Thalassämie. Selbsternannte Künstler und ehrgeizige Biounternehmer träumen davon, mit Hilfe der Methode rosa Kaninchen oder lebende Nippesfiguren zu erschaffen, ähnlich den Minischweinen, die in China kürzlich unter Verwendung von CRISPR/Cas als Haustiere erzeugt wurden. Die Vorstellung, mit dem Verfahren menschliche Embryonen zu »reparieren« oder unsere DNA via Keimbahneingriff dauerhaft zu verändern, hat fieberhafte Diskussionen ausgelöst. Solche denkbaren »Verbesserungen« des Menschen haben Forderungen nach internationalen Forschungsmoratorien laut werden lassen.

## AUF EINEN BLICK

### CRISPR/CAS, DIE PRÄZISIONSSCHERE

**1** Mit dem neuen Verfahren **CRISPR/Cas** können Wissenschaftler das Erbgut eines Organismus verändern – und das nicht nur mit bislang unerreichter Genauigkeit, sondern auch noch sehr einfach und preisgünstig.

**2** Die Methode hat **enormes ökonomisches Potenzial**, da sie kleinen landwirtschaftlichen Unternehmen – und nicht nur den großen Agrarkonzernen – ermöglicht, genetisch veränderte Nutztiere und -pflanzen sowie Pilze zu entwickeln und auf den Markt zu bringen.

**3** Die Anwendung von CRISPR/Cas in der Landwirtschaft ist aber hoch umstritten. **Befürworter** halten das Verfahren für weniger bedenklich als bisherige Gentechnik und weniger rabiat als konventionelle Zuchtmethoden. Zulassungsbehörden neigen dazu, dem zuzustimmen. **Skeptiker** jedoch hegen die gleichen Vorbehalte wie gegenüber bisherigen genetisch veränderten Organismen (GVO).



Speisepilze wie Champignons lassen sich das ganze Jahr über in fensterlosen, klimatisierten Einrichtungen kultivieren. Eine neue genetische Methode könnte verhindern, dass die empfindlichen Fruchtkörper so schnell braun werden.

PICTUREALANCE / PHASEL / DAMP SPOR

Ihre größten Auswirkungen dürfte die CRISPR/Cas-Revolution in der Landwirtschaft haben. Im Herbst 2015, als Yang vor den Pilzzüchtern sprach, waren bereits etwa 50 Fachartikel über Pflanzen erschienen, deren Erbgut mit dieser Methode verändert worden war. Nur ein halbes Jahr später, im April 2016, gab das US-Landwirtschaftsministerium USDA (U.S. Department of Agriculture) bekannt, es werde davon absehen, Yangs CRISPR/Cas-Pilze einem speziellen Zulassungsverfahren zu unterziehen. Die genomeditierten Champignons dürfen nun ohne weitere Auflagen kultiviert und verkauft werden. Diese Entscheidung hatte sich zwar abgezeichnet, ist aber dennoch ein Paukenschlag. Denn sie ermutigt zahlreiche weitere Unternehmen, derart genetisch veränderte Agrarerzeugnisse in den Handel zu bringen.

Dahinter verbirgt sich eine komplexe Debatte – nämlich die, was man unter einem gentechnischen Eingriff zu verstehen habe. Klassische Methoden der Gentechnik führen neues Erbmaterial in Lebewesen ein. Stammt dieses aus einer fremden Spezies, entsteht dabei ein transgener Organismus. Der Einbau artfremder DNA ins Erbgut war immer ein wesentlicher Kritikpunkt von Gentechnikgegnern. Zudem ließ sich nie genau vorhersagen, wo im Erbgut die neuen Gene landen und was sie dort anrichten würden. Deshalb mussten gentechnisch veränderte Organismen ein aufwändiges Zulassungsverfahren durchlaufen, um ihre Unbedenklichkeit unter Beweis zu stellen.

CRISPR/Cas setzt all das außer Kraft. Die Besonderheit des Verfahrens liegt erstens darin, dass es häufig ohne Fremd-DNA auskommt, und zweitens in seiner überragenden Präzision. Mit ihm ist es möglich, beliebige Gene auszuschalten, und das vergleichsweise einfach und billig. CRISPR steht für Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats. Gemeint sind wiederholt auftretende Abschnitte im Erbgut von Bakterien, zwischen denen Teile von viralen DNA-Molekülen liegen. Letztere dienen dem Bakterium als eine Art Virenarchiv und helfen ihm, sich an entsprechende Erreger zu »erinnern«, um sie bei einer Infektion rasch zu erkennen und zu bekämpfen. Das Bakterium stellt in diesem Fall so genannte Cas-Enzyme her: Endonukleasen, die an der DNA der eingedrungenen Viren andocken und sie kappen (Cas steht für CRISPR-associated).

2012 schlugen die Forscherinnen Emmanuelle Charpentier und Jennifer Doudna in der Fachzeitschrift »Science«

vor, das CRISPR/Cas-System als DNA-Schere zu nutzen, um das Erbgut gezielt an bestimmten Stellen zu schneiden. Dazu muss man dem Enzym Cas9 lediglich statt einer viralen Sequenz eine so genannte Leit-RNA vorlegen, welche passgenau an die jeweils gewünschte DNA-Stelle bindet. Sie führt das Cas-Enzym präzise dorthin, so dass es den Erbgutstrang an diesem Punkt zerteilt. Die Technik lässt sich nutzen, um beliebige Sequenzen aus beliebigen DNA-Molekülen zu entfernen und damit gezielt Gene zu inaktivieren. Voraussetzung dafür ist, dass man die Sequenz des gewünschten Gens oder DNA-Abschnitts kennt – sonst kann man die Leit-RNA nicht herstellen. Liegt dieses Wissen jedoch vor, lässt sich das passende CRISPR/Cas-Set innerhalb eines Arbeitstags für rund 20 Euro anfertigen – ein Spottpreis im Vergleich zu bisherigen Methoden. Mehr noch: Die Genschere funktioniert nicht nur in Bakterien, sondern auch in Pflanzen, Pilzen und Tieren.

### Künstlich oder natürlich mutiert? Das lässt sich nicht beantworten

Befürworter sehen CRISPR/Cas als die biologisch am wenigsten eingreifende Form der Pflanzenzüchtung, die Menschen je erdacht haben – einschließlich der herkömmlichen Zuchtmethoden durch Kreuzung, die bereits seit Jahrtausenden angewendet werden. Weil das Verfahren in vielen Fällen ohne das umstrittene Einschleusen artfremder DNA auskommt, ist seinem Ergebnis oft nicht mehr anzusehen, ob es sich um eine geneditierte oder natürliche Mutante handelt. CRISPR/Cas-veränderte Nutzpflanzen unterscheiden sich daher fundamental von transgenen Erzeugnissen wie jenen umstrittenen Mais- und Sojagewächsen von Monsanto, die gegen das Herbizid Roundup resistent sind. Viele Forscher erwarten deshalb schon lange, dass die neue genomeditierende Methode den Streit um die »grüne Gentechnik« völlig neu aufmischen wird. Und das tut sie nun tatsächlich.

Werden die Verbraucher da mitgehen? Oder werden sie die mit CRISPR/Cas veränderten landwirtschaftlichen Erzeugnisse auch nur als genmanipulierte Lebensmittel betrachten – als Eingriff in die Natur mit unvorhersehbaren Folgen für Gesundheit und Umwelt? Noch ist die große Welle entsprechender Marktzulassungen nicht ins Rollen gekommen, daher steht das Thema wenig im Fokus der Öffentlichkeit. Doch das wird sich bald ändern. Pilzzüchter werden wohl die Ersten sein, die dieses Terrain betreten – wahrscheinlich in den kommenden ein, zwei Jahren.

Kurz nachdem Yang seinen Vortrag vor den Landwirten gehalten hatte, sprach ihn ein Industrieforscher auf die Herausforderungen CRISPR/Cas-veränderter Lebensmittel an. Er stimmte Yang zwar darin zu, dass die Herstellung entsprechend genomeditierter Champignons nur minimale Eingriffe in die DNA erfordert, verglichen mit konventionell gentechnisch veränderten Organismen. »Aber es ist und bleibt eine genetische Veränderung, und manche Leute werden das so auslegen, als spielten wir Gott. Wie kommen wir aus diesem Dilemma raus?« Welche Antworten Yang und andere

MEHR WISSEN BEI [Spektrum.de](http://Spektrum.de)

Unser Online-Dossier zum Thema »CRISPR/Cas9-Verfahren« finden Sie unter



[www.spektrum.de/t/crispr](http://www.spektrum.de/t/crispr)



ISTOCK / DRA\_SCHWARTZ

Wissenschaftler darauf finden, wird mit darüber entscheiden, ob CRISPR/Cas sich durchsetzt oder am öffentlichen Widerstand scheitert.

Der Gradmesser einer jeden neuen Technologie ist, wie schnell Forscher sie auf ihre eigenen wissenschaftlichen Probleme anwenden. Demnach gehört CRISPR/Cas zu den leistungsstärksten Verfahren, die im zurückliegenden halben Jahrhundert Eingang in die biologische Methodik gefunden haben. Yongs modifizierte Pilze veranschaulichen das auf eindrucksvolle Weise.

Yinong Yang — sein Vorname bedeutet witzigerweise so viel wie »betreibt Landwirtschaft« — hat sich vor 2013 nie mit Pilzen beschäftigt. Geboren in Huangyan, einer Stadt südlich von Schanghai, arbeitete er Mitte der 1990er Jahre als Student an der University of Florida und später der University of Arkansas mit primitiven geneditierenden Enzymen. Er erinnert sich noch lebhaft an jene »Science«-Ausgabe vom 17. August 2012 mit der Publikation von Jennifer Doudna (University of California, Berkeley) und Emmanuelle Charpentier (heute am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin), in dem die beiden Forscherinnen das CRISPR/Cas-System und sein Potenzial für das Genome Editing beschrieben. Yang war verblüfft. Innerhalb weniger Tage arbeitete er Pläne aus, wie man damit Eigenschaften von Reis- und Kartoffelpflanzen verbessern könne. Im Sommer 2013 veröffentlichte seine Arbeitsgruppe ihr erstes einschlägiges Paper.

Yang war nur einer von vielen. Zeitgleich mit ihm stürzten sich zahlreiche Pflanzenforscher auf die neue Methode. Chinesische Wissenschaftler sorgten 2014 für Aufsehen, als sie demonstrierten, wie sich Brotweizen mit CRISPR/Cas resistent gegen eine alte Plage machen lässt: den Mehltau.

Die Revolution im Genome Editing hatte allerdings schon Jahre vorher begonnen. Für Wissenschaftler wie Daniel F. Voytas ist CRISPR/Cas nur das jüngste Kapitel einer langen Entwicklung. Vor 16 Jahren versuchte er, damals an der Iowa State University, Erbgutveränderungen mit Zinkfinger-nukleasen vorzunehmen: künstlich hergestellten Enzymen, die DNA-Stränge an bestimmten Positionen erkennen und schneiden können. Voytas' erstes Genome-Editing-Unternehmen scheiterte an Patentfragen. 2008 wechselte er an die University of Minnesota und meldete 2010 zusammen mit anderen das Patent an einem genomeditierenden System für Pflanzen an, das auf TALENs basierte. TALENs (transcription activator-like effector nuclease, auf Deutsch transkriptionsaktivatorartige Effektor-nuklease) sind künstliche Enzyme, die Ähnliches leisten wie Zinkfinger-nukleasen. 2010 gründeten Voytas und seine Kollegen das Unternehmen Calyxt mit Sitz in Minnesota. Weitgehend unbeachtet von der Öffentlichkeit erzeugten die Forscher dort mit Hilfe von TALENs genetisch veränderte Pflanzen, die bereits in Freilandversuchen in Nord- wie Südamerika angebaut wurden. Dazu ge-

hören modifizierte Sojabohnen, die mehr ungesättigte Fettsäuren produzieren, und eine Kartoffelsorte, die bei kühler Lagerung weniger zur Bildung bestimmter Zuckerarten neigt – was sowohl bitterem Geschmack entgegenwirkt als auch weniger Acrylamid beim Braten oder Frittieren entstehen lässt.

Da diese gentechnischen Veränderungen nicht mit dem Einbau artfremder Gene einhergingen, entschied APHIS (Animal and Plant Health Inspection Service), die Überprüfungsstelle für Tier- und Pflanzengesundheit des US-Landwirtschaftsministeriums, dass die modifizierten Nutzpflanzen nicht den Regulierungen für gentechnisch veränderte Organismen unterliegen. »Das Ministerium bewertete sie so, als seien sie mit chemischen Mutagenen, Gammastrahlen oder einer nicht genehmigungspflichtigen Methode entstanden, und gab grünes Licht für ihren Anbau«, beschreibt Voytas. »Das ist für uns natürlich von großem Vorteil und erlaubt uns, die Produktentwicklung deutlich zu beschleunigen.«

Nutztierforscher sind ebenfalls auf den Zug aufgesprungen. Wissenschaftler der kleinen Biotechfirma Recombinetics, die in Minnesota ansässig ist, haben bei Holsteinrindern, den wichtigsten Arbeitstieren der Milchindustrie, das für das Hornwachstum verantwortliche biologische Signal genetisch ausgeschaltet. Die Forscher erreichten das, indem sie mittels Genome Editing eine Mutation erzeugten, die bei Aberdeenrindern natürlich vorkommt und zur Folge hat, dass diesen keine Hörner wachsen. Scott Fahrenkrug, Geschäftsführer von Recombinetics, betont, dabei würden keine Fremdgene übertragen. Laut den Wissenschaftlern ist das ein tierfreundlicher Eingriff, denn er erspare Holsteinrindern jene fürchterliche Prozedur, bei der Tierhalter die Hornanlagen von Kälbern ausbrennen oder verätzen beziehungsweise bei heranwachsenden Tieren die Hörner heraussägen lassen – eine Maßnahme, die das Vieh und die Landwirte vor Verletzungen schützen soll. Unterdessen haben koreanische und chinesische Wissenschaftler Schweine mit mehr Muskelmasse erzeugt, indem sie per Genome Editing ein Gen ausschalteten, das für das Protein Myostatin kodiert.

### Heißer Kampf um gewerbliche Schutzrechte

Die Schnelligkeit, unkomplizierte Handhabung und Wirtschaftlichkeit des CRISPR/Cas-Verfahrens macht dieses sogar noch attraktiver als die TALENs. Nur die verfahrenepatentdebatte – sowohl die University of California als auch das Broad Institute, welches vom Massachusetts Institute of Technology und der Harvard University getragen wird, beanspruchen die Erfindung für sich — behindert dessen kommerzielle Verwertung in der Landwirtschaft. Biotechfirmen zögern, Produkte auf der Grundlage von CRISPR/Cas zu entwickeln, solange der Patentstreit nicht geklärt ist.

## Nur der verfahrenepatentstreit behindert die kommerzielle Verwertung des CRISPR/Cas-Systems in der Landwirtschaft

# Die wichtigsten Methoden zur Pflanzenzucht im Überblick

Seit Jahrtausenden kultivieren Menschen Nutzpflanzen, und immer bestand das Ziel darin, ihnen vorteilhafte(re) Merkmale zu verleihen – etwa höhere Ernteerträge oder mehr Resistenz gegenüber Krankheiten. Zunächst erfolgte dies mittels konventionellem Kreuzen. Ab Anfang des 20. Jahrhunderts gingen Wissenschaftler dazu über, das Erbgut von Pflanzen absichtlich zu schädigen – in der Hoffnung, dass dabei zufällig günstige Eigenschaften entstehen könnten. Heute ermöglichen Präzisionswerkzeuge wie CRISPR/Cas, einzelne Gene auszuschalten oder neues genetisches Material an ganz bestimmten Stellen des DNA-Strangs einzufügen. All diese Techniken verändern das Erbgut des betroffenen Organismus, und dennoch muss das Ergebnis in den Augen vieler Forscher nicht unbedingt ein gentechnisch veränderter Organismus (GVO) sein.

## Schlüsselbegriffe

**Mutagenese:** Seit den 1920er Jahren behandeln Forscher pflanzliches Saatgut mit Röntgenstrahlen, Gammastrahlen oder Chemikalien, um dessen DNA zu mutieren. Anschließend lassen sie es keimen und prüfen, ob bei der Prozedur günstige Merkmale entstanden sind. Falls ja, werden die mutierten Pflanzen mit vorhandenen Sorten gekreuzt. Die Gewächse, die daraus hervorgehen, bewertet das US-Landwirtschaftsministerium (USDA) nicht als GVO. Auch nach dem deutschen Gentechnikgesetz gelten sie nicht als solche.

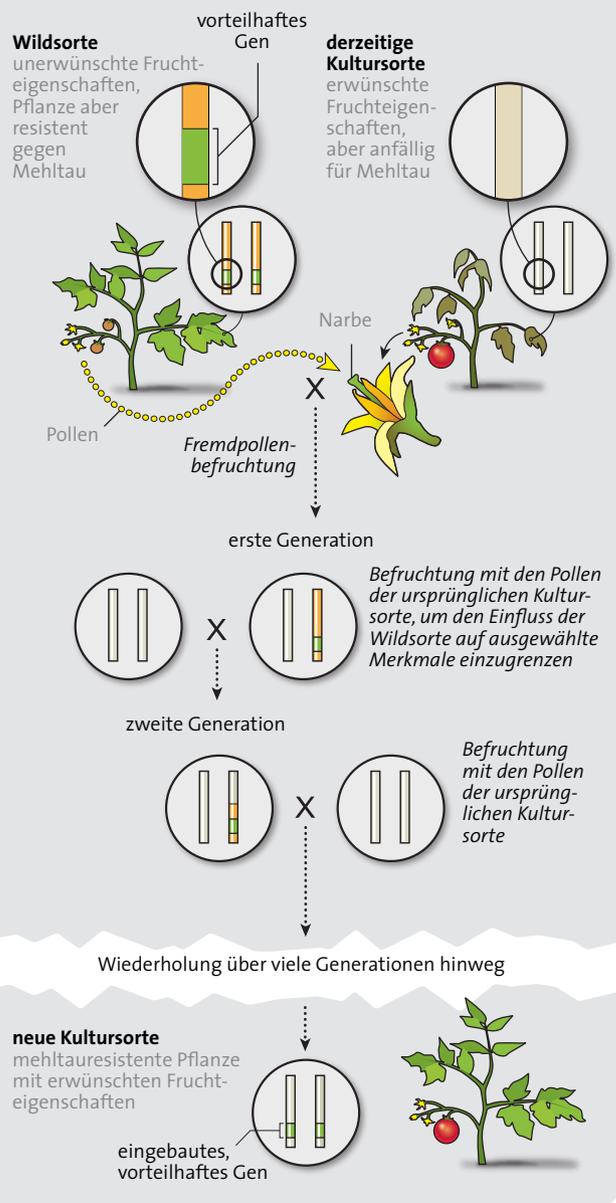
**Gene Silencing:** Etwa seit dem Jahr 2005 gelingt es Wissenschaftlern, Gene mit unerwünschter Wirkung auszuschalten, indem sie RNA-Schnipsel in die jeweiligen Pflanzenzellen einführen. Diese interferierende RNA (iRNA) ist so konstruiert, dass sie an jene Boten-RNA bindet, welche die Information des Gens an die Proteinsynthesemaschine der Zelle überträgt. Das führt entweder zur Zerstörung der Boten-RNA oder zu ihrer »Stummschaltung« und somit zur Inaktivierung des Gens. Mit dieser Methode wurden unter anderem bräunungsresistente Kartoffeln und Äpfel erzeugt. Das USDA bewertet sie nicht als gentechnisch veränderte Organismen. Das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit teilt diesbezüglich mit, es prüfe auf Antrag, ob es sich bei einem Organismus, der nach einem neuen Züchtungsverfahren erzeugt wurde, um einen GVO im Sinn des Gentechnikgesetzes handle oder nicht. Weiter heißt es, das Bundeslandwirtschaftsministerium strebe ein auf europäischer Ebene abgestimmtes Vorgehen bei den neuen Techniken der Pflanzenzüchtung an.

**Cisgenese:** Bei diesem Verfahren bringen Wissenschaftler Erbmateriale nur von solchen Spezies ein, die mit der behandelten Art kreuzbar sind; die entstehende cisgene Pflanze könnte also auch durch natürliche Kreuzung entstehen. Das soll das Risiko des Einbringens artfremder Erbanlagen (Transgenese) mindern. Die Übertragung des Erbmaterials erfolgt typischerweise mit Hilfe einer Pflanzen infizierenden Mikrobe namens *Agrobacterium tumefaciens*, welche die gewünschten Gene an einer weitgehend zufälligen Stelle der Pflanzen-DNA einbaut. Bei cisgenen Pflanzen entscheidet das USDA von Fall zu Fall, wie sie reguliert werden sollen. Genauso verfährt laut Selbstauskunft das Bundeslandwirtschaftsministerium.

**Transgenese:** Erbanlagen, die für ein erwünschtes Merkmal kodieren, werden von einem Organismus auf einen anderen, artfremden übertragen. Wie bei der Cisgenese dient hier das Bakterium *A. tumefaciens* als Genfähre. Beispiele für transgene Nutzpflanzen sind Getreide, denen ein Herbizidresistenzgen eingebaut wurde. 90 Prozent aller in den USA angebauten Sojabohnen sind transgen. Sie gelten als gentechnisch verändert – sowohl laut USDA als auch nach deutschem Gentechnikgesetz.

## Konventionelle Pflanzenzucht per Kreuzung

Pflanzen werden absichtlich mutiert, selektiv gezüchtet und mit anderen gekreuzt. Dabei gelangen riesige Chromosomensegmente – mitunter Millionen Basenpaare groß – zusammen mit dem gewünschten Merkmal in das Erbgut einer domestizierten Kultursorte. Durch nachfolgendes Kreuzen verringert sich typischerweise der Anteil der übertragenen DNA; dennoch umfasst das eingebaute Fremdmaterial oft hunderttausende Basenpaare und kann unvorteilhafte Gene enthalten. Eine Analyse des Genoms von *Arabidopsis* (Vertreter dieser Gattung dienen als Modellorganismen in der Pflanzenforschung) ergab im Jahr 2010, dass die konventionelle Züchtung in jeder Generation zu ungefähr sieben neuen, spontanen Mutationen pro Milliarde Basenpaare führt.



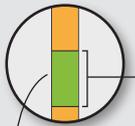
JEN CHRISTIANSEN

## Genetische Veränderungen der ersten Generation

In den 1980er Jahren entwickelten Wissenschaftler die ersten gentechnisch veränderten Nutzpflanzen. Um neues Erbmaterial in die Pflanzenzellen einzubringen, nutzten sie entweder biologische Mittel wie *Agrobacterium* oder physikalische Methoden – so genannte Genkanonen, die DNA in Zellen hineinschießen. Das übertragene Erbmaterial stammte von fremden Arten (Transgenese) oder von verwandten, kreuzbaren Spezies (Cisgenese).

### vorteilhaftes Gen

Kann von einem verwandten Organismus stammen (cisgene Kreuzung) oder von einem artfremden (Mehltau).



vorteilhaftes Gen

### derzeitige Kultursorte

erwünschte Fruchtigenschaften, aber anfällig für Mehltau



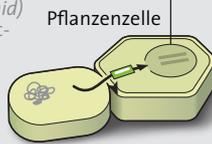
### Agrobacterium-Methode

Das vorteilhafte Gen wird in ein ringförmiges DNA-Molekül (Plasmid) der Mikrobe *Agrobacterium tumefaciens* eingebaut.



Bakterium

Anschließend infiziert man Pflanzenzellen mit dem modifizierten Bakterium, wobei dieses sein Plasmid ins pflanzliche Genom integriert.



Pflanzenzelle

### DNA-Transfer mittels Genkanone

Metallpartikel, die mit DNA-Stücken beschichtet sind, werden in Pflanzenzellen der jeweiligen Kultursorte geschossen. Diese bauen die DNA in ihr eigenes Genom ein.



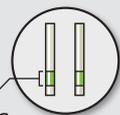
Pflanzenzelle

Zellen, die das neue Erbmaterial in ihr Genom eingebaut haben, teilen sich und entwickeln sich zu Pflanzen.

### neue Kultursorte

mehltauresistente Pflanze mit erwünschten Fruchtigenschaften

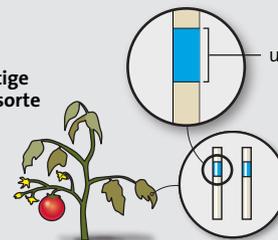
integriertes, vorteilhaftes Gen



## Genetische Veränderungen der zweiten Generation: Genome Editing

Mit Präzisionstechniken wie Zinkfinger-nukleasen, TALENs und CRISPR/Cas können Biologen ganz bestimmte Orte innerhalb des zellulären Genoms anpeilen. Sie können beispielsweise ein spezifisches Gen inaktivieren (siehe unten) oder es durch andere ersetzen. Die dabei eingebrachte neue DNA kann von einer artfremden Spezies stammen (Transgenese) oder von einer verwandten, kreuzbaren (Cisgenese). Obwohl CRISPR/Cas9 sich so programmieren lässt, dass es spezifische Stellen im Genom ganz gezielt angreift, macht sein Schneidwerkzeug, die Endonuklease Cas9, gelegentlich unerwünschte Schnitte auch an anderen Orten, so genannte »off-target cuts«. Diese kommen nach bisherigen Erkenntnissen aber in Pflanzenzellen nur selten vor.

### derzeitige Kultursorte



unerwünschtes Gen

### CRISPR/Cas-Werkzeug

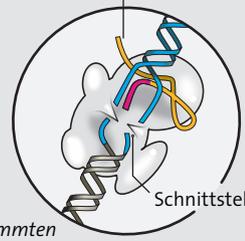
Enthält eine Leit-RNA, die zur Zielsequenz auf dem DNA-Strang komplementär ist (und deshalb an sie bindet), sowie ein DNA-schneidendes Protein, in der Regel die Endonuklease Cas9.



Leit-RNA

Cas9

Pflanzenzelle



Schnittstelle

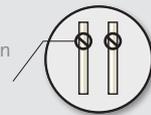
CRISPR/Cas9 bindet sich an die Zielsequenz, und Cas9 schneidet beide DNA-Stränge. Wenn die Zelle den Doppelstrangschnitt repariert, kommt es dort häufig zu zufälligen Veränderungen in der Abfolge der Basenpaare, was meist das gesamte Gen ausschaltet (»knock out«). Schleust man zusätzlich fremdes Erbmaterial ein, kann dieses unter bestimmten Voraussetzungen beim Reparieren des Doppelstrangschnitts eingefügt werden. Dadurch lassen sich hunderte oder tausende neuer Basenpaare ins Genom integrieren.

Zellen mit der modifizierten DNA teilen sich und entwickeln sich zu Pflanzen.

### genomeditierte Pflanze

mehltauresistente Pflanze mit erwünschten Fruchtigenschaften

Unerwünschtes Gen wurde deaktiviert.



Für wissenschaftliche Labore ist das allerdings kein großes Thema. Im Oktober 2013 nahm die Entwicklung genetisch veränderter Speisepilze eine entscheidende Hürde, als David Carroll in Yangs Labor auftauchte. Carroll ist Präsident des Unternehmens Giorgi Mushroom, des zweitgrößten Speisepilzproduzenten in den USA, und erkundigte sich danach, was die neuen Genome-Editing-Techniken leisten könnten. Yang fragte zurück, was genau an den Pilzen verändert werden solle. Carroll nannte deren Neigung, braun zu werden, und Yang erklärte sich bereit, nach entsprechenden Möglichkeiten zu suchen.

Yang wusste genau, auf welches Gen er zielen musste. Biologen hatten zuvor sechs Erbanlagen identifiziert, die für das Enzym Polyphenoloxidase kodieren, welches die Pilze braun werden lässt. Die gleiche Genfamilie lässt auch Äpfel und Kartoffeln braun anlaufen – ein Umstand, an dessen Vermeidung Gentechniker bereits arbeiten. Yang glaubte, wenn er eines dieser Gene ausschalte, würde dies die Bräunung verlangsamen.

### **Steckbrief mit 20 Buchstaben gibt genaue Zielbeschreibung**

CRISPR/Cas9 findet seine Zielsequenz anhand der Leit-RNA: einem kurzen Nukleinsäureschnipsel, dessen Sequenz komplementär zu jener der DNA im Zielbereich ist. Die spezifische Paarung zwischen den Nukleotidbasen Adenin und Thymin sowie Cytosin und Guanin sorgt dafür, dass bereits eine Leit-RNA von nur 20 Nukleotiden Länge ausreicht, um jede gewünschte Stelle im *Agaricus-bisporus*-Genom mit seinen 30 Millionen Basenpaaren präzise aufzuspüren. Das Schneiden erfolgt dann durch das Enzym Cas9, eine Endonuklease, die ursprünglich aus Joghurtbakterienkulturen isoliert wurde und quasi auf dem Rücken der Leit-RNA reitet. Nebenbei bemerkt: Der Name CRISPR/Cas9 für die Methode trifft streng genommen nicht ganz zu. Denn die als CRISPR bezeichneten Erbgutschnipsel kommen ausschließlich im Genom von Bakterien vor. Es ist das mit einer Leit-RNA versehene Cas9-Protein, das die DNA von Pflanzen, Pilzen und Menschen schneidet; CRISPR sind hierbei gar nicht involviert.

Was geschieht, sobald Gentechniker die DNA, die sie verändern möchten, mit Cas9 am gewünschten Punkt geschnitten haben? Die Zelle registriert das und macht sich daran, den Strangbruch zu reparieren. Üblicherweise schließt sie ihn einfach wieder. Man kann aber auch ein Stück DNA hinzugeben, und die zelluläre Reparaturmaschine wird es mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit an der betroffenen Stelle in den Strang einbauen. Auf diese Weise lässt sich CRISPR/Cas9 dazu nutzen, Erbmaterial in einen Organismus einzuschleusen.

Beim Champignon ging es darum, ein vorhandenes Gen auszuschalten, wofür die einfache Strangreparatur ausreicht. Denn während der genetischen Ausbesserung gehen gewöhnlich ein paar Basenpaare im DNA-Strang verloren, gleichbedeutend mit dem Verlust einiger Buchstaben im genetischen

Kode. Da der zelleigene Proteinsyntheseapparat die DNA in Form drei Buchstaben langer »Wörter« abliest, verändert das Verschwinden einiger Buchstaben den gesamten Text. Fachleute sagen: Das Leseraster verschiebt sich. Dadurch verliert das betroffene Gen in der Regel seine Funktion.

Genau das ist bei dem genomeditierten Champignon passiert. Durch die Entfernung eines winzigen DNA-Stücks inaktivierten Yang und seine Kollegen eines der Gene, die für die Polyphenoloxidase kodieren – eine Mutation, die sich per DNA-Analyse bestätigen ließ. Hierfür waren etwa zwei Monate Laborarbeit nötig. Der schwierigste Schritt, die Erzeugung der Leit-RNA, kostete einige hundert Dollar. Diese Hürde ist mittlerweile leichter zu nehmen, denn verschiedene kleine Biotechunternehmen haben sich darauf spezialisiert, maßgeschneiderte CRISPR/Cas-Konstrukte herzustellen, mit denen sich jedes beliebige Gen verändern lässt. Am teuersten dabei ist die menschliche Arbeitskraft. »Wenn man diese nicht berücksichtigt, hat das ganze Projekt wahrscheinlich weniger als 10 000 US-Dollar gekostet«, schätzt Yang. In der landwirtschaftlichen Biotechbranche sind das Peanuts.

Noch viel wichtiger aber sind die Unterschiede auf regulatorischem Gebiet, die zwischen CRISPR/Cas und herkömmlichen gentechnischen Methoden bestehen. Im Oktober 2015 stellte Yang sein Pilzprojekt informell dem US-Landwirtschaftsministerium vor. Die dort zuständigen Mitarbeiter entscheiden, ob genetisch modifizierte Nutzpflanzen unter besondere staatliche Regulierung fallen – wobei es im Wesentlichen um die Frage geht, ob die jeweiligen Gewächse als gentechnisch veränderte Organismen (GVO) einstuft werden. Yang verließ das Treffen ziemlich zuversichtlich, dass mit Nein entschieden werden würde – was im April 2016 tatsächlich geschah. Dieses Urteil ist von erheblicher Tragweite: Die gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsanforderungen an GMO zu erfüllen, kann laut Gentechnikunternehmer Daniel Voytas bis zu 35 Millionen Dollar kosten und bis zu fünfzehn Jahren dauern.

Speisepilze wie Champignons bieten einen weiteren Vorteil, um die Anwendbarkeit des CRISPR/Cas-Systems in der Landwirtschaft zu demonstrieren: Sie wachsen sehr schnell. Sie benötigen nur etwa fünf Wochen, um auszureifen, und können zudem das ganze Jahr über in fensterlosen, klimatisierten Einrichtungen kultiviert werden. Die genetisch veränderten Sojabohnen und Kartoffeln hingegen, die das Unternehmen Calyxt erzeugt hatte, müssen monatelange Feldversuche durchlaufen. Außerdem lassen sie sich nur saisonal anbauen – weshalb das Unternehmen eine behördliche Genehmigung einholte, seine Sojabohnen während der Wintermonate 2014/2015 in Argentinien anzupflanzen zu dürfen, wenn das in Nordamerika nicht möglich ist.

Mit genetisch modifizierten Organismen verbindet sich allerdings die grundsätzliche Sorge, dass sie unvorhergesehene Auswirkungen auf die Umwelt haben könnten. Biotechnisch erzeugte Lebensmittel könnten Toxine oder Allergene enthalten, die ein Gesundheitsrisiko bedeuten – eine Befürchtung übrigens, die sich bei GMO bislang noch nie be-

wahrheit hat. Zu den Horrorszenarien, die vor allem Gegner der grünen Gentechnik schüren, gehören pflanzliche GVO, die quasi Amok laufen und lokale Biotope zerstören. Die Marktzulassung von Yangs CRISPR/Cas9-veränderten Champignons könnte aber auch unbeabsichtigte ökonomische Folgen haben. Wenn die Pilze langsamer verrotten, dürfte das zu einem geringeren Bedarf seitens der Händler führen. Zudem könnte eine Nachfrage nach ausländischen (nicht genomveränderten) Pilzen entstehen und deren Import ankurbeln. Für die Landwirte sind Yangs verbesserte Pilze also gewissermaßen ein zweischneidiges Schwert. Und noch ein weiterer Aspekt ist zu beachten: Es könnte sein, dass die genomeditierten Pilze anders schmecken und daher von den Kunden nicht angenommen werden. All diese Aspekte werden eine Rolle spielen in der noch jungen Geschichte CRISPR/Cas9-veränderter Lebensmittel.

Als Yang seine Arbeiten vor den Landwirten und den Vertretern des Landwirtschaftsministeriums erläuterte, beschrieb er sein Verfahren mit der Formulierung »transgenfreie genetische Modifikation«. Damit wollte er unterstreichen, dass die neuen Genome-Editing-Techniken wie CRISPR/Cas9 ohne artfremde DNA (Transgene) auskommen. Yang und viele andere möchten damit die Debatte um GVO neu aufrollen. Tatsächlich hat die Abkürzung GEO (gen edited organisme) bereits begonnen, sich als Alternative zu GVO zu etablieren.

### **Herkömmlich gezüchteter Brotweizen: Eine genetische Monstrosität**

Was genau bedeutet gentechnisch verändert? Das ist nicht leicht zu beantworten. Kritiker von biotechnisch erzeugten Lebensmitteln argumentieren, jede Form genetischer Modifikation sei eine Veränderung des Erbguts mit dem Risiko unbeabsichtigter Mutationen, die die menschliche Gesundheit oder die Umwelt gefährden. Wissenschaftler wie Voytas und Yang entgegnen, alle Formen der Pflanzenzucht beruhen auf genetischen Veränderungen, einschließlich jener von Brotweizen durch neolithische Bauern vor vielen Jahrtausenden. Traditionelle Züchtungsmethoden, argumentieren die Forscher, würden oft als irgendwie im Einklang mit der Natur angesehen, seien aber alles andere als biologisch unbedenklich. Sie bringen, mit den Worten von Yang, »massive« Verwerfungen im Erbgut mit sich. Nina Fedoroff, Pflanzenbiologin und frühere Präsidentin der American Association for the Advancement of Science (AAAS), hat die domestizierten Formen des Brotweizens, die herkömmlich gezüchtet wurden, einmal als »genetische Monstrositäten« bezeichnet.

Landwirtschaftliche Gentechnik wurde erstmals in den 1970er Jahren verfügbar. Davor hatten Pflanzenzüchter meist auf brachiale Methoden zurückgegriffen, um die DNA von Nutzpflanzen zu verändern: etwa Röntgen- und Gamma-

strahlen sowie aggressive Chemikalien. Das war ungefähr so, als würde man eine Splittergranate in eine Jahrmaktschießbude werfen, um auf einer Zielscheibe ins Schwarze zu treffen. Trotzdem führten einige der dabei entstandenen zufälligen Mutationen zu landwirtschaftlich günstigen Eigenschaften, etwa höherem Ernteertrag, formschöneren Früchten oder der Fähigkeit, unter widrigen Bedingungen wie Trockenheit zu gedeihen. Diese ließen sich dann mit vorteilhaften Merkmalen von anderen Sorten oder Arten kombinieren, allerdings nur durch Kreuzung der jeweiligen Pflanzen. Diese Form der Zucht ist sehr zeitaufwändig; sie nimmt oft fünf bis zehn Jahre in Anspruch, gilt aber als natürlich.

Was viele nicht wissen: Natürliche Zucht hat ein enormes Zerstörungspotenzial. Jedes Mal, wenn während eines Kreuzungsvorgangs die

DNA-Moleküle der beteiligten Individuen zusammenkommen, werden sie durchmischt. Dabei können riesige DNA-Sequenzen mit Millionen von Basenpaaren ausgetauscht werden, und es entsteht laut Voyas ein gigantischer Mischmasch. »Es wird nicht bloß eine Erbanlage transportiert, sondern ein gewaltiger Batzen DNA mit vielen Genen.« Zusammen mit der jeweils gewünschten, vorteilhaften Eigenschaft werden dabei oft ungünstige Merkmale übertragen. Dieser Mitnahmeeffekt kann die gezüchtete Pflanze schädigen. Neue genetische Befunde über Reispflanzen deuten darauf hin, dass bei deren einstiger Domestikation nicht nur die offensichtlich nutzbringenden Eigenschaften herangezüchtet, sondern zudem nachteilige Mutationen eingeführt wurden, die sich nur nicht so deutlich im Phänotyp äußern.

CRISPR/Cas ist zwar wesentlich präziser als herkömmliche Zuchtverfahren, aber nicht unfehlbar. Die Endonuklease schneidet manchmal an einer unbeabsichtigten Stelle (»off-target cut«), was Sicherheitsbedenken aufwirft. Hauptsächlich deshalb gilt das Genome Editing von menschlichen Keimzellen derzeit noch als zu unsicher und ethisch bedenklich. Forscher arbeiten daran, die Methode zu verbessern, um die Häufigkeit fehlerhafter Schnitte zu reduzieren.

Die geringen Kosten und die leichte Handhabbarkeit des CRISPR/Cas-Verfahrens bringen Forschungslabore und kleine Biotechfirmen wieder in ein Spiel zurück, das lange Zeit den Großen der Agrarindustrie vorbehalten war. Lediglich finanzstarke Unternehmen konnten es sich leisten, die kostspieligen Zulassungsverfahren der grünen Gentechnik zu stemmen. Gentechnische Veränderungen von Nutzpflanzen dienten deshalb bisher fast immer dem Zweck, die Produktion von Lebensmitteln gewinnbringender zu machen – sei es über Ertragssteigerungen mit Hilfe herbizidresistenter Gewächse des US-Konzerns Monsanto oder über bessere Transportfähigkeit mit Hilfe von Flavr-Savr-Tomaten (»Antimatschtomaten«) der kalifornischen Firma Calgene, die 1997 von Monsanto aufgekauft wurde. All diese Pflanzenmodifikationen dienten mehr der Agrarindustrie als den

## **Die klassische, brachiale Mutagenese wirkt ungefähr so, als würde man eine Splittergranate in eine Jahrmaktschießbude werfen**

Verbrauchern und zielten kaum auf die Qualität der Lebensmittel ab.

Die innovativen Genome-Editing-Verfahren könnten das Feld nun neu aufrollen. Caixia Gao von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften weist darauf hin, dass Pflanzen viele Stoffe herstellen, die keinen direkten Nährwert haben, etwa Toxine (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2016, S. 28). Mit Eingriffen ins Erbgut ließe sich das unterbinden, um den Nährgehalt ebenso wie den Geschmack zu verbessern. Letzteres trifft etwa bei der Kartoffelpflanze von Calyxt bereits zu.

Michael Palmgren, Pflanzenbiologe an der Universität Kopenhagen, hat vorgeschlagen, Nutzpflanzen mittels Genome Editing partiell rückzuzüchten. Er meint damit, nützliche Eigenschaften wiederherzustellen, die in vielen Generationen landwirtschaftlicher Zucht verloren gegangen sind. Wirtschaftlich bedeutsame Gewächse wie Reis, Weizen, Orangen und Bananen sind beispielsweise sehr anfällig gegenüber Krankheiten, und die »Wiederbelebung« inaktiver Gene könnte ihre Resistenz erhöhen.

### Vom Unkraut zur Nutzpflanze – dank weniger genetischer Eingriffe

Solche Rückzüchtungsversuche sind bereits im Gang. Daniel Voytas schlägt allerdings einen anderen Ansatz vor als Palmgren. Seine Mitarbeiter und er versuchen, landwirtschaftlich vorteilhafte Erbanlagen aus vorhandenen Hybridpflanzen in wilde Spezies zu übertragen, welche widerstandsfähiger und anpassungsfähiger sind – beispielsweise in Verwandte von Mais- und Kartoffelpflanzen. »Oft sind es nur eine Hand voll Veränderungen in fünf, sechs oder sieben Genen, die Früchte größer werden lassen oder mehr Ähren hervorbringen – und damit Pflanzen, die man bisher bloß als Unkräuter kannte, plötzlich wirtschaftlich interessant machen«, sagt der Gentechnikunternehmer. Statt Jahre darauf zu verwenden, Wildmit Kulturformen zu kreuzen, könne man die ersten einfach per Genome Editing domestizieren, meint er.

CRISPR/Cas und andere genomeditierende Verfahren scheinen den Zulassungsprozess allgemein zu beschleunigen. Als das Unternehmen Calyxt erstmals beim US-Landwirtschaftsministerium anfragte, welche Sicherheitsanforderungen seine mit TALENs modifizierten Kartoffelpflanzen erfüllen müssten, benötigten die Beamten mehr als ein Jahr, bis sie im August 2014 entschieden, die veränderten Gewächse bedürften keiner besonderen Regulierung. Als die Firma im Sommer 2015 die gleiche Anfrage bezüglich seiner genomodifizierten Sojabohnen formulierte, dauerte es nur zwei Monate, bis die Gutachter zum gleichen Schluss kamen. Anscheinend bewerten zuständige US-Behörden die neuen Techniken mittlerweile als grundsätzlich verschieden von transgenen Methoden.

Die schwedische Landwirtschaftskammer erklärte im November 2015, einige mutierte Pflanzen, die mit dem CRISPR/Cas-System erzeugt wurden, fielen nicht unter die EU-Definition eines gentechnisch veränderten Organismus. Argenti-

nien entschied ähnlich. Die EU überprüft derzeit ihre Haltung zu den neuen Editing-Techniken. Mit Spannung wird der Beschluss der EU-Kommission erwartet, inwieweit CRISPR/Cas und andere Verfahren unter das Gentechnikrecht fallen. Die Kommission hat ihre Entscheidung jedoch wiederholt verschoben. Voytas und andere Forscher schlagen einen möglichen Kompromiss vor: Demnach sollten genomeditierende Eingriffe, die zu einer Mutation oder dem Abschalten (»knock out«) eines Gens führen, analog zu herkömmlichen Formen der Pflanzenzucht angesehen werden, bei denen etwa Röntgenstrahlung zum Einsatz kommt. Beim Einbringen neuer DNA hingegen (Transgenese oder »knock in«) sollen die Aufsichtsbehörden von Fall zu Fall entscheiden.

Der Tag, an dem genomeditierte Lebensmittel auf den Markt kommen, ist wohl nicht mehr fern. Voytas rechnet mit der Markteinführung der Calyxt-Sojabohnen im Jahr 2017 oder 2018. Wie wird die Öffentlichkeit reagieren? Wahrscheinlich skeptisch, meint Jennifer Kuzma, politische Analystin an der North Carolina State University und Experte für landwirtschaftliche Gentechnik: »Wer die erste Generation gentechnisch veränderter Organismen abgelehnt hat, wird das wohl auch bei der zweiten tun, einfach weil es ein Eingriff in die DNA ist.« Kuzma hält es für dringend notwendig, das Zulassungsprozedere zu überarbeiten und mehr Gutachter am Überprüfungsverfahren zu beteiligen. Ihrer Meinung nach stehen wir an einem Wendepunkt im Umgang mit genveränderten Lebensmitteln.

Was Yangs Pilze betrifft, so wird ihr Markterfolg oder -misserfolg wesentlich von den Landwirten abhängen. Die Champignons mögen noch so lange weiß bleiben. Doch wenn die Züchter an deren Geschmack zweifeln oder Absatzeinbrüche befürchten, weil die Kunden das neue Produkt nicht annehmen, wird es sich nicht durchsetzen. ~

#### DER AUTOR



**Stephen S. Hall** ist ein preisgekrönter Wissenschaftsautor in den USA. Er schreibt unter anderem für »National Geographic«, »Science«, »Technology Review« und »Scientific American«.

#### QUELLEN

- Andersen, M.M. et al.:** Feasibility of New Breeding Techniques for Organic Farming. In: Trends in Plant Science 20, S. 426–434, 2015
- Kokotovich, A., Kuzma, J.:** Conflicting Futures: Environmental Regulation of Plant Targeted Genetic Modification. In: Bulletin of Science, Technology & Society 34, S. 108–120, 2014
- Ledford, H.:** Bitter Fight over CRISPR Patents Heats up. In: Nature 529, S. 265, 2016
- Waltz, E.:** Gene-Edited CRISPR Mushroom Escapes US Regulation. In: Nature 532, S. 293, 2016
- Waltz, E.:** A Face-Lift for Biotech Rules Begins. In: Nature Biotechnology 33, S. 1221–1222, 2015

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1414910](http://www.spektrum.de/artikel/1414910)

# DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM  
SPEKTRUM DER  
WISSENSCHAFT-  
**DIGITAL-  
ABO**

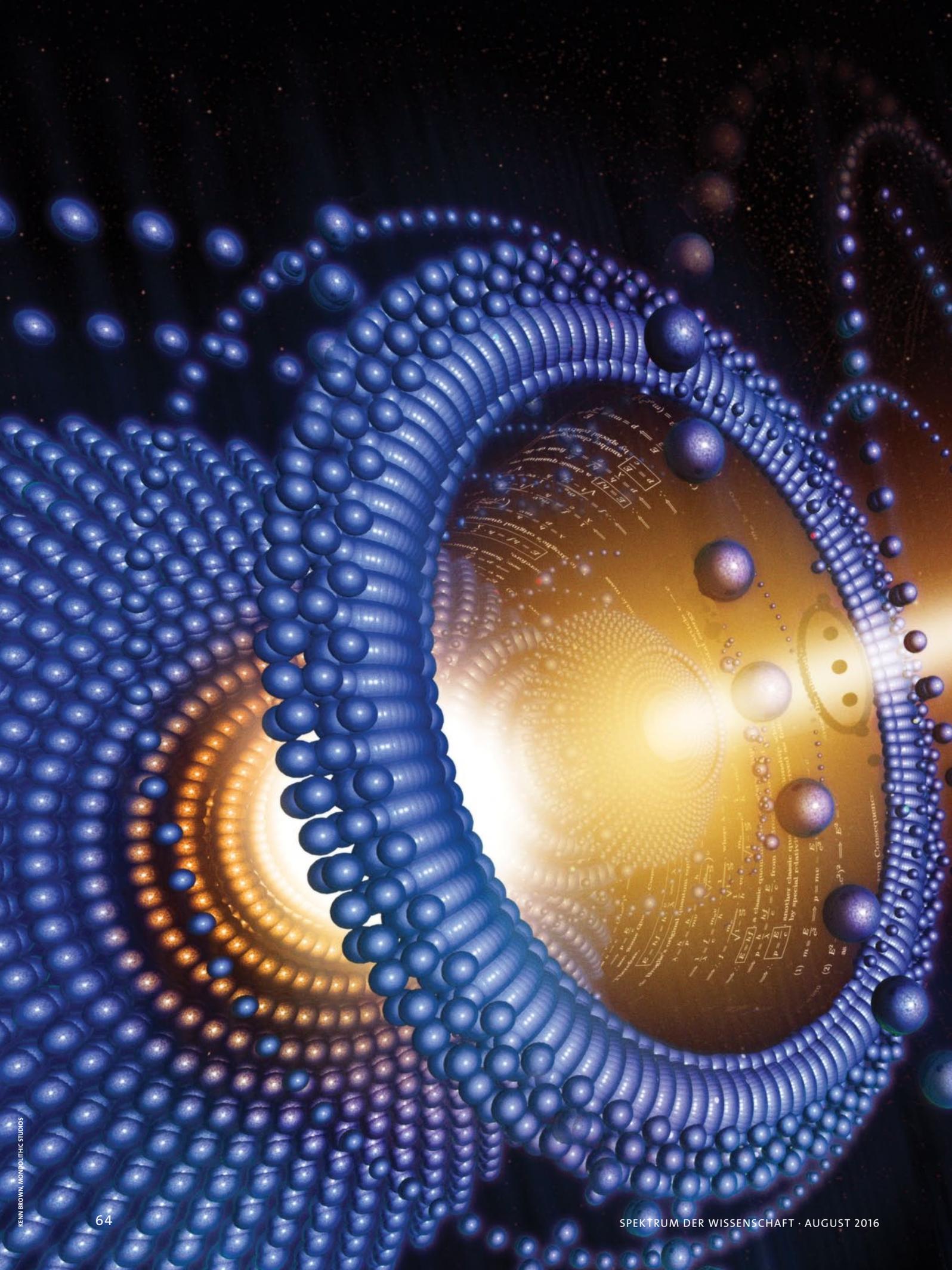


Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das E-Paper-Heftarchiv!

So einfach erreichen Sie uns:  
**Telefon: 06221 9126-743**  
**[www.spektrum.de/digitalabo](http://www.spektrum.de/digitalabo)**  
E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

Oder QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!





INFORMATIK

# Quantencomputer als Kodeknacker

Heutige Verschlüsselungsmethoden werden den Quantencomputern der Zukunft nicht standhalten. Kann es dann überhaupt noch sichere Codes geben?

Von Tim Folger

**A**n einem Herbstnachmittag des Jahrs 1979 diskutierten zwei junge Forscher ein Problem, das noch gar nicht existierte. Der eine, Gilles Brassard, hatte kürzlich an der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York) promoviert und sonnte sich am Strand von Puerto Rico, als ihn ein flüchtig bekannter Physiker ansprach und von garantiert fälschungssicherem Papiergeld schwärmte: Einige Jahre zuvor habe ein Doktorand an der Columbia University in New York namens Stephen Wiesner die Idee gehabt, man müsse in die Banknoten nur irgendwie Photonen – Lichtquanten – einbetten; dann würde jeder Versuch, die Photonen zu messen oder zu kopieren, nach den Regeln der Quantenmechanik augenblicklich deren Eigenschaften ändern. Alle Geldscheine besäßen auf diese Weise eine absolut kopiergeschützte Quantenseriennummer.

Die Unterhaltung habe sein Leben verändert, meint Brassard, heute Informatikprofessor an der University of Montreal (Kanada); sein Gesprächspartner damals war Charles Bennett, Forschungsphysiker bei IBM. Obwohl die Idee des Quantengelds beide faszinierte, wussten sie um deren Unmöglichkeit. Bis heute hat niemand eine Ahnung, wie man lichtschnelle Photonen dauerhaft in ein Stück Papier sperren soll. »Aber als Gedankenexperiment ist das ein schönes Beispiel für eine unter praktischen Gesichtspunkten völlig lächerliche Idee, die sich als theoretisch ungemein fruchtbar erweist«, sagt Brassard. »Aus ihr entwickelten Bennett und ich den so genannten Quantenschlüsselaustausch.«

Mit der Begegnung am Strand begann eine Zusammenarbeit, aus der nach fünf Jahren die erste Verschlüsselungsmethode hervorhing, die nicht auf mathematischer Komplexität beruht, sondern auf physikalischen Gesetzen. Der Quantenschlüsselaustausch (quantum-key distribution, QKD) ist ein im Prinzip absolut abhörsicheres Verfahren zur Datenkodierung und -übermittlung mittels Photonen. Als Bennett und Brassard ihre Arbeit 1984 endlich veröffentlichten, wurde sie kaum

bemerkt. »Sie galt als Spielerei«, meint Brassard. »Ich glaube, wir selbst haben uns auch nicht besonders ernst genommen.«

Das hat sich geändert. Vor 30 Jahren verwendeten praktisch nur staatliche Geheimdienste kryptografische Techniken. Heute sind normale Transaktionen im Internet selbstverständlich verschlüsselt. Sobald jemand online sein Passwort oder eine Kreditkartennummer eingibt, schützen raffinierte Programme im Webbrowser die Information vor unbefugtem Zugriff. »Das ist eine Technik, die jeder braucht, aber niemand bemerkt«, sagt Vadim Makarov, der am Institute for Quantum Computing der University of Waterloo in Ontario forscht. »Sie funktioniert eben.«

Das muss jedoch nicht so bleiben. Kaum ein gängiges Chiffrierverfahren wird wahrscheinlich etwas gegen künftige Quantencomputer ausrichten; diese Maschinen könnten bald die komplizierten Codes knacken, die heute alles Mög-

## AUF EINEN BLICK

### BEDROHTE DATENSICHERHEIT

**1** Herkömmliche Computer tun sich schwer damit, die – oft auf großen Primzahlen beruhende – **Verschlüsselung** der unzähligen Nachrichten und Transaktionen zu knacken, die durch das Internet schwirren.

**2** Ein künftiger **Quantencomputer** könnte heutige Chiffriermethoden überwinden, indem er die seltsamen Gesetze der Mikrophysik nutzt und alle denkbaren Lösungen eines Codeproblems simultan ausprobiert.

**3** Während Universitäten, Regierungsstellen und Privatfirmen große Anstrengungen unternehmen, einen funktionierenden Quantencomputer zu bauen, bemühen sich Kryptologieexperten bereits, auf **Quanteneffekten** beruhende **Chiffriermethoden** zu entwickeln, die selbst ein Quantencomputer nicht dekodieren kann.

liche schützen – vom Onlinekauf bis zur Stromversorgung. Zwar hat bisher noch niemand einen funktionsfähigen Quantencomputer gebaut, aber weltweit arbeiten Forscher in Universitäts-, Industrie- und Regierungslabors an Prototypen. Eines der vom Whistleblower Edward Snowden enthüllten Dokumente beschreibt ein Projekt des US-Auslandsgeheimdiensts NSA (National Security Agency) namens Penetrating Hard Target (Englisch für etwa: ein hartes Ziel durchdringen): Für fast 80 Millionen Dollar soll ein Quantencomputer entstehen. »Man kann kaum ausschließen, dass es in 10 bis 15 Jahren so ein Gerät geben wird«, meint der Physiker Ray Newell vom Los Alamos National Laboratory in New Mexico.

Sobald der erste Quantencomputer läuft, wird das wirkksamste Mittel gegen seine Fähigkeit, Codes zu knacken, vermutlich ebenfalls auf Quanteneffekten beruhen – auf einer

Anwendung der mehr als 30 Jahre alten Theorie von Bennett und Brassard. Die Quantenverschlüsselung, welche die seltsamen Eigenschaften einzelner Lichtteilchen nutzt, lässt sich sogar leichter realisieren als ein Quanten-

computer, und ein paar kleine Quantenschlüssel funktionieren schon. Das Problem ist nur: Wahrscheinlich dauert es länger, sämtliche Chiffriersysteme der Welt durch Quantenversionen zu ersetzen, als einen echten Quantencomputer zu entwickeln. »Wenn dieses Problem tatsächlich in 10 bis 15 Jahren auftauchen sollte, hätten wir gestern mit der Lösung beginnen müssen«, meint Newell. »Wahrscheinlich ist es schon zu spät.«

Hinter dem mühelosen Mausclicken und Bildschirmtippen des digitalen Netzverkehrs steckt ein kompliziertes mathematisches Gerüst aus zwei Chiffrierformen: Bei der symmetrischen Verschlüsselung dient zum Kodieren und Dekodieren der Daten ein und derselbe geheime Schlüssel, während bei der asymmetrischen Verschlüsselung ein Schlüssel die Nachricht kodiert und ein anderer sie entziffert. Jeder sichere Internetverkehr erfordert beide Verfahren.

## Kaum ein gängiges Chiffrierverfahren wird etwas gegen Quantencomputer ausrichten

Ein typischer Datenverkehr zwischen einem privaten Computer und dem Webserver eines Onlinehändlers beginnt mit der Herstellung eines symmetrischen Schlüssels, den Kunde und Händler gemeinsam nutzen, um Kreditkartennummern und andere private Daten zu kodieren. Ein Schlüssel ist im Grunde eine Gruppe von Anweisungen zur Kodierung von Information. Ein lächerlich einfacher Schlüssel könnte vorschreiben, jede Ziffer einer Kreditkartennummer mit 3 zu multiplizieren; natürlich sind echte Schlüssel mathematisch viel komplexer. Sobald jemand etwas im Internet kauft, teilt sich der Webbrowser des Kunden einen Schlüssel mit dem Server des Onlinehändlers. Aber wie wird der Schlüssel selbst während dieses ersten Datenaustauschs geheim gehalten? Eine zweite, diesmal asymmetrische Sicherheitschicht verschlüsselt den symmetrischen Schlüssel.

### Zweierlei Chiffrierung

Die asymmetrische Verschlüsselung – in den 1970er Jahren vom britischen Geheimdienst sowie parallel von unabhängigen Forschern erfunden – verwendet zwei Schlüssel: einen öffentlichen und einen privaten. Für jede geschützte Übertragung sind beide erforderlich. Während eines Onlinekaufs sendet der Server des Händlers seinen öffentlichen Schlüssel an den Computer des Kunden. Der Kundencomputer nutzt dann den öffentlichen, allen Kunden zugänglichen Schlüssel des

Onlinehändlers, um einen eigenen symmetrischen Schlüssel zu chiffrieren. Nachdem der Händlerserver den chiffrierten symmetrischen Kundenschlüssel empfangen hat, dekodiert er ihn mit einem privaten Schlüssel, den niemand sonst besitzt. Sobald der symmetrische Schlüssel sicher kommuniziert wurde, schützt dieser den Rest des Kaufvorgangs vor Zugriff durch Unbefugte.

Die für das asymmetrische Verfahren genutzten öffentlichen und privaten Schlüssel beruhen auf sehr großen Zahlen und deren Primfaktoren, das heißt auf der Zerlegung einer Zahl in Faktoren, die nur durch eins und sich selbst teilbar sind. Der öffentliche Schlüssel besteht aus einer riesigen Zahl, die durch Multiplikation zweier großer Primzahlen entstanden ist; den privaten Schlüssel bilden die beiden Primfaktoren. Das Multiplizieren von zwei Primzahlen ist kinderleicht, aber die umgekehrte Rechenoperation – Teilen einer sehr großen Zahl in zwei Primfaktoren – kann selbst große Computer überfordern. Das Aufspüren der Primfaktoren einer riesigen Zahl erinnert Newell an den Versuch, zwei in einem Topf miteinander verrührte Farben zu trennen: »Farben mischen ist keine Kunst, Farben trennen schon.«

Die gängigste asymmetrische Verschlüsselungsmethode heißt RSA, nach ihren Schöpfern Ron Rivest, Adi Shamir und Leonard Adleman, die den Ansatz Ende der 1970er Jahre am Massachusetts Institute of Technology entwickelten. Asym-

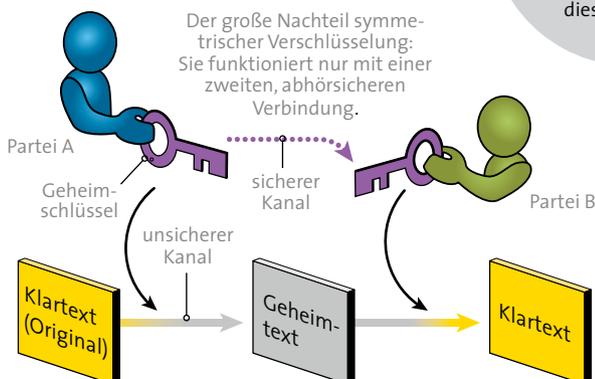
## Verschlüsselung heute

Bei jedem Onlinekauf tauschen der Browser des Kunden und die Website des Händlers zunächst einen Geheimcode aus, der die eigentlichen Kaufdaten verschlüsseln soll. Man spricht von symmetrischer Verschlüsselung, da beide Parteien denselben Schlüssel verwenden. Um den Schlüssel zu sichern, nutzen bei-

den Parteien eine zweite Chiffrieremethode: die asymmetrische Verschlüsselung. Dieses zweistufige System stellt einen wirksamen Schutz dar – allerdings nur, bis Quantencomputer zum Knacken der Codes eingesetzt werden.

### Symmetrische Verschlüsselung

Angesichts einer unsicheren Verbindung kodiert Partei A eine Botschaft, bevor sie diese an Partei B sendet. Wenn ein Spion die kodierte Botschaft abfängt, macht das nichts, denn er kann sie nicht verstehen. Hingegen kann Partei B die Nachricht lesen, denn Partei A hat Partei B durch einen abhörsicheren Nebenkanal einen Geheimschlüssel übermittelt.

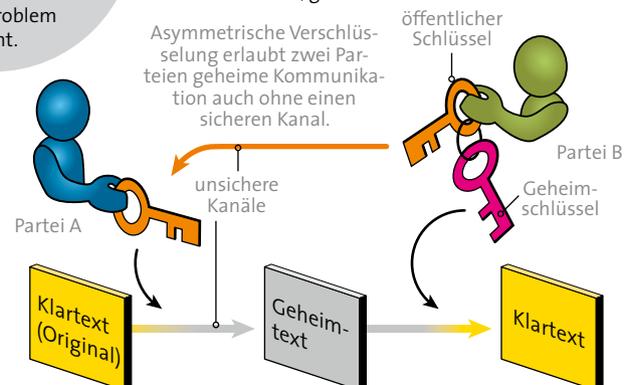


### Anfälligkeit

Asymmetrische Verschlüsselung funktioniert, weil klassische Computer an der Faktorisierung sehr großer Zahlen scheitern. Quantencomputer haben dieses Problem nicht.

### Asymmetrische Verschlüsselung

Partei B – der Empfänger – wählt zwei Schlüssel aus: Der eine erklärt, wie man eine Botschaft kodiert, der andere, wie man sie entschlüsselt. Partei B teilt ungeschützt die Kodierungsanleitung mit; das ist der »öffentliche« Schlüssel. Partei A kodiert ihre Botschaften mit dem öffentlichen Schlüssel. Sobald Partei B die kodierte Botschaft empfängt, dekodiert sie diese mit Hilfe des zweiten, geheimen Schlüssels.



metrische Digitalschlüssel sind typischerweise 1024 Bits lang, doch sogar diese riesige Zahl wird – von möglichen Quantencomputern einmal ganz abgesehen – wohl nicht ausreichen, künftige Hackerangriffe zu vereiteln. Das National Institute of Standards and Technology (NIST) in Gaithersburg (Maryland) empfiehlt bereits, die RSA-Schlüssel auf 2048 Bits zu vergrößern. Doch aufwändige Schlüssel haben ihren Preis, mahnt Richard Hughes, ein Physiker am Los Alamos Laboratory: Sie kosten Rechenzeit. Die Rechenleistung der Computer hinkt den immer umständlicheren Dekodierungsalgorithmen hinterher. »Wenn man ein Cloudsystem mit vielen gleichzeitigen Zugriffen betreibt oder ein Stromnetz«, meint Hughes, »dann kann man sich solche Zeitverzögerungen einfach nicht leisten.«

Und gegen einen echten Quantencomputer würde selbst der von NIST empfohlene 2048-Bit-Schlüssel nichts ausrichten. Wie Michele Mosca, Mitbegründer des Institute for Quantum Computing, vermutet, könnte dieser Fall bis 2030 eintreten. »Angesichts der Fortschritte in den letzten fünf Jahren müssen wir uns auf Quantencomputer vorbereiten«, betont Donna Dodson, leitende Beraterin für Computersicherheit bei NIST. »Wir halten sie für wahrscheinlich.«

### Kodes und Qubits

Warum sind Quantencomputer so leistungsstark? In herkömmlichen Rechenmaschinen kann jedes Bit Information nur entweder den Wert 0 oder 1 annehmen. Hingegen nutzt ein Quantencomputer eine seltsame Eigenschaft der Mikrowelt: Einzelne Teilchen können in mehreren Zuständen gleichzeitig existieren. Wie Schrödingers berühmte Katze, die zugleich lebendig und tot ist, solange niemand nachsieht, kann ein Quantenbit – oder kurz Qubit – gleichzeitig die Werte 0 und 1 besitzen. Physikalisch entspräche dem etwa ein einzelnes Elektron in zwei simultanen Spinzuständen. Ein Quantencomputer mit 1000 Qubits würde  $2^{1000}$  mögliche Quantenzustände enthalten – weit mehr als die Anzahl der Teilchen im Universum. Das heißt aber nicht, dass er unbegrenzte Datenmengen speichern könnte: Jeder Versuch, die Qubits zu beobachten, würde augenblicklich einen einzigen 1000-Bit-Wert herbeiführen. Doch mit raffinierten Tricks lässt sich die riesige Anzahl unbeobachteter möglicher Qubit-Zustände für Berechnungen nutzen, an denen jeder herkömmliche Computer scheitern muss.

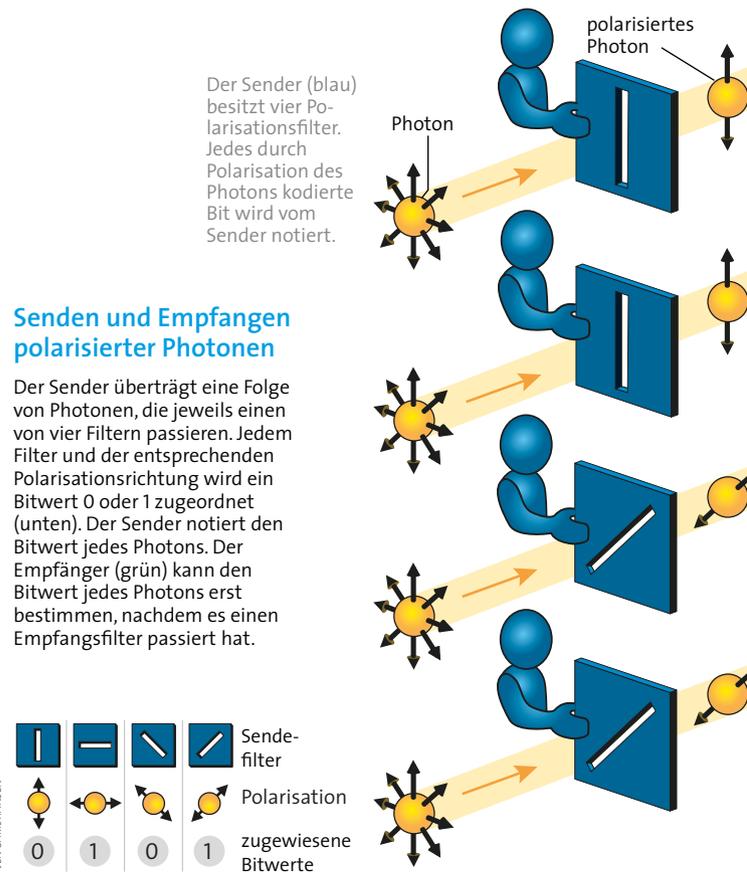
1994 bewies der Mathematiker Peter Shor, damals an den AT&T Bell Laboratories in Murray Hill (New Jersey) tätig, dass ein Quantencomputer die für eine asymmetrische RSA-Verschlüsselung gebrauchten Riesen Zahlen zu faktorisieren vermag. Damit schrieb Shor praktisch das erste Programm für einen Quantencomputer. Während ein normaler Computer seine Berechnungen eine nach der anderen abarbeitet, erledigt ein Quantencomputer alle auf einmal. »Shors Algorithmus würde den RSA-Schlüssel knacken«, sagt Mosca. Hingegen wären symmetrische Chiffriermethoden – insbesondere der 2001 von NIST genehmigte Advanced Encryption Standard (AES) – weiterhin sicher, weil sie nicht auf Primzahlen

beruhen. Symmetrische Schlüssel bestehen aus zufällig erzeugten, normalerweise 128 Bits langen Folgen von Nullen und Einsen. Das ergibt  $2^{128}$  mögliche Schlüssel; das heißt, ein Hacker müsste mehrere Milliarden Milliarden Milliarden Kombinationen ausprobieren. Selbst der schnellste Computer der Welt namens Tianhe-2, der in China steht und 33,8 Billionen Berechnungen pro Sekunde ausführen kann, würde dafür mehr als eine Billion Jahre benötigen. So große Schlüssel könnten Hacker nicht einmal mit einem Quantencomputer direkt knacken. Doch wie oben erwähnt werden die riesigen symmetrischen Schlüssel während einer Internettransaktion ihrerseits mit asymmetrischen Programmen wie RSA verschlüsselt – und diese sind durch Shors Faktorisierungsmethode durchaus verwundbar.

Allerdings braucht Shors Programm, bevor es RSA zerlegen kann, erst einmal einen genügend starken Quantencomputer, auf dem es läuft. Wie Mosca prophezeit, werden weltweit mehrere Labors binnen Jahresfrist Prototypen aus 10 bis

## Künftige Quantenkryptografie

Der Quantenschlüsselaustausch nutzt eine Folge polarisierter Lichtquanten als Chiffrieranleitung. Wenn ein Spion diese Photonen unterwegs misst, verändert der Messvorgang die Polarisation einiger Photonen, und Sender wie Empfänger wissen, dass ihre Nachricht abgehört wurde.



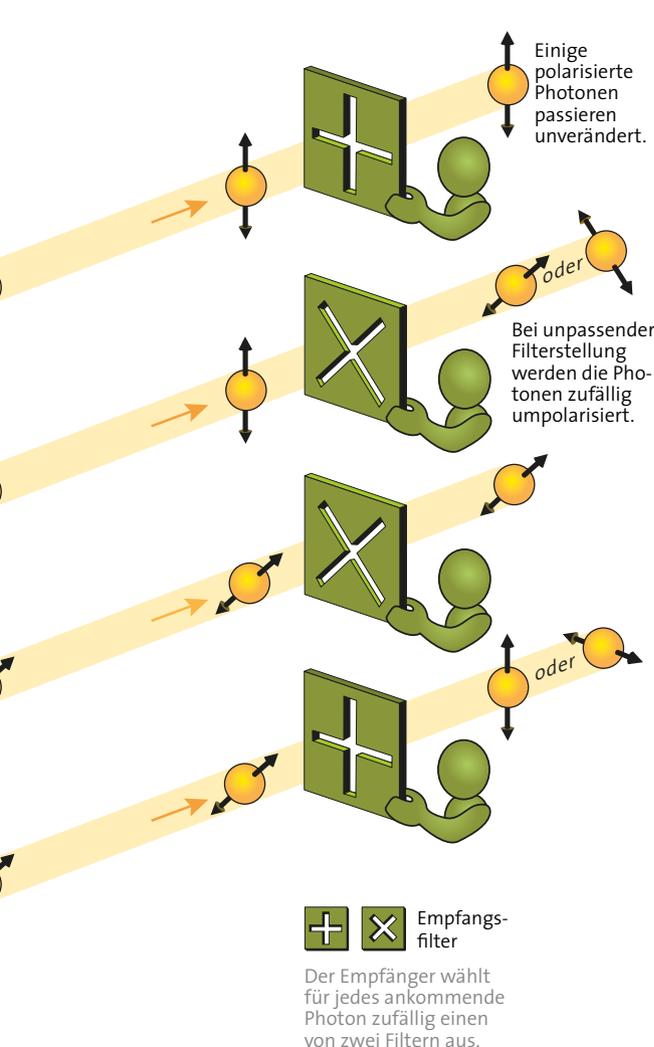
20 Qubits entwickeln. »Um einen 2048-Bit-RSA-Schlüssel zu faktorisieren, braucht man wahrscheinlich mindestens 2000 Qubits«, schätzt Mosca. Der Sprung von 10 zu 1000 Qubits könnte ein Jahrzehnt beanspruchen: »Schon jetzt sind wir prinzipiell fast in der Lage, einen großen Quantencomputer zu bauen«, meint er.

### Quantenvernetzung

Zunächst einmal beruhigt es etwas, dass die Quantenchiffrierung schneller voranschreitet als der Bau eines Quantencomputers. Am Anfang der Entwicklung stand ein Artikel des Physikers Artur Ekert von der University of Oxford über Quantenkryptografie, der 1991 in den angesehenen »Physical Review Letters« erschien. Ohne die früheren Arbeiten von Bennett und Brassard zu kennen, beschrieb Ekert ein eigenes Verschlüsselungsverfahren. Seine Arbeit verschaffte der Idee von Bennett und Brassard neue Anerkennung, da diese sich gegenüber Ekerts Ansatz als praktikabler erwies.

Doch erst zu Beginn der 2000er Jahre erreichte die Quantenkryptografie allmählich Marktreife. Damals fanden Physiker heraus, wie man einen Photonendetektor – den wichtigsten und teuersten Baustein jeder Quantenchiffriermaschine – mit Strom kühlt statt mit flüssigem Stickstoff. »Als ich 1997 mit der Doktorarbeit anfang, tauchte man die Detektoren noch in ein klobiges Kühlgefäß«, erinnert sich Grégoire Ribordy, Chef der Schweizer Firma ID Quantique, die 2007 eines der ersten kommerziellen Quantenchiffriersysteme entwickelte und an die Regierung zum Schutz von Datenzentren verkaufte. »Das ist normale Laborpraxis, aber für große Datenspeicher nicht brauchbar.« Die Firma hat unterdessen Schweizer Banken als Kunden und errichtet zusammen mit dem Battelle Memorial Institute in Columbus (Ohio) ein Netzwerk, das die Firmenbüros in Ohio mit einer Zweigstelle in der Bundeshauptstadt Washington verbinden soll.

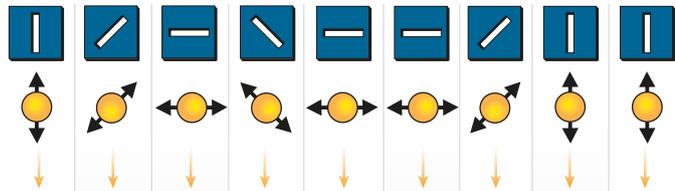
Ein kompletter Quantenchiffrierer passt in ein mannshohes Regal im Kellerlabor des Battelle-Gebäudes in Columbus.



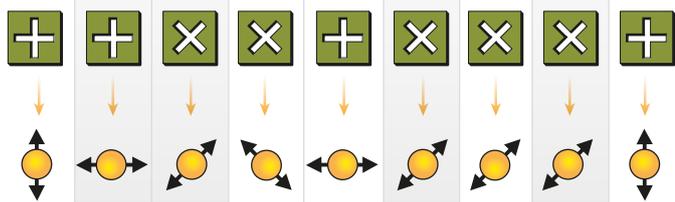
### Herstellung des Quantenschlüssels

Der Empfänger notiert die Bitwerte der durch die Empfangsfilter ankommenden Photonen und vergleicht sie mit den Aufzeichnungen des Senders. Der Sender teilt dem Empfänger mit, welche Filter übereinstimmen. Die Folge der zwischen Sender und Empfänger übereinstimmenden Bitwerte dient als gemeinsamer Quantenschlüssel.

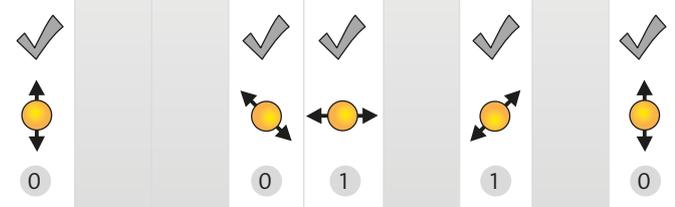
- 1 Der Sender benutzt einen Filter, um Photonen zu polarisieren.



- 2 Die Empfangsfilter lassen einige Photonen durch und polarisieren andere um.



- 3 Empfänger und Sender vergleichen ihre Notizen; übereinstimmende Werte bilden den Schlüssel.



JEN CHRISTIANSEN

Die Hardware besteht aus einer kleinen Laserdiode, wie sie in DVD-Playern und Strichkodescannern üblich ist, und einem Glasfilter, der die Laserpulse auffängt. Der Filter absorbiert fast alle Photonen und lässt nur einzelne Lichtteilchen hintereinander passieren. Diese werden in zwei mögliche Richtungen polarisiert, die den Bitwerten 0 und 1 entsprechen. Die polarisierten Photonen bilden die Grundlage eines geheimen Schlüssels, der durch ein Glasfaserkabel zum gewünschten Empfänger gelangt. Dessen eigene Hardware dekodiert den Schlüssel, indem sie die Polarisation der Photonen misst.

Anders als herkömmliche Geheimchiffren ist der Photonschlüssel praktisch vollkommen abhörsicher. Jeder Spion, der die Photonen abzufangen sucht, stört sie und verändert ihre Werte. Durch partiellen Schlüsselvergleich überprüfen Sender und legitimer Empfänger, ob die übertragenen Photonen mit den Originalen übereinstimmen. Falls sie etwas Verdächtiges entdecken, können sie den Schlüssel sekundenschnell verwerfen und von vorn beginnen.

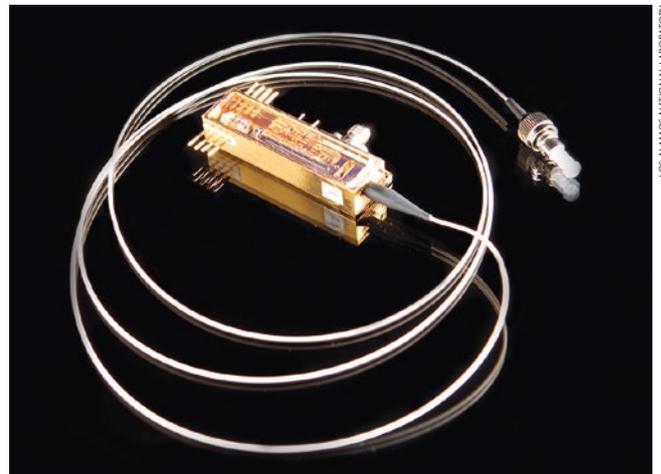
Battelle betreibt bereits ein Quantennetzwerk, um mittels einer 110 Kilometer langen Glasfaserverbindung Geschäftsbilanzen und andere heikle Daten zwischen der Firmenzentrale in Columbus und einer Fabrik in Dublin (Ohio) auszutauschen. Allerdings ist damit fast die Maximaldistanz für quantenchiffrierte Botschaften erreicht; das Signal verschlechtert sich allmählich, weil das Kabel Photonen absorbiert.

Um diese Einschränkung zu überwinden, entwickeln Battelle und ID Quantique so genannte verlässliche Knoten (trusted nodes), die als Relais für den Empfang und das Weitersenden von Quantendaten dienen sollen. Die Knoten müssen in luftdichten wärmeisolierten Hüllen stecken, um die empfindlichen, auf minus 40 Grad gekühlten Photonendetektoren zu schützen. Falls jemand versucht, in einen Knoten einzudringen, schaltet er sich ab und wird unbrauchbar.

Sobald eine Kette solcher Relais funktioniert, könnten künftige Quantennetze ein ganzes Land versorgen. Der Physiker Don Hayford, der bei Battelle die Quantenchiffrierforschung leitet, träumt von einem sicheren Netz, welches das gesamte Zentralbanksystem der USA schützt: »Für die Überlandstrecken wird man jeweils rund 75 Knoten brauchen«, schätzt er. »Das klingt wie eine ganze Menge, aber bei konventionellen Glasfasernetzen liegen die Signalverstärker ähnlich dicht.« Auch die chinesische Regierung arbeitet an dieser Technik. Zwischen Schanghai und Peking entsteht eine 2000 Kilometer lange Quantenverbindung für Behörden und Banken.

Solche Projekte eignen sich zwar für die geschützte Vernetzung einzelner Organisationen, aber nicht für das öffentliche Internet. Die verlässlichen Knoten bilden eine lineare Kette, die einen Computer mit dem nächsten verbindet, jedoch kein verzweigtes Netzwerk, in dem jede Maschine leicht

## Anders als herkömmliche Chiffren ist der Photonschlüssel praktisch vollkommen abhörsicher



LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY

Ein am Los Alamos National Laboratory in New Mexico entwickeltes Gerät namens QKard könnte den Prototyp eines Quantenrouters bilden. Mit seiner Hilfe würden beliebig viele Computer und Mobiltelefone über einen sicheren Zentralserver Quantenschlüssel austauschen.

mit anderen kommunizieren kann. Die bis vor Kurzem in Los Alamos tätige Physikerin Beth Nordholt fühlt sich an die mühsamen Anfänge des Telefonierens im späten 19. Jahrhundert erinnert: »Damals brauchte man für jeden Anruf einen eigenen Draht. Das stößt schnell an Grenzen.«

Nordholt und ihr Gatte Richard Hughes versuchen zusammen mit den Los-Alamos-Kollegen Newell und Glen Peterson, die Quantenverschlüsselung vielseitig anwendbar zu machen. Zu diesem Zweck haben sie einen Apparat namens QKard von der Größe eines USB-Sticks gebaut, mit dem alle möglichen vernetzten Geräte – Mobiltelefone, Laptops oder Fernseher – über einen sicheren zentralen Server Quantenschlüssel austauschen können.

»Das Kostspielige an der Quantenkryptografie sind die empfindlichen, gekühlten Photonendetektoren«, erklärt Nordholt. Darum hat das Los-Alamos-Team die komplizierten und teuren Komponenten in einem Computer im Zentrum des Netzwerks verstaut. Die mit je einer QKard ausgestatteten Computer der Nutzer sind mit dem Zentrum durch Glasfaserkabel verbunden, aber nicht untereinander. Die QKard dient als Sender: Der Apparat enthält einen kleinen Laser, mit dem er Photonen zum Zentrum losschickt.

In ihrer Funktion ähnelt die QKard einer Telefonvermittlung. Jeder Computer im Netz lädt seinen eigenen, als Photonenfolge chiffrierten symmetrischen Schlüssel in den Zentralcomputer. Diese Quantenchiffrierung ersetzt die übliche RSA-Kodierung, die normalerweise die Übertragung der symmetrischen Schlüssel schützt. Sobald die Schlüssel zwischen den verschiedenen Nutzern und dem Zentrum ausgetauscht wurden, verwendet der zentrale Computer die

Schlüssel und das AES-Verfahren, um zwischen einzelnen Nutzern herkömmlich gesicherte, nicht quantenchiffrierte Botschaften auszutauschen.

Nordholts Team erprobt in Los Alamos ein QKarD-Labormodell, das über eine in einem Eimer aufgerollte Glasfaser immerhin eine simulierte Netzweite von 50 Kilometern bewältigt. Falls QKarD Marktreife erlangt, dürfte ein Zentralcomputer, der 1000 QKarD-Nutzer zu verbinden vermag, nach Hughes' Schätzung 10000 Dollar kosten. Die QKarDs selbst würden – sofern massenhaft hergestellt – vielleicht schon für 50 Dollar zu haben sein. »Ich könnte mir gut vorstellen, dass in Smartphones oder Tablets eine QKarD eingebaut wird, die eine sichere Verbindung zum Server garantiert«, meint Nordholt.

## Quantenhacker

Die weltweite Anpassung der Verschlüsselungsinfrastruktur könnte länger als zehn Jahre dauern – eine dringende und schwierige Aufgabe. »Es geht nicht bloß um den Schutz von Kreditkarten«, betont Nordholt. Einer Studie des Idaho National Laboratory zufolge könnten Hacker etwa durch Einspeisen falscher Daten in die Steuerungssoftware von Energieversorgern Generatoren zerstören und ganze Stromnetze lahmlegen.

Wahrscheinlich wird das aber nicht der erste Job eines Quantencomputers sein. Nach Meinung von Kryptografieexperten fischen die NSA und andere Geheimdienste in aller Welt aus dem Internet riesige Mengen verschlüsselter Daten, die mit heutiger Technik nicht zu knacken sind – in der Hoffnung, sie eines Tages mit Quantencomputern dekodieren zu können. Demnach sind nicht nur die privaten Transaktionen der Bürger in einigen Jahrzehnten gefährdet, sondern bereits unser gegenwärtiger Gedankenaustausch, den wir naiverweise für abhörsicher halten.

»Ohne Zweifel gibt es da draußen schon Instanzen, die den gesamten Nachrichtenverkehr aufzeichnen und nur auf den Tag warten, an dem sich alles rückwirkend dechiffrieren lässt«, meint Brassard: »Selbst wenn es bis zum ersten Quantencomputer noch 20 Jahre dauert, ist von jenem Tag an jede jemals klassisch verschlüsselte Nachricht ein offenes Buch.«

Sogar dann, wenn die Quantenchiffrierung Gemeingut würde, ginge das kryptografische Katz-und-Maus-Spiel weiter. Wie der bisherige Verlauf der Entwicklung zeigt, klafft unweigerlich eine Lücke zwischen theoretischer Perfektion und praktischer Anwendung. Anfangs galt die RSA-Kodierung als völlig sicher, erzählt Zulfikar Ramzan, Chefingenieur der von Rivest, Shamir und Adleman zur kommerziellen Nutzung ihrer Erfindung gegründeten Firma. Doch 1995 entdeckte Paul Kocher, damals Student an der Stanford University, dass er den RSA-Code einfach knacken konnte, indem er beobachtete, wie lange ein Computer brauchte, um eine kleine Datenmenge zu verschlüsseln.

»Wenn der Schlüssel mehr Einsen als Nullen enthält, dauert die RSA-Kodierung ein bisschen länger«, erklärt Ramzan. »Indem man diese Beobachtung oft genug wiederholt und

die Zeiten misst, kann man tatsächlich den ganzen RSA-Schlüssel herleiten – allein aus der erforderlichen Rechenzeit.« Das Gegenmittel war simpel: Die Ingenieure tarnten die Rechenzeiten durch Hinzufügen zufälliger Programmzeilen. »Dennoch hatte niemand den Angriff vorhergesehen«, betont Ramzan. »Also gibt es vielleicht ähnliche Attacken auch bei Quantencomputern.«

Tatsächlich hat es schon den ersten Quantenhackerangriff gegeben. 2011 verband Makarov, damals an der Technisch-Naturwissenschaftlichen Universität Norwegens tätig, einen mit optischen Geräten vollgepackten Koffer über eine Glasfaserleitung mit einem von ID Quantique konstruierten Quantenchiffriersystem. Indem Makarov die Photonendetektoren vorübergehend mit Laserimpulsen blendete, konnte er eine scheinbar sichere Quantenübertragung erfolgreich dechiffrieren.

Zu dieser Attacke wären gewöhnliche Hacker nicht fähig, erklärt Makarov: »Man muss ein bisschen älter als ein Teenager sein und Zugang zu einem Optiklabor haben. Diese Technik gibt's nicht im Hobbykeller – noch nicht.« Zwar hat ID Quantique das Chiffriergerät inzwischen gegen solche Angriffe nachgerüstet, aber Makarov hat die Aura der Unbesiegbarkeit, welche die Quantenkryptografie umgab, gründlich zerstört.

Für Brassard gibt es keinen Zweifel, dass die närrische Idee, die Bennett und er vor so vielen Jahren am Strand ausheckten, den Sicherheitsstandard künftiger Netzwerke global prägen wird. »Es wird teuer, doch das ist der Kampf gegen den Klimawandel schließlich auch«, meint er. »Aber in beiden Fällen sind die Kosten winzig gegen die Verluste, wenn wir nicht handeln.« ~

## DER AUTOR



**Tim Folger** ist ein US-amerikanischer Wissenschaftspublizist. Er schreibt unter anderem für die Magazine »Scientific American«, »National Geographic« und »Discover«.

## QUELLEN

**Naylor, D. et al.:** The Cost of the »S« in HTTPS. In: Proceedings of the 10th ACM International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, S. 133–140, 2014

**Rich, S., Gellman, B.:** NSA Seeks to Build Quantum Computer that Could Crack Most Types of Encryption. In: Washington Post, 2. Januar 2014

## LITERATURTIPP

**Ekert, A., Renner, R.:** Vertraulichkeit ist machbar. In: Spektrum der Wissenschaft 5/2015, S. 84–91  
*Eine Prise frei gewählten Zufalls macht Quantenschlüssel besonders abhörsicher.*

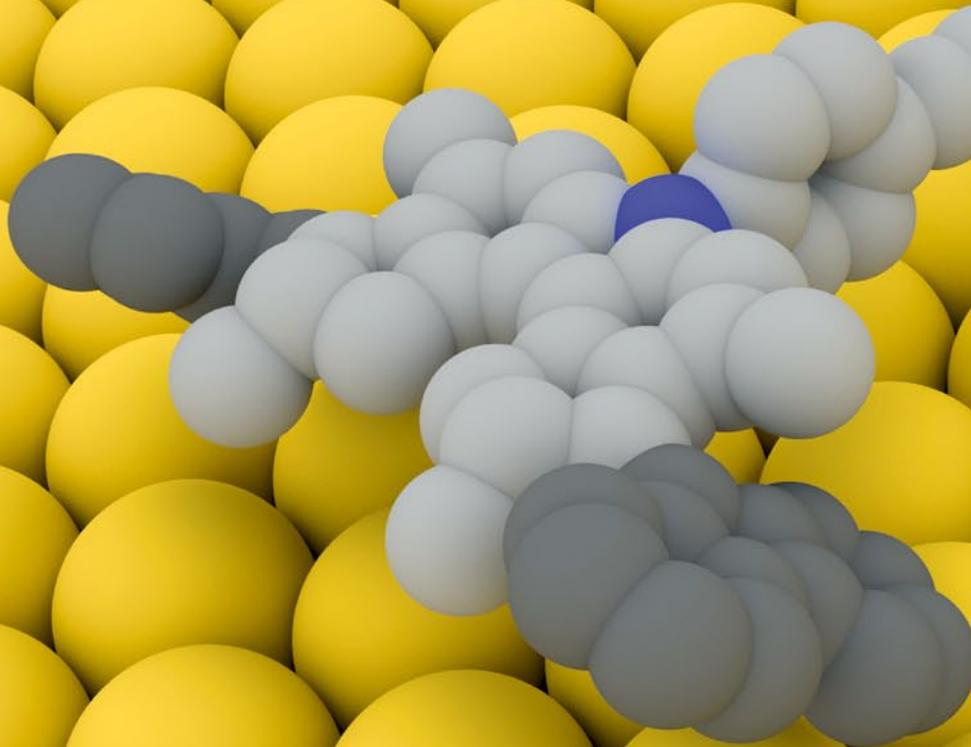
Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1408645](http://www.spektrum.de/artikel/1408645)

MOLEKULARE MASCHINEN

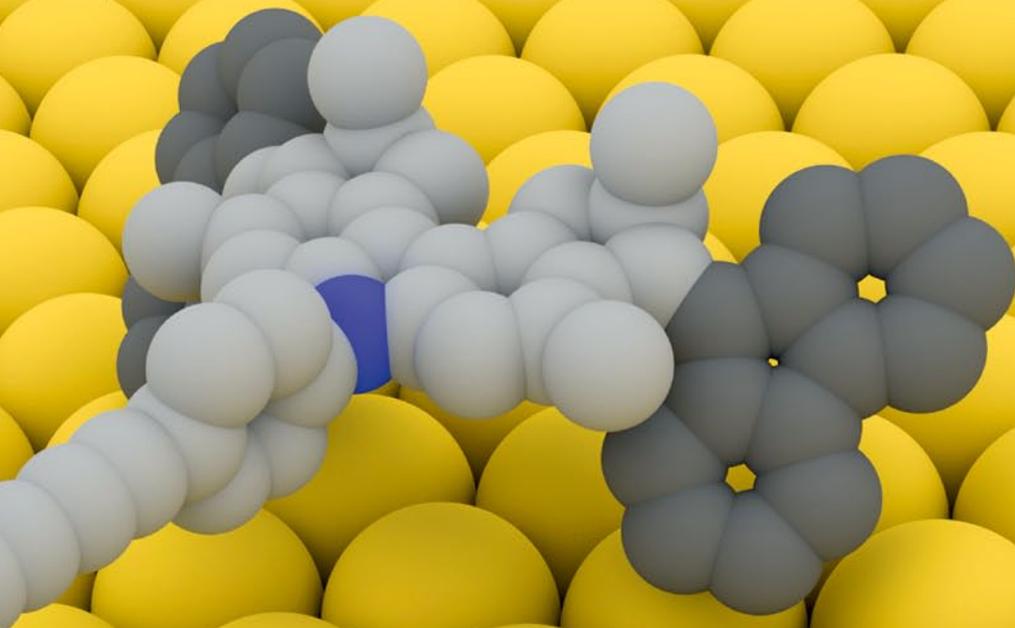
# Nanomotoren lernen laufen

Jahrzehntlang haben Chemiker Moleküle für verschiedenste grundlegende Aufgaben entworfen. Nun beginnen sie, diese Bauteile zu winzigen Apparaturen zu kombinieren.

Von Mark Peplow



2011 stellten Nanowissenschaftler ein erstes »Auto« vor, das von vier sich drehenden Molekülen angetrieben wurde. Es bewegte sich über eine Metalloberfläche, sobald die Forscher ihm Elektronen über die Spitze eines Rastertunnelmikroskops zuführten.



**D**er Roboter bewegt sich langsam entlang seiner Spur, hält an und gabelt mit seinem Greifarm ein Bauteil auf. Er verbindet es mit einer komplizierten Konstruktion auf seiner Rückseite, gleitet weiter vorwärts und wiederholt das Ganze. So baut er nach und nach viele Einzelteile einem präzisen Plan folgend zusammen.

Das könnte eine Szene aus einer Hightechfabrik sein – wäre das Fließband nicht nur einige Nanometer lang. Die Bauteile sind Aminosäuren, das Produkt ist ein klei-

nes Peptid, und der vom Chemiker David Leigh von der University of Manchester in Großbritannien gebaute Roboter ist eines der komplexesten Exemplare derartiger Maschinen überhaupt.

Leigh gehört zu einer wachsenden Riege molekularer Architekten, die sich von biologischen Bauteilen der Zellen inspirieren lassen. Darunter finden sich zum Beispiel Kinesine, die über das mikroskopisch kleine Zellgerüst wandern, oder Ribosomen, welche den genetischen Kode ablesen, um Proteine herzustellen. In den vergan-

genen zwei Jahrzehnten haben die Forscher eine beeindruckende Palette von Schaltern, Sperren, Motoren, Stäben, Ringen und Propellern entworfen – alles Komponenten mikroskopischer Mechanismen, die wie Legosteine im Nanomaßstab zusammengesteckt werden können. Verbesserte Methoden der analytischen Chemie und ausgeklügelte Reaktionen zur vereinfachten Synthese großer organischer Moleküle beschleunigten den Fortschritt noch.

Nun steht die Forschung an einem Wendepunkt: »Inzwischen wurden 50 oder 60 verschiedene Motoren entwickelt«, meint der Chemiker Ben Feringa von der Universität Groningen in den Niederlanden. »Allmählich sollten wir über ihren Einsatz nachdenken, anstatt immer neue zu konstruieren.« Das waren deutliche Worte im Rahmen der Gordon Research Conference im Juni 2015. Zum ersten Mal ging es bei der angesehenen US-Konferenzserie um molekulare Maschinen und ihre möglichen Anwendungen. Die Veranstalter unterstrichen damit, wie rasch das gesamte Forschungsfeld vorankommt. »Diese Modelle werden schon in 15 Jahren zentraler Bestandteil von Chemie und Materialdesign sein«, prognostiziert Leigh.

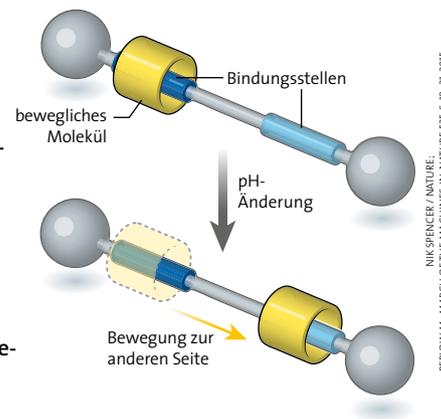
Doch der Weg dahin wird anspruchsvoll. Die Forscher müssen erst einmal herausfinden, wie Milliarden von diesen Objekten gemeinsam messbare, makroskopische Effekte hervorrufen können – beispielsweise ein Material so verformen, dass es als künstlicher Muskel arbeitet. Die Bauteile müssen auch einfach zu steuern sein und zuverlässig zahlreiche Male funktionieren.

Deshalb erwarten viele Insider zunächst keine komplizierten Anwendungen, sondern nützliche Basiskomponenten: lichtaktivierte Schalter zum gezielten Freisetzen von Medikamenten; »smarte« Stoffe, die Energie speichern können oder sich auf einen Lichtreiz hin ausdehnen oder zusammenziehen. Die molekularen Architekten suchen erst einmal Wissenschaftler, die solche Dinge brauchen könnten. »Wir müssen sie davon überzeugen, dass unsere Nanomoleküle spannend sind«, hofft der Organisator der US-Konferenz, der Chemiker Rafal Klajn vom Weizmann-Institut in Rehovot, Israel.

Viele der heutigen molekularen Maschinen gehen auf ein relativ einfaches System aus dem Jahr 1991 zurück, das der US-Chemiker Fraser Stoddart entworfen hat. Sein so genannter

## MOLEKULARER SCHALTER

Eine ringförmige Struktur, aufgefädelt auf ein lineares Molekül, bewegt sich zwischen zwei Bindungsstellen hin und her, abhängig vom pH-Wert der umgebenden Flüssigkeit.



NIK SPENCER / AMULIFE. PETEROW, AL. MARCH OF THE MACHINES IN NATURE 525, S. 38–21, 2015

tes Rotaxan besteht aus einer Achse, auf die ein ringförmiges Molekül aufgefädelt ist. Sie selbst besitzt an jedem Ende einen sperrigen Stopper sowie zwei chemische Gruppen, die an den Ring binden. Stoddart stellte damals fest, dass der bewegliche Teil zwischen diesen zwei Stellen hin- und herspringen kann.

1994 hatte er das molekulare Shuttle so modifiziert, dass die Achse zwei verschiedene Bindungsstellen aufwies (siehe Illustration oben). Sein Konstrukt funktionierte, wenn man es in Lösung brachte: Veränderte sich der pH-Wert der Flüssigkeit, sprang der Ring auf die gegenüberliegende Seite. Damit war der Komplex zu einem reversiblen Schalter geworden, der eines Tages in Sensoren eingesetzt werden könnte, die auf Hitze, Licht oder bestimmte Chemikalien reagieren. Denkbar wäre auch, damit die Klappe eines Nanocontainers zu öffnen, um ein Medikament im Körper eines Menschen freizusetzen – in der richtigen Dosis, zur richtigen Zeit und am richtigen Ort.

## Geschicktes Design für mühelose Schritte

Stoddarts Schalter hatte zwei grundlegende Eigenschaften, die nachfolgende Entwicklungen molekularer Maschinen beibehielten. Erstens war die Verbindung zwischen den wandernden Elementen und den Kontakten an der Achse keine starke kovalente, welche die Atome fest in Molekülen verknüpft. Stattdessen herrschten schwächere elektrostatische Kräfte zwischen leicht positiven und negativen Abschnitten der zwei Komponenten. Damit ließen sich die Bindungen einfach bilden und auch wieder lösen, vergleichbar den Wasserstoffbrücken zwischen zwei DNA-Strängen. Zweitens hatten die Schalter den Vorteil, dass sie keine externe Energie benötigten, um sich hin- und herzubewegen; sie wurden allein durch die brownische Molekularbewegung angetrieben, also die Kollision mit anderen Bestandteilen der Lösung.

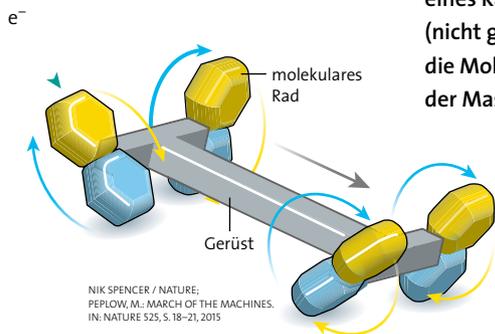
Jede Menge anderer Schalter folgten bald. Manche wurden durch Licht oder Temperaturveränderung kontrolliert, andere nutzten spezifische gelöste Ionen und Moleküle, ähnlich wie bei den Kanälen in Zellmembranen, die sich auf chemische Signale hin öffnen und schließen. Stoddart interessierte sich aber für etwas ganz anderes. Zusammen mit James Heath vom California Institute of Technology in Pasadena entwickelte er auf Basis von Millionen Rotaxanmolekülen

### AUF EINEN BLICK

#### MIKROSKOPISCHE HEINZELMÄNNCHEN

- 1 Nanowissenschaftler verfügen über einen imposanten Baukasten verschiedener Verbindungen, die als **Einzelteile extrem miniaturisierter Maschinen** fungieren könnten.
- 2 Diese treiben **chemische Vorgänge** an oder rufen in großen Gruppen **makroskopische Effekte** hervor, indem sie beispielsweise Materialien verformen oder bewegen.
- 3 Nun wollen die Forscher über die prinzipielle Funktionsfähigkeit ihrer molekularen Spielzeuge hinaus demonstrieren, dass die Komponenten auch nützliche **Anwendungen** ermöglichen.

## NANOAUTO



Elektronen von der Spitze eines Rastertunnelmikroskops (nicht gezeigt) springen auf die Moleküle, die als »Räder« der Maschine fungieren. Konformationsänderungen und Rotation bewegen das wenige Nanometer kleine Auto letztlich vorwärts.

einen Datenspeicher. In Sandwichform zwischen Silizium- und Titanelektroden gepackt, konnten die Rotaxane elektrisch von dem einen in den anderen Zustand umgeschaltet und zum Schreiben von Informationen genutzt werden. Der knapp 13 Mikrometer breite molekulare Abakus besaß 160 000 Bits, die jeweils aus einigen hundert Rotaxanen bestanden und eine Speicherdichte von etwa 100 Gigabit pro Quadratzentimeter erreichten – vergleichbar mit kommerziell erhältlichen Festplatten.

Mit Hilfe von 24 Bits zeigte Stoddarts Team, wie sich die Buchstaben CIT (für California Institute of Technology) speichern und wieder abrufen ließen. Die Schaltungen waren allerdings nicht dauerhaft nutzbar und zerfielen meist nach weniger als 100 Zyklen. Womöglich ließe sich das Problem mit MOFs (metal-organic frameworks) lösen – diese metallorganischen Gerüste könnten die Nanoschalter schützen und dreidimensional anordnen.

Anfang 2015 beschrieben Robert Schurko und Stephen Loeb von der University of Windsor in Kanada, wie sie etwa  $10^{21}$  molekulare Schalter auf einem Kubikzentimeter eines MOFs unterbrachten. Im September 2015 präsentierte Stoddart ein anderes MOF mit schaltbaren Rotaxanen. Es war an eine Elektrode angeschlossen, und alle Moleküle ließen sich durch Veränderung der Spannung gemeinsam umklappen.

Die Forscher hoffen, dass die dreidimensionalen, festen Gerüste eine größere Moleküldichte ermöglichen als konventionelle Siliziumtransistoren und das Schalten vereinfachen. Dann ließen sich große Datenmengen speichern. »Es

ist aber noch Sciencefiction, sich jedes einzelne Molekül als ein Bit vorzustellen«, räumt Loeb ein. Realistischer sei, dass ein kleines Stück eines MOFs mit Hunderten von Schaltern als eine Einheit fungiert. Solange die meisten der Teile darin gut arbeiten, könnten sie gemeinsam und verlässlich Informationen verarbeiten.

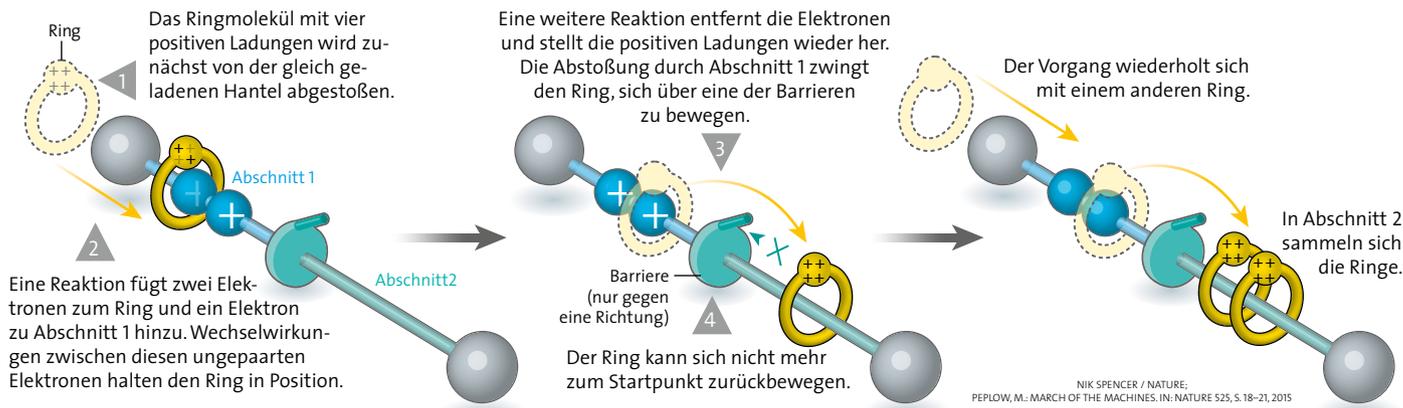
Andere Labore haben auf Grundlage von Rotaxanen steuerbare Katalysatoren entwickelt. Leigh beschrieb 2012 ein System mit einem Stickstoffatom in der Mitte einer Achse, das im Normalzustand durch einen Ring abgedeckt ist. Fügt man Säure hinzu, dann bewegt sich der Ring zu einer der Seiten und gibt das Stickstoffatom frei, das nun eine chemische Reaktion katalysieren kann. 2015 berichtete Leigh sogar von einem Rotaxansystem mit zwei verschiedenen katalytischen Zentren. Indem man den Ring von der ersten zur zweiten Stelle bewegt, lässt sich die Aktivität des Rotaxans steuern, um die gewünschte Mischung von Reaktionsprodukten zu erreichen. Leigh versucht derzeit, mehrere verschiedene umschaltbare Katalysatoren in derselben Flüssigkeit zu kontrollieren. Sie könnten bestimmte Moleküle in komplexe chemische Gefüge einbauen, ganz ähnlich, wie es Enzyme in einer Zelle tun.

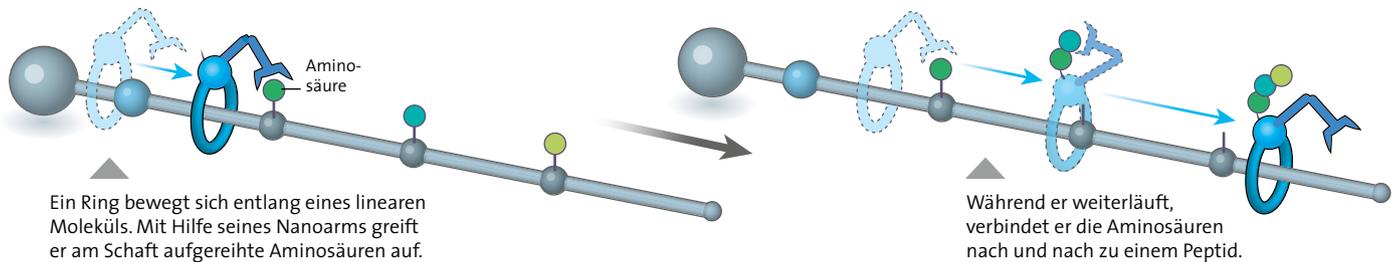
## Vom Hin und Her zum Vortrieb

Nach den ersten Experimenten mit Shuttles und Schaltern kam das Gebiet 1999 einen großen Schritt voran, als das Team von Feringa den ersten synthetischen molekularen Motor baute. Er bestand aus einem einzigen Molekül mit zwei identischen paddelähnlichen Einheiten, die durch eine Kohlenstoffdoppelbindung verbunden waren und damit an ihrem Platz gehalten wurden – bis ein Lichtimpuls die Bindung aufbrach und ihre Rotation erlaubte. Entscheidend dabei war, dass die Form der Paddel schon eine bestimmte Drehrichtung vorgab. Solange ausreichend Licht und etwas Wärme vorhanden waren, drehte sich der Motor immer weiter.

Feringa hat damit ein vierrädriges »Nanoauto« gebaut (siehe »Nanoauto«, oben). Er konnte mit den Molekülen außerdem ein ausreichendes Drehmoment auf Flüssigkristalle übertragen, um einen oben aufsitzenden Glasstab langsam rotieren zu lassen – dieser war 28 Mikrometer lang und damit tausende Male so groß wie die Motoren selbst. Einige

## MOLEKULARE PUMPE





Kollegen finden diese Konstruktionen zwar prinzipiell spannend, aber für sich allein genommen letztlich nutzlos. »Ich war schon immer etwas skeptisch gegenüber synthetischen Motoren. Sie sind kompliziert herzustellen, und die Wirkungen lassen sich nur schwierig auf größere Skalen übertragen«, bemerkt der Chemiker Dirk Trauner von der Ludwig-Maximilians-Universität in München.

Die zu Grunde liegenden chemischen Prinzipien könnten sich dennoch als sehr nützlich erweisen. So haben Wissenschaftler mit durch Licht aktivierten Mechanismen bereits rund 100 Medikamentenkandidaten entwickelt, deren Wirkung sich aktivieren und deaktivieren lässt. 2015 veröffentlichte beispielsweise das Team um Trauner eine Variante des potenten Tumormedikaments Combretastatin A4, das bisher schwere Nebenwirkungen hervorruft, weil es auch gesundes Gewebe attackiert. Die neue Substanz enthält eine Stickstoffdoppelbindung, die zwei Teile des Moleküls voneinander trennt und es so im inaktiven Zustand hält. Nur unter blauem Licht löst sich die Bindung und erlaubt den Molekülabschnitten, sich in die aktivierte Form zu drehen. Die aktivierende Strahlung soll durch einen flexiblen Fiberglaschlauch oder ein implantiertes Gerät vor Ort einwirken. Laut Trauner ließe sich ein Gewebestück von nur zehn Mikrometer Dicke anvisieren. Er plant Untersuchungen an Mäusen, um die Wirksamkeit der Substanz gegen Krebs zu testen.

Der Chemiker möchte solche Substanzen auch zur Therapie bei Makuladegeneration und Retinitis pigmentosa nutzen. Bei diesen Erkrankungen wird die Netzhaut im Auge geschädigt – ein Organ, in das sich Licht leicht von außen einbringen lässt. 2014 konnte er bereits zeigen, dass die Injektion eines chemischen Fotoschalters ins Auge blinder Mäuse ihr Sehvermögen verbesserte und sie wieder zwischen hell und dunkel unterscheiden konnten. Das Forscherteam entwickelt die Technik nun für Primaten weiter und hofft, bald mit Studien am Menschen beginnen zu können.

### Wenn Erbgutstränge wandern lernen

Lange bevor sich im Lauf der Evolution die ersten Lebewesen an Land begeben haben, waren einzelne Zellen schon mit molekularen Beinen in ihrem Inneren ausgerüstet. Bestes Beispiel dafür sind zweiteilige Proteine, so genannte Kinesine, die Zellinhalte entlang des starren Gerüsts aus Mikrotubuli transportieren. Von diesen Vehikeln inspiriert, haben Forscher künstliche, wandernde Moleküle aus Erbgut ent-

wickelt. Deren Beine laufen meist auf einer DNA-Spur, wo sie an komplementäre Sequenzen binden. Wird ein passender Strang hinzugegeben, löst sich der Fuß der wandernden DNA und kann ein Stück voranschreiten. Eines der wohl imposantesten Beispiele beschrieb 2010 Nadrian Seeman von der New York University. Sein Konstrukt hatte vier Füße und drei Hände, mit denen es Nanopartikel aus Gold aufheben konnte, während es über eine Fläche aus gefalteter DNA lief.

Seemans DNA-Wanderer, wie auch spätere Varianten aus anderen Laboren, würden sich aber nur ziellos umherbewegen, wäre bei ihnen nicht eine Sperre eingebaut, die Rückwärtsschritte verhindert. Dazu verwenden Forscher geschickt die verschiedenen Reaktionsgeschwindigkeiten beim Binden und Lösen der Füße, während die brownische Molekularbewegung das jeweils freie Ende vorwärtstreibt.

In den letzten Jahren haben Experimente und Simulationen zur Dynamik auf diesen Skalen gezeigt, dass alle chemisch getriebenen molekularen Maschinen, einschließlich vieler biologischer Motoren, eine solche »brownische Sperrklinke« nutzen. Natürliche und synthetische Moleküle unterliegen also denselben Bewegungsprinzipien.

Inzwischen haben Chemiker eine Reihe mikrometergroßer Maschinen und Röhren entwickelt, die an den 1966 produzierten Sciencefiction-Kultfilm »Die phantastische Reise« mit einem mikroskopisch klein geschrumpften U-Boot erinnern. Einige dieser neuen Motoren haben einen Katalysator, der seine Schubkraft aus einem Strom von Blasen erhält, den er aus der umliegenden Flüssigkeit – meist Wasserstoffperoxid – bildet. Andere bekommen ihren Antrieb durch Licht oder externe elektrische beziehungsweise magnetische Felder, was auch zum Steuern genutzt werden kann. »Die Nanomotoren können mehr als 1000-mal ihre eigene Länge pro Sekunde zurücklegen«, erklärt der Nanoingenieur Joseph Wang von der University of California in San Diego. Seiner Meinung nach liegen die vielversprechendsten Anwendungsmöglichkeiten in der schnellen Medikamentenversorgung (siehe »Hausgeister im Körper«, SdW 5/2015, S. 30) oder in der Entsorgung von Umweltschadstoffen. Allerdings mahnen viele seiner Kollegen noch, dass es zu früh sei, um das echte Potenzial der Nanotechnik gegenüber den hoch entwickelten konventionellen Methoden abzuschätzen.

Wasserstoffperoxid ist ein starkes Oxidationsmittel und daher als Energiequelle in lebenden Organismen ungeeignet. »Als die Technik noch allein darauf basierte, waren viele

sehr skeptisch«, gibt Wang zu. Aber im Dezember 2014 beschrieb er, wie ein Minimotor für den Einsatz im Körper aussehen könnte. Seine etwa 20 Mikrometer lange Plastikröhre besitzt einen Kern aus Zink, das mit Magensäure reagiert und Wasserstoffblasen produziert, die sie vorwärtstreiben. Im Experiment flitzten die Röhren etwa zehn Minuten lang im Inneren eines Mäusemagens herum. Wang beförderte damit Nanopartikel aus Gold in das umliegende Gewebe. Bei Kontrollmäusen, die nur die blanken Nanopartikel erhalten hatten, fand er später dreimal weniger davon in der Magenwand wieder. Wang möchte mit seiner Entwicklung Medikamente oder Kontrastmittel schnell und effektiv in das Magengewebe des Menschen transportieren.

### Tüfteln auf atomaren Skalen

Im Moment überschneiden sich die zahlreichen Forschungsinitiativen rund um Nanoraketen und molekulare Maschinen kaum. »Aber wir könnten viel voneinander lernen«, glaubt Rafal Klajn. Er schlägt vor: »Bestückt man beispielsweise einen Mikromotor mit lichtsensitiven Schaltern, könnte man seine Bewegung besser kontrollieren.«

Auf der Suche nach sinnvoll einsetzbaren Motoren bauen die Forscher inzwischen tatsächlich schon verschiedene Komponenten zusammen. 2015 demonstrierte Stoddart eine künstliche molekulare Pumpe, die zwei Ringmoleküle aus einer Lösung auf ein Lagerband hinaufhievt. Jedes schlüpft dazu über einen Stopper an einem Ende der Kette hinweg und wird von einem steuerbaren Bindungspunkt angezogen. Legt man den Schalter um, wird der Ring über die zweite Barriere die Pumpe entlanggetrieben, wo er an einem bestimmten Abschnitt anhält (siehe »Molekulare Pumpe«, S. 75).

Das System transportiert allerdings nur eine bestimmte Art Molekül, und seine Konstruktion war aufwändig und von vielen Fehlschlägen begleitet. Aber nun ist klar, dass molekulare Maschinen chemische Verbindungen anreichern können. Dabei verschiebt sich gezielt das Gleichgewicht des Systems – ähnlich wie in biologischen Energiespeichern, die Ionen oder andere Substanzen gegen einen Konzentrationsgradienten bewegen. »Wir lernen gerade, eine energetische Sperrklinke zu bauen«, erzählt Stoddart begeistert.

Die verschiedenen Entwicklungen könnten laut dem Wissenschaftler zu zwei parallelen Forschungsrichtungen führen: Im Nanobereich werden die Maschinen Aufgaben auf molekularer Ebene erledigen; auf der Makroskala wirken Myriaden gemeinsam – wie bei einer Armee von Ameisen –, um Materialien umzuwandeln oder vergleichsweise große Lasten zu transportieren.

Leighs molekulares Fließband ist dafür ein Paradebeispiel. Es kann Aminosäuren von seiner Achse aufnehmen und sie an eine wachsende Peptidkette hängen (siehe »Molekulares Fließband«, links). Dieses Nanosystem ließe sich auch auf den Makrokosmos hochskalieren: Innerhalb von 36 Stunden könnten  $10^{18}$  der einzelnen Konstrukteure zusammen ein paar Milligramm eines Peptids synthetisieren. »Das ist natürlich nichts anderes als eine Synthese, die man auch in einer

halben Stunde im Labor machen könnte«, gibt Leigh zu. »Aber es zeigt, dass eine molekulare Maschine eine Schiene entlanglaufen, dabei Bausteine aufgreifen und diese aneinanderbinden kann.« Leigh arbeitet bereits an weiteren Varianten, die Polymere nach Maß zusammensetzen sollen.

In der Makrowelt würden Billionen dieser kleinsten Teile zusammengenommen die Eigenschaften von Materialien verändern. So wären Gele, die sich durch Licht oder Chemikalien gesteuert ausdehnen oder zusammenziehen, als flexible Linsen oder Sensoren geeignet. »Ich gehe davon aus, dass es schon 2020 das erste intelligente Material geben wird, bei dem Schaltsysteme direkt eingebaut sind«, prophezeit Feringa.

Erste mechanische Moleküle sind bereits auf dem besten Weg zur kommerziellen Anwendung. So stellte der Fahrzeughersteller Nissan 2012 eine selbstreparierende Hülle für Smartphones vor. Sie ist mit einem Material behandelt, das ursprünglich als kratzfester Autolack entwickelt wurde. Es besteht aus Polymersträngen, die durch fassförmige Cyclodextrinmoleküle gefädelt und in Form einer großen, geschlungenen Acht verbunden sind. Ritzt man eine handelsübliche Polymerschicht ein, brechen Verbindungen zwischen den Ketten dauerhaft – ein Kratzer entsteht. Die Cyclodextrinringe des neuen Materials arbeiten dagegen wie Rollen eines Seilzugs und lassen die Polymerstränge hindurchgleiten, ohne dass Brüche entstehen.

Stoddart zufolge zeigen solche Beispiele, wie kurz der Weg von den Konstruktionen der molekularen Architekten bis hin zu ersten Anwendungen geworden ist. »Nun müssen sich all diese Dinge nur noch als nützlich erweisen.«

### DER AUTOR



**Mark Peplow** ist Wissenschaftsjournalist in Cambridge. Er ist promovierter Chemiker und arbeitete vier Jahre lang als leitender Nachrichtenredakteur für »Nature«.

### QUELLEN

- Anelli, P.L. et al.:** A Molecular Shuttle. In: Journal of the American Chemical Society 113, S. 5131–5133, 1991
- Cheng, C. et al.:** An Artificial Molecular Pump. In: Nature Nanotechnology 10, S. 547–553, 2015
- Kudernac, T. et al.:** Electrically Driven Directional Motion of a Four-Wheeled Molecule on a Metal Surface. In: Nature 479, S. 208–211, 2011
- Lewandowski, B. et al.:** Sequence-Specific Peptide Synthesis by an Artificial Small-Molecule Machine. In: Science 339, S. 189–193, 2013
- McGonigal, P.R. et al.:** Electrochemically Addressable Triradical Rotaxanes Organized within a Metal-Organic Framework. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 112, S. 11161–11168, 2015

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1395687](http://www.spektrum.de/artikel/1395687)

© Nature Publishing Group

[www.nature.com](http://www.nature.com)

Nature 525, S. 18–21, 3. September 2015

# Archäologie aus der Luft

Ein LiDAR-Gerät sendet Hunderttausende von Laserpulsen in der Sekunde aus, um von einem Flugzeug aus ein hoch aufgelöstes Profil des Bodens zu gewinnen. Das hilft Archäologen bei der Suche nach den Spuren der Vergangenheit und funktioniert sogar über dem Urwald.

Von William E. Carter, Ramesh L. Shrestha und Juan Carlos Fernandez-Diaz

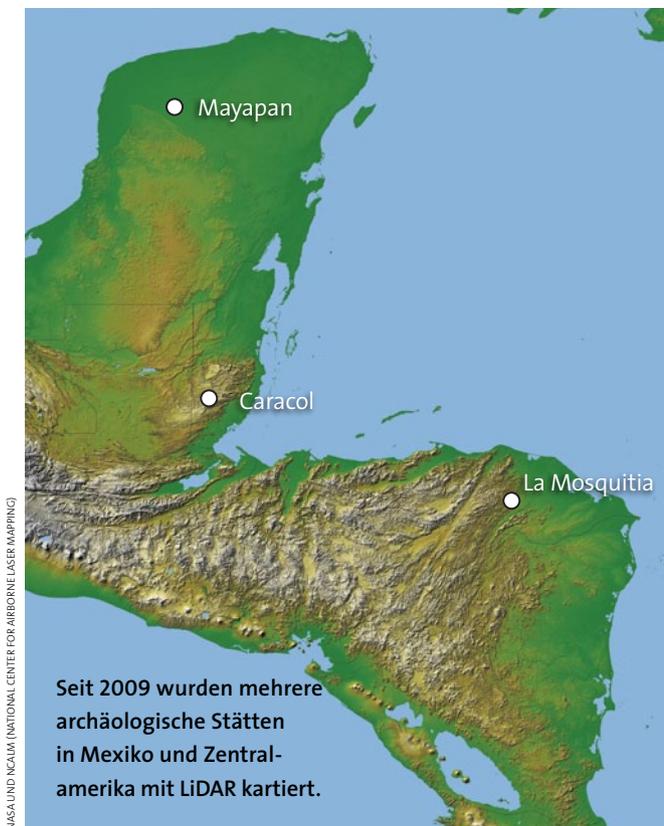
Städte aus purem Gold sollten die Regenwälder der Moskitoküste (heute in Nicaragua und Honduras, siehe Karte) verbergen. Von Gier getrieben und im Glauben an die Erzählungen der indianischen Ureinwohner, drangen spanische Konquistadoren im 16. Jahrhundert in die Wildnis vor, allen Gefahren zum Trotz. Dem unwegsamen Terrain mussten sie sich schließlich geschlagen geben. Auch Schatzjägern späterer Zeit erging es nicht besser. Sich durch die wuchernde Vegetation zu kämpfen, ist noch heute eine Herkulesaufgabe, und große Teile von »La Mosquitia« gelten als unerforscht. Nun versuchen Archäologen ihr Glück: Sie wollen mit modernen Techniken bislang

unentdeckte Überreste altamerikanischer Zivilisationen aufspüren.

Dabei setzen sie ihre Hoffnung vor allem auf eine Variante der Luftbildarchäologie. Als Pionier dieser Disziplin pries die »New York Times« 1929 den Piloten Charles Lindbergh, der, unterstützt von dem amerikanischen Altertumsforscher Alfred Vincent Kidder, die spärlich bewachsenen Trockengebiete im Südwesten der Vereinigten Staaten, in Mexiko und in Zentralamerika erkundete. Höhepunkt dieser Unternehmung war die Entdeckung einer Maya-Stätte. Heutzutage ist der forschende Blick von oben ein weltweit gängiges Verfahren in der Archäologie. Von dichten Wäldern bewachsene Flächen jedoch bleiben herkömmlichen Kameras verborgen. Und sogar dort, wo das Blätterdach Lücken aufweist, verhüllt der Schatten der Baumkronen selbst größere Strukturen wie Pyramiden und Plätze.

Das Raumfahrtzeitalter, das 1957 mit dem Start des sowjetischen Satelliten Sputnik 1 begann, förderte auch die Entwicklung neuer Fernerkundungstechnologien. Sensoren für ultraviolettes, infrarotes und sichtbares Licht liefern aus der Erdumlaufbahn Informationen etwa zum Bewuchs der Erdoberfläche; Radargeräte und Laser erfassen ihre Topografie, indem sie Mikrowellen- beziehungsweise Lichtpulse aussenden und die Zeit bis zum Empfang der rückgestreuten Signale messen. NASA-Wissenschaftler warfen mit Hilfe solcher Daten einen ersten Blick durch das Kronendach der Regenwälder von Zentral- und Südamerika, Südostasien und Äquatorialafrika. Doch aus dem Weltraum lassen sich nur Strukturen erkennen, die Dutzende Meter groß sind. Für archäologische Fragestellungen ist das ein zu grobes Raster.

In den frühen 1990er Jahren kamen drei neue Techniken auf, die unter ihren Akronymen bekannt wurden: GPS, IMU und LiDAR. Das inzwischen in jedem Smartphone verfügbare Globale Positionsbestimmungssystem (GPS) ermöglicht hochgenaue Lokalisierung, Trägheitsnavigationssysteme (»inertial measurement units«, IMU) registrieren über Drehraten- und Beschleunigungssensoren die Ausrichtung etwa von Fluggeräten im Raum. Erfasst also eine fliegende Kamera die

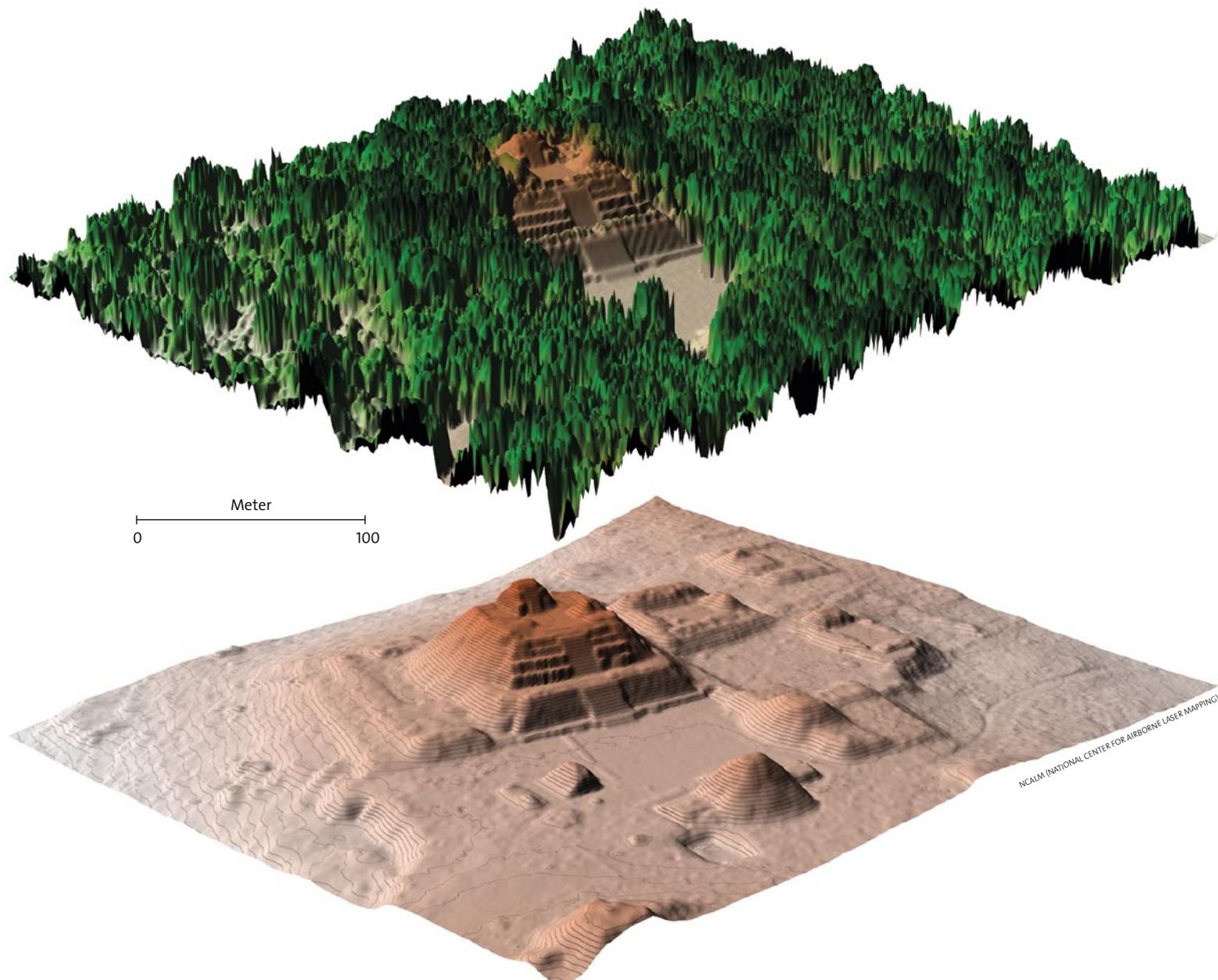


Landschaft unter sich, lassen sich aus der GPS-basierten Position in Kombination mit der IMU-basierten Ausrichtung die Grenzen des aufgenommenen Bilds am Boden sowie die Koordinaten von im Bild sichtbaren Objekten berechnen. Zur Erhöhung der Genauigkeit wird noch ein GPS-Referenzempfänger an einer bereits bestimmten Position am Boden verwendet.

Die dritte Technik, Light Detection And Ranging (LiDAR), dient zur hochpräzisen Abstandsmessung mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern. Dazu funkt ein Laser pro Sekunde zehntausende bis hunderttausende Pulse mit einer Dauer von

10 bis 15 Nanosekunden ab, die von Erdboden, Laubwerk, Ruinen und anderen Objekten in verschiedene Richtungen gestreut werden. Nur ein kleiner Teil dieses Streulichts gelangt aber zurück zum Flugzeug und wird von Sensoren erfasst. Ein sich bewegendes Spiegelsystem lenkt den Sendestrahl seitlich ab, so dass er die Landschaft »zeilenweise« abtastet (scannt). Aus der Zeit zwischen Senden und Empfangen errechnet sich die Distanz vom Scanner zu den Objekten am Boden. Kombiniert mit den Daten zur Position und Ausrichtung des Scanners lassen sich nun die 3-D-Koordinaten jedes

Mittels Laserortung und -abstandsmessung, kurz LiDAR, lässt sich aus der Luft die Geländetopografie einer archäologischen Stätte erfassen. Die obere Computergrafik zeigt die »Oberfläche« des Urwalds bei der Ausgrabungsstätte Caracol in Belize. Sie wurde aus den jeweils ersten rückgestreuten Signalen berechnet. In der unteren hat man diese herausgefiltert, so dass der Erdboden mit relevanten Strukturen sichtbar wird.



## DAS FLIEGENDE ARCHÄOLOGEN-AUGE

**1** Eine spezielle Form der Luftbildarchäologie setzt sich immer mehr durch: So genannte **LiDAR-Systeme** scannen von Flugzeugen aus mit **Laserpulsen** den Boden.

**2** Aus den gewonnenen Daten wird eine **topografische Karte der Oberfläche** berechnet. Darin zeichnen sich auch für Archäologen interessante Strukturen ab.

**3** Dank **hoher Pulsfrequenzen** sehen aktuelle Systeme sogar mehr das dichte Kronendach von Regenwäldern hindurch. Messkampagnen in Belize und Honduras lieferten Hinweise auf bisher unbekannte altamerikanische Stätten.

Messpunkts bestimmen. So kann man in wenigen Stunden hunderte Millionen Punkte in einem Gebiet von hunderten Quadratkilometern Fläche vermessen.

Diese sind ungleichmäßig verteilt, gestreut von Pflanzen, Steinen, Erde und anderem mehr. In ihnen steckt auch eine zeitliche Abfolge: Die Krone eines Baums beispielsweise wirft Licht bereits zurück, bevor es das Blattwerk eines Buschs trifft, und der verschattet den nackten Erdboden. Wasserflächen liefern kaum Information, da sie Licht nicht streuen, sondern spiegeln – die Rücksignale folgen dem Reflexionsgesetz und erreichen die Sensoren daher erst gar nicht. Außerdem wird im Allgemeinen Infrarotlicht verwendet, Wasser absorbiert aber in diesem Wellenlängenbereich.

Die Genauigkeit jedes Punkts der Datenwolke hängt von der Flughöhe und -geschwindigkeit ab. Starke Winde und Turbulenzen beeinträchtigen einen ruhigen Flug und damit auch die Präzision. Hinzu kommen Fehler, etwa auf Grund von Mängeln der mechanischen, optischen und elektronischen Komponenten.

Mit nur wenigen tausend Pulsen pro Sekunde reduzierten bereits die ersten fliegenden LiDAR-Systeme Mitte der 1990er Jahre den Zeit- und Kostenaufwand zum Beispiel für die Planung neuer Autobahnen, die Messung der Erosion von Küsten und die Quantifizierung von Waldbrandschäden. Doch lange blieben sie kommerziellen Unternehmen vorbehalten, denn Anschaffungskosten von gut einer Million US-Dollar

pro System überschritten die Etats der Hochschulen. Auch erforderlichen Handhabung und Datenanalyse Expertenwissen. Kartierungsfirmen waren aber selten zu Kooperationen mit Forschern bereit, da sie ihr Knowhow gegenüber der Konkurrenz schützen mussten.

Im Jahr 2003 gründete die National Science Foundation (NSF) daher das National Center for Airborne Laser Mapping (NCALM), um LiDAR-Messungen großer Genauigkeit und hoher Messpunktdichte zu unterstützen und Forschern zur Verfügung zu stellen. Zudem hilft NCALM, die Technologie weiterzuentwickeln und Fachkräfte auszubilden.

Vielen vorgeschlagenen Projekten war gemeinsam, dass sie nicht nur Bilder des Bodens mit einer Auflösung von einem Meter oder weniger benötigten, trotz Vegetationsdecke. Die Lösung waren sehr viel höhere Pulsfrequenzen, aber auch Flughöhe und Geschwindigkeit spielten eine Rolle.

### Wie ein Laserpuls die Lücke durch das Blattwerk findet

Für wissenschaftliche Beobachtungen fliegt das LiDAR meist nur 400 bis 600 Meter über dem Boden, damit Aerosole in der Luft möglichst wenig Licht streuen und das empfangene Rücksignal eine hohe Intensität hat. Vor allem aber: Je niedriger und langsamer der LiDAR-Scanner fliegt, umso dichter und damit detaillierter wird die resultierende Messpunktwolke. Außerdem kann man nur dann den Abstand des Sensors vom Boden durch Strauch- oder Baumbewuchs hindurch bestimmen, wenn sowohl der emittierte wie der rückgestreute Laserpuls eine Lücke im Laubwerk findet. Eine geringere Geschwindigkeit des Flugzeugs erhöht die Chance, dass für Hin- und Rückweg dieselbe Lücke zur Verfügung steht.

Etwa 2006 war die Technologie so weit entwickelt, dass kommerzielle Systeme Pulsfrequenzen von weit über hunderttausend pro Sekunde erreichten und die räumliche Auflösung der berechneten digitalen Geländemodelle trotz Bewuchs einen Meter betrug. In Europa gehört LiDAR insbesondere bei der großflächigen Suche nach unbekanntem Fundstellen zu den Standardwerkzeugen. Allerdings zielt der Laser dabei oft auf damals wie heute dicht besiedelte und immer wieder überprägte Kulturlandschaften. Vor allem die Bewirtschaftung von Äckern und Feldern ebnet selbst einst viele Meter hohe Grabhügel bis auf wenige Zen-

NCALM (NATIONAL CENTER FOR AIRBORNE LASER MAPPING)



Ein Querschnitt durch eine mit LiDAR erhobene Punktwolke der Moskitoküste in Honduras zeigt, dass die aufgezeichneten Rückstreuungen größtenteils von den Bäumen des Regenwalds stammen (grün). Dennoch genügen die vom Erdboden zurückgeworfenen Signale (rot), um ein Relief der Erdoberfläche zu berechnen.

timeter ein. Um die einander überlagernden Spuren aus Jahrhunderten menschlicher Nutzung zu entwirren, kommen zunehmend Visualisierungstechniken zum Einsatz, die noch geringste Höhenunterschiede beispielsweise durch Hervorheben von Kanten deutlicher sichtbar machen.

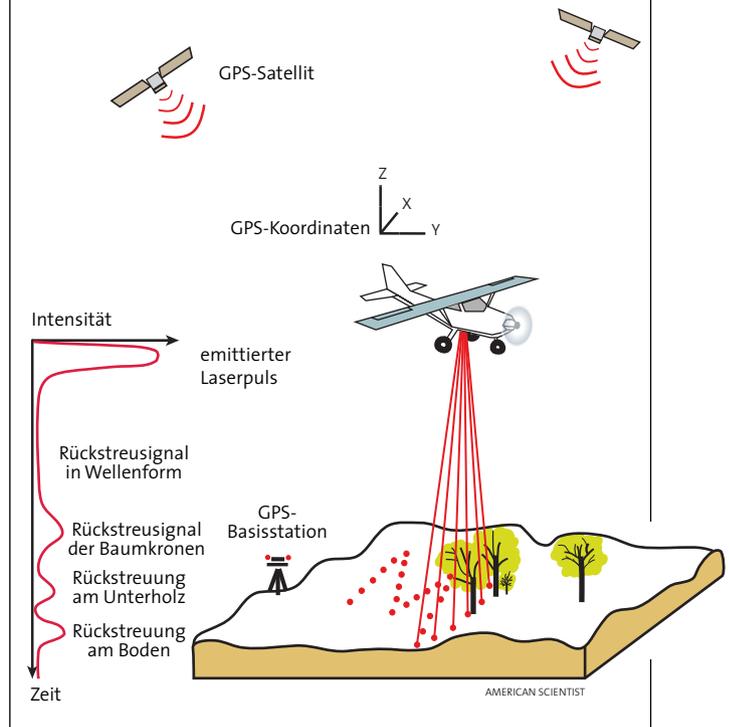
Von solchen Schwierigkeiten können Altamerikanisten nur träumen. Ihre Untersuchungsgebiete sind oft menschenleer, dafür aber dicht bewachsen. 99 Prozent oder mehr der Laserpulse treffen zuerst auf die Pflanzen und werden an ihnen zurückgeworfen. Da sich die Laserstrahlen auf Messflecken von etlichen Zentimetern Durchmesser auffächern, erreicht zwar meist immer noch ein genügend hoher Anteil von Pulsen den Boden. Doch wenn Sensoren und Elektronik nach dem Empfang eines Messsignals zu lange brauchen, um bereit für das nächste zu sein, gehen Informationen verloren. Glücklicherweise haben moderne optische Detektoren nur eine Totzeit von wenigen Nanosekunden.

2009 erhielt Arlen Chase von der University of Central Florida Fördermittel zur Kartierung der präkolumbischen Stadt Caracol im mittelamerikanischen Belize mit Hilfe von flugzeuggestütztem LiDAR. Einige Mitglieder seiner Gruppe waren fast drei Jahrzehnte lang immer wieder zu Fuß dort unterwegs gewesen, um die Stätte zu vermessen und die Überreste von hunderten Gebäuden, Straßen und landwirtschaftlichen Terrassen zu dokumentieren. Dazu hatten sie mühsam Sichtlinien durch die dichte Vegetation schlagen müssen. Ungeachtet ihrer Mühen wiesen die gewonnenen Geländeprofile große Lücken auf; nicht einmal die gesamte Ausdehnung der Stadt war klar.

Gemeinsam mit NCALM-Forschern kartierten sie nun ein Gebiet von ungefähr 200 Quadratkilometern, was weit über die bis dahin bekannte Fläche von Caracol hinausging. Indem man die pro Überflug erfassten Flächen überlappen ließ, wuchs die Auflösung auf 20 Messpunkte pro Quadratmeter, und es wurde möglich, fehlerhafte Punkte zu entfernen und systematische Fehler der Flugbahnen zu korrigieren. Schon die ersten Datenanalysen zeigten überraschenderweise Häufungen von Messpunkten, die bis zu mehrere Meter unter dem Bodenniveau zu liegen schienen. Die Archäologen vermuteten dort Karsthöhlen, denn der Untergrund von Caracol besteht aus Kalkgestein.

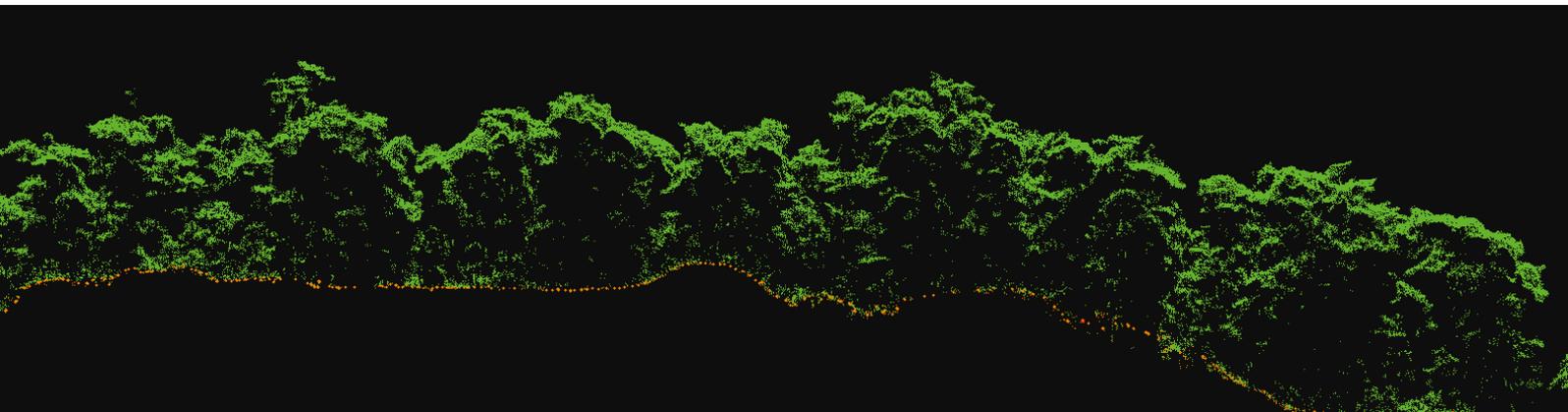
## So funktioniert LiDAR

Ein Leichtflugzeug fliegt mit einer LiDAR-Einheit entlang einer genau geplanten und mittels GPS kontrollierten Route. Oszillierende Spiegel verteilen hunderttausende Laserpulse pro Sekunde über ein Messfeld von wenigen hundert Metern Breite. Das Licht kann auf Bäume und Unterholz treffen, bevor es den Boden erreicht. Daher verursacht jeder Puls mehrere Rückstreusignale, die nacheinander von den Sensoren empfangen werden. Anhand der GPS- und IMU-Daten lassen sich die Koordinaten jedes Messpunktes berechnen.



Eine eingehendere Untersuchung der LiDAR-Beobachtungen offenbarte mehr als 50 mögliche Höhleneingänge, manche nur wenige Meter von Wegen entfernt, welche die Forscher seit Jahren nutzten. Anhand der ermittelten Koordinaten konnten sie etliche davon tatsächlich ausfindig

NCALM (NATIONAL CENTER FOR AIRBORNE LASER MAPPING)





LiDAR im praktischen Einsatz für die Archäologie zeigt dieses Video:



<https://www.youtube.com/watch?v=aGY4R6lw5Zc>

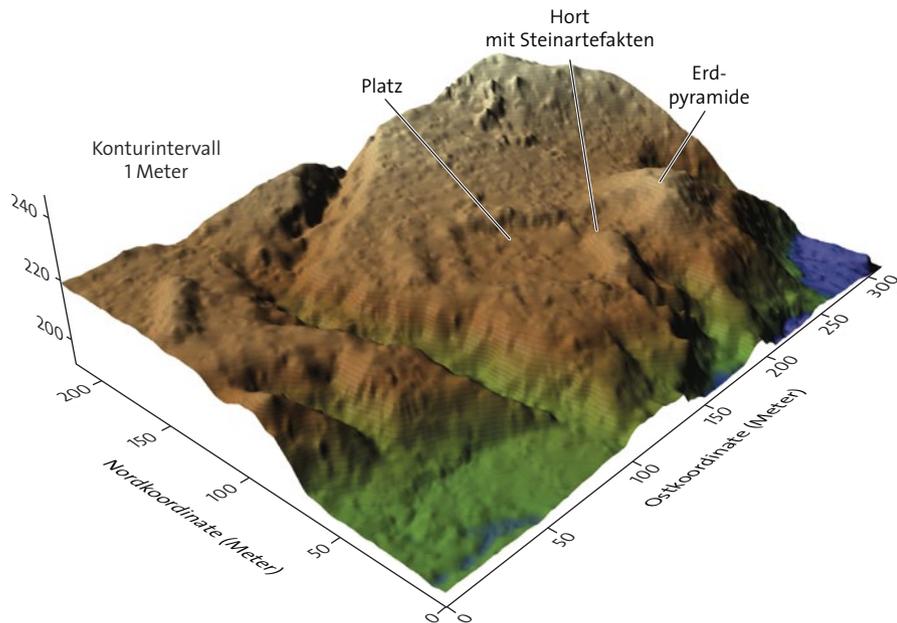
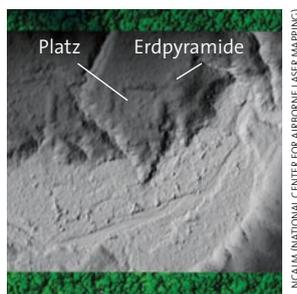
machen. Die meisten der Höhlen erfordern eine Kletterausrüstung, und es wird Jahre dauern, bis alle erforscht sind, aber die ersten Resultate sind viel versprechend. So fand man in eine Karsthöhle aus mindestens vier vermutlich durch Kalkauswaschung entstandenen »Räumen« diverse Artefakte der Maya-Zeit – die Bewohner Caracols hatten diese Kavernen offenbar gezielt aufgesucht.

Die Messungen enthüllten auch viele bisher unbekannte Gebäude, Mauern und Dammwege. Vielleicht noch überraschender war die einstmals ausgedehnte Terrassierung des Geländes für die Landwirtschaft. Dabei vermochte LiDAR direkt aneinander angrenzende Felder zu unterscheiden, deren Höhengniveaus um nur 30 Zentimeter differierten – eine angesichts der tropischen Vegetation höchst beeindruckende Präzision. Chase und seine Kollegen halten LiDAR daher für die wichtigste neue Technologie für Archäologen seit der Radiokarbondatierung.

Ihre Ergebnisse weckten die Neugier des Dokumentarfilmers Steve Elkins. Er schlug 2011 vor, Forscher des NCALM und der University of Houston (UH) sollten vier Areale an der Moskitoküste in Honduras nach Maya-Stätten absuchen. Das Vorhaben war in jeder Hinsicht spektakulär. Nicht nur ist der Regenwald dort noch dichter als in Belize – das Gebiet

Dank LiDAR-Einsatz wurde 2012 eine bis dahin unbekannte archäologische Stätte in La Mosquitia entdeckt. Demnach verbirgt das Blätterdach einen

vermutlich aufgeschütteten, rechteckigen Platz, auf dem wohl vormals strohgedeckte Holzhäuser standen. Daneben befand sich eine Erdpyramide. In der Umgebung lagen Wohnhäuser mit Gärten, die von einem Bach aus bewässert wurden. Den darin eingetragenen Hortfund deponierter Steinartefakte entdeckte eine Expedition, deren Hauptaufgabe es war, die LiDAR-Daten zu verifizieren.



war seit Jahrhunderten von niemandem, jedenfalls von keinem Archäologen, betreten worden. Es war zudem unbekannt, ob es dort überhaupt Städte gegeben hatte und wer ihre Erbauer gewesen sein sollten. Das Projekt barg also für Elkins ein großes finanzielles Risiko und für die beteiligten Wissenschaftler die Gefahr eines peinlichen Misserfolgs.

Anfang Mai 2012 begannen die Forscher, LiDAR-Daten von dreien der Areale zu erheben. Schon nach wenigen Tagen identifizierten sie Ruinen, darunter eine Erdpyramide, aber auch landwirtschaftliche Terrassen. Mit jedem weiteren Flug wurde deutlicher, dass es in der Region einst zwei größere Siedlungen sowie etliche kleinere Strukturen, vermutlich Wohnstätten einzelner Familien, gegeben hatte. Ohne flugzeuggestütztes LiDAR hätten Archäologen Jahrzehnte mit der Erkundung verbringen können, ohne ein Gefühl für das Ausmaß der Stätte zu gewinnen.

### Archäologie im Drogenschungel

Mehr als 30 Archäologen und Geodäten landeten im Februar 2015 mit Helikoptern in dem Gebiet, zudem ein Filmteam sowie eine honduranische Militäreinheit. Letztere sollte die Wissenschaftler sowie von ihnen entdeckte Artefakte vor den bewaffneten Drogenschmugglern schützen, die im Regenwald unterwegs sind (die Soldaten bewachen das Areal bis heute). Ehemalige Angehörige des britischen Special Air Service (SAS) waren bereits vor Ort; sie hatten Landeplatz und Camp vorbereitet und unterrichteten die Zivilisten nun in der Kunst, im Dschungel zu überleben.

Denn es galt, die mit LiDAR entdeckten Strukturen zu verifizieren. Bei jedem Vorstoß in den Urwald leiteten die berechneten Karten sowie GPS-Geräte die Archäologen. Nicht nur erwiesen sich die digitalen Modelle als korrekt. Am Fuß der aufgespürten Erdpyramide fanden die Wissenschaftler auch einen Hort mit mehr als 50 verzierten Steinobjekten, die dort teilweise aus der Erde ragten. Die Arte-



Auf Grund der einfacheren Technik ist das so genannte bodengebundene Laserscanning sehr viel preiswerter und unkomplizierter als LiDAR von der Luft aus. Steve Elkins und sein Expeditionsteam verwendeten es zur Dokumentation eines Horts von Steinartefakten im Regenwald der Moskitoküste (links). Das rechte Foto wurde mit einer normalen Digitalkamera aufgenommen. Es zeigt die Objekte und das auf einem Dreibeinstativ montierte terrestrische LiDAR.

fakte, vermutlich Weihgaben, wurden fotografiert, mit einer terrestrischen LiDAR-Einheit millimetergenau eingemessen (siehe Bilder oben) – und für spätere Untersuchungen an Ort und Stelle belassen.

Archäologische Surveys aus der Luft erscheinen wenig abenteuerlich im Vergleich zu solchen im Regenwald selbst, aber auch der Einsatz von LiDAR ist nicht ohne Risiko. So bot das Untersuchungsgebiet keinen sicheren Platz für eine Notlandung; daher kam ein zweimotoriges Flugzeug mit langer Reichweite zum Einsatz. Dessen Steuerung war mühsam und anspruchsvoll. Stundenlang hin und her auf festgelegten Routen zu fliegen, dabei ständig darauf bedacht, Winkel- und Höhenänderungen auf ein Minimum zu reduzieren, ermüdet und verleitet zu Fehlern. Bei einem anderen Kartierungsprojekt, durchgeführt von der University of Florida, zog der Pilot einmal irrtümlich das Fahrwerk kurz vor der Landung wieder ein. Niemand wurde verletzt, aber Flugzeug und LiDAR-Einheit wurden schwer beschädigt.

Am Boden ist der Dschungel freilich gefährlicher. Zu den unwillkommenen Besuchern des Honduras-Camps gehörten ein Tapir, diverse Giftschlangen und unzählige blutsaugende Insekten. Trotz aller Vorsichtsmaßnahmen erkrankte das halbe Team an Leishmaniose, einer durch Insekten übertragenen Parasiteninfektion. Weil die Patienten nicht auf die üblichen Behandlungsmethoden ansprachen, werden sie inzwischen von Ärzten des National Institute of Health betreut. Sie sind nun auf dem Weg der Besserung.

All diesen Problemen zum Trotz gilt das Honduras-Projekt als Wendepunkt für die archäologische Forschung, denn es hat bewiesen: Innerhalb weniger Tage lassen sich mit LiDAR detaillierte Informationen über Ausdehnung, Bebauung und Zusammenhang uralter Stätten gewinnen, mögen sie auch über hunderte Quadratkilometer im dichten Regenwald verstreut liegen. 2014 finanzierte die University of Houston daher die Entwicklung der nächsten Gerätegeneration. Drei Laser senden nun mit jeweils verschiedenen Wellenlängen je 300 000 Pulse pro Sekunde aus! Das erhöht nicht nur die Messpunktdichte, sondern erlaubt sogar einen Blick auf den Grund seichter Gewässer. Selbst Unterschiede im Material

und in der Beschaffenheit der reflektierenden Oberflächen lassen sich dank der drei Wellenlängen bestimmen. Damit reichen die Anwendungsmöglichkeiten von der Archäologie über die Vermessung von Erosionsprozessen bis hin zum Beobachten von Lavaströmen. In der Antarktis hat man Trockentäler kartiert und die gewonnenen Daten mit Satellitenbildern aus den Jahren 2001 und 2002 verglichen. Insbesondere wurden Einsenkungen der Erdoberfläche deutlich, die entstehen, wenn Eis im Untergrund schmilzt. Airborne LiDAR hilft also auch, den Klimawandel zu vermessen. ~

#### DIE AUTOREN



**William E. Carter** (links) forscht am Department of Civil Engineering der University of Houston. **Ramesh L. Shrestha** (Mitte) leitet das dortige National Center for Airborne Laser Mapping (NCALM). **Juan Carlos Fernandez-Diaz** arbeitet dort als Forschungsingenieur. Die Redaktion dankt Ralf Hesse, Referent für LiDAR-Auswertung beim Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg, für seine Unterstützung.

#### QUELLEN

- Carter, W.E. et al.:** Geodetic Imaging: A New Tool for Mesoamerican Archaeology. In: Eos, Transactions American Geophysical Union 93, S. 413–415, 2012
- Chase, A.F. et al.:** Ancient Maya Regional Settlement and Inter-Site Analysis: The 2013 West-Central Belize LiDAR Survey. In: Remote Sensing 6, S. 8671–8695, 2014
- Fernandez-Diaz, J.C. et al.:** Now You See it ... now You Don't: Understanding Airborne Mapping LiDAR Collection and Data Product Generation for Archaeological Research in Mesoamerica. In: Remote Sensing 6, S. 9951–10001, 2014

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1411565](http://www.spektrum.de/artikel/1411565)

© American Scientist

1916

### Mehr Sicherheit am Tiefseearbeitsplatz

»Immer mehr macht sich das Bedürfnis geltend, sich in tiefem Wasser zur Ausführung von Arbeiten lange aufhalten zu können. Bei schnell-

lem Nachlassen des äußeren Druckes sammelt sich in den Blutgefäßen Stickstoff in Gasblasen, der erst allmählich bei langsamer Druckabnahme entweicht. Wo diese plötzlich stattfindet, können schwere Gesundheitsstörungen eintreten. Es gibt ein Mittel: der *langsame* Aufstieg, nicht immer aber ist er ausführbar. Da ein Tiefseetauchen nicht immer in der Nähe einer Taucherstation oder von Bord

eines Taucherschiffes aus stattfindet, bauten die Drägerwerke zur Verhütung und Behandlung ein widerstandsfähiges, weitmaschiges Gefüge von verzinnnten eisernen Ketten, das dem Taucher übergezogen wird. Jetzt kann ohne Bedenken Druck in den Anzug gegeben werden, da selbst ein morscher Gummianzug standhalten wird. Der Taucher verbringt die für eine vollständige Aus-

scheidung des überschüssigen Stickstoffes erforderliche Zeit im Druckanzug.« Die Umschau, August 1916, S. 692–693



Dank Kettennetz wird der Taucheranzug zur Druckkammer.

### Die neue Landlust

»Für den größten Teil der Landjugend ist die Elementarschule das einzige Bildungsmittel. Den Bedürfnissen könnte besser Rechnung getragen werden, wenn man zwischen Stadt- und Landschullehrern einen Unterschied machte. Einzelne für die Landschule minder wichtige Lehrgegenstände könnten beschränkt werden. Wenn dann mit jeder Schule ein Garten verbunden würde und der Lehrer befähigt wäre, diesen zu bewirtschaften, welchen Segen könnte er in der Erteilung von Handfertigungsunterricht, im Wandern mit der Jugend in Wald und Feld stiften!« Die Umschau, August 1916, S. 694

### Es werde Licht

»Einem Budapester Ingenieur ist es gelungen, eine Taschenlampe herzustellen, die ihren Strom nicht einer galvanischen Batterie, sondern einem Dynamo entnimmt. Nach der »Elektrotechn. Zeitschr.« wird die Umsetzung der Muskelkraft dadurch eingeleitet, daß der Daumen der haltenden Hand rasch einen kleinen Hebel niederdrückt. Durch das Niederdrücken wird eine Feder gespannt, die beim Entspannen unter Zwischenschaltung einiger Zahnräder einen Dynamo mit Dauermagnet in Bewegung setzt.« Technische Monatshefte, August 1916, S. 248

### Warum Antibiotika versagen können

»So können an sich harmlose Kolistämme, die gegen Antibiotika resistent sind, ihre Widerstandsfähigkeit auf andere Bakterienstämme durch einen Resistenz-Transfer-Faktor (RTF) über-

tragen, der Virusstruktur hat. Während man früher glaubte, die Resistenz gegen Antibiotika entstehe durch Selektion einzelner resistenter Bakterien aus einer natürlichen Population wäh-

rend der Behandlung, weiß man heute, daß dies selten vorkommt. Der RTF ist nicht an eine Bakterienart gebunden, so daß ein harmloses Bakterium in kurzer Zeit alle Krankheitsreger

1966

eines Hospitals resistent machen kann.« Naturwissenschaftliche Rundschau 8, 1966, S.337

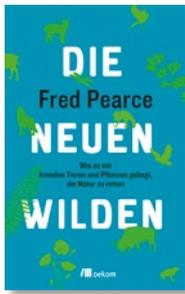
### Rätselhafte Olmeken-Kultur

»Wie jetzt bekannt wird, wurde im Sommer 1965 in Las Limas bei Jesús Carranza, México, eine der schönsten Figuren der La Venta-Kultur (oft als »Olmekische Kultur« bezeichnet) gefunden. Die 55 cm hohe und ca. 60 kg schwere, vollplastische Skulptur aus einem grünen Gestein (Jadeit?) zeigt eine sitzende männliche Figur, deren Gesicht, Oberarme und Unterschenkel mit Ritzmustern verziert sind. In den Armen hält sie ein Kind mit reichem Schmuck. Die Bedeutung des Stücks ist noch unbekannt.« Die Umschau 16, 1966, S. 546 (Nach heutigem Wissen handelt es sich bei dem Kind um einen Werjaguar, ein magisches Wesen, d. Red.)



### Meilenstein auf dem Weg zur künstlichen Befruchtung

»Dr. Robert Edwards und seinen Kollegen gelang es bei rund fünf Prozent einer großen Zahl menschlicher Oozyten Vorgänge zu beobachten, von denen sie mitteilen, daß es sich um Befruchtungen handeln dürfte. Die Studien wurden an Ovarien durchgeführt, die wegen medizinischer Indikationen entfernt werden mußten. Aufgabe war es, die Folge der hormonellen Einflüsse genau zu reproduzieren, durch welche die Eireifung gesteuert wird. Der nächste Schritt zur Einleitung der Embryonalentwicklung ist eine Vorbehandlung der Spermatozoen, die sie in die Lage versetzt, die Hülle der Eizelle zu durchdringen. Bisher wurde kein Mittel gefunden, das eine zuverlässige naturgetreue Befruchtung garantiert.« Naturwissenschaftliche Rundschau 8, 1966, S. 332–333



Fred Pearce

### **Die neuen Wilden**

**Wie es mit fremden Tieren und Pflanzen gelingt, die Natur zu retten**

Aus dem Englischen von

Gabriele Gockel und Barbara Steckhan

oekom, München 2016

330 S., € 22,95

ÖKOLOGIE

## Konstant ist nur der Wandel

Naturschützer sollten damit aufhören, verbissen am Status quo festzuhalten, schreibt Umweltjournalist Fred Pearce.

Mit dem Untertitel seines Buchs lehnt sich der renommierte britische Umweltjournalist Fred Pearce weit aus dem Fenster und stellt sich gegen die Ansichten etablierter Naturschützer. Getreu dem Motto, Veränderung sei die einzige Konstante, stellt er eingefahrene Ansichten darüber auf den Prüfstand, was Naturschutz ist und wer oder was von ihm profitieren darf. Natur gegen Kultur, heimisch gegen fremd, gut versus schlecht, ursprünglich versus zivilisiert, Stadt im Gegensatz zu Land: Pearce beschreibt, wie wenig hilfreich diese Kategorisierungen sind, wenn man Biodiversität bewahren und fördern möchte. Seine Ausführungen verdeutlichen, dass es in der Natur kein Schwarz-Weiß gibt, sondern vielmehr ein Zusammenspiel verschiedenster Graustufen.

Im Zuge seiner Recherchen hat der Journalist unterschiedlichste Biotope aufgesucht. An ihrem Beispiel zeigt er, dass eingewanderte Arten – seien es Tier- oder Pflanzenspezies – nicht unbedingt negative Auswirkungen auf bereits vorhandene Lebensgemeinschaften haben müssen. So berichtet er von Invasionen, die zu einem Anstieg des Artenreichtums führten oder sogar gefährdete Arten vor dem Aussterben bewahrten. Der Gelbbrustara etwa (*Ara ararauna*) siedelte sich erfolgreich auf Puerto Rico an, starb aber in seiner Heimat Paraguay nahezu aus. Dass neu eingewanderte Arten auch für Men-

schen durchaus vorteilhaft sein können, zeigt er am Beispiel der Europäischen Honigbiene (*Apis mellifera*). Sie wurde im 17. Jahrhundert von britischen Siedlern in die USA eingeschleppt und ziert heute die Wappen von zwölf amerikanischen Bundesstaaten. Inzwischen umgetauft in Westliche Honigbiene, trägt sie jährlich mehrere Milliarden Dollar zur US-Wirtschaft bei.

Pearce zufolge seien die Definitionen von »Wildnis« und »Ursprünglichkeit« veraltet und müssten abgeschafft beziehungsweise überarbeitet werden. Wie sie den Naturschutz prägen, untersucht er im zweiten Teil des Buchs. Auch hier bedient er sich diverser Beispiele, um zu belegen: Die vermeintliche Wildnis ist gar nicht so wild und ursprünglich, wie es oft scheint. Die Regenwälder des Amazonas etwa umfassen kaum noch Primärwald. Vielmehr handelt es sich großteils um einen Flickenteppich verwilderter Gärten – Zeugen früherer Zivilisationen, die gezielt Landwirtschaft betrieben und Sekundärwälder anlegten. Zahlreiche archäologische Funde von Resten hoch entwickelter urbaner Gesellschaften belegen das.

Im dritten und letzten Teil des Werks stellt Pearce schließlich den Abgesang auf die Natur in Frage. Ist die Zukunft wirklich so düster, wie Klimaforscher prophezeien? Lässt sich der Untergang aufhalten? Der Autor argumentiert, die Natur sei durchaus in der Lage, eine gewisse Toleranz gegenüber menschlichen

Störungen zu entwickeln – freilich ohne dass er den Menschen einen Freifahrtsschein für Umweltzerstörungen ausstellt. So lebten drei Viertel der noch existierenden Orang-Utans nicht in Primär-, sondern in Nutzwäldern. Manche Tier- und Pflanzenpopulationen beschränkten sich mittlerweile ausschließlich auf Städte, in denen sie eine neue Heimat gefunden hätten. Im Terminal 2 des Flughafens London-Heathrow beispielsweise gebe es seit mehreren Jahren eine Kolonie Hausspatzen, die sich von den Krümeln der Snackbars ernähre.

Der Autor wirft einen optimistischen Blick in die Zukunft. Die Ökosysteme der Welt seien zu außerordentlichen Regenerationsleistungen fähig, wenn der Mensch sie nur lasse und die Einwanderung neuer Arten nicht immer als Verlust oder Bedrohung ansehe. Endemische Spezies könnten von invasiven mitunter durchaus profitieren, beispielsweise durch ein erweitertes Nahrungsangebot. Veränderung müsse also nicht immer negativ besetzt sein. Neue Arten besetzten oft lediglich freie Nischen, wie Pearce plausibel zeigt.

Der Umweltjournalist führt in seinem Werk den traditionellen Naturschutz in vielerlei Hinsicht ad absurdum und zeigt, dass wir gerade in Zeiten des Klimawandels widerstandsfähige Arten brauchen, die sich auf veränderte Umweltbedingungen einstellen. Wir könnten es uns nicht leisten, schreibt er, an einem Status quo festzuhalten, der lediglich die Momentaufnahme eines stetigen Wandels sei. Statt uns nur auf die Verlierer des (anthropogenen) Artenschwunds zu fokussieren, müssten wir uns auch den Gewinnern zuwenden und deren Wert erkennen. »Fremd« bedeute nicht zwangsläufig »gefährlich«.

Pearces Ausführungen lesen sich wie ein Appell, verstaubte Ansichten über Bord zu werfen. Sie regen dazu an, die Vorteile zu sehen, wenn man Natur als offenes System begreift.

---

#### **Julia Schulz**

Die Rezensentin ist Veterinärmedizinerin und Journalistin. Als Erstere ist sie in der Wild- und Zootiermedizin tätig; als Letztere im Wissenschafts- und Kulturjournalismus.



Jim Al-Khalili  
**Chaostheorie**  
*Der Flügelschlag des Schmetterlings*  
 Komplett-Media, Grünwald 2016  
 Dokumentation, England  
 DVD, Laufzeit 60 Minuten  
 € 19,99

PHYSIK

## Winzige Ursache, kolossale Wirkung

Vom Turing-Mechanismus bis zur Entstehung des Lebens: ein gelungener Überblick über nichtlineares Systemverhalten.

**K**leine Manipulationen an einem System können zu dramatisch verschiedenen Entwicklungen führen: Das ist die Kernaussage der vorliegenden Dokumentation, durch die uns der Physiker Jim Al-Khalili von der University of Surrey (England) führt. Al-Khalili befasst sich unter anderem mit Alan Turing (1912–1954), einem der einflussreichsten Theoretiker der frühen Computerentwicklung und Informatik. 1952

1970) Systeme aus mehreren chemischen Reaktionen, die nichtlinear reagieren und so zeitliche Oszillationen aufweisen. Mathematisch werden derlei Vorgänge durch Gleichungen beschrieben, wie Turing sie entdeckt hat. Veröffentlichten konnte Belousov seine bahnbrechenden Erkenntnisse nicht, denn seine Kollegen glaubten ihm nicht. Wie konnten die einfachen Gleichungen, denen ein solches System ge-

*Virtuelle Läufer, die sich nur nach einfachen Regeln bewegen, aber einem Evolutionsprozess unterliegen, entwickeln nach kaum 100 Generationen den aufrechten Gang*

veröffentlichte dieser ein theoretisches Modell (den »Turing-Mechanismus«), mit dem sich beschreiben lässt, wie Dinge spontan Gestalt annehmen. Solche Selbstorganisationsprozesse gibt es in der Natur viele, etwa die Morphogenese bei Embryonen, die Bildung von Sanddünen oder das Entstehen farbiger Muster auf den Fellen von Tieren. Turing initiierte damit eine Disziplin, deren Fortschritte er nicht mehr verfolgen konnte – er nahm sich mit 41 Jahren das Leben, vermutlich infolge einer Hormonbehandlung, zu der er als Homosexueller genötigt worden war.

Ungefähr zeitgleich, aber ohne von Turing zu wissen, entdeckte der russische Chemiker Boris Belousov (1893–

horcht, ein so kompliziertes Verhalten hervorbringen?

Schon damals war das mechanistisch-deterministische Weltbild durch die aufkommende Quantenphysik stark ramponiert worden. Doch die überwältigende Komplexität, die makroskopische Systeme zeigen können, sollte erst noch entdeckt werden. Das bekannteste Bild für nichtlineares Verhalten prägte der Meteorologe Edward Lorentz (1917–2008). Der Flügelschlag eines Schmetterlings kann ihm zufolge den Verlauf des Wetters ändern und sogar einen Hurrikan auslösen. Mit anderen Worten: Das Verhalten mancher Systeme lässt sich nicht vorhersagen, selbst wenn man alle Regeln kennt, denen es

genügt. Denn ihre Entwicklung hängt dermaßen empfindlich von den Anfangsbedingungen ab, dass sie für alle praktischen Fälle unmöglich zu prognostizieren ist.

Ein wesentliches Element solcher Systeme ist die Rückkopplung, dass also das Ergebnis eines Vorgangs zugleich wieder dessen Ausgangsbedingung ist. Der Film illustriert dies mit Hilfe der »Videorückkopplungsschleife«, bei der eine Kamera das Bild filmt, das sie selbst gerade aufgenommen hat. Wie von Geisterhand entstehen dabei Muster, deren Aussehen niemand hätte vorher ahnen können.

Mathematisch sind derlei Strukturen mit den Fraktalen verwandt, deren sich Al-Khalili im nächsten Abschnitt annimmt. Ihr Entdecker ist der amerikanische Mathematiker Benoît Mandelbrot (1924–2010). Romanesco-Blumenkohl, Küstenlinien oder Flussdeltas: Diese Formen sind häufig selbstähnlich. Wenn man sie vergrößert, findet man kleinere Abbilder der Gesamtstruktur. Eines der ästhetischsten Beispiele ist die Mandelbrot-Menge (auch »Apfelmännchen« genannt), die der Film beeindruckend schön zeigt. Diese fraktale Figur wird zwar durch eine sehr einfache Gleichung erzeugt, wirkt aber komplex wie wild wachsender Farn.

Die Entdeckung des »Chaos« führte also zu einer Neudefinition dessen, was komplex ist. Folgerichtig widmet sich die Dokumentation am Ende den komplexesten Systemen, die wir kennen – denen des Lebens. Die biologische Evolution unterliegt nur wenigen Faktoren, im Wesentlichen Mutation, Selektion, Gendrift und Rekombination. Wer könnte vorhersehen, dass so wenige Prozesse dermaßen komplexe Wesen hervorbringen wie Menschen? Die Parallele zum Chaos ist frappierend.

Sehr schön ist das Beispiel, das Al-Khalili wählt, um die schöpferische Kraft der Evolution zu zeigen: Virtuelle Wesen im Computer können ihre Gliedmaßen nach wenigen einfachen Regeln bewegen. Natürlich stolpern die meisten von ihnen. Schaltet man aber einen Evolutionsprozess dazu, der jene bevor-

zugt, die besser laufen können, dauert es kaum 100 Generationen, bis sich der aufrechte Gang entwickelt. Die Wesen lernen sogar, nach Stürzen wieder aufzustehen, ohne dass man dies je einprogrammiert hätte. Laufende Kreaturen ohne Gestalter oder Schöpfer: Dieses kraftvolle Bild lässt der Film am Ende stehen.

Die Doku hat eine ausgezeichnete und fesselnde Ästhetik und wartet mit tollen Visualisierungen auf. Dass sie in England entstand, merkt man deutlich an der Auswahl der Interviewpartner, die allesamt an britischen Hochschu-

len lehren. Auch wird Turings Rolle im Zweiten Weltkrieg etwas glorifiziert, schließlich hat nicht er allein die deutschen Funksprüche entschlüsselt. Regelmäßig verstörend ist es allerdings, wie der Film das Labor Boris Belousovs darstellt – in einer staubigen Bruchbude soll demnach der russische Chemiker geforscht haben. Ein Bild, das der Mentalität des Kalten Kriegs entspricht und eine gewisse Arroganz erkennen lässt.

Die Übersetzung aus dem Englischen ist nicht besonders präzise; bereits der englische Titel »The secret life of chaos«

nimmt sich wesentlich überzeugender aus als die deutsche Version. Im Vergleich mit vorherigen Produktionen, in denen Al-Khalili zu sehen ist, hat der deutsche Verlag den Preis deutlich gesteigert. Konnte man auf den früheren DVDs für 30 Euro zwei je einstündige Filme genießen, ist nun für 20 Euro nach einem Film und einer Stunde bereits Schluss.

---

**Stefan Gillissen**

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.



Jörg Riecke  
**Geschichte der deutschen Sprache**  
 Eine Einführung  
 Reclam, Stuttgart 2016  
 277 S., € 16,95

LINGUISTIK

## Kommunikationsmittel für die Pferde

Germanist Jörg Riecke schildert, wie sich die deutsche Sprache über die Jahrhunderte ausformte.

War der habsburgische Kaiser Karl V. (1500–1558) ein sprachbegabter Mann? In seinem Reich ging die Sonne nicht unter, und wer ein so großes Imperium regiert, sollte zumindest einiger der darin vertretenen Landessprachen mächtig sein. Nach eigener Aussage redete Karl mit Gott spanisch, mit Männern italienisch, mit Frauen französisch und mit Pferden deutsch. Wie das Deutsche zu einer Sprache wurde, die auch in anderen Kommunikationszusammenhängen anwendbar ist, beschreibt der Germanistikprofessor Jörg Riecke im vorliegenden Werk.

Der besondere Zugang, den Riecke seinen Lesern eröffnet, ist der einer kul-

turgeschichtlichen Annäherung. Der Autor richtet sich in erster Linie an Studienanfänger, die Deutschlehrer werden möchten, aber auch an interessierte Leser ohne germanistische Vorkenntnisse, für die viele einschlägige Werke mit ihren hoch spezialisierten Darstellungen zu anspruchsvoll sind. Aus diesem Grund betont Riecke, er verstehe sein Büchlein »als Hinführung zu den großen, umfangreichen Darstellungen, die das Fach zu Recht prägen«.

Was das Werk weiterhin kennzeichnet, ist sein erzählender Duktus und sein weit gehender Verzicht auf einen wissenschaftlichen Apparat. Fußnoten, die sich in anderen Publikationen gera-

dezu zu einem eigenen Genre der Wissenschaftsprosa entwickelt haben, fehlen hier vollständig. Verweise auf die im Text zitierte weiterführende Literatur finden sich am Ende des Bands. Hierin lässt sich ein kleines Manko erkennen, erschwert das Fehlen konkreter Seitenangaben bei Zitaten im Text doch das Nachlesen in den genannten Fachbüchern.

Riecke widmet sich der Entwicklung der deutschen Sprache von Karl dem Großen (747–814) über Martin Luther (1483–1546) bis zum Nationalsozialismus und darüber hinaus. Einen besonderen Schwerpunkt legt er auf die Zeit zwischen dem 18. und dem 20. Jahrhundert. Seine Darstellung endet bei zirka 1950; in einem abschließenden Ausblick verweist er auf die Veränderungen der jüngeren Gegenwartssprache, die jedoch nicht mehr Gegenstand der Sprachgeschichtsschreibung seien. Das ist ein bisschen schade, da gerade die medialen Neuerungen der zurückliegenden 20 Jahre einigen Einfluss auf die Schriftsprache hatten.

Jedem Kapitel steht eine plakative Überschrift vor, die wesentliche Entwicklungen der jeweiligen Sprachperiode prägnant zusammenfasst. Sie macht nicht nur neugierig, sondern trägt auch dazu bei, dass die Leser einen guten ersten Überblick bekommen, wie die einzelnen Epochen im historischen Verlauf zusammenhängen. Natürlich muss man hier davor warnen, die

Sprachgeschichte allzu teleologisch (an Zwecken orientiert) anzusehen: Es könnte der Eindruck entstehen, ihre Entwicklungsstränge liefen zielgerichtet auf einen Endpunkt zu, den wir als fertige und nicht mehr veränderbare

Riecke gelingt es eindrucksvoll und anhand vieler spannender Textzeugnisse, dies plausibel zu veranschaulichen. Dabei greift er auch auf eher unbekannte Texte zurück und beleuchtet Personen abseits des wissenschaftli-

chre wissenschaftlichen Beiträge vielfach auf Deutsch. So wirkten sie daran mit, diese Sprache in der Wissenskultursprache zu etablieren.

Trotz seines geringen Umfangs bietet der Band einen fundierten Überblick über die Entwicklungspfade der deutschen Sprache. Zahlreiche Beispiele sorgen für Anschaulichkeit. Der Autor macht deutlich, dass Sprachgeschichte alles andere als graue Theorie ist. Mit seiner narrativen Herangehensweise hat er ein informatives und zugleich unterhaltsames Werk geschaffen, das dem einen oder anderen Leser hoffentlich Lust auf mehr macht.

### *Frauen verfassten ihre wissenschaftlichen Beiträge vielfach auf Deutsch und wirkten so maßgeblich daran mit, diese Sprache in der Wissenskultursprache zu etablieren*

Verfasstheit der Gegenwartssprache erleben. Dies jedoch hat Riecke keineswegs im Sinn, was er mehrfach nachdrücklich betont.

Eine Sprache entwickelt sich nicht losgelöst von ihren Sprechern und auch nicht abgekoppelt vom kulturellen, gesellschaftlichen, politischen und wissenschaftlichen Rahmen, in den die Sprachgemeinschaft eingebunden ist – eine an sich banale Erkenntnis. Doch

chen Rampenlichts – einer der Pluspunkte seines Werks. Am Beispiel der Mathematikerin und Astronomin Maria Cunitz, die im 17. Jahrhundert in Schlesien wirkte, illustriert er, dass der Einfluss von Frauen auf die deutsche Wissenschaftssprache nicht unterschätzt werden sollte. Da sie meist keinen unmittelbaren Zugang zur lateinisch geprägten Gelehrtenkultur der frühen Neuzeit hatten, verfassten sie

---

#### **Monika Hanauska**

Die Rezensentin ist akademische Mitarbeiterin am Institut für Germanistik des Karlsruher Instituts für Technologie. Ihre Forschungsschwerpunkte sind historische Sprachwissenschaft und Medienlinguistik.



Katharina Schüller

#### **Statistik und Intuition**

*Alltagsbeispiele kritisch hinterfragt*

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2016

312 S., € 14,99

MATHEMATIK

## Tückisches Thema

Von Hurrikänen mit weiblichen Namen bis zur Messung von Armut: Statistikerin Katharina Schüller zeigt Fallstricke ihres Fachs auf.

Die Autorin des Werks ist Diplomstatistikerin und hat sich in den zurückliegenden Jahren mit regelmäßigen Radiobeiträgen einen Namen gemacht, ebenso als Leiterin eines international aktiven Data-Science-Unternehmens. Auch beteiligt sie sich mit Kommentaren an der renommierten »Unstatistik des Monats« des Ökonomen Thomas Bauer, des Statistikers Walter Krämer und des Risikoforschers

Gerd Gigerenzer. Dass der Umgang mit statistischen Daten schwierig ist und oft danebengeht – Wirtschaftsnobelpreisträger Daniel Kahneman bezeichnet unser Gehirn in dieser Hinsicht als miserabel –, verdeutlicht die Autorin in fünf Kapiteln mit jeweils sieben gut ausgewählten Beispielen.

Das Spektrum dieser 35 Fälle ist sehr breit. Bei der Lektüre werden sich die Leser sicherlich an die eine oder andere

Schlagzeile erinnern, die auf angebliche Ergebnisse von wissenschaftlichen Studien verwies. Dazu gehört etwa die Aussage, Hurrikane mit weiblichen Namen verursachten mehr Todesfälle als solche mit männlichen – eine Fehleinschätzung, wie Schüller zeigt. Die Autorin erläutert auch Gründe dafür, warum Steuerschätzungen regelmäßig danebenliegen und die jährliche Prognose des Arbeitskreises Steuerschätzung, eines Beirats des Bundesfinanzministeriums, in den seltensten Fällen stimmt. Zudem setzt sie sich mit den fragwürdigen Kriterien des Korruptionswahrnehmungsindex von »Transparency International« auseinander, laut dem Deutschland zurzeit auf Platz 12 von 175 bewerteten Ländern liegt.

Weiterhin macht sie deutlich, auf welch wackligen Beinen die Aussage steht, ein Prozent der Weltbevölkerung besitze so viel wie die ärmsten 50 Prozent zusammengenommen.

Zu den behandelten Themen gehört ebenfalls die »geplante Obsoleszenz«, die absichtliche Verringerung der Lebensdauer von Produkten, so dass diese vorzeitig verschleifen oder versagen.

# FALLING WALLS LAB + CONFERENCE

## BERLIN 8/9 NOV 2016

**BEWIRB  
DICH!**  
FALLING-WALLS.COM/LAB



### NACHWUCHSWISSENSCHAFTLER UND YOUNG PROFESSIONALS MIT INNOVATIVEN IDEEN GESUCHT!

#### DAS FALLING WALLS LAB AM 8. NOVEMBER

- Präsentiere Deine Idee vor Nachwuchsforschern und Young Professionals aus aller Welt.
- Überzeuge eine hochkarätige Jury in 3 Minuten.
- Werde Teil der interdisziplinären Falling Walls Lab Community mit Standorten in über 35 Ländern.

#### Programm

100 Nachwuchswissenschaftler, Young Professionals und Innovatoren präsentieren am 8. November 2016 ihre Forschungsprojekte, Ideen und Initiativen zu gesellschaftlichen Herausforderungen vor einer hochkarätigen Jury – in jeweils 3 Minuten.

#### Wer kann sich bewerben?

Die Bewerbung steht Bachelor- & Masterstudenten, Doktoranden, Post-Docs sowie Young Professionals aller Disziplinen offen.

#### Gewinner

- Die drei Gewinner des Labs werden von der Jury zu den „Falling Walls Innovators of the Year 2016“ gekürt, erhalten einen Geldpreis und treten mit ihren 3-Minuten-Vorträgen als Sprecher auf der Falling Walls Conference vor internationalem Publikum auf.
- Mit der Einladung zum Falling Walls Lab erhält jeder Teilnehmer ein A.T. Kearney-Stipendium, das den Eintritt zur Falling Walls Conference und eine Übernachtung beinhaltet.

#### Bewerbungen

- Bewirb Dich unter: [falling-walls.com/lab](http://falling-walls.com/lab)
- Bewerbungsschluss: **31. August 2016**

**FRAGEN?** [falling-walls.com/lab](http://falling-walls.com/lab)

**TWITTER:** #FallingWalls16



**FALLING  
WALLS  
LAB 2016**

Founding Partner

**ATKearney**

Global Partner

**FESTO**

The Falling Walls Foundation is supported by





J.V. Chamary

**50 Schlüsselideen Biologie**

Aus dem Englischen von Monika Niehaus. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg 2016. 205 S., € 16,99

Was ist Leben? Der Wissenschaftsautor und Biologe J.V. Chamary vermittelt das nötige Rüstzeug, um dieser Frage kompetent nachzugehen. In 50 anschaulichen Essays liefert er reichlich Wissen zu Themen wie Evolution, Sex und Zellzyklus. Dabei geht er auch auf Wissenschaftsgeschichte, alternative Thesen und religiös inspirierte Betrachtungsweisen ein. Beispielsweise erläutert er nicht nur die darwinsche Evolutionstheorie, sondern befasst sich zudem mit »Intelligent Design« – jener kreationistischen Auffassung, laut der sich das Leben am besten mit einem intelligenten Urheber (»Schöpfer«) erklären lässt. Auf diese Weise möchte Chamary den Blick auch auf Gebiete jenseits der Wissenschaft lenken. Zeitleisten, Kästen und Abbildungen sorgen für Einordnung und fördern das Verständnis. Unterm Strich präsentiert sich der Band als gelungenes und empfehlenswertes Werk für biologisch interessierte Leser, die ihr Wissen auffrischen und erweitern möchten.

SABRINA SCHRÖDER



Galileo Big Pictures

**Spektakuläre Bilder und die unglaublichen Geschichten dahinter**

riva, München 2016. 200 S., € 19,99

Kurios und spektakulär verspricht dieser Bildband zu sein, der aus der gleichnamigen Rankingshow des Fernsehsenders RTL hervorgegangen ist. In einer Art visueller Reise durch Raum und Zeit präsentiert er Schnappschüsse aus Geschichte, Natur, Forschung und Sport. Das Spektrum ist sehr breit: Es reicht von Martin Luther King, aufgenommen während seiner berühmten Rede, über einen Geysir, der bei Bohrungen entstand, bis hin zum undurchdringlichen Smog in einer chinesischen Stadt und zu bunt gefärbten Küken in Pakistan. Dass einige dieser Fotos beeindruckend sind, steht außer Zweifel. Was sie verbindet, sind aber allenfalls die Superlative, die Galileo-Moderator Aiman Abdallah im Vorwort anpreist. Als Betrachter staunt man daher nicht nur über die Bilder, sondern auch über ihre wilde Zusammenstellung.

HANNA STERN



Konrad Wothe, Martin Rasper

**Knallbunt & unsichtbar – Farbenpracht und Tarnung in der Tierwelt**

Knesebeck, München 2016. 192 S., € 35,95

Was kommt heraus, wenn ein passionierter Naturfotograf und ein erfahrener Redakteur gemeinsam einen Bildband über tierische Farbenpracht und Tarnung austüfteln? Im besten Fall etwas Ähnliches wie dieses Buch. Die titelgebende Eigenschaft »knallbunt« trifft auf einen Gutteil der insgesamt 200 Tierfotos zu. Bei den restlichen Aufnahmen muss man sehr genau hinsehen, um die abgebildeten Wesen, etwa eine Stabheuschrecke, zu erkennen. Diese Tour de Force durch entweder äußerst auffällige oder kaum zu erkennende Landtiere – von Gliedertieren über Amphibien, Reptilien und Vögel bis hin zu Säugern – besticht nicht nur durch ihre Fotos, sondern auch durch knackige und informative Begleittexte, die genau die richtige Menge Kontext liefern. Ein Bildband, der die Ästhetik der Natur ins Wohnzimmer holt und Lust weckt, sie draußen selbst zu entdecken.

ARNE BAUDACH



Beat Döbeli Honegger

**Mehr als 0 und 1 – Schule in einer digitalisierten Welt**

hep, Bern 2016. 160 S., € 24,-

Der Autor beschreibt, welche Herausforderungen die digitale Revolution für den Schulbetrieb mit sich bringt und wie dieser darauf reagieren kann. Das Ziel lautet, Lehrkräften, Eltern und Bildungspolitikern eine Entscheidungshilfe an die Hand zu geben. Dies gelingt dem Autor zum einen, indem er umfassend über alle Positionen und Gegenpositionen informiert, und zum anderen, indem er sein Buch sehr übersichtlich strukturiert. So finden sich am Ende jedes Kapitels nicht nur die jeweils zusammengefassten Kernaussagen, sondern auch Verweise auf weiterführende Literatur. Der Anhang listet Argumente gegen die Digitalisierung in der Schule auf; Leser können sich selbst eine Meinung zu ihrer Stichhaltigkeit bilden. Dabei hilft das so genannte Biblionetz, eine Literaturliteraturdatenbank im Internet, die kontinuierlich gepflegt und erweitert werden soll, um aktuelle Diskussionsbeiträge vorzuhalten.

KATRIN HOCHBERG

Geplante Obsoleszenz gibt es; sie kann aber auch irrtümlich empfunden werden, so Schüller. Die Statistikerin erläutert, wie es zu subjektiven Fehleinschätzungen der Wahrscheinlichkeiten für solche Ereignisse kommt.

An all diesen Beispielen analysiert die Autorin Fehler, die in statistischen

schließen sich erst durch Beispiele in nachfolgenden Kapiteln. Daher kann es sinnvoll sein, das Buch nicht von vorn nach hinten zu lesen: Dem ersten Kapitel beispielsweise sollte man sich erst zuwenden, nachdem man das letzte durchgearbeitet hat, das wesentliche Begriffe und Methoden der Statistik

### *Das Buch zeigt, welche statistischen Aussagen angemessen aus Datenmengen abgeleitet werden können*

Veröffentlichungen geschehen, und beleuchtet grundsätzliche Fallstricke. Ihre Ausführungen belegt sie ausführlich mit Quellenangaben und verweist auf weiterführende Literatur. Den 35 Beispielen geht ein einleitender Teil voraus, der sich Denkmustern, Heuristiken und Statistiken sowie der Arbeitsweise von Statistikern widmet. Zusätzlich hält das Buch einen umfangreichen Abschnitt über deren Handwerkszeug bereit.

Schüller bemüht sich durchweg um Verständlichkeit. Dennoch erscheinen einige Buchpassagen wegen ihrer Allgemeinheit und des verwendeten Fachvokabulars zu wenig konkret und schwer zugänglich. Manche Erörterungen er-

sachkundig erläutert. Dies geschieht im Wesentlichen verbal, also fast ohne Formeln, was die Darstellung auch für Nichtmathematiker geeignet macht.

»Statistik und Intuition« weist die eine oder andere strukturelle Schwäche auf. Nichtsdestoweniger zeigt das Buch, welche statistischen Aussagen angemessen aus Datenmengen abgeleitet können, welche (Denk-)Fehler oft hinter statistischen Veröffentlichungen stecken und wie diese sich vermeiden lassen.

#### **Heinz Klaus Strick**

Der Rezensent ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.



Peter M. Kammer

#### **Pflanzen einfach bestimmen**

Schritt für Schritt

einheimische Arten kennenlernen

Haupt, Bern 2016

416 S., € 29,90

BOTANIK

## Pflanzenführer auf neuen Wegen

Ein innovativer Band zur Einordnung heimischer Gewächse.

**P**flanzen bestimmen ist nicht ganz einfach. Möchte man ein Buch verfassen, das dies für alle Arten eines Landes erlaubt, kommt es schnell auf mehr als 1000 Seiten für rund 4000 so genannte Gefäßpflanzen.

Verschiedene Wege hat man ausprobiert, das Einordnen dennoch möglichst schnell und sicher zu erlauben. Zunächst trifft man für Pflanzenliebhaber – Amateure im Sinne des Worts, für die das vorliegende Werk gemacht wur-

## JAHRGANGS-CD-ROM 2015



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

So erreichen Sie uns:

**Telefon: 06221 9126-743**

**[www.spektrum.de/recherche](http://www.spektrum.de/recherche)**

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

de – eine Auswahl. Mehr als 3000 Arten kann man da schon mal weglassen, weil sie sehr selten sind (etwa Frauenschuh), weil sie nur an ganz wenigen exponierten Stellen wachsen (zum Beispiel Edelweiß) oder lediglich in seltenen Lebensräumen vorkommen (beispielsweise Sonnentau im Moor). Dann spart man noch alle Kulturpflanzen der Felder und alle Garten- und Parkpflanzen aus. So kommt der Autor, Peter Manuel Kammer, Professor an der Pädagogischen Hochschule in Bern und dort verantwortlich für die Lehrerausbildung in

**Der Autor geht zum Eingrenzen der jeweils interessierenden Spezies einen völlig neuen Weg. Das Abfragen von Alternativen behält er bei, aber praktisch ganz ohne botanisches Fachvokabular – was ausgezeichnet funktioniert**

Biologie und Chemie, auf seine Auswahl von nur noch 674 Arten. Es sind dies die wichtigsten Farne, Schachtelhalme und Blütenpflanzen, einschließlich Gehölzen, Wasserpflanzen und – was sonst in solchen Büchern immer fehlt – einigen Süß- und Sauergräsern.

Damit es nun auch noch möglichst schnell geht, bis man weiß, was man vor sich hat, ordnen die meisten bunt bebilderten Feldführer die ausgewählten Arten nach der Blütenfärbung. Klassische Bestimmungsbücher – ohne solche Abbildungen – verlangen für das Auffinden einer Art das sehr sorgfältige Lesen eines fachnahen Textes. Dabei muss man sich immer für eine von je zwei verschiedenen Beschreibungen

der Pflanze oder ihrer Teile entscheiden, und das so lange, bis die Spezies eingegrenzt ist. Das kann sehr frustrierend sein, wenn man beispielsweise ein Schneeglöckchen in der Hand hat und bei der Tulpe ankommt.

Genau hier geht der Autor einen völlig neuen Weg, und der funktioniert ausgezeichnet. Das Abfragen von Alternativen hat er beibehalten, aber praktisch ganz ohne botanisches Fachvokabular, das man sich sonst vorher beibringen musste, wenn man nicht dauernd im Glossar nachschlagen woll-

te. An einigen wenigen Stellen geht es auch in Kammers Buch nicht ohne Fachtermini; dort erklärt er den notwendigen Begriff einfach an Ort und Stelle und bildet, wenn nötig, noch eine Skizze dazu ab. Ich habe das an zehn willkürlich von draußen mitgebrachten Pflanzen ausprobiert und neun davon leicht gefunden. Die übrig gebliebene war eine Brombeere, und da versagt auch so manches vielbändige Bestimmungswerk: Die Gattung *Rubus* gehört zu den schwierigsten überhaupt.

Zu jeder Art gibt es eine Abbildung, gelegentlich sogar zwei. Dazu eine Beschreibung, welche die Familie nennt, den lateinischen Namen erklärt und weitere wichtige Erkennungsmerkmale aufzählt. Ferner erfährt man einiges über die Blütezeit und den Lebensraum. Unter »Wissenswertes« folgen interessante Angaben zur Verwendung, zum Giftgehalt oder zur Bekämpfung (bei einigen sehr invasiven Arten, die endemische verdrängen können).

Bezüglich der Echten Brombeere (*Rubus fruticosus*) wird beispielsweise erklärt, warum es »zu einer unüberblickbaren Formenvielfalt und zahlreichen schlecht unterscheidbaren Kleinarten« (innerhalb der Gattung) gekommen ist. Hier stößt man an die Grenzen eines solchen Feldführers. Es bleibt auf den Seiten aber fast immer Platz für ei-

gene Anmerkungen, was sehr nützlich sein kann.

Ein kurzes Glossar erklärt wichtige Begriffe vor allem zur Fortpflanzungsbiologie der Blütenpflanzen etwas ausführlicher. Das Literaturverzeichnis führt jene Werke auf, von denen man einige braucht, wenn man mehr als diese 674 Arten kennen lernen will.

So weit die positiven Aspekte. Leider gibt es auch einige negative. Bei dem Urheber der Abbildungen, die durchweg sehr gut sind, handelt es sich um Konrad Lauber (1927–2004), der zu den besten Pflanzenfotografen Europas gehörte. Er illustrierte unter anderem die »Flora Helvetica« mit mehr als 3000 Arten ganz allein und erscheint dort als Erstautor. Im vorliegenden Werk wird er gerade mal im Impressum erwähnt, während Stefan Eggenberg, »dessen Zeichnungen dieses Buch veredeln«, ausdrücklichen Dank erfährt. Die Titelfotos für den Einband stammen zudem aus dem Internet von Pixabay, Fotolia oder Flickr. Eine solche Missachtung eines Fotografen ist mir bisher noch nicht untergekommen.

Bilder für Bestimmungsbücher müssen nicht »schön« sein, sondern die wesentlichen Merkmale möglichst detailreich zeigen. Das ist in diesem Band grundsätzlich hervorragend gelungen. Leider aber hat man das Buch an den Rändern so knapp beschnitten, dass bei vielen Abbildungen die gewählten Ausschnitte nicht mehr stimmig sind: Blüten- oder Laubblätter sind nur zum Teil zu sehen, oder die Symmetrie des Bildaufbaus ist gestört. Das ist schade und wäre vermeidbar gewesen.

Unterm Strich jedoch stimmen die Qualität und der Preis des Bands. Er ist zwar kein Taschenbuch mehr, aber mit seinem flexiblen abwaschbaren Einband absolut geländetauglich. Wer ihn besitzt, hat kaum noch einen Grund, nicht sofort auf Pflanzenexpedition zu gehen!

**Jürgen Alberti**

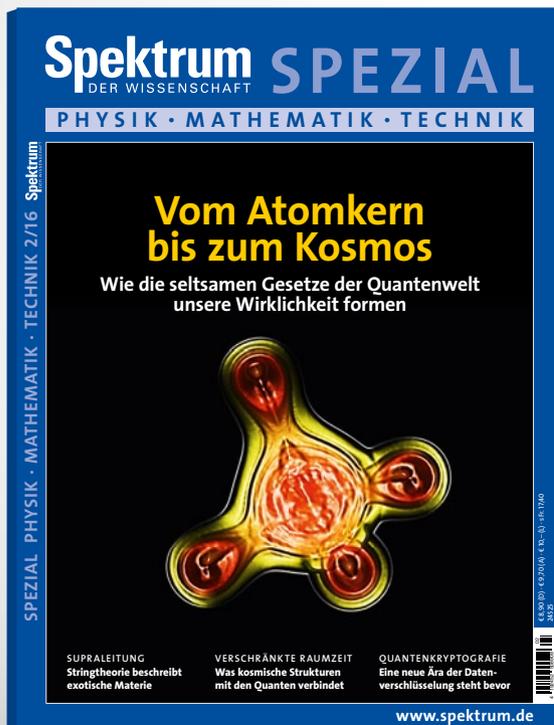
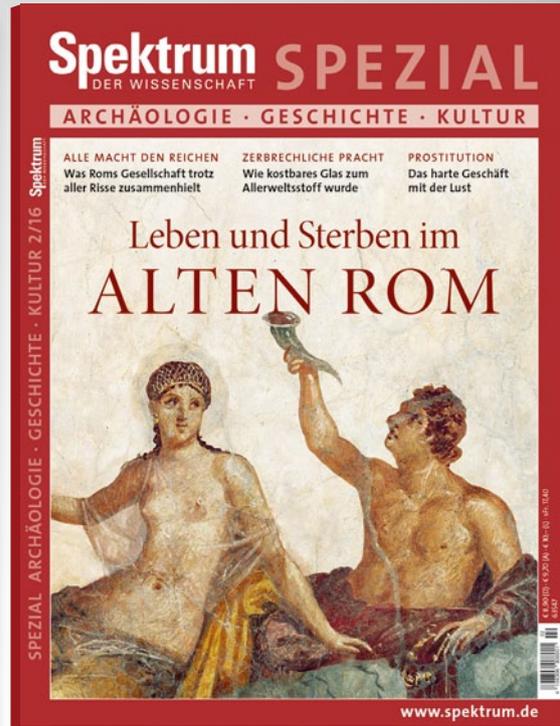
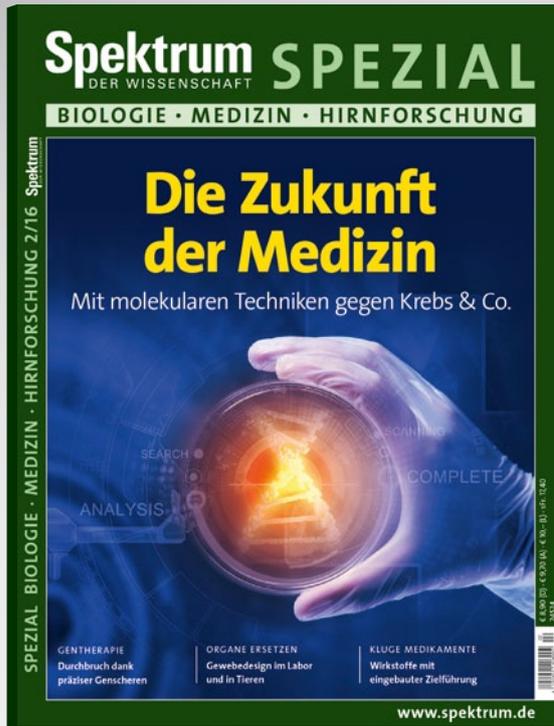
Der Rezensent ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn. Aus seiner Feder stammen diverse Veröffentlichungen zur Natur- und Kulturgeschichte des Kraichgaus.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:  
[www.spektrum.de/rezensionen](http://www.spektrum.de/rezensionen)

DAS GANZE SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT:  
**UNSERE SPEZIALREIHEN**



Alle Hefreihen auch im Handel erhältlich!

JETZT IM  
 ABO FÜR NUR  
**€ 7,40**  
 PRO HEFT  
 BESTELLEN

Jede der drei **Spektrum Spezial**-Reihen erscheint viermal pro Jahr und kostet im Abonnement nur € 29,60 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 25,60). Noch vor Erscheinen im Handel erhalten Sie die Hefte frei Haus und sparen dabei über 15 % gegenüber dem Einzelkauf!

So einfach erreichen Sie uns:

**Telefon: 06221 9126-743**  
**www.spektrum.de/spezialabo**

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

Oder QR-Code  
 per Smartphone  
 scannen und  
 Angebot sichern!



## Süße Heilung

Die Ärzte Thomas von Woedtk und Hans-Robert Metelmann stellten mögliche Anwendungen von physikalischem Plasma in der Medizin vor (»Heilen mit dem vierten Aggregatzustand«, Juni 2016, S. 30).

**Jörg Michael, Hannover:** Ich habe keinerlei Zweifel, dass Heilen mit kalten Plasmen zumindest in der Krebstherapie eine interessante Nischenanwendung darstellt. Um den Nutzen einer Behandlungsform zu ermitteln, sollte man diese aber nicht mit einer Nichtbehandlung vergleichen, sondern mit vorhandenen Alternativen. Das gilt ganz besonders für das im Untertitel erwähnte Desinfizieren von Wunden.

Vor etwa zehn Jahren habe ich in der Zeitschrift »New Scientist« einen Artikel über Wundbehandlung mit Hilfe von Honig oder Zucker gelesen. In einem Fall konnte damit sogar eine Amputation verhindert werden. In einer gesättigten Zuckerlösung überleben (fast) keine Bakterien (daher hält sich Marmelade). Die Anwendung ist simpel: Einfach auf die Wunde auftragen



Mit einem solchen Gerät richten Mediziner kalte Plasmastrahlen auf Haut- und Wundoberflächen.

NEOPIAS TOOLS GMBH

und trocknen lassen. Der Zucker desinfiziert zuerst die Wunde und bildet nach dem Trocknen einen Wundverschluss. Innerhalb von drei oder vier Tagen geht die Zuckerkruste in eine normale Borke über. Die Wundheilung wird ebenfalls deutlich beschleunigt, bei gleichzeitig minimierter Narbenbildung. Zucker ist in fast jedem Haushalt quasi kostenlos verfügbar. Solange es nur ums Desinfizieren von Wunden geht, stellt sich daher die Frage: Warum Hightech, wenn es auch einfach geht? Nach einer Plasmabehandlung ist die Wunde schließlich weiterhin offen. Und in Bezug auf Krebstherapie sollten die Autoren einmal darüber nachdenken, ihre Methode mit anderen Verfahren zu kombinieren.

## Wäre unsere Erde zu entdecken?

Wie fahnden Astronomen mit Weltraumobservatorien nach Exoplaneten? Die Astrophysiker Kevin Heng und Joshua Winn gaben einen Überblick über die aktuellen Forschungsprogramme (»Auf der Jagd nach der zweiten Erde«, April 2016, S. 36).

**Thomas GÜthner, Trostberg:** Zu dem sehr interessanten Artikel eine ganz einfache Frage: Würden die aufwändigen (und teuren) Suchprogramme nach erdähnlichen Planeten unsere eigene Erde eigentlich finden können? Meine ganz einfache geometrische Überlegung geht so: Als Referenzfläche dient die Oberfläche einer Kugel mit Radius einer Astronomischen Einheit. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Erde für einen beliebigen Beobachter zu einem fixen Zeitpunkt die Sonne bedeckt, ist der Quotient aus der scheinbaren Fläche der Sonnenscheibe gegen die Referenzfläche – das sind rund 5,4 Millionstel. Die Wahrscheinlichkeit, dass für einen beliebigen Beobachter die Erde innerhalb eines Jahrs vor der Sonne vorbeie-

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser

**Redaktion:** Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.de

**Ständige Mitarbeiter:** Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer, Dr. Gerd Trageser

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

**Redaktionsassistentz:** Barbara Kuhn

**Assistenz des Chefredakteurs:** Hanna Hillert

**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck

**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,

E-Mail: service@spektrum.de

**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Eva Gottfried,

Dr. Claudia Hecker, Dr. Ingrid Horn, Nele Miethig, Dr. Michael

Springer, Dr. Sebastian Vogel.

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

**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

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationale Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**Bezugspreise:** Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-;

im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten

(gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland:

€ 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement

(Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank

Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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, Gesamtbereichsleitung: Michael

Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550;

Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg,

Tel. 040 3280-189

**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. 37 vom 1.1.2016.

**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: © 2016 (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 Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

Aussagen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

**SCIENTIFIC AMERICAN**

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven

Inchcombe, Executive Vice President: Michael Florek



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

zieht, ist eine Ringfläche mit Breite des scheinbaren Sonnendurchmessers auf der Referenzkugel, bezogen auf die Gesamtfläche der Referenzkugel – das sind rund 0,47 Prozent. Man müsste also rund 200 Systeme der Art Erde-Sonne mindestens ein Jahr beobachten, um ein Objekt wie unsere Erde zu entdecken – und dabei würde die Helligkeit nur auf 99,9995 Prozent der unbedeckten Sonnenhelligkeit abfallen. Diese einfache Rechnung zeigt, dass – trotz aller Erfolge bei der Suche nach Exoplaneten – ein wirklich erdähnliches System auch mit den geplanten Missionen nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit gefunden werden kann.

#### Antwort

##### der Redakteurin Felicitas Mokler:

Die Wahrscheinlichkeit, einen Transit von einem Exoplaneten bei einem bestimmten Stern zu beobachten, errechnet sich aus dem Verhältnis von Sterndurchmesser zu Durchmesser des Planetenorbits. Für ein System ähnlich wie Erde-Sonne beträgt diese etwa 0,1 Prozent. Um wirklich fündig zu werden, werden die Missionen wie TESS und PLATO hunderttausende Sterne nach Transits solcher Planeten absuchen. Die Helligkeit würde bei einem solchen System übrigens um etwa 0,01 Prozent beziehungsweise auf 99,99 Prozent und nicht auf 99,9995 Prozent abfallen.

Selbst wenn die Wahrscheinlichkeit nur 1/200 ist und wir nur 100 000 Sterne beobachten, so werden wir statistisch gesehen 500 solcher Planeten finden.

## Endliche Fläche

*Die Chemiker Matthias Ducci und Marco Oetken zeigten, wie man der Entstehung von fraktalen Strukturen unter dem Mikroskop zusehen kann (»Minibäume aus Metall«, Mai 2016, S. 76).*

**Stefan Riegel, Bad Vilbel:** Die Aussage, dass der Koch-Stern unendlich in seiner Struktur sei, da sich Umfang oder Fläche nicht angeben lassen, ist bezüglich der Fläche nicht korrekt.

Der Umfang  $U$  des Koch-Sterns wächst mit jedem Iterationsschritt um

den Faktor  $4/3$ . Nach dem  $n$ -ten Schritt beträgt er daher  $U_n = U_0 \cdot (4/3)^n$  und wird für  $n \rightarrow \infty$  tatsächlich unendlich groß.

Anders verhält es sich jedoch mit seinem Flächeninhalt. Wir beginnen mit einem gleichseitigen Dreieck der Fläche  $A_0$ . Im ersten Iterationsschritt kommen drei neue Dreiecke mit dem Flächeninhalt von je  $1/9 A_0$  hinzu. Bei jedem weiteren Iterationsschritt werden jedem zuvor hinzugekommenen Dreieck vier neue Dreiecke mit je  $1/9$  seiner Fläche hinzugefügt. Die Gesamtfläche nach dem  $n$ -ten Schritt ist damit  $A_n = A_0(1 + 3 \cdot 1/9 + 3 \cdot 4 \cdot (1/9)^2 + \dots + 3 \cdot 4^{n-1} \cdot (1/9)^n)$ . Im Grenzfall  $n \rightarrow \infty$  geht diese Summe gegen  $A_0 \cdot 8/5$ . Der Flächeninhalt des Koch-Sterns hat also einen endlichen und angebbaren Wert.

## Exklusive Minderheit

*Laut einer Befragung beträgt der Männeranteil versus Frauenanteil bei den Abonnenten neun zu eins (»Cherchez les femmes!«, Editorial, Juni 2016, S. 3).*

**Maike Stern, per E-Mail:** Mit Freude habe ich das neue »Spektrum«-Heft aus dem Briefkasten gefischt. Direkt ausgepackt, Editorial aufgeschlagen und was lese ich da: dass ich zu einer sehr exklusiven Minderheit gehöre – den Abonnentinnen! Dass wir nur zehn Prozent sind, hat mich genauso sehr überrascht wie Sie. Tatsächlich waren es genau die »harten, physikalischen Themen« auf der Titelseite, die mich ursprünglich zu Ihrem Blatt gebracht haben. Zufällig, vor etwa 15 Jahren, an einem Kiosk. Als Elektroingenieurin an einem Forschungsinstitut in dem Bereich Machine Learning arbeitend, spiegeln diese zehn Prozent durchaus den Anteil meiner Kolleginnen wider. Ich werfe einfach mal die These in den Raum, dass das Interesse für »harte« naturwissenschaftliche Themen in vielen Frauen schlummert, es aber keine erweckenden Berührungspunkte gibt. Vielen Dank für die vielen interessanten Artikel!

**Renate Bischoff, Le Mont-Pèlerin (Schweiz):** Zehn Prozent Abonnentinnen heißt ja nicht unbedingt nur zehn

FOLGEN SIE UNS  
IM INTERNET

facebook

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

YouTube

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

Google+

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

twitter

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

Prozent Leserinnen. Ich habe vor Jahren meinem Mann das »Spektrum«-Abonnement geschenkt. Er wird als Abonnent geführt; gelesen wird »Spektrum« von uns beiden. Vielleicht ist das auch in anderen Familien so, und damit wäre die Welt wieder etwas im Gleichgewicht.

**Elisabeth Bauer, Hattingen:** Wir sind seit vielen Jahren Abonnenten. Das Abo läuft auf den Namen meines Mannes, in dieser Zeit habe aber hauptsächlich ich die Hefte ausführlich gelesen. Vor fast zwei Jahren ist mein Mann gestorben, und ich habe das Abo weder gekündigt – ich möchte darauf auch weiterhin nicht verzichten – noch den Namen geändert. Vielleicht erklärt so etwas, warum nur zehn Prozent Ihrer Abonnenten Frauen sind.

## LESERBRIEFE

... sind willkommen! Schicken Sie ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach an die E-Mail-Adresse [leserbriefe@spektrum.de](mailto:leserbriefe@spektrum.de) oder geben Sie mit Ihrem Kommentar direkt unter dem zugehörigen Artikel auf [Spektrum.de](http://Spektrum.de) ab. Die individuelle Webadresse ist stets am Ende des Artikels im Heft in Rot abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie unter: [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe)

# DAS MUSEUM DES NICHTS

Und das soll Kunst sein?

VON ANNA ZUMBRO

Gleich am Eingang zum Museum des Nichts wird man gebeten, die Kontaktlinsen herauszunehmen. Es gibt sogar kostenlose Behälter und Fläschchen mit Aufbewahrungslösung, aber bei den Eintrittspreisen wäre es übertrieben zu behaupten, man bekäme etwas umsonst.

»Ich habe Astigmatismus«, sage ich, als die Wächterin fragt, ob ich intelligente Linsen trage. »Die hat mir der Arzt verschrieben.« Natürlich steigern sie außerdem die Wahrnehmung, wie bei jedem, und das ist der eigentliche Grund, warum das Museum verlangt, sie abzugeben.

Die Wächterin bleibt ungerührt. »Das ist das Museum des Nichts«, betont sie. »Sie werden nichts verpassen.«

Sie erwidert meinen Blick und lässt damit zu, dass meine Linsen ihre persönlichen Daten sammeln. Sie heißt Wanda Richardson und lebt in der Webster Street. Mit 16 brach sie die Schule ab, schloss sich einer Bande an und verbrachte neun Monate im Gefängnis wegen Planung eines Raubüberfalls, obwohl sie nur Schmiere stand, während ihre Freunde die Tür zum Elektronikladen aufbrachen. Eine kirchliche Einrichtung half ihr auf die Beine, bis sie eine Affäre mit dem Pas-

tor hatte. Als Wächterin im Museum bekam sie eine zweite – oder besser dritte – Chance.

Wandas Augen verengen sich. Sie weiß, dass ich ihre von meinen Linsen projizierten Daten ablese, dass ich ihre Vergangenheit durchforste. Sie selbst trägt keine Linsen. Anscheinend müssen hier sogar die Wächter den Regeln folgen.

Eigentlich dumm. Sie würden doch besser aufpassen können, wenn sie Linsen hätten, die sie über die Besucher informieren. Aber wenn das wirklich das Museum des Nichts ist, gibt es wohl auch nichts zu stehlen.

Ich schreibe meinen Namen auf den Beutel, den Wanda mir reicht, und entferne meine Linsen an dem kleinen Waschbecken neben Wandas Pult. Ihr Gesicht verschwimmt. Sie zeigt zum Eingang der Ausstellung, und ich strecke meine Hand aus, weil ich meinen Augen nicht mehr traue.

Die Galerie hat weiße Wände und einen Parkettboden, genau wie die vielen anderen Museen, in denen ich schon Bilder von Da Vinci und Kahlo und Wyeth und wer weiß wem gesehen habe. Doch hier gibt es weder Gemälde noch Skulpturen, nichts als vier weiße Wände und ein Schild neben der Tür.

Ich kneife die Augen zusammen, um das Schild zu lesen: »Bitte die Kunstwerke nicht berühren.«

Da muss ich laut lachen: Nichts nicht berühren?

»Na, was hat Sie denn ins Museum geführt?«, fragt ein Mann, ungefähr so groß wie ich. Er lächelt dabei. Ich vermute, er amüsiert sich mit mir, nicht über mich. Aber das lässt sich schwer sagen. Seine Gesichtszüge sind verschwommen, fast abstrakt. Ohne meine Linsen weiß ich nicht, wie er heißt und woher er stammt, ob er jeden Donnerstag Suppe an Obdachlose verteilt oder vor einer Anklage wegen dreifachen Mordes flieht – mich fröstelt es. Ich kann mich nicht erinnern, wann ich zuletzt mit jemandem gesprochen habe, ohne seinen Namen und seine Vergangenheit zu kennen.

»Vielleicht musste ich mit eigenen Augen sehen, ob es das wirklich gibt«, antworte ich. »Ein Museum des Nichts, das kam mir wie ein Witz vor.«

»Dann hat es Sie immerhin zum Lachen gebracht.« Die Stimme des Manns hört sich freundlich an. Aber stimmt das? Kann ich meinen Ohren wirklich trauen?

»Warum sind Sie gekommen?«, frage ich zurück.

Er weist mit großen Gesten auf die weiße Wand vor uns hin. »Ich wollte die Kunst sehen.«

Jetzt weiß ich, dass etwas nicht stimmt. Ich weiche vorsichtig zurück. »Genau«, sage ich, um ihn bei Laune zu halten. »So etwas sieht man nicht alle Tage.«

»Nein, nein. Damit Sie mich richtig verstehen«, versetzt er hastig, »ich sage nicht, dass die Wand Kunst ist. Aber ist die Kunst nicht dazu da, uns zum Nachdenken zu bringen? Ununterbrochen werden wir mit Information gefüttert. Nie müssen wir etwas herausfinden. Verstehen Sie nicht? Dieser Ort regt zum Denken an. Er weckt die Fantasie. Deshalb ist er Kunst.«

Ich folge seinen Gesten und schaue die Wand an. Falls der Anstrich ein Muster aufweist, kann ich es nicht erkennen. Mein einziger Gedanke ist der Wunsch, meine Kontaktlinsen wiederzuhaben. Ohne sie fühlt sich die Welt fremd an.

»Bisher habe ich mich nie für besond-ers altmodisch gehalten«, sage ich, »aber eigentlich bevorzuge ich Kunst, die man sehen kann.«

Der Mann tritt näher zur Wand und beugt sich vor. »Vielleicht sollten Sie noch einmal genau hinsehen«, meint

er. »Ich erkenne das Bild: Verschüttete Milch auf weißem Marmor.«

»Tatsächlich?«, erwidere ich. »Ich hatte es mit diesem anderen Meisterwerk verwechselt: Tanz der unsichtbaren Geister in dichtem Nebel.«

Wir lachen einträchtig. Sein Lachen klingt nervös, und das beruhigt mich. Ich frage mich, ob ich ihm meinerseits verdächtig vorkomme.

»Ich heiße Tara«, sage ich.

Er streckt seine Hand aus und packt schließlich meine, weil ich danebengreife. »Duke«, sagt er. »Sehr erfreut.«

Ich heiße nicht Tara, und irgendwie weiß ich, dass er nicht Duke heißt. Mein Kopf schmerzt von der ungewohnten Anstrengung der Augen. Trotzdem möchte ich noch ein Weilchen bleiben. Mir wird klar: Der falsche Duke und ich werden getrennt das Museum verlassen müssen, damit wir die Illusion nicht zerstören.

Doch im Augenblick spielt das keine Rolle. Hier drinnen können wir uns neue Identitäten ausmalen – wie Picasso den Stil wechseln von blau zu rosa zu kubistisch. Wir können sein, wer wir wollen, weil niemand uns kennt. Das ist kein Museum des Nichts, sondern ein Ort, wo wir zugleich die Künstler und die Kunst sind. 🦋

## DIE AUTORIN

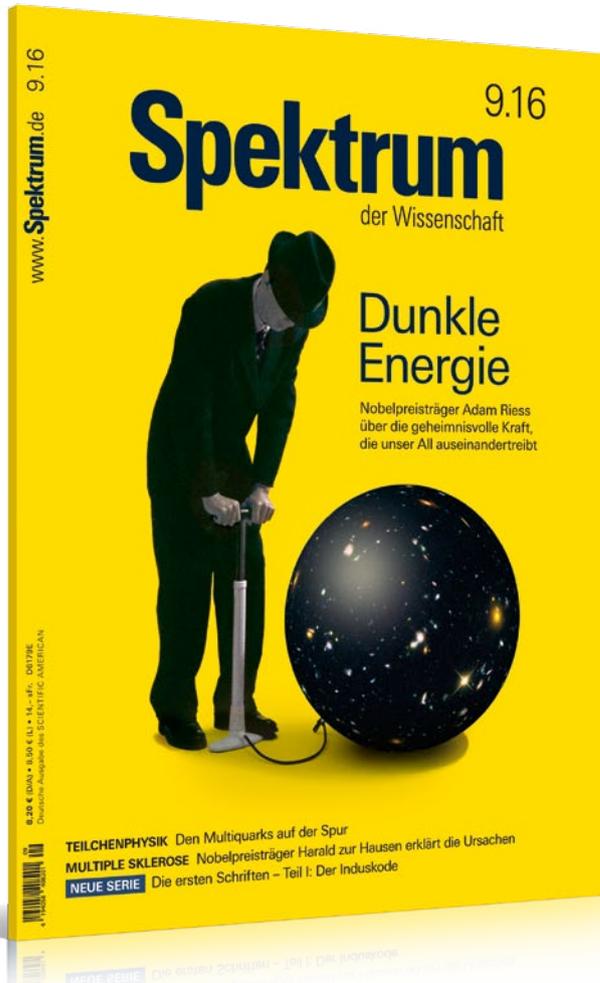
**Anna Zumbro** lebt in der US-Hauptstadt Washington. Ihre Kurzgeschichten sind in »Daily Science Fiction« und anderen Onlinemagazinen erschienen.

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
Nature 533, S. 138, 5. Mai 2016

## Der Dunklen Energie auf der Spur

Eine unbekannte Kraft treibt das Universum auseinander. Auch zwei Jahrzehnte nach der Entdeckung verstehen Kosmologen das Phänomen nicht. Neue Experimente sollen nun Klarheit schaffen.



Ab der nächsten Ausgabe  
erscheint Spektrum der Wissenschaft  
in neuem Gewand!

### Die ersten Multiquarks

Die Protonen und Neutronen der Atomkerne bestehen aus jeweils drei elementaren Quarks. Theoretisch kann es aber auch Quarksysteme aus vier, fünf und mehr Bausteinen geben. Schon lange suchen Physiker nach diesen Exoten – aktuelle Ergebnisse vom Large Hadron Collider am CERN geben jetzt neuen Auftrieb.

### Multiple Sklerose durch Milch und Rindfleisch?

Im »Spektrum«-Interview formuliert Nobelpreisträger Harald zur Hausen eine bahnbrechende Vermutung. Demnach könnte virale DNA in Rindfleisch und Milchprodukten nicht nur Krebs, sondern auch neurodegenerative Krankheiten wie etwa multiple Sklerose auslösen.



GREGORY MILLER

### Wir machen einen Faustkeil

Anthropologen lernen Faustkeile zu schlagen – ein unerwartet schweres Vorhaben. Doch dabei erfahren sie viel über die Entwicklung des menschlichen Gehirns.



JIM RICHARDSON

### Rettung für Afrikas Erde

Ausgelaugte Ackerböden regenerieren sich und liefern wieder gute Erträge, wenn die Bauern zwischen die Nutzpflanzen Bäume, Sträucher und andere ausdauernde Gewächse setzen.

### NEWSLETTER

Möchten Sie immer über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:  
[www.spektrum.de/newsletter](http://www.spektrum.de/newsletter)

JETZT BESTELLEN:  
DAS ABO VON SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT  
mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE  
KEINE AUSGABE  
DES MAGAZINS!

WÄHLEN  
SIE IHR  
**GESCHENK!**



**DVD »Die Tricks der Pflanzen«**  
Diese DVD entführt den Zuschauer 100 Minuten lang an einen Ort voller teuflischer Täuschungen, tödlicher Fallen und pflanzlicher Verlockungen: Die geheime Welt der Orchideen und Fleisch fressenden Pflanzen.

## JAHRES- ODER GESCHENKABO

- ✓ **ERSPARNIS:**  
12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10% günstiger als der Normalpreis.
- ✓ **WUNSCHGESCHENK:**  
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.
- ✓ **KEINE MINDESTLAUFZEIT:**  
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.
- ✓ **AUCH ALS KOMBIABO:**  
Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

NEU!



### Füllhalter »CLASSIC Sport« von Kaweco

Der »Kaweco Sport« im Taschenformat, ausgestattet mit edler Stahlfeder und Iridiumspitze für Tintenpatronen, ist der ideale Begleiter für unterwegs.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

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

E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)



Oder QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!

# Am Anfang steht die Neugier.



Freuen Sie sich mit uns auf das neu gestaltete  
**Spektrum der Wissenschaft**

**Ab 20.08.2016 im Handel**

**NaWaM**

Nachhaltiges Wassermanagement

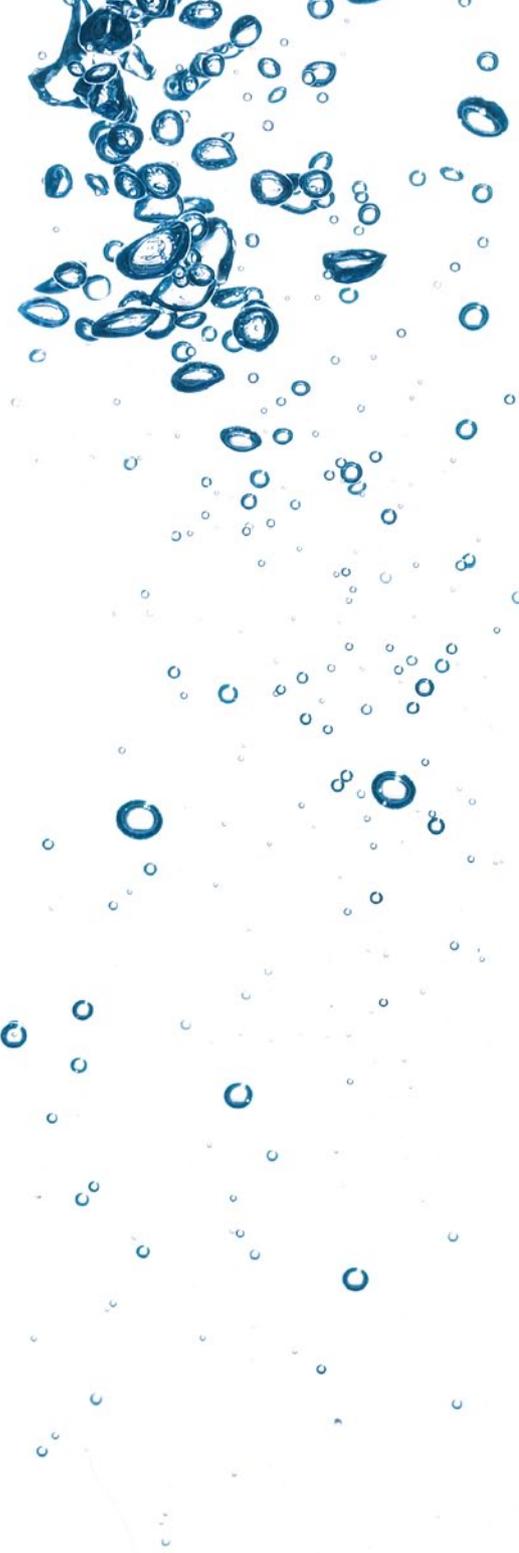


BMBF-Fördermaßnahme

**RiSKWa**

Risikomanagement von neuen Schadstoffen  
und Krankheitserregern im Wasserkreislauf

# Wir kümmern uns um sauberes Wasser



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



**FONA**  
Nachhaltiges  
Wassermanagement  
BMBF

Die meisten halten es für selbstverständlich, und doch gehört es zu den großen Errungenschaften der Zivilisation: sauberes Trinkwasser.

In der großen Forschungsinitiative »RiSKWa« (Risikomanagement von neuen Schadstoffen und Krankheitserregern im Wasserkreislauf) haben Wissenschaftler sowie Vertreter von Behörden, Industrie und Interessenverbänden gemeinsam neue Wege des Wassermanagements entwickelt.

### Rund 120 Liter Trinkwasser ...

... verbraucht der Durchschnittsdeutsche pro Tag. Wasser, das mit Ausscheidungen, Arzneirückständen, Waschmitteln und vielen anderen Stoffe verunreinigt auf Nimmerwiedersehen in den Abfluss rauscht. Auf Nimmerwiedersehen? Durchaus nicht: Nach dem Reinigen in Kläranlagen entlassen wir es zurück in den natürlichen Wasserkreislauf, aus dem wir letztlich auch wieder unser Trinkwasser beziehen. Rund ein Viertel des Letzteren stammt in Deutschland aus Seen, Flüssen oder Talsperren, der Rest aus Grundwasser, das ebenfalls am natürlichen Wasserkreislauf mitwirkt, wenn auch in wesentlich längeren Zeiträumen. Unsere Trinkwasserressourcen sind in Deutschland von hoher Qualität und lassen sich meist mit vergleichsweise geringem Aufwand in bedenkenlos genießbares Leitungswasser verwandeln.

Das war allerdings nicht immer so. Mit der zunehmenden Urbanisierung im Europa des 19. Jahrhunderts erstickten die Städte regelrecht im Abwasser. Wo es bereits Kanalisationssysteme gab, mündeten diese oft direkt in natürliche Gewässer, besonders Flüsse, die

sich dadurch in stinkende Kloaken verwandelten. Weil Flüsse zugleich das Gros des Trinkwassers lieferten, waren Epidemien programmiert. So erlebte Hamburg im 19. Jahrhundert eine Serie von Cholera-Ausbrüchen, deren letzter im Jahr 1892 mehr als 8000 Opfer forderte. Je mehr man darüber herausfand, wie Krankheiten und die Verbreitung ihrer Erreger über schmutziges Trinkwasser zusammenhängen, desto besser erkannte man die Bedeutung der Abwasserklärung und der Trinkwasseraufbereitung – und begann, die neuen Erkenntnisse auch praktisch umzusetzen. Der Rest ist Wasserwirtschaftsgeschichte. Heute werden unsere Abwässer flächendeckend in modernen Kläranlagen gereinigt; dadurch sind Deutschlands Gewässer so sauber wie zuletzt vor der industriellen Revolution. Unser Trinkwasser gehört zu den besten der Welt.

### Neue Bedrohungen

Die heute so hohe Qualität unseres Trinkwassers ist also eine zivilisatorische Errungenschaft der zurückliegenden 100 Jahre. Wir sollten sie nicht als selbstverständ-

lich ansehen: Unsere Trinkwasserressourcen sind neuen Bedrohungen ausgesetzt, die ihren Schutz wichtiger denn je machen. Demografische Veränderungen, Klimawandel und die Ansprüche der Wohlstandsgesellschaft – sie alle wirken sich auf die Qualität des Wassers im natürlichen Kreislauf aus und damit letztlich auf die Reinheit des Leitungswassers. »Sorgen bereiten uns heute vor allem anthropogene, schwer abbaubare Substanzen wie Arzneimittelrückstände, PFC, neue Arten von Krankheitserregern, die durch Wasser übertragen werden, sowie Antibiotikaresistenzen. Es ist fraglich, ob unsere rund 100 Jahre alten Verfahren zur hygienisch-mikrobiologischen Überwachung von Trink- und Abwasser hier allein noch ausreichen«, sagt Professor Martin Exner vom Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit der Universität Bonn.

Exner sitzt dem Lenkungskreis des Forschungsprogramms RiSKWa vor. Zwischen 2011 und 2016 haben die daran beteiligten Forscher in zwölf Verbundprojekten nach praxisnahen Wegen gesucht, solche neuen Risiken zu identifizieren, deren Gefahrenpotenziale zu bewerten und diesen schließlich mit Hilfe neuer Technologien und Handlungsstrategien zu begegnen (siehe »RiSKWa – Eine Übersicht«, S. 8). Dabei war es den Forschern wichtig, ihre Erkenntnisse nicht für sich zu behalten, sondern die Öffentlichkeit dafür zu sensibilisieren, wie jeder Einzelne zu einem nachhaltigeren Umgang mit der Ressource Wasser beitragen kann.

### Schadstoffe im Spurenbereich

Um was genau geht es bei den RiSKWa-Projekten? Als anthropogene (vom Menschen erzeugte) Spurenstoffe bezeichnet man chemische Verbindungen in geringsten Konzentration, die in der vom Menschen unbeeinflussten Natur entweder gar nicht oder kaum vorkommen.

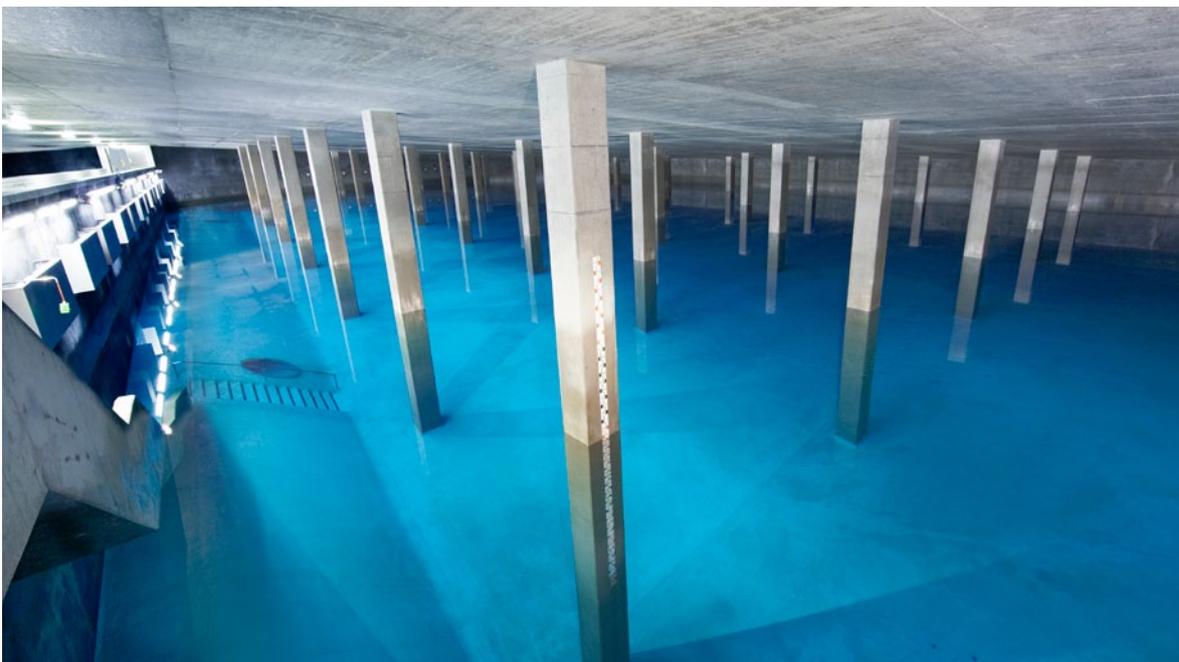
### Aufbereitetes Trinkwasser im Speicherbehälter Büttlau, einer Anlage des Zweckverbands Bodensee-Wasserversorgung.

Im Wasserkreislauf Probleme bereiten können neben Pestiziden und Kunststoffzusätzen vor allem Rückstände aus Arzneimitteln. »In Deutschland sind rund 3000 Pharmawirkstoffe zugelassen, deutlich über 100 davon wurden bereits in Abwässern nachgewiesen«, erläutert Martin Jekel, Professor für Wasserreinhaltung an der TU Berlin und Koordinator des RiSKWa-Verbundprojekts »ASKURIS«.

Ins Abwasser gelangen erhebliche Mengen von Medikamentenresten. 2011 wurden nach Angaben des Wissenschaftlichen Instituts der AOK jedem gesetzlich Versicherten in Deutschland durchschnittlich 520 Tagesdosen verschiedener Medikamente verordnet – eine Zahl, die in unserer alternden Gesellschaft künftig noch deutlich steigen wird. Viele dieser Wirkstoffe scheidet der Körper entweder unverändert oder teilweise in andere Verbindungen umgewandelt aus. Sie landen ebenso im Abwasser wie große Mengen abgelaufener Medikamente, die entgegen anders lautenden Empfehlungen über die Toilette entsorgt werden.

Welche dieser Stoffe in der Umwelt oder später im Trinkwasser trotz extremer Verdünnung Probleme bereiten können, war bislang nicht ausreichend untersucht. Während manche Substanzen relativ schnell zerfallen, sind andere äußerst stabil und können sich in der Umwelt anreichern. Zu den häufig im Abwasser gefundenen Arzneien gehören Schmerzmittel und Entzündungshemmer, Psychopharmaka und Betablocker, aber auch Kontrastmittel für Röntgenuntersuchungen.

Besonders problematisch sind künstliche Hormone aus der Antibabypille oder Stoffe mit hormonähnlicher Wirkung wie das in Kunststoffen enthaltene Bisphenol A. Weil Hormone naturgemäß schon in geringsten Mengen große physiologische Effekte haben, könnten bereits extrem niedrige Konzentrationen im Wasser zu relevanten Risiken führen. Beispielsweise verhindern künstliche Östrogene nicht nur ungewollte Schwangerschaften, sondern stören als Spurenstoff im Wasser auch die Sexualentwicklung von Fischen.



Zu den Arzneien mit herausragendem Risikopotenzial im Wasserkreislauf gehören Antibiotika, Wirkstoffe also, die sich zur gezielten Bekämpfung von Bakterien eignen. Vor allem durch unsachgemäßen Gebrauch sind weltweit inzwischen viele Mikroorganismen entstanden, die gegen einen oder mehrere Wirkstoffe resistent sind. In welchem Umfang gelangen Antibiotika mit dem Abwasser in die Umwelt, und inwieweit fördern sie dort die Bildung resistenter Keime? Dieser Frage gingen RiSKWa-Forscher ebenso nach wie jener nach konkreten Gesundheitsrisiken durch Mikroben – und nach Möglichkeiten, diese zu kontrollieren.

### Krankheitserreger

Der zweite Schwerpunkt von RiSKWa widmete sich Krankheitserregern. Viele von ihnen, beispielsweise coliforme Bakterien, wie sie in unseren Ausscheidungen enthalten sind, haben wir seit 100 Jahren dank unserer Abwassersysteme und Trinkwassergewinnung gut im Griff. In ihrer gesamten Breite stehen Krankheitserreger aber erst seit relativ kurzer Zeit im Fokus der Hygienemediziner. Dazu zählen Bakterien wie Legionellen, die etwa in Trinkwasser-Hausinstallationen lauern, aggressive Stämme des Darmbakteriums *Escherichia coli* (etwa EHEC) oder Noroviren. »Die klassischen Nachweisverfahren und Indikatorsysteme zur Überprüfung der Wasserqualität versagen bei vielen dieser Erreger«, sagt Exner, der in den Ausbrüchen der Legionellose wie 2010 in Ulm, 2013 in Warstein oder 2016 in Bremen ein Warnsignal sieht.

Eine Warnung, die angekommen ist. Beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat man die aufkommende Gefährdung frühzeitig erkannt und mit der umfangreichen Förderung von RiSKWa reagiert – mit dem Ziel eines vorsorgenden Schutzes und einer nachhaltigen Bewirtschaftung unserer Wasserressourcen. RiSKWa ist dabei eine von mehreren Forschungsinitiativen des Förderschwerpunkts »Nachhaltiges Wassermanagement« (NaWaM). Was RiSKWa besonders macht, ist vor allem der zusätzliche Schwerpunkt auf der Kommunikation: Nicht nur werden die Ergebnisse allen Interessengruppen und der Öffentlichkeit vermittelt, sondern diese werden auch aktiv in die Entwicklung der Lösungsansätze einbezogen.

Denn wissenschaftlich zu erforschen, welche Gefahren von neuen Schadstoffen und Krankheitserregern im Wasserkreislauf drohen, ist in unserer Risikogesellschaft nur eine Seite der Medaille. Die andere Seite ist ein gesellschaftlicher Diskurs, der jeden Einzelnen angeht: Wie sauber ist sauber genug – etwa im Hinblick auf Trinkwasser oder Badeseen? Welche Kosten oder Verhaltensänderungen halten wir für hinnehmbar, um alte und neue Risiken für unser Wasser zu minimieren? Und wie gehen wir mit der

Tatsache um, dass auch die Wissenschaft nicht immer endgültige Antworten darauf geben kann, wie hoch ein Risiko überhaupt zu bewerten ist?

Fragen, die sich nicht allein mit wissenschaftlichen Fakten beantworten lassen, so wichtig diese als Entscheidungsgrundlage auch sind. Deshalb sind Öffentlichkeitsarbeit und kompetente Risikokommunikation ein wichtiges Element von RiSKWa, das sich wie ein roter Faden durch die zwölf Verbundprojekte zieht. Insbesondere geht es um die Frage, wie man in der Bevölkerung ein angemessenes Problembewusstsein schaffen kann, ohne dabei zu beschwichtigen oder zu übertreiben – gegebenenfalls auch mit konkreten Handlungsanweisungen.

Die Kernthemen der zwölf Verbundprojekte lassen sich trotz großer inhaltlicher Breite in die vier zentralen Bereiche eines jeden Risikomanagements einteilen: Erkennen – Bewerten – Handeln – Kommunizieren. Welche Fragen hat RiSKWa gestellt? Wie ging man sie an? Und welche Antworten lassen sich nach fünf Jahren intensiver Arbeit geben?

### Erkennen

Medikamentenrückstände und andere anthropogene Spurenstoffe im Wasserkreislauf sind erst seit einigen Jahren ein in der Öffentlichkeit breit diskutiertes Thema. Das hat zumindest zum Teil einen verblüffend einfachen Grund: Man konnte sie vorher schlicht nicht nachweisen. Zudem erkennt man jetzt den Einfluss gesellschaftlicher Veränderungsprozesse auf sie, etwa veränderter Verschreibungspraktiken und Einnahmengen infolge des demografischen und gesellschaftlichen Wandels. Moderne Analysemethoden wie Flüssigkeitschromatografie und hochauflösende Massenspektrometrie haben die Nachweisgrenzen für solche Spurenstoffe in den letzten 20 Jahren um mehrere Größenordnungen gesenkt. Umfangreiche Datenbanken wie »STOFF-IDENT«, die im Rahmen des RiSKWa-Verbundprojekts »RISK-IDENT« für gewässerrelevante Stoffe entwickelt wurden, erleichtern inzwischen auch die Identifizierung so genannter Non-Target-Verbindungen. Musste man früher gezielt nach bestimmten Stoffen suchen, so lassen sich Wasserproben heute auf ein breites Spektrum von Substanzen screenen. »STOFF-IDENT« beispielsweise enthält schon jetzt Referenzdaten für fast 10 000 Substanzen, darunter 1730 Humanarzneistoffe und deren Abbauprodukte.

Ähnlich sieht es beim Nachweis bakterieller Krankheitserreger im Trinkwasser aus. Dieser erfolgt seit mehr als 100 Jahren über das Kultivieren der Keime auf Agar-Nährböden – eine relativ langwierige Methode, die sich nur für eine begrenzte Zahl von Bakterien-spezies eignet. Um Größenordnungen empfindlicher und gleichzeitig das ganze Spektrum möglicher Krank-

heitserreger abdeckend ist die so genannte Polymerase-Kettenreaktion (PCR). Dank PCR lassen sich auch geringste Spuren des Erbmoleküls DNA in kürzester Zeit extrem stark vervielfältigen und problemlos analysieren. Die DNA-Spuren geben Auskunft über ihre Herkunft, seien es Bakterien, Viren oder Einzeller.

Die PCR, ein zu Beginn noch aufwändiges und teures Verfahren, hat als Schlüsselbiotechnologie in den zurückliegenden 20 Jahren eine rasante Entwicklung hingelegt – und wurde dabei immer kostengünstiger. Molekularbiologische Nachweisverfahren auf ihrer Grundlage zu entwickeln, zu optimieren und zu validieren, war Teil des RiSKWa-Verbundprojekts »PRiMaT«. Mittelfristig, so das Ergebnis, haben solche Methoden das Zeug, die standardisierten Kulturverfahren zum Erfassen mikrobiologischer Gefährdungen zu ergänzen. In »RiMaTH« zeigte sich unter anderem, dass der Nachweis von Legionellen mit Hilfe der PCR innerhalb von Stunden möglich ist, während etablierte Kulturverfahren Tage benötigen.

### Bewerten

So erfreulich die um ein Vielfaches gestiegene Nachweisempfindlichkeit für Spurenstoffe und Krankheitserreger im gesamten Wasserkreislauf auch ist, sie stellt uns vor neue Herausforderungen. Denn Belastungen, die vorher weit unter der Nachweisgrenze lagen, werden nun sichtbar. Ob sie auch relevant sind, ist eine andere Frage. Im Trinkwasser lassen sich vereinzelt Rückstände des Schmerzmittels Ibuprofen in Konzentrationen von

einigen Nanogramm pro Liter nachweisen. Um die übliche und unbedenkliche Einmaldosis von 400 Milligramm aufzunehmen, müsste man mehrere Millionen Liter Leitungswasser trinken.

Allerdings darf man über solchen Zahlenspielen nicht vergessen, dass sich manche stabile Spurenstoffe erst in der Umwelt zu deutlich erhöhten und möglicherweise problematischen Konzentrationen anreichern. Wieder andere Substanzen haben bereits in erstaunlich kleinen Mengen merkbare Effekte, etwa Hormon-Analoga wie Bisphenol A oder einige Medikamente, die den Fortpflanzungserfolg von Fischen und anderen Wasserbewohnern beeinflussen.

Die verbesserten Nachweisverfahren stellen Behörden, die mit dem Schutz von Wasserressourcen betraut sind, vor neue Herausforderungen. Denn die Zahl der von Verordnungen nicht geregelten Spurenstoffe nimmt stetig zu. Hier setzt das vom Umweltbundesamt koordinierte RiSKWa-Verbundprojekt »TOX-BOX« an. Die darin mitwirkenden Forscher haben eine einheitliche Teststrategie erarbeitet, um auch neu festgestellte, nicht reglementierte und bezüglich ihres Gefährdungspotenzials noch nicht ausreichend erforschte Spurenstoffe rasch bewerten zu können. Dazu gehören schnelle Untersuchungsverfahren, die erste Rückschlüsse auf mögliche schädliche Wirkungen erlauben, etwa auf die Embryonalentwicklung, das Nervensystem oder die Fruchtbarkeit. »Das Ergebnis sind so genannte Gesundheitliche Orientierungswerte (GOW), dank derer wir auch ohne gesetzlich verbindliche Standards Maßnahmenempfehlungen geben können«, sagt Projektkoordinatorin Tamara Grummt vom Umweltbundesamt. Zudem erlaube das GOW-Konzept, neue Substanzen nach ihrem Gefährdungspotential zu priorisieren, und gebe damit Orientierung für das weitere Vorgehen.

Auch für den Schwerpunkt »Neue Krankheitserreger« konnten RiSKWa-Forscher innovative Bewertungsstrategien erarbeiten. Das Verbundprojekt »Sichere Ruhr« hat ergeben, dass sich Hygienrisiken durch Krankheitserreger mit der Methode der so genannten quantitativen mikrobiologischen Risikobewertung (QMRA) objektiv erfassen lassen. Die Verbundprojekte »ANTI-Resist«, »RiskAGuA« und »TransRisk« wiederum ergaben, dass das Risiko, welches von in die Umwelt entlassenen antibiotikaresistenten Bakterien ausgeht, derzeit noch kaum abschätzbar ist.

### Handeln

Neue Spurenstoffe und Krankheitserreger zu identifizieren und ihr Gefährdungspotential schnell abzuschätzen, ist das eine. Andererseits bringt es nur dann etwas, wenn sich daraus praktische Maßnahmen zur Risikoreduktion ableiten lassen. Vorsorge ist bekanntlich

Eine Diskussionsveranstaltung mit interessierten Bürgern zum Baden in der Ruhr (Verbundprojekt »Sichere Ruhr«).



besser als Nachsorge. Deshalb fokussierte sich RiSKWa zu einem darauf, den Eintrag von Spurenstoffen und Krankheitserregern in den Wasserkreislauf einzudämmen, und zum anderen darauf, solche Verunreinigungen, sofern bereits ins Abwasser gelangt, daraus zu entfernen.

Dabei fanden die Forscher in fünf Jahren neue Ansätze, wie sich die bereits sehr hohe Reinigungsleistung der kommunalen Abwasserbehandlung noch erhöhen lässt. Vor allem die Aufbereitung des Abwassers mit Aktivkohle (allein oder in Kombination mit Ozon), und zwar in einer vierten Reinigungsstufe in Kläranlagen, erwies sich als geeignetes Mittel, die Belastung weiter zu reduzieren. Ozon, ein aus drei Sauerstoffatomen bestehendes Molekül, ist ein aggressives Oxidationsmittel, das sowohl Mikroorganismen abtöten als auch stabile organische Spurenstoffe aufbrechen kann. Die dabei entstehenden Molekülbruchstücke, die zum Teil selbst wieder unerwünschte Wirkungen entfalten, lassen sich mit Hilfe von Aktivkohle entfernen, einem Naturprodukt, das dank einer immens großen inneren Oberfläche ein hervorragendes Adsorptionsmittel ist.

Die Forscher im Verbundprojekt »SAUBER+« haben die Wirksamkeit dieser Ansätze auch für Einrichtungen des Gesundheitswesens demonstriert, beispielsweise für Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen. Ihre Untersuchungen machten auch deutlich, dass solche Einrichtungen bereits heute nur noch in Einzelfällen mehr Spurenstoffe beziehungsweise Krankheitserreger in Kläranlagen entlassen als durchschnittliche Privathaushalte. Das Ergebnis ist nicht weiter verwunderlich, werden doch zusehends Therapie und Medikation in den häuslichen Bereich verlagert.

Dass die Reinigungsmethoden in der Praxis funktionieren, haben die Teilnehmer des Verbundprojekts »SchussenAktivplus« belegt: In einer Kläranlage an der Schussen, einem Bodenseezufluss, reduzierte die Ozon-Aktivkohle-Behandlung des Kläranlagenablaufs die Konzentrationen von Spurenstoffen um den Faktor 10 und die Keimzahlen sogar um den Faktor 100 bis 1000. Das so behandelte Wasser hatte in Bezug auf die Keimbelastung Badequalität, was sich deutlich positiv auf die flussabwärts lebenden Wasserorganismen auswirkte. Die dafür nötige vierte Abwasserreinigungsstufe verursacht zusätzliche Kosten, die sich laut den beteiligten Wissenschaftlern auf schätzungsweise rund einen Euro pro Monat und Einwohner belaufen.

Es muss allerdings nicht immer eine Ozon-Aktivkohle-Behandlung sein – manchmal können schon relativ einfache Maßnahmen sehr dabei helfen, den Eintrag von Spurenstoffen und Krankheitserregern zu reduzieren. Das demonstrierten Forscher im Verbundprojekt »AGRO« an einer Trinkwasserquelle im Karst der Schwäbischen Alb: Hier half es bereits, Regenüberlauf-

becken und Kanalsysteme im Einzugsgebiet der Quelle zu sanieren und auszubauen, um die Belastungen des Quellwassers deutlich zu verringern.

Unterm Strich gilt: Schon die etablierten Verfahren helfen, Spurenstoffe und Krankheitserreger erheblich zu reduzieren. Welche zusätzlichen Maßnahmen sinnvoll sind, muss man im Einzelfall vor Ort entscheiden und gegen die entstehenden Kosten abwägen. Eine zusätzliche vierte Reinigungsstufe empfiehlt sich vor allem dort, wo der Abwasseranteil eines Gewässers hoch ist und wo dieses als Badegewässer oder zur Gewinnung von Trinkwasser genutzt wird.

## Kommunizieren

Erkennen, Bewerten, Handeln: So lauten die ersten drei Gebote im Umgang mit Risiken. Doch die Sicherheit unseres Trinkwassers und der Schutz des gesamten Wasserkreislaufs ist nicht nur ein Problem für Spezialisten. Das Thema geht uns alle an. Einerseits, weil wir sauberes Wasser zum Leben brauchen. Andererseits, weil jeder als Konsument von Trinkwasser und

**Mit diesem Pilot-Schnellfilter in der Oberflächenwasser-Aufbereitungsanlage Tegel testeten die Forscher neue Wasserreinigungsverfahren (Verbundprojekt »ASKURIS«).**



Produzent von Abwasser zur Reinhaltung der Ressource Wasser beitragen kann. Am Bewusstsein hierfür mangelt es jedoch: Für viele Menschen kommt sauberes Wasser einfach aus dem Hahn.

Aus diesem Grund legte das RiSKWa-Konsortium von Anfang an großen Wert darauf, seine Inhalte und Ergebnisse der breiten Öffentlichkeit zu vermitteln und die Menschen zur aktiven Mitarbeit an der Sicherung der Ressource Wasser zu motivieren. So haben Forscher der Universität Bayreuth im Projekt »PRiMaT« untersucht, welches Vorwissen und welche Einstellungen Schüler wie Studenten zum Thema Wasserversorgung haben. Ebenso haben sie geprüft, wie effektiv einschlägige didaktische Methoden sind. Ein praktisches Resultat davon ist ein über die PRiMaT-Webseite zugängliches Portal für Lehrer, das zahlreiche Informationen und Lehreinheiten für Schüler der 5. bis 12. Jahrgangsstufe anbietet.

Im Verbundprojekt »Sichere Ruhr« wiederum wurden Anwohner des einstmals extrem verschmutzten Flusses zu ihren Einstellungen befragt. In mehreren Workshops entwickelten RiSKWa-Forscher gemeinsam mit den Bürgern verschiedene Zukunftsszenarien für die Ruhr als Badegewässer, die inzwischen ökologisch weitgehend wiederhergestellt ist. Diese Szenarien werden in die Planung der kommenden Jahre eingehen.

Praktische Hilfe beim Gewässerschutz im Alltag gibt das Internetportal [www.arzneimittelentsorgung.de](http://www.arzneimittelentsorgung.de). Hier kann sich jeder von uns anhand einer interaktiven Deutschlandkarte darüber informieren, welche Möglichkeiten es gibt, alte Medikamente in der jeweiligen Stadt oder dem Landkreis sicher zu entsorgen. Bisher landet ein beträchtlicher Teil nicht verbrauchter Arzneien in der Toilette – eine unnötige Belastung, die sich durch individuelles Handeln eindämmen lässt.

### Fünf Jahre Forschung – und der Ausblick

Unsere Wasserressourcen sind vielfältigen Gefahren ausgesetzt. Manche Probleme, etwa die Überdüngung von Gewässern, werden schon seit Längerem bearbeitet, andere hingegen werfen neue Herausforderungen auf, etwa Spurenstoffe, Krankheitserreger und antibiotikaresistente Bakterien. Diese Entwicklung verstärkt sich in unserer alternden Gesellschaft, aber auch infolge des Klimawandels. Was ist zu tun, um die hohe Qualität unserer Wasserressourcen auch morgen zu gewährleisten und das große Vertrauen der Menschen in die Wasserqualität auch künftig zu rechtfertigen? Die BMBF-Fördermaßnahme RiSKWa liefert mit ihrer anwendungsorientierten Forschung wichtige Antworten darauf.

Dank moderner und schneller Methoden, um Schadstoffe und ihre Wirkungen ebenso wie Krankheitserre-



Besucher sehen sich einen Quelltopf an, in den Wasser aus dem Bodensee strömt (Verbundprojekt »PRiMaT«).

ger im Wasserkreislauf nachzuweisen, können wir die Risiken für Mensch und Umwelt jetzt besser und genauer bewerten. Die Ergebnisse von RiSKWa zeigen zudem innovative Möglichkeiten auf, wie sich ein vorsorgender Schutz unserer Wasserressourcen technisch und organisatorisch umsetzen lässt. Diese Fortschritte müssen nun Eingang in die wasserwirtschaftliche Praxis und die zugehörigen Rahmenbedingungen finden.

Auch für neue Schadstoffe und Krankheitserreger gilt: Vorsorge (also die Vermeidung ihres Eintrags) ist im Zweifel besser als Nachsorge (ihre Entfernung aus dem Wasserkreislauf). Weil sich problematische Einträge aber gerade bei Medikamentenrückständen nicht immer vermeiden lassen, wird auf Dauer nur eine Kombination beider Ansätze erfolgreich sein, zeigen sich die RiSKWa-Fachleute überzeugt. So kann die Einführung einer vierten Reinigungsstufe in Kläranlagen der beste Weg sein, um Gewässer mit hohem Abwasseranteil oder intensiver Nutzung zur Trinkwassergewinnung zu schützen.

Fünf Jahre interdisziplinäre RiSKWa-Forschung geben uns nicht nur das nötige Wissen an die Hand, um die Risiken neuer Schadstoffe und Krankheitserreger im Wasserkreislauf besser zu erkennen und zu bewerten, sondern auch die Werkzeuge, um ihnen zu begegnen. Nun kommt es darauf an, die Ergebnisse mittels fundierter und transparenter Kommunikation allen Beteiligten zu vermitteln – seien es Akteure der Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung, Politiker oder »einfache« Bürger. Denn nur wer die Risiken versteht, kann am Ende auch entschieden handeln. 

# Arzneimittel-Entsorgung richtig gemacht!

**Wohin entsorge ich Arzneimittel?**

Auf dieser Webseite erfahren Sie, wie Sie Arzneimittel umweltbewusst entsorgen können. Wählen Sie Ihren Landkreis oder Ihre kreisfreie Stadt über die Deutschlandkarte oder das Menü auf der rechten Seite und finden Sie heraus, welche Entsorgungsmöglichkeiten für Sie empfohlen werden.

In Deutschland gibt es keine einheitliche Regelung zur Entsorgung von Medikamenten und Arzneimitteln. Um unsere Umwelt und Gewässer nachhaltig zu schützen und die Wirksamkeit von Medikamenten zu erhalten, ist die sachgemäße Entsorgung von Arzneimitteln jedoch sehr wichtig.

Der Umwelt und uns zuliebe - Arzneimittel niemals über Toilette oder Spüle entsorgen.

**Bundesland-Auswahl**

- Sachsen-Anhalt
- Schleswig-Holstein
- Thüringen

Anzeigen

Impressum

Die Website [www.arzneimittelentsorgung.de](http://www.arzneimittelentsorgung.de) informiert Bürgerinnen und Bürger darüber, wie Arzneimittelreste in ihren Städten und Landkreisen richtig entsorgt werden.

## RiSKWa – Eine Übersicht

**Förderer:** Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

**Förderumfang:** ca. 31 Millionen Euro

**Laufzeit:** 2011 bis 2016

**Ziele:** Vorsorgender Schutz unserer Wasserressourcen und unserer Gesundheit. Neue Risiken für das Trinkwasser und den gesamten Wasserkreislauf identifizieren und ihr Gefahrenpotenzial bewerten. Neue Technologien und Strategien ausloten, um ihnen zu begegnen. Ergebnisse in die Praxis vermitteln und Bürger begeistern, selbst zu Lösungen beizutragen.

**Partner:** 90 Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft und Behörden

**Kontakt:** [www.bmbf.riskwa.de](http://www.bmbf.riskwa.de)

Die folgenden zwölf Verbundprojekte wurden in RiSKWa gefördert:

**AGRO:** Risikomanagement von Spurenstoffen und Krankheitserregern in ländlichen Karsteinzugsgebieten

**ANTI-Resist:** Untersuchung zu Einträgen von Antibiotika und der Bildung von Antibiotikaresistenz im urbanen Abwasser sowie Entwicklung geeigneter Strategien, Monitoring- und Frühwarnsysteme am Beispiel Dresden

**ASKURIS:** Anthropogene Spurenstoffe und Krankheitserreger im urbanen Wasserkreislauf – Bewertung, Barrieren und Risikokommunikation

**PRiMaT:** Präventives Risikomanagement in der Trinkwasserversorgung

**RISK-IDENT:** Bewertung bislang nicht identifizierter anthropogener Spurenstoffe sowie Entwicklung von Handlungsstrategien zum Risikomanagement im aquatischen System

**RiskAGuA:** Risiken durch Abwässer aus der intensiven Tierhaltung für Grund- und Oberflächenwasser in Agrarräumen

**RiMaTH:** Risikomanagement in der Trinkwasser-Hausinstallation – Schnellnachweismethoden für bakterielle Kontaminationen und Begleitung von Sanierungsvorhaben

**SAUBER+:** Innovative Konzepte und Technologien für die separate Behandlung von Abwasser aus Einrichtungen des Gesundheitswesens

**SchussenAktivplus:** Reduktion von Mikroverunreinigungen und Keimen durch weitergehende Behandlung von Kläranlagenabläufen und Mischwasser aus Regenüberlaufbecken verschiedener Größe zur weiteren Verbesserung der Gewässerqualität des Bodenseezuflusses Schussen

**Sichere Ruhr:** Badegewässer und Trinkwasser für das Ruhrgebiet

**TOX-BOX:** Gefährdungsbasiertes Risikomanagement für anthropogene Spurenstoffe zur Sicherung der Trinkwasserversorgung

**TransRisk:** Charakterisierung, Kommunikation und Minimierung von Risiken durch neue Schadstoffe und Krankheitserreger im Wasserkreislauf

## Spektrum CP

Ein Geschäftsbereich der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

**Leitung:** Ann-Kristin Ebert

**Anschrift:**  
Spektrum CP  
Postfach 10 48 40  
69038 Heidelberg

**Hausanschrift:**  
Tiergartenstr. 15–17  
69121 Heidelberg

**Tel.:** 06221 9126-12  
**Fax:** 06221 9126-5612

[www.spektrum-cp.com](http://www.spektrum-cp.com)

**Redaktion:** Georg Rüschemeyer,  
Dr. Frank Schubert

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Claus Schäfer

**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.),  
Sigrid Spies, Katharina Werle

**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.),  
Anke Lingg, Gabriela Rabe

**Redaktionsassistent:** Hanna Hillert

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck

**Erscheinungstermin:**  
Spektrum der Wissenschaft 8/2016

**Auftraggeber und verantwortlich für den Inhalt:**

Dr. Thomas Track  
DECHEMA e. V.  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

**Ansprechpartner für die BMBF-Fördermaßnahme RiSKWa:**  
Dr. Helmut Löwe  
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat 724 – Ressourcen und Nachhaltigkeit  
53170 Bonn

Dr. Verena Höckele  
Projekträger Karlsruhe,  
Karlsruher Institut für Technologie  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen: 02WRS1271