

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

LICHT-WUNDER
Wissenschaftler
durchleuchten
undurchsichtige
Materialien

AUGUST 2015

ASTEROIDEN

Schutz vor
kosmischen Bomben

MEDIZIN

Impfen
mit Zucker

ARCHÄOLOGIE

Die Kosmologie
der Hethiter

Künstliches Bewusstsein

Forscher konstruieren den ersten
Roboter mit Persönlichkeit



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



Jetzt als 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.



**JETZT
ABONNIEREN!**





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Was wird aus diesem »Baby«?

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern fällt es oft schwer, ihre Forschung in einfache Worte zu fassen. Die meisten haben nie wirklich gelernt, zu veranschaulichen, was sie tun und herausgefunden haben. Andere gar hegen prinzipielle Vorbehalte: Sprachliche Vereinfachung bedeute automatisch inhaltliche Verfälschung, daher solle man als Experte lieber die Finger davon lassen. Doch diese Ansicht ist falsch. Ganz abgesehen von der Frage, ob Forscher nicht verpflichtet sind, der Gesellschaft zu erklären, was sie machen – sprachliche Veranschaulichung ist nicht erst Teil der Popularisierung; sie dient bereits dem Erkenntnisprozess. Denn schon in der internen Fachkommunikation prägen Wissenschaftler Spachbilder und versichern sich so gegenseitig neuer Einsichten.

Freilich: Vergleiche haben immer nur eine begrenzte Aussagekraft; einen bestimmten Aspekt eines Phänomens beschreiben sie gut, andere hingegen nicht. Ein Schwarzes Loch etwa ist kein Loch, sondern im Gegenteil ultradichte Materie. Dennoch erfüllt der metaphorische Ausdruck seine Funktion. So wie alle Dinge in ein Loch im Boden fallen, wenn man sie darüberhält und loslässt, stürzt alle Materie ab einer gewissen Grenze auf ebenjene raumzeitliche Singularität zu, deren Existenz die allgemeine Relativitätstheorie vor 100 Jahren voraussagte. Und da nichts dem Einflussbereich eines solchen Objekts entrinnt, dieses also keine Signale aussendet oder reflektiert, ist es – bildlich gesprochen – »schwarz«.

Einen provokanten Vergleich formulierte der Chemienobelpreisträger Eric Betzig gerade auf der Lindauer Nobelpreisträgertagung: »Jede neue Technologie ist wie ein Baby. Du hoffst, dass es einmal Präsident wird oder Krebs heilt, und bist am Ende froh, wenn es nicht im Knast landet.« Eine bemerkenswerte Aussage für einen Forscher, der im vergangenen Jahr für die Erfindung einer neuen Technologie, der supraauflösenden Fluoreszenzmikroskopie, mit dem höchsten Wissenschaftspreis geehrt wurde (Spektrum der Wissenschaft 12/2014, S.10; Betzigs Lindauer Vortrag im Netz: www.mediatheque.lindau-nobel.org).

Auf keinen Beitrag in diesem Heft passt Betzigs Bonmot besser als auf unsere Titelgeschichte des Neurowissenschaftlers Tony Prescott von der University of Sheffield über die Entwicklung eines Roboters mit künstlichem Bewusstsein (S. 80). Die Frage, ob dieses »Baby« namens iCub oder einer seiner Nachfolger einmal die kühnen Träume ihrer Erfinder zum Wohl der Menschen verwirklichen wird oder aber »im Knast« endet, ist für mich eine der spannendsten des 21. Jahrhunderts.

Eine anregende Lektüre wünscht
Ihr

Carl Mönzel

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Molekularbiologe **Stefano Piccolo** und sein Team haben gezeigt, wie schon mechanische Kräfte eine Zelle grundlegend verändern können: sie etwa dazu bringen, sich wie eine Tumorzelle zu verhalten (S. 20).



Max-Planck-Direktor **Peter H. Seeberger** forscht an vorderster Front über neue Impfansätze mit »Design«-Zuckern. Kürzlich hat ihn die Fachzeitschrift »Medicine Maker« als einzigen Deutschen in die Top Ten der weltweit führenden Medikamentenentwickler gewählt (S. 28).



Wie es den Hethitern gelang, die kosmologischen Vorstellungen anderer Völker mit den eigenen zu verbinden, beschreibt ab S. 62 die Altorientalistin **Susanne Görke** von der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

3 Editorial

6 Spektrogramm

Junger Mars war wohl ein Schneepianet • »Spracherwerb« bei Flughunden • Wie Wüstenameisen kühl bleiben • Gravitation stört Quantenzustände • Lymphgefäße in der Hirnhaut • Zentren der Elefantenswilderei

9 Bild des Monats

Medusas Haupt in Großaufnahme

10 Forschung aktuell

Zellevolution

Bindeglied zu komplexen Zellen entdeckt

Das Rätsel von Rapa Nui

Untergang der Osterinsel-Kultur in Simulationen

Anstoß der Klimaschaukel

Klimakopplung ist um 200 Jahre verschoben

Bienensterben

Studien erhärten Bedenken zu gebräuchlichen Spritz- und Beizmitteln – vor allem für Wildbienen

SPRINGER'S EINWÜRFE
Zu schön, um wahr zu sein
Vorurteile abbauen zu wollen, verführt zu wissenschaftlichem Betrug

20



JOHN UELAND

..... BIOLOGIE & MEDIZIN

20 Die Mechanik der Zelle

Ein molekularer Schalter übersetzt Druck- und Zugwirkungen in intrazelluläre Signale.

Stefano Piccolo

SERIE »DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT« TEIL 4

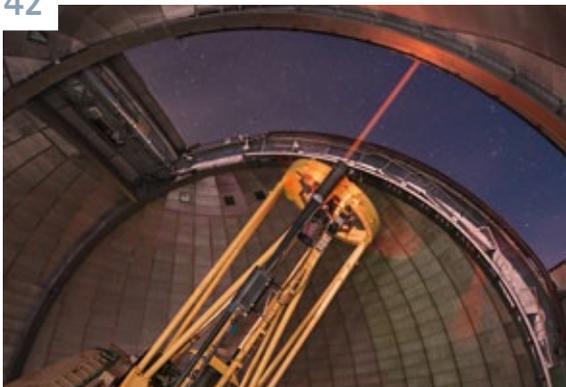
▶ 28 Impfen mit Zucker

Die neuen Vakzine erweisen sich als sehr viel versprechend.

Peter H. Seeberger

..... PHYSIK & ASTRONOMIE

42



LAURIE HATCH

▶ 36 Blick hinter den Vorhang

Forscher schauen ins Innere von Materialien, die für Licht eigentlich undurchlässig sind.

Zeeya Merali

42 Klare Sicht für Astronomen

Mit himmelwärts geschickten Lasern hat Claire Max Teleskopen zu neuer Präzision verholfen.

Ann Finkbeiner

SCHLICHTING!

48 Schönheit im Auge des Betrachters

Ein schillernder optischer Effekt entsteht erst im Sehorgan.

H. Joachim Schlichting

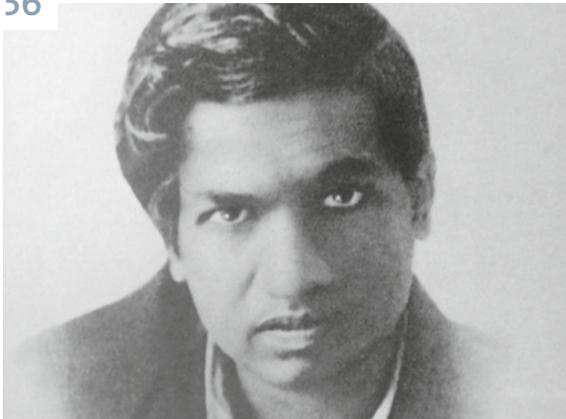
▶ 50 Asteroiden im Visier

Wie begegnen Forscher der Gefahr aus dem All?

Felicita Mokler

..... MENSCH & KULTUR

56



PUBLIC DOMAIN

56 Das Orakel

Srinivasa Ramanujans berühmte Notizbücher haben ein neues Geheimnis preisgegeben.

Ariel Bleicher

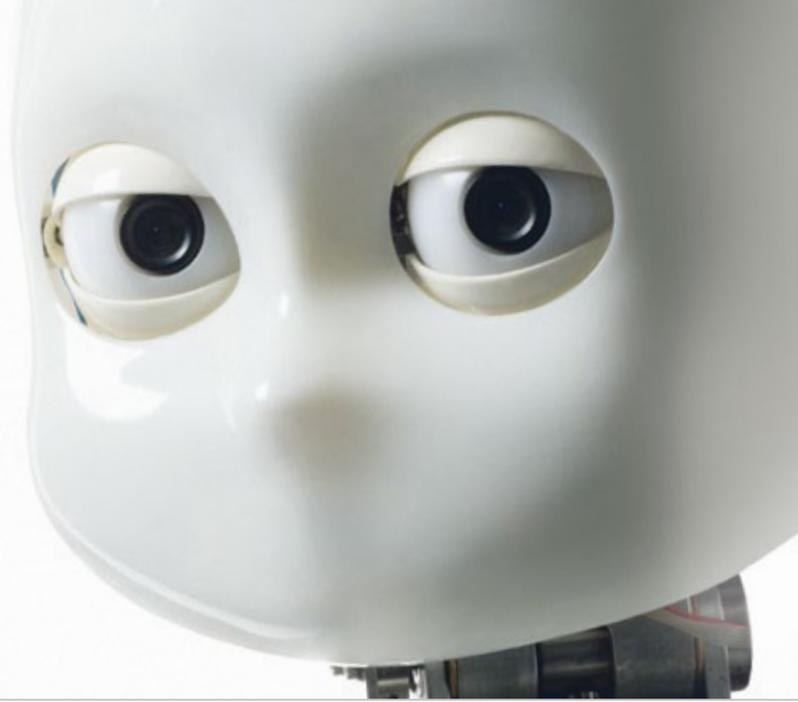
► TITELTHEMA

KÜNSTLICHES BEWUSSTSEIN

80 Roboter mit Ego

Tony Prescott

Die Ich-Vorstellung eines Menschen, der sich seiner selbst gewahr ist, setzt sich aus einer Reihe von Einzelaspekten zusammen. Wissenschaftler haben damit begonnen, diese Komponenten Stück für Stück in einen Roboter einzubauen. Am Ende hoffen sie so ein künstliches Bewusstsein zu schaffen.



62



CHINA CRISIS / CC-BY-SA-2.5 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/2.5/LEGALCODE)

► 62 **Das Weltbild der Hethiter**

In alten Kulturen galt das Jenseits mal als Schreckensort, mal als Spiegelbild der Erde. Die Kosmologie der Hethiter jedoch vereinte beide Ansichten.

Susanne Görke

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

67 **Das Wahnsinnsamt, Sandhäufchen und apollonische Dreiecke**

Am Rand des Chaos bilden sich überraschende Strukturen.

Christoph Pöppe

72



DOMINIC BRACCO II

ERDE & UMWELT

72 **Fischfarmen für eine Milliarde Chinesen**

Als größter Fischproduzent und -konsument der Welt betreibt und entwickelt China Süß- und Salzwasserfarmen für Fische und Meeresfrüchte in nie da gewesenem Ausmaß. Dabei haben die Forscher auch die ökologische Nachhaltigkeit im Blick.

Erik Vance

86 **Rezensionen**

Ute Schneider, Stefan Brakensiek (Hg.): Gerhard Mercator • Bernhard Kegel: Die Herrscher der Welt • Ingo Klöckl: Chemie der Farbstoffe • Mark Levinson: Particle Fever u. a.

93 **Wissenschaft im Rückblick**

Vom schwebenden Sumpf zum Weltraumspaziergang

94 **Leserbriefe/Impressum**

96 **Futur III**

Beth Cato: Mein Freund, der Gehweg

98 **Vorschau**

Titelmotiv: Massimo Brega, The Lighthouse, mit frdl. Gen. des Istituto Italiano di Tecnologia (ITT); Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

PLANETOLOGIE

Junger Mars war wohl ein Schneeplanet

Unser roter Nachbarplanet war in seiner Frühzeit wahrscheinlich größtenteils von Schnee bedeckt. Darauf deutet ein Vergleich zweier aktueller Klimamodelle hin. Ein Team um den Planetologen Robin Wordsworth von der Harvard University hat die frühe Entwicklung des Planeten in Simulationen nachgestellt und dabei einerseits warme und feuchte Bedingungen zu Grunde gelegt, andererseits ein Szenario der Schnee- und Eisbedeckung. Das letzte liefert nach Ansicht der Forscher nicht nur die plausibleren Ergebnisse, sondern erklärt auch jene Geländeformationen besser, die Milliarden Jahre alt und offensichtlich durch Wasser entstanden sind.

In der Zeit zwischen drei und vier Milliarden Jahren vor heute, am Übergang zwischen Noachischer und Hesperischer Periode, bildeten sich die meisten großen Stromtäler und andere Spuren fließenden Wassers, die den Planeten prägen. Welches Klima zu dieser Zeit auf dem Mars herrschte, ist unbekannt. Viele Wissenschaftler hatten spekuliert, der Planet könne warm und feucht gewesen sein – und womöglich belebt. Es liegt jedoch näher, ein kaltes Klima anzunehmen, denn die Sonnenstrahlung transportierte damals etwa ein Viertel weniger Energie zum Mars als heute. Vermutlich, so ergaben die Simulationen der For-



Kasei Valles ist das größte Stromtal auf dem Mars.

ESA / DLR / FU BERLIN, GERHARD NEUKIRCH

scher, lag die durchschnittliche Oberflächentemperatur des Planeten bei minus 50 Grad Celsius. Unter solchen Bedingungen wäre den Modellen zufolge viel Schnee in die äquatorialen Hochlandregionen gelangt, wo die Dichte der Stromtäler am höchsten ist. Wahrscheinlich schmolz er vorübergehend bei Vulkanausbrüchen oder Meteoriteneinschlägen, was zu gewaltigen Fluten führte und die Kanäle auswusch. Offen bleibt, ob unter diesen Bedingungen Leben entstanden sein könnte.

J. Geophys. Res. 10.1002/2015JE004787, 2015



Mehr Aktualität!

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

BIOLOGIE

Sprachschule für Flughunde

Junge Flughunde erwerben ihre »Sprache« ähnlich wie Menschenkinder, berichten Zoologen der Universität Tel Aviv. Die Forscher um Yossi Yovel haben nachgewiesen, dass junge Nilflughunde (*Rousettus aegyptiacus*) ihre Kommunikationslaute von erwachsenen Tieren lernen. Das macht sie zu Modellorganismen für die Fähigkeit des »stimmlichen Lernens«, die bis jetzt nur bei Menschen und Singvögeln untersucht ist.

Nilflughunde leben in großen Gruppen zusammen. Die Forscher trennten trächtige Weibchen von der Kolonie und hielten sie über die Geburt hinaus in isolierten Boxen. Da die Weibchen dort still bleiben, wuchsen ihre Jungtiere ohne Laute von Artgenossen heran. Auch nach der Entwöhnung hielten Yovel und sein Team die Jungtiere weiter in Isolation. Sie zeich-

neten deren Laute auf und verglichen sie mit den Äußerungen von Flughunden, die in der Kolonie aufwuchsen.

Beide Gruppen gaben anfangs dasselbe hochfrequente »Babybrabbeln« von sich, doch ihre Lautäußerungen entwickelten sich nach einiger Zeit auseinander. Die Rufe der in der Gruppe aufgezogenen Jungtiere passten sich denen der adulten Flughunde an, die isolierten Tiere hingegen hinkten in der Entwicklung hinterher. Erst als die Forscher beide Gruppen zusammenbrachten, holten Letztere ihren Rückstand auf. Weitere Versuche zeigten: Allein lebende Jungtiere, die aufgezeichnete Laute von Artgenossen vorgespielt bekommen, ahmen diese nach. Das Kommunikationsrepertoire von Nilflughunden ist somit nicht genetisch festgelegt, sondern erlernt.

Science Advances, 1:e1500019, 2015

Silberrücken kühlt Sahara-Ameisen

Afrikanische Silberrückenameisen (*Cataglyphis bombycina*) bewegen sich in glühender Mittagshitze über den Wüstensand. Das erstaunt, denn der Sand heizt sich auf mehr als 70 Grad Celsius auf – Temperaturen, bei denen die Insektenproteine denaturieren müssten. Offenbar halten die rund ein Zentimeter großen Tiere ihren Körper deutlich kühler.

Wie das gelingt, haben nun Physiker, Ingenieure und Materialwissenschaftler um Rüdiger Wehner von der Universität Zürich herausgefunden. Die Ameisen sind von silbrig schimmernden Härchen bedeckt, die einen dreieckigen Querschnitt haben und wenige Mikrometer stark sind. Die sichtbaren und die nahinfraroten Anteile des Sonnenlichts erfahren dort eine so genannte Mie-Streuung: Da ihre Wellenlängen in etwa dem Durchmesser der Härchen entsprechen, werden sie von diesen in alle Richtungen gestreut, also überwiegend vom Ameisenkörper weg. Zudem tritt auf der Unterseite der durchscheinenden Härchen eine Totalreflexion auf, die schräg von oben kommendes Sonnenlicht nahezu vollständig in die Umgebung zurückwirft. Das führt dazu, dass die Tiere zwei Drittel der einfallenden Sonnenstrahlung reflektieren, was ihnen ein quecksilberähnliches Aussehen verleiht.

Ein weiterer Mechanismus kommt hinzu: Im mittleren Infrarotbereich reflektieren die Härchen eher schlecht, dafür ist jedoch ihr Emissionsvermögen dort hoch. Infolgedessen geben die Tiere ihre Körperwärme besonders effektiv

ab – was ebenfalls zur Kühlung beiträgt. Mit all diesen Anpassungen ausgestattet erhitzen sich die Tiere im heißen Wüstensand auf nicht mehr als rund 50 Grad Celsius. Vielleicht, hoffen die Wissenschaftler, lassen sich mit diesen Erkenntnissen passive Kühlungen für technische Geräte konstruieren.

Science Express 10.1126/science.aab3564, 2015



NORMAN TAN SHI E, NANFANG YU, COLUMBIA ENGINEERING

Mit ihrer Körperbehaarung reflektieren Wüstenameisen das Sonnenlicht überaus effektiv.

Gravitation stört Quantenzustände

Das Schwerfeld der Erde kann quantenmechanische Experimente stören, indem es Superpositionen zusammenbrechen lässt. Zu diesem Schluss kommen Physiker um Igor Pikovski von der Universität Wien.

Die Superposition ist eine besonders unanschauliche Konsequenz aus den Gesetzen der Quantenphysik. Sie besagt, dass sich ein Teilchen gleichzeitig in verschiedenen Zuständen befinden kann, etwa indem es sich zur selben Zeit an verschiedenen Orten aufhält. Diese Überlagerung geht verloren, wenn das Teilchen mit seiner Umgebung wechselwirkt. Es »entscheidet« sich dann für einen Zustand, was Physiker als Dekohärenz bezeichnen.

Pikovski und seine Kollegen schreiben, dass laut allgemeiner Relativitätstheorie bereits im Schwerfeld der Erde Effekte auftreten, die zur Dekohärenz führen können. Sie meinen damit insbesondere die Zeitdilatation – die Verlangsamung von Uhren im Schwerfeld, die sich mit Präzisionsinstrumenten in verschiedenen Höhen über der Erdoberfläche sogar messen lässt. Befinde sich ein Teilchen in Superposition, so die Physiker, und sei einer der beteiligten Zustände etwas »höher« lokalisiert als die anderen, verlaufe für ihn die Zeit anders. Das könne bereits dazu führen, dass die Überlagerung zusammenbricht. Vorstellbar sei das etwa bei einem Molekül, das sich in

einer Superposition verschiedener Schwingungszustände befindet.

Daher könnten quantenmechanische Experimente selbst in einem perfekt isolierten Versuchsaufbau misslingen, schreiben die Forscher – einfach, weil das System auf dem Erdboden steht. Konkret rechnen Pikovski und sein Team nach, dass das bei Quantenobjekten ab einer Größe von einigen Mikrometern bedeutsam werden könnte. Diese Dimensionen sind allerdings weit entfernt von jenen, mit denen Wissenschaftler heute im Labor arbeiten, so dass sich der Effekt real noch nicht bemerkbar macht.

Nature Physics 10.1038/NPHYS3366, 2015

ANATOMIE

Lymphgefäße in der Hirnhaut

Anders als früher angenommen ist auch das Gehirn an das Lymphsystem angeschlossen. Sehr feine Lymphkanäle durchziehen die äußere der drei Hirnhäute, die Dura mater, haben jetzt Wissenschaftler um Jonathan Kipnis von der University of Virginia (USA) entdeckt. Sie dienen offenbar dazu, Zerebrospinalflüssigkeit zu leiten, die mit der Hirngewebsflüssigkeit in Verbindung steht, und Immunzellen in Richtung Gehirn zu befördern.

Die Forscher entdeckten die Lymphgefäße, als sie Mäuse mit einem speziellen Präparationsverfahren untersuchten, bei dem die Hirnhäute am Schädel befestigt und dann im Ganzen freigelegt werden. Übliche Präparationsmethoden zerstören die Kanäle; wohl deshalb blieben diese bislang unentdeckt. Sie verlaufen parallel zu Venen in der Dura mater.

Die Anfärbung der Gefäße mit verschiedenen Markierungssubstanzen belegt, dass es sich um typische Ausläu-

fer des Lymphsystems handelt, wie sie auch im restlichen Körper vorkommen. Lange hatte man angenommen, Immunzellen würden nur bei bestimmten Krankheiten ins Zentralnervensystem (ZNS) vordringen, ansonsten aber wäre dieses gegen den Rest des Körpers abgeschirmt und verfüge über ein eigenes Abwehrsystem. Mit dieser These ließ sich allerdings schwer erklären, warum Immunzellen auch im ZNS von gesunden Menschen zu finden sind. Sie könnten über das Lymphsystem dorthin gelangen, meinen Kipnis und seine Kollegen mit Blick auf ihre Entdeckung.

Möglicherweise lassen sich in diesem Licht neurodegenerative Erkrankungen besser verstehen, an denen das Immunsystem beteiligt ist. Beeinträchtigungen der Lymphgefäße könnten beispielsweise zur Entstehung von Alzheimer und Sklerose beitragen, spekulieren die Forscher.

Nature 10.1038/nature14432, 2015

ÖKOLOGIE

Zentren der Elefantenwilderei

Forscher haben afrikanisches Elfenbein, das zwischen 1996 und 2014 konfisziert wurde, mit Hilfe genetischer Methoden untersucht. Das überraschende Ergebnis: Rund 90 Prozent des seit 2006 beschlagnahmten weißen Golds stammen aus nur zwei Regionen in Afrika. Dieser Befund kann helfen, die zunehmende Wilderei einzudämmen. Im zurückliegenden Jahrzehnt

sind die zentralafrikanischen Waldelefantenpopulationen durch illegale Jagd um rund 60 Prozent eingebrochen.

Zoologe Samuel Wasser von der University of Washington in Seattle (USA) und sein Team analysierten Elfenbein aus 28 beschlagnahmten Ladungen. Sie ordneten die Stoßzähne taxonomisch zu und ermittelten deren geografische Herkunft. Hierfür untersuchten sie ge-

netisches Material aus 1350 Dungproben frei lebender Elefanten in 29 afrikanischen Ländern. Daraus erstellten sie eine Karte mit der geografischen Verteilung bestimmter genetischer Merkmale. Diese verglichen sie mit den DNA-Sequenzen des konfiszierten Elfenbeins.

Die Stoßzähne von Afrikanischen Elefanten (*Loxodonta africana*) kamen fast ausschließlich aus Südosttansania und dem benachbarten Nordmosambik. Solche von Waldelefanten (*Loxodonta cyclotis*) stammten zum größten Teil aus einem Gebiet, das Teile Gambuns, Kameruns, der Republik Kongo und der Zentralafrikanischen Republik umfasst. Die Wilderer hatten meist versucht, das Elfenbein über andere Länder auszusmuggeln, was die Herkunftsbestimmung zunächst erschwerte. Eine der größten beschlagnahmten Ladungen enthielt Elfenbein aus beiden Regionen, was auf einen überregional organisierten Schwarzhandel hindeutet.

Science 10.1126/science.aaa2457, 2015

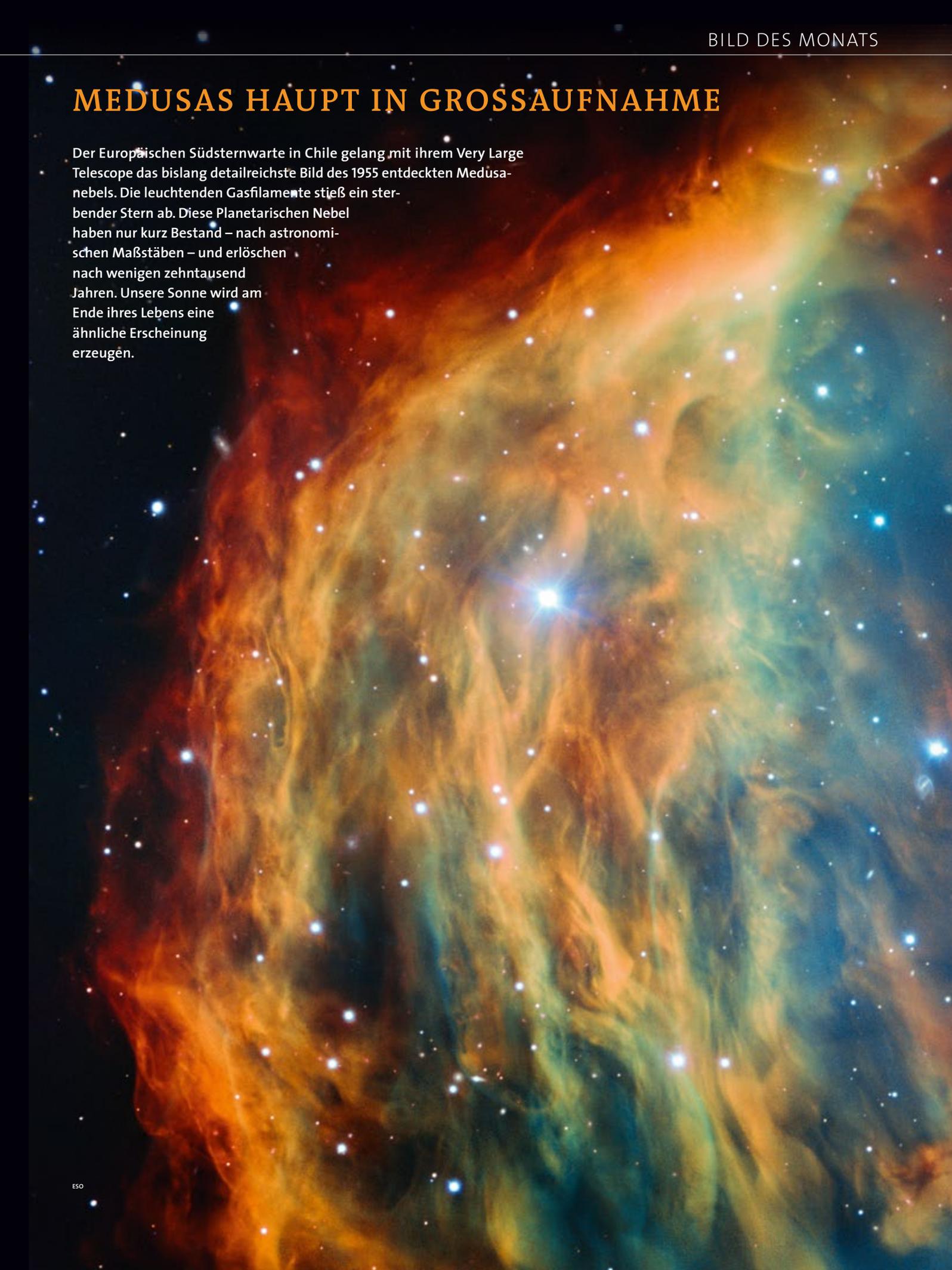


SHIVANI BHALLA / SAVE THE ELEPHANTS

Wilderer in Afrika gehen weiterhin brutal gegen Elefanten vor.

MEDUSAS HAUPT IN GROSSAUFNAHME

Der Europäischen Südsternwarte in Chile gelang mit ihrem Very Large Telescope das bislang detailreichste Bild des 1955 entdeckten Medusanebels. Die leuchtenden Gasfilamente stieß ein sterbender Stern ab. Diese Planetarischen Nebel haben nur kurz Bestand – nach astronomischen Maßstäben – und erlöschen nach wenigen zehntausend Jahren. Unsere Sonne wird am Ende ihres Lebens eine ähnliche Erscheinung erzeugen.



MIKROBIOLOGIE

Entscheidendes Bindeglied in der Evolution des Lebens

In der Tiefsee entdeckte Lokiarchaeen zeigen erstaunliche Ähnlichkeiten zu komplexen Zellen. Sie geben neue Einblicke in die Evolution von Eukaryoten, zu denen auch wir Menschen zählen.

VON NICOLE PASCHEK

Bakterien, Archaeen und Eukaryoten – in diese drei Domänen teilt man traditionell das Leben auf der Erde ein. Eukaryoten sind Ein- und Vielzeller mit komplex aufgebauten Zellen. Fast alle mehrzelligen Organismen wie Pflanzen, Pilze und Tiere zählen dazu. Von den Prokaryoten – also Bakterien und Archaeen – unterscheiden sie sich durch ihren »echten« Zellkern und andere Zellorganellen wie die Mitochondrien, die »Kraftwerke der Zelle«. Im Gegensatz dazu sind die Prokaryoten relativ simpel gebaut und meist einzellig. Sie besitzen keine komplexen Organellen und keinen Zellkern, so dass ihr Genom frei in ihrem Inneren schwimmt.

Laut der so genannten Endosymbiontentheorie gingen eukaryotische Zellen aus einer Symbiose zwischen zwei Prokaryoten hervor. Im Lauf der Evolution nahm demnach eine Wirtszelle ein so genanntes Alphaproteobakterium auf, welches fortan in der Zelle als Mitochondrium weiterlebte. Das erklärt auch, wie so diese Zellorganellen ihr eigenes Genom, die mitochondriale DNA, besitzen.

Jedoch ist bisher noch nicht bekannt, wie jene Zelle aussah, die sich den Vor-

läufer des Mitochondriums einverleibte. Man vermutet, dass sie entweder ein gemeinsamer Vorfahre mit den Archaeen war oder dass jene Vorläuferzelle der Eukaryoten selbst zu den Archaeen gehörte. Um das zu klären, müssten Forscher Zwischenstufen finden, die den Übergang widerspiegeln.

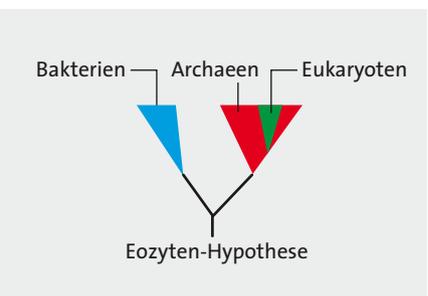
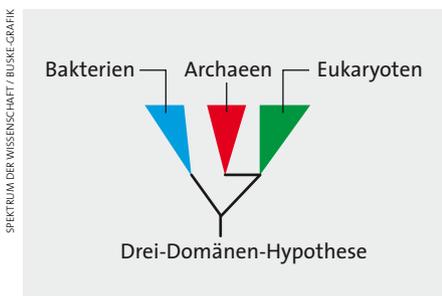
Überraschender Fund: Völlig neue Organismen in der Tiefsee

Solch eine Zwischenstufe entdeckte nun Thijs Ettema von der Universität Uppsala in Schweden zusammen mit seinen Kollegen der Universitäten Bergen (Norwegen), Uppsala und Wien (*Nature* 10.1038/nature14447, 2015). In einer Bodenprobe aus 3283 Meter Tiefe des mittelatlantischen Ozeans, zwischen Grönland und Norwegen, spürten sie völlig neue Archaeen-Arten auf. Ihr Name war schnell gefunden: Lokiarchaeen – nach der Fundstelle, 15 km nördlich von »Loki's Castle«, einer Gruppe hydrothermaler Schote. Dort strömt aus vier »schwarzen Rauchern« zirka 300 Grad heiße Flüssigkeit ins Meer, die aus Schwefelwasserstoff, Ammonium, Kohlenstoffdioxid und ver-

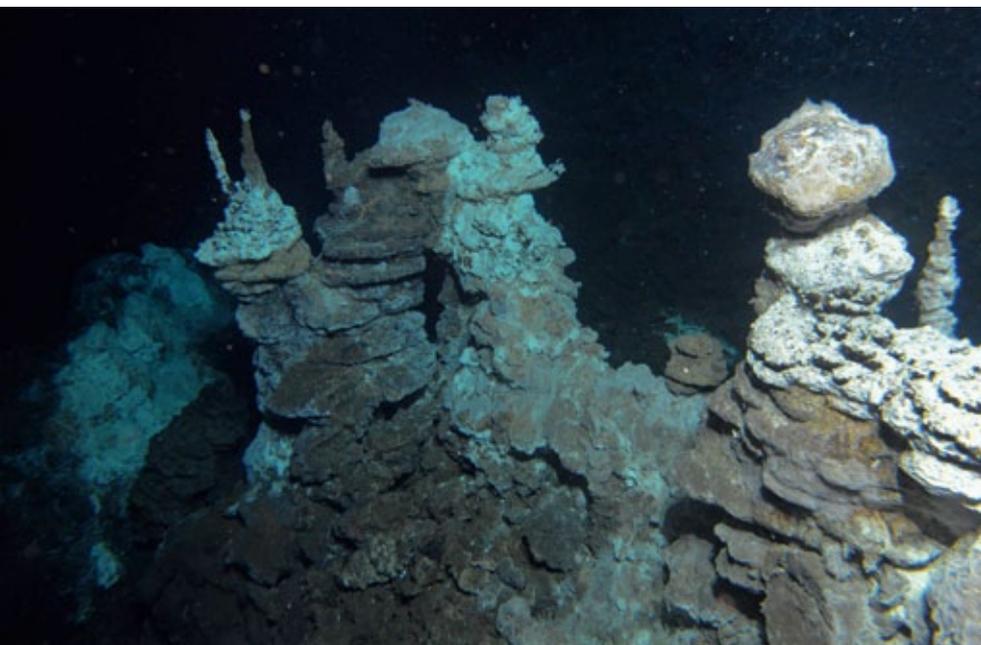
gleichsweise großen Mengen Methan besteht. Obwohl die vulkanische Aktivität von Loki's Castle den Entdeckungsort der Lokiarchaeen stark beeinflusst, herrscht an Letzterem eine Temperatur nahe dem Gefrierpunkt.

Die Wissenschaftler stießen auf die neuen Organismen, indem sie das in der Bodenprobe vorhandene »Metagenom« erfassten, also die gesamte darin enthaltene DNA sequenzierten. Dabei ergaben sich kurze DNA-Stücke, die sich in ihrer Sequenz überlappten und somit aus dem gleichen Organismus stammten, so genannte Contigs. Indem sie diese Contigs zusammenfügten, konnten sie das Lokiarchaeen-Genom rekonstruieren. Die Analyse ergab, dass Lokiarchaeen zu den so genannten TACK-Archaeen gehören (ein Überstamm der Archaea bestehend aus Thaumarchaeota, Aigarchaeota, Crenarchaeota und Korarchaeota). Man wusste bereits, dass Vertreter dieser Gruppe einige Gene für spezielle Proteine besitzen, die sonst nur in Eukaryoten vorkommen. Das Besondere an den Lokiarchaeen aber ist: Sie zeigen eine erstaunliche Vielfalt solcher Gene, zum Beispiel für aktinähnliche Proteine.

Aktine sind eukaryotische Strukturproteine, die Filamente des Zellskeletts bilden und essenziell für verschiedene zelluläre Prozesse sind: Muskelbewegung, Zellteilung, Stofftransport innerhalb der Zelle und Endozytose funktionieren nicht ohne sie. Bei letzterem Vorgang nimmt die Zelle etwas von außen auf, indem sie ihre Zellmembran nach innen stülpt. Schluckt sie feste Bestandteile oder sogar andere Zellen, nennt man diesen Vorgang auch Phagozytose. Die eukaryotische Vorläuferzelle



Nach der Drei-Domänen-Hypothese (links) gliedert sich das Leben in drei Bereiche: Bakterien, Archaeen und Eukaryoten. Einer anderen Auffassung zufolge – jetzt von neuen Daten gestützt – entstanden die Eukaryoten innerhalb der Archaeen (rechts).



R. B. PEDERSEN/CENTRE FOR GEOBIOLOGY (CGB), UNIVERSITY OF BERGEN

Der Fundort der Lokiarchaeen befindet sich nahe der hydrothermalen Kamine von »Loki's Castle« (Bild) in einer Meerestiefe von über 3000 Metern. Wie die neu entdeckten Mikroorganismen unter diesen Bedingungen überhaupt leben können, ist noch ungeklärt, da sie sich bisher nicht kultivieren ließen.

müsste hierzu fähig gewesen sein – andernfalls hätte sie das Alphaproteobakterium wohl nicht aufnehmen können, das zum Mitochondrium wurde.

Das Einverleiben fremden Materials birgt aber auch Risiken: Die eigene DNA könnte sich mit der fremden vermischen. Möglicherweise entstand der mit Membranen abgegrenzte Zellkern der Eukaryoten deswegen, weil so die Integrität des Wirtszell-Genoms bewahrt blieb. Dies könnte durch Membraneinstülpungen um die DNA herum geschehen sein.

Doch wie nah sind Lokiarchaeen tatsächlich mit den Eukaryoten verwandt? Um sie besser im Stammbaum des Lebens einordnen zu können, haben die Wissenschaftler ihre DNA mit der anderer Vertreter der postulierten Domänen verglichen. Demnach bilden die Lokiarchaeen eine monophyletische Gruppe mit den Eukaryoten. Das heißt, beide stammen von einer gemeinsamen Urform ab. Lokiarchaeen sind also nicht die Vorläufer von Eukaryoten, sondern eigene Organismen zwischen den relativ simplen Mikroben und den komplexen eukaryotischen Zellen.

Weiter unklar ist jedoch, ob Archaeen und Eukaryoten von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen oder ob die komplexen Zellen aus Archaeen hervorgingen. Im ersten Szenario, das die Forscher bis vor ein paar Jahren überwiegend annahmen, gäbe es drei Domänen im Stammbaum des Lebens, im zweiten nur zwei, denn Eukaryoten würden zum selben Ast wie Archaeen gehören (siehe Grafik). Die aktuelle Studie stützt die letztere, seit zwei Jahren zunehmend populäre Ansicht, beweist sie jedoch noch nicht endgültig.

Nichts als etwas Dreck

Alles, was die Forscher bisher über Lokiarchaeen wissen, stammt aus weniger als zehn Gramm Dreck vom Meeresboden. Und sie kennen lediglich Sequenzen ihrer DNA. Ettema versucht nun, auch die Organismen selbst zu kultivieren und zu untersuchen. Nur so ließe sich erkennen, wie komplex sie wirklich sind und ob ihre spektakulären Gene tatsächlich die gleichen Aufgaben erfüllen wie bei Eukaryoten.

Dass jene eukaryotenartigen Erbanlagen funktionslos sind, hält der Evo-

lutionsbiologe Andrew Roger von der kanadischen Dalhousie University für unwahrscheinlich: »Gene, die nicht exprimiert werden oder nicht funktional sind, bleiben nicht sehr lange im prokaryotischen Genom. Mutationen hätten sie sicherlich bereits aus dem Genom gelöscht.«

Die Forscher wissen auch nicht, wie Lokiarchaeen unter den schwierigen Bedingungen am Fundort überhaupt überleben. Neben Eiseskälte herrscht im Tiefseeboden auch chronischer Nährstoffmangel. »Auf Grund der extremen Limitierung von Nährstoffen ist das Leben in dieser Biosphäre sehr langsam«, erklärt Ettema. Er schätzt, dass sich Mikroorganismen im Tiefseeboden möglicherweise nur einmal alle zehn Jahre teilen. Lokiarchaeas langsame Art zu leben ist auch ein Grund, wieso es bisher nicht gelang, Kulturen von ihnen zu züchten.

In den Tiefen des Atlantiks sind die Forscher mit den Lokiarchaeen auf Zeugen der Entstehung von Eukaryoten gestoßen. Vermutlich gibt es noch weitere Archaeenarten zu entdecken, die Aufschluss über unser Verwandtschaftsverhältnis zu den einzelligen Prokaryoten geben könnten. »Ich denke, wir brauchen noch mehr Bindeglieder, um die phylogenetischen Analysen zu bestätigen«, so Roger. »Diese könnten uns auch dabei helfen, die Reihenfolge zu rekonstruieren, in der die größten genetischen und zellulären Innovationen auf dem Weg zu den Eukaryoten stattfanden.«

Die neue Studie lässt vermuten, dass die eukaryotische Vorläuferzelle viel komplexer war als bisher angenommen. Sie besaß höchstwahrscheinlich bereits dynamische aktinähnliche Filamente und weitere Proteine, die bis dato für eukaryotenspezifisch gehalten wurden. So haben die neuen Lokiarchaeen nicht nur ein neues Glied in den Stammbaum des Lebens eingefügt, sondern auch ein wenig Licht ins Dunkel des Ursprungs unserer eigenen Zellen gebracht.

Nicole Paschek ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

ÖKOLOGIE

Das Rätsel von Rapa Nui

Kollabierte die Kultur der Osterinsel infolge eines Raubbaus an der Natur oder auf Grund der von Europäern eingeschleppten Krankheiten? Simulationen lassen an beiden Thesen zweifeln – und kommen zu einer salomonischen Lösung.

VON GUNNAR BRANDT

Ein karges, baumloses Eiland, gerade mal 24 Kilometer lang und nicht einmal halb so breit, das etwa 3500 Kilometer von der Küste Chiles entfernt isoliert im Pazifik liegt und heutzutage von weniger als 6000 Menschen bewohnt ist – die Osterinsel bietet auf den ersten Blick wenig Aufregendes. Ohne die meterhohen steinernen »Moai« (siehe Bild), die im Landesinneren geschlagen und unter großem Aufwand überall an den Küsten aufgestellt wurden, wäre die von den Ureinwohnern Rapa Nui genannte Insel vielleicht niemals in den Fokus der Wissenschaft geraten. Doch diese Monumente sprechen für eine einst blühende Kultur, die wenig mit den Beschreibungen der europäischen Entdecker gemein hat, die am Ostersonntag 1722 dort an Land gingen.

Ein wichtiger Effekt der Bevölkerungsdichte war der verstärkte Holzeinschlag. Denn Kanus für die Jagd auf Meeressäuger, für Fischerei, Hausbau und eventuell auch für den Transport der Moai setzten das Fällen großer Palmen voraus

Tatsächlich verraten Pollen in Sedimentkernen: Als die nach heutigem Wissen aus Polynesien stammenden ersten Siedler um 1200 die Insel erreichten, gediehen dort fast überall Palmen, zumeist *Jubaea chilensis*, die Honigpalme. Der amerikanische Wissenschaftler Jared Diamond beschrieb daher 2005 in seinem Buch »Kollaps« sehr plakativ die These, die Ureinwohner hätten diese Ressource zu exzessiv ausgebeutet und so die Ökologie Rapa Nuis zerstört – mit verheerenden Folgen für sie selbst. Nicht nur trugen die Palmenkerne und der zuckerhaltige Saft des Stamms zur Ernährung bei, das Holz war zudem der

einzigste Werkstoff für Häuser und Kanus sowie gutes Brennmaterial. Indem die Menschen Wäldchen niederbrannten, gewannen und düngten sie auch Ackerflächen. Je mehr die Bevölkerung wuchs, desto stärker wurde die Ressource übernutzt. Die maximale Einwohnerzahl schätzte Diamond anhand der archäologischen und paläoökologischen Daten auf rund 15000. Die europäischen Seefahrer trafen deutlich weniger an: Ihre Aufzeichnungen sprechen von ein paar tausend bis zu wenigen hundert. Um 1680 sei die Insel fast vollständig entwaldet gewesen, beschleunigt durch Krieg und Kannibalismus hätte sich der »Ökozid« in nur wenigen Jahrzehnten vollzogen.

»Kollaps« kam auf die Bestsellerlisten, und das vermeintlich selbst verschuldete Schicksal der Rapanui avan-

gierte zum Menetekel eines rücksichtslosen Umgangs mit natürlichen Ressourcen. Allerdings gibt es keine Informationen, die direkte Rückschlüsse auf die Einwohnerzahl in der Zeit vor der Entdeckung zulassen. Zwar existieren etwa zwei Dutzend Holztafeln mit als Rongorongo bekannten Schriftzeichen, doch eine schlüssige Übersetzung und Deutung stehen noch aus.

Die archäologischen und pollenanalytischen Informationen lassen sich aber auch anders deuten. Sie bestätigen zwar die Berichte der Entdecker: 1722 war die Insel kaum noch bewaldet. Auch die als Genozid bezeichnete Gegenthese

geht daher von einer Waldübernutzung aus, doch sei der Rückgang der Palmen damals noch nicht abgeschlossen gewesen, da er weit langsamer verlief. Die Zahl der Einwohner betrug laut dem Archäologen Terry Hunt von der University of Hawaii etwa 4000 und blieb über die fünf Jahrhunderte zwischen der Besiedlung und der Ankunft der Europäer weitgehend stabil. Diese Anzahl hätte nach Hunts Schätzung langfristig auf der Insel überleben können, da sich die klimatischen Bedingungen in dieser Zeit nicht sonderlich verändert hätten. Der allmähliche Verlust des Waldes und insbesondere der Düngung durch Brandrodung sei zum Beispiel durch Untermengen kleiner Steine in die Ackerflächen kompensiert worden – eine Technik, bei der durch Verwitterung dem Boden Nährstoffe zugeführt werden. Was die Bevölkerung tatsächlich dezimiert hätte, seien von den Europäern eingeschleppte Infektionskrankheiten und der Menschenraub für den Sklavenhandel gewesen.

Von Gegnern der Ökozidtheorie wird immer wieder ein weiterer Akteur ins Spiel gebracht: die an Bord der polynesischen Kanus als Schlachttier mitgeführte Pazifische Ratte. Sie ernährt sich unter anderem von Palmennüssen, die dann nicht mehr keimen und neue Bäume hervorbringen können. Ohne natürliche Feinde, so die Forscher, konnten sich die Tiere rasant vermehren und hatten somit maßgeblichen Anteil am Verschwinden des Waldes. Leider lässt sich diese Theorie bislang nicht überprüfen und der Einfluss der Ratte nicht genau quantifizieren.

Anhand von ausgegrabenen Werkzeugen, Spuren von baulichen Strukturen, Nachweisen von Brandrodung,

sterblichen Überresten und anderem können Archäologen die Besiedlung lediglich qualitativ in ihrem zeitlichen Ablauf nachvollziehen. Welcher Erklärungsansatz des Status quo im Jahr 1722 die historische Wirklichkeit besser wiedergibt, haben Agostino Merico und ich daher mit einem mathematischen Modell überprüft, das die wichtigsten

Komponenten des Mensch-Umwelt-Systems und ihre Interaktionen für die Zeit zwischen 1200 und der Mitte des 19. Jahrhunderts berücksichtigt. Es besteht aus verknüpften Differenzialgleichungen, welche die zeitlichen Änderungen der Populationen von Menschen, Ratten und Palmen simulieren, indem sie Wachstum und Sterblichkeit

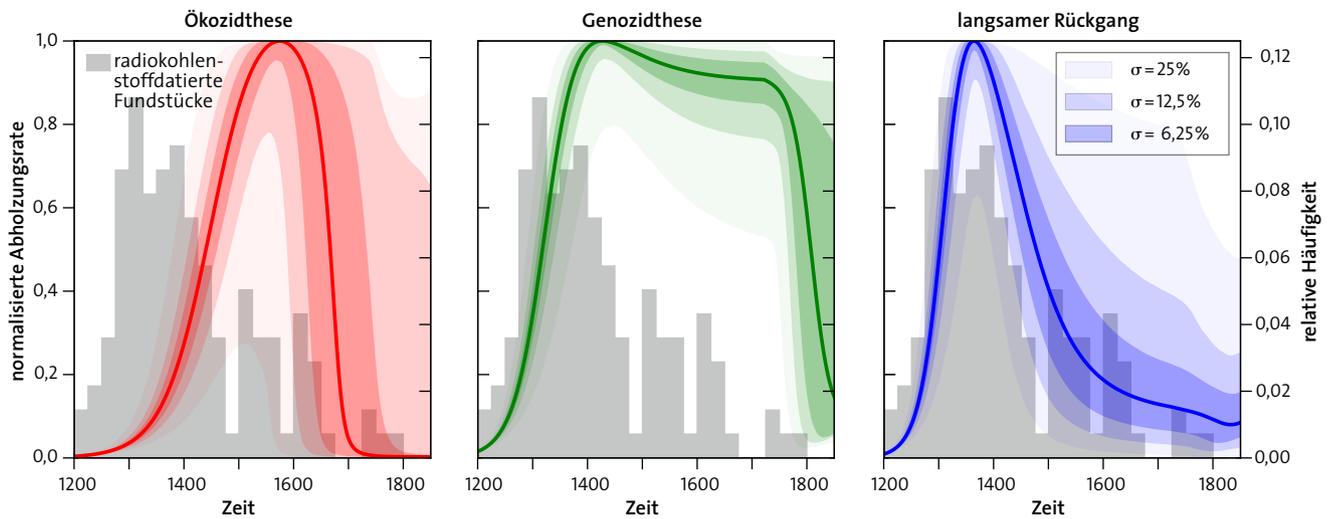
miteinander verrechnen; für die Menschen wurde die Mortalität auch durch ein »Seuchenmodul« berücksichtigt.

Für den Palmenwald nahmen wir eine eingeschränkte Regenerationsfähigkeit an – infolge der Ratten wie der Nutzung durch den Menschen. Ein wichtiger Effekt der zunehmenden Bevölkerungsdichte aber waren der verstärkte Holzeinschlag und die Brandrodung. Denn Kanus zur Jagd auf Meeressäuger, Fischerei, Hausbau und eventuell der Transport der Moai setzten das Fällen großer Palmen voraus. Und mit jedem niedergebrannten Wäldchen stand nicht

Gewaltige Steinskulpturen, die so genannten Moai, blicken weit über das Meer. Für Touristen sind sie der Grund, die Osterinsel zu besuchen; ansonsten ist die Landschaft karg und wenig anziehend. Dabei war das Eiland einst dicht mit Palmen bewachsen. Führte das Verschwinden des Waldes zum Untergang der Rapa-Nui-Kultur?



ISTOCK / SEBASTIEN COTE



BRANDT, C., MENDOZA, A.: THE SLOW DEMISE OF EASTER ISLAND: INSIGHTS FROM A MODELING INVESTIGATION OF HUMAN IMPACTS IN ECOLOGY AND EVOLUTIONS (JUNE 18, 2015). DOI: 10.3390/PL0030106003.FIG. 4. MIT FREI. GEB. VON GUNNAR BRANDT

Archäologische Holzfunde bieten eine verlässliche Möglichkeit, die in der Simulation berechnete Abholzungsrates zu überprüfen. Doch weder Ökozid- noch Genozidthese ergeben übereinstimmende Verläufe der Häufigkeitsverteilungen. Ein Szenario dazwischen gibt die Realität wohl am besten wieder (rechts).

nur Ackerland zur Verfügung, der Boden wurde auch durch die Asche gedüngt. Die simulierte Populationsgröße der Insulaner koppelte also zurück auf die der Palmen und vice versa.

Ökozid und Genozid konnten mit diesem Modellsystem bereits simuliert werden, wobei die wissenschaftliche Literatur die Parameterwerte lieferte. Für die Ausgangssituation verwendeten wir folgende: 50 Polynesier (Schätzungen der Archäologen gehen von weniger als 100 Individuen aus); 10 Ratten und 800000 Palmen (letzteres entspricht konservativen 50 Prozent des von den Kieler Ökologen Andreas Mieth und Hans-Rudolf Bork ermittelten Werts). Insgesamt zehn Parameter spiegeln die beiden Szenarien. Die wichtigsten betreffen die maximale Bevölkerungszahl, die Abhängigkeit des Bevölkerungswachstums von der Ressource Holz im Verhältnis zum Ackerbau und die der Abholzungsrates von der Größe des Waldes – im Szenario Ökozid wird er rücksichtsloser gefällt, im Alternativszenario zurückhaltender, je kleiner er wird. Indem wir die Werte nach einem statistischen Verfahren variierten, ermittelten wir ihren Einfluss auf die Simulationen.

Diese Berechnungen untermauerten wir per Abgleich mit einer Zusammen-

stellung von radiokohlenstoffdatierten Holzstücken und Palmnüssen. Diese gelten als Zeugnisse menschlicher Aktivität, seien sie Überreste einer Brandrodung, Brennmaterial aus Öfen oder Artefakte von religiösen Stätten. Unter der Annahme, dass die Fundhäufigkeit der Nutzungsintensität des Palmenwalds in einem bestimmten Zeitraum entspricht, haben wir die simulierten Abholzungsmuster mit der Häufigkeitsverteilung dieser Objekte verglichen.

Ein goldener Mittelweg

Erstaunlicherweise weichen diese sowohl für Ökozid und Genozid erheblich von der Verteilung der Beobachtungsdaten ab. Diese sprechen für eine intensive Holznutzung im 14. und 15. Jahrhundert, die sich in der Simulation weder mit einem Bevölkerungsmaximum von 15000 Menschen im 17. Jahrhundert (Ökozid) noch mit der konstanten Zahl von 4000 Bewohnern (Genozid) reproduzieren ließ.

Den archäologischen Daten näher kam eine Simulation, die von einer gut bewaldeten Insel in den ersten Jahrhunderten nach der Besiedlung ausging, maximal etwa 6000 Menschen im 14. Jahrhundert und eine durch allmähliche Ressourcenknappheit erzwunge-

ne Halbierung bis 1722. Dieses Ergebnis wird auch durch Pollenanalysen aus Sedimentkernen gestützt, die laut Núria Cañellas-Boltà von der Universidad de Barcelona einen deutlichen Palmenschwund vor 1500 aufzeigen. Ein langsamer Niedergang ist somit ein Kompromiss zwischen Ökozid und Genozid, der die Beobachtungsdaten schlüssig erklärt. Die durch Differenzialgleichungen modellierte Ausbreitung von Krankheiten ließ die Populationsgröße dann weiter einbrechen und bewirkte nochmals eine Halbierung. 1850 endet die Simulation mit etwa 1500 Bewohnern, wobei Verschleppung und Ermordung unberücksichtigt blieben. Zum weiteren Verlauf gibt es schriftliche Quellen. So wurden vermutlich 1400 Insulaner Anfang der 1860er Jahre als Zwangsarbeiter nach Peru deportiert. Wenig später drängte eine europäische Firma die Rapanui in einen kleinen Teil der Insel, um den großen Rest als Weideland zu nutzen. Erst in den 1970er Jahren erhielten die letzten verbliebenen Insulaner des zu Chile gehörenden Eilands mehr Rechte. Inzwischen leben dort wieder gut 6000 Menschen, zumeist vom Tourismus. Als Lehrbeispiel für den viel zitierten ökologischen Selbstmord taugt die Osterinsel also nicht, dunkle Schatten wirft ihr Schicksal gleichwohl.

Gunnar Brandt ist promovierter Systemökologe am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenökologie in Bremen.

Norden stößt Klimaschaukel an

Die Analyse eines Eisbohrkerns aus der Antarktis verrät Genaueres über die Kopplung des Klimas auf der Nord- und Südhalbkugel während der letzten Eiszeit. Demnach folgten jeweils rund 200 Jahre nach Temperatursprüngen auf Grönland markante Klimaänderungen in entgegengesetzter Richtung am Südpol.

VON TAS VAN OMMEN

Im Verlauf der letzten drei Jahrzehnte haben Eisbohrkerne aus Grönland und von der Antarktis faszinierende Wechselwirkungen zwischen dem Klima auf den beiden Erdhalbkugeln während des letzten Vereisungszyklus von vor etwa 110000 bis vor 12000 Jahren offenbart. Im Norden wurde die allgemein herrschende Kälte mehrfach von einer plötzlichen Erwärmung unterbrochen, gefolgt von einer leichten Abkühlung über einige Jahrhunderte, bevor die Temperatur wieder abrupt auf das eiszeitliche Niveau absackte. Diese sogenannten Dansgaard-Oeschger- oder

kurz DO-Ereignisse hatten Gegenstücke in der Antarktis, aber mit entgegengesetztem Verlauf: Während der Kältephasen in Grönland stieg am Südpol die Temperatur langsam an, erreichte ein Maximum und fiel während der warmen Episoden im Norden allmählich wieder ab.

In dem Maß, wie Forscher höher aufgelöste Daten von Eisbohrkernen aus der Antarktis gewannen und die Klimakurven für die beiden Hemisphären immer besser synchronisieren konnten, kristallisierte sich ein klarer zeitlicher Zusammenhang zwischen den

DO-Ereignissen und den Temperaturmaxima am Südpol heraus. Letztere werden allgemein als Antarktische Isotopenmaxima (AIM) bezeichnet, weil das Verhältnis der beiden Sauerstoffisotope O-18 zu O-16 im Eis als Klimaindikator dient. Dennoch gelang es nicht, die Vorgänge im Norden und Süden auf weniger als einige Jahrhunderte genau einander zuzuordnen. Damit blieb offen, ob DO-Ereignisse und AIMs exakt zusammenfielen oder zeitlich verzögert auftraten.

Die Analyse eines neuen Eisbohrkerns vom Kamm des Westantarkti-

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG

DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT

Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer der Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« und »Das Interview« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg

Spektrum-Workshop »Wissenschaftsjournalismus«; Preis: € 139,- pro Person; Sonderpreis für Abonnenten: € 129,-

Spektrum-Workshop »Das Interview«; Preis: € 179,- pro Person; Sonderpreis für Abonnenten: € 159,-

Weitere Informationen und Anmelde-möglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code per Smartphone scannen!

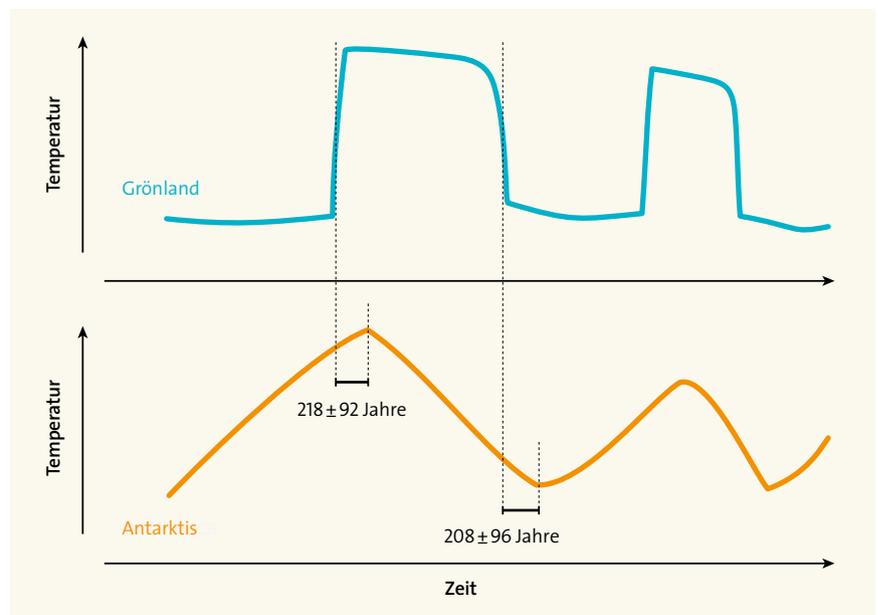


schen Eisschildes (WAIS) durch Christo Buizert von der Oregon State University in Corvallis und seine Kollegen hat diese Unsicherheit nun beseitigt und gezeigt, dass der Umschwung am Südpol stets etwa 200 Jahre nach dem auf Grönland erfolgte (*Nature* 520, S. 661–665, 2015). Das bestätigt die alte Vermutung, wonach der Norden jeweils den Anfang machte und die Trendwende im Süden nach sich zog. Der relativ lange zeitliche Abstand spricht außerdem dafür, dass die Kopplung zwischen den Vorgängen in beiden Hemisphären über das Meer und nicht über die Atmosphäre stattfand.

Eine entsprechende Hypothese, bekannt unter dem Begriff bipolare Klimaschaukel, stützt sich auf die Existenz einer großräumigen Wasserzirkulation im Atlantik: der Atlantic meridional overturning circulation (AMOC). Diese führt als eine Art Umwälzpumpe warmes Oberflächenwasser von der Südhalbkugel nach Norden. Weil es dabei allmählich abkühlt und sein Salzgehalt auf Grund von Verdunstung steigt, nimmt seine Dichte stetig zu, bis es am Rand der Arktis schließlich absinkt. Am Meeresgrund strömt es dann als nordatlantisches Tiefenwasser nach Süden zurück. Verstärkt sich diese Zirkulation, steigen die Temperaturen im Norden, während sie im Süden fallen. Das Gegenteil passiert, wenn sie sich abschwächt.

Der Südhalbkugel hinkte hinterher

Auf den ersten Blick scheint aus dieser Hypothese zu folgen, dass sich die Klimaverhältnisse in den beiden Erdhälften einfach gegenläufig zueinander verändern. Das trifft jedoch nicht zu. Der Grund ist, dass der riesige Südozean mit seiner enormen Wärmekapazität nur verzögert auf ein Temperatursignal aus dem Norden reagiert. Berücksichtigen Klimaforscher diesen Effekt, erhalten sie ein einfaches thermodynamisches Modell der bipolaren Klimaschaukel, das die Beobachtungen befriedigend erklärt. Aus diesem Modell geht hervor, dass die plötzliche Erwärmung bei DO-Ereignissen mit einer verstärkten Meereszirkulation zusammenhing, in deren



VAN DOMMEN, T.: NORTHERN PUSH FOR THE BIPOLEAR SEESAW. IN: NATURE 520, S. 660–661, 2015, FIG. 1

Während der letzten Eiszeit entwickelte sich das Klima in der Antarktis gegenläufig zu dem in Grönland. Dabei folgten die Umschwünge im Süden denen im Norden mit einer Verzögerung von ungefähr 200 Jahren.

Verlauf die Südhalbkugel Wärme an den Norden abgab und sich deshalb abkühlte. Kältephasen in Grönland entsprechen dagegen Perioden mit abgeschwächter AMOC, in denen sich im Gegenzug die Antarktis erwärmte.

Die Frage nach der eigentlichen Ursache der Klimaumschwünge – wieso verstärkte sich die atlantische Umwälzpumpe oder erlahmte? – bleibt jedoch unbeantwortet. Als mögliche Auslöser kommen Änderungen in der Süßwasserzufuhr, in der Meereisbedeckung oder in der Ausdehnung von Eisschelfen in Frage, die allesamt die Bildung von Tiefenwasser im Norden oder Süden beeinflussen können (siehe SdW 1/1996, S. 86). Auch wenn Buizert und seine Kollegen die Zeitverzögerung zwischen DO-Ereignis und AIM als klaren Hinweis darauf werten, dass eine vom Norden ausgehende AMOC-Verstärkung die Veränderungen im Süden auslöste, lassen sie Einwände von Kritikern gelten, wonach die Vorstellung eines Auslösers in einem System eng miteinander gekoppelter Oszillationen vielleicht nicht angemessen ist. Externe, bisher unbekannte Faktoren könnten dieses System als Ganzes an einen Punkt führen, an dem es kippt.

Nach der neuen Untersuchung des antarktischen Eisbohrkerns endete die langsame Erwärmung der Antarktis im Mittel 218 Jahre nach einem DO-Ereignis und begann wieder durchschnittlich 208 Jahre nach dem Rücksprung in den kalten Modus im Norden. Die Dauer dieser Verzögerung scheint aus zwei Gründen interessant. Zum einen ist die Zeitspanne viel länger, als bei einer Kopplung über Vorgänge in der Atmosphäre zu erwarten wäre, was auf den Ozean als Bindeglied hindeutet. Zum anderen stimmen beide Werte erstaunlich genau überein. Die Reaktion im Süden folgt also immer im selben zeitlichen Abstand auf die Veränderung im Norden, gleichgültig ob es sich um einen Temperatursprung nach oben oder unten handelt. Das liefert neue, wesentliche Randbedingungen für die Prozesse, die für den Transport von Wärme in den südlichen Ozean und über die Barriere des antarktischen Zirkumpolarstroms hinweg verantwortlich sind.

Die neuen Messwerte nähern sich der Grenze dessen, was Analysen von Eisbohrkernen hergeben. Dabei sind auch sie noch mit einer erheblichen Unsicherheit von fast 100 Jahren behaf-

tet. Das liegt vor allem an unvermeidlichen Ungenauigkeiten beim Datieren der im Eis eingeschlossenen Luft und beim Nachweis von Trendänderungen in der Isotopenzusammensetzung des gefrorenen Wassers; in beiden Fällen stört das mit klimatischen Vorgängen stets verbundene »Datenrauschen« bei den Messwerten. Um es zu unterdrücken, mittelten die Autoren der neuen Studie über mehrere AIMS. Aber so aufschlussreich die durchschnittliche Verzögerung ist, wäre doch auch interessant zu wissen, inwieweit der Abstand zwischen einzelnen DO-AIM-Paaren variiert.

Untersuchungen an weiteren antarktischen Eisbohrkernen lassen darauf schließen, dass der Temperaturverlauf regional schwankt. Außerdem sind während des Anstiegs in der Regel zwei Phasen zu erkennen, die auf Änderun-

gen in der Luftzirkulation unabhängig von Vorgängen auf Grönland hindeuten. Entsprechendes entdeckten Buizert und seine Kollegen auch in ihrem Eisbohrkern. Überdies maßen sie Änderungen im Salzgehalt während einer Erwärmungsphase – womöglich ein Hinweis auf die Zufuhr von Süßwasser und Rückkopplungsprozesse im Meer, die sich auf die bipolare Klimaschaukel auswirken könnten.

Entscheidende Klimakopplung

Die genaue Zeitverschiebung zwischen Klimaereignissen in beiden Erdhälften zu kennen, ist zweifellos ein großer Fortschritt. Aber das volle Ausmaß der in den antarktischen Eisbohrkernen dokumentierten Änderungen, etwa was den Kohlendioxidgehalt der Luft betrifft, dürfte noch lange nicht ausgelotet sein. Ein umfassendes Verständnis

der Klimakopplung zwischen den Hemisphären steht deshalb weiterhin aus. Dennoch sind die Befunde von Buizert und seinen Kollegen auch im Hinblick auf eine aktuelle Abschwächung der AMOC durch den anthropogenen Treibhauseffekt von Bedeutung, die schon länger erwartet wurde und sich neuerdings zu bestätigen scheint. Unsere Fähigkeit, die globalen Auswirkungen einer solchen Entwicklung vorherzusagen, hängt ganz entscheidend davon ab, wie gut wir die Wechselwirkung zwischen Nord- und Südhalbkugel des Planeten verstehen.

Tas van Ommen ist Paläoklimatologin an der University of Tasmania in Hobart.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 520, S. 630–631, 30. April 2015

UMWELT

Pflanzenschutzmittel kontra Bienen

Bestimmte Pestizide – die Neonikotinoide – galten vielen bisher als unbedenklich für die Bestäuber der behandelten Pflanzen. Doch neue Studien wecken Zweifel.

VON DANIEL CRESSEY

Das Bienensterben taucht immer wieder in den Schlagzeilen auf. Verschiedene Ursachen dafür konnten bereits ausgemacht werden: darunter die parasitische Varroamilbe und der Rückgang des Nahrungsangebots. Verdächtig wird des Weiteren die Substanzklasse der Neonikotinoide, die auf einen Rezeptor von Nervenzellen besonders bei Insekten wirken. Diese synthetischen Insektizide sind als Beizmittel zum Schutz von Saatgut beliebt; Pflanzen können sie außerdem aus dem Boden aufnehmen und in ihre Blätter einlagern. Sie gelangen allerdings ebenso in den Pollen und Nektar. Der Einsatz dreier dieser Mittel bei Saatgut – Clothianidin, Imidacloprid und Thiamethoxan – ist in der EU gegenwärtig untersagt, weil nicht ausgeschlossen erschien, dass sie nicht nur die Fraßfeinde und Blattsau-

ger schädigen, sondern auch die bestäubenden Insekten. In diesem Dezember soll das Verbot nochmals geprüft werden. Entsprechende Maßgaben gibt es in den USA nicht. Allerdings teilte die US Environmental Protection Agency am 2. April 2015 mit, neue Neonikotinoide würden wahrscheinlich nicht zugelassen werden, ehe keine weiteren Bienenstudien vorlägen.

Die bisherige Datenlage ist durchwachsen. Von den vorliegenden Untersuchungen, die einen Zusammenhang des Bienensterbens mit dem Einsatz solcher Substanzen gefunden hatten, gerieten viele in die Kritik. Es hieß zum Beispiel, die Forscher hätten mit unrealistisch hohen Dosierungen gearbeitet. Zudem meinten manche Befürworter des Einsatzes von Neonikotinoiden, Bienen würden lernen, behandelte Pflan-

zen zu meiden, falls diese Insektizide ihnen tatsächlich schadeten.

Eben diese Frage hat die Insektenneuroethologin Geraldine Wright von der Newcastle University zusammen mit Kollegen untersucht (*Nature* 521, S. 74–76, 2015). Die Forscher sperren Honigbienen (*Apis mellifera*) und Erdhummeln (*Bombus terrestris*) in Boxen. Dort konnten die Tiere wählen zwischen reinem Nektar und einem Nektar, der jeweils mit einem der drei oben genannten Insektizide verunreinigt war. Wie sich herausstellte, bevorzugten Bienen den sauberen süßen Saft nicht. Vielmehr zeigten sie sogar eine leichte Vorliebe für die mit Imidacloprid beziehungsweise mit Thiamethoxan versetzte Nahrung. Ob sie das im Freien auch täten, bleibt allerdings vorerst unklar.

Zu schön, um wahr zu sein

Der Abbau von Vorurteilen ist ein Anliegen, das zu Wunschdenken verführt – bis hin zu wissenschaftlichem Betrug.

Wer wünscht sich nicht, dass stereotype Meinungen, die bestimmte Bevölkerungsgruppen diskriminieren, möglichst schnell, einfach und gründlich abgebaut werden? Und oft heißt es, das beste Mittel gegen Vorurteile sei die persönliche Bekanntschaft mit Menschen, die Opfer solcher Stereotype sind. Kein Wunder, dass eine im renommierten Wissenschaftsmagazin »Science« publizierte Studie zu diesem Thema große Resonanz weit über die Fachwelt hinaus fand (*Science* 346, S. 1366–1369, 2014). Ihr zufolge baue schon ein viertelstündiges Gespräch an der Haustür homophobe Vorurteile ab, wenn es von bekennenden Homosexuellen initiiert werde. Auch ich habe sie an dieser Stelle gutgläubig zitiert – schien sie doch ein »Patentrezept gegen soziale Vorurteile« zu versprechen (*Spektrum der Wissenschaft* 2/2015, S. 18).

Wie sich leider unterdessen herausstellte, stützte der angehende Politologe Michael J. LaCour von der University of California in Los Angeles sein spektakuläres Resultat auf derart fragwürdige Daten, dass sein Doktorvater Donald P. Green von der Columbia University in New York sich von dem gemeinsamen Artikel distanzierte und ihn zurückzog. Nun diskutiert die Fachwelt, wie die akademischen Kontrollmechanismen in diesem Fall so eklatant versagen konnten (*Nature* 522, S. 14–15, 2015).

Anscheinend wird die professionell-skeptische Grundhaltung von Koautoren und Begutachtern manchmal regelrecht abgeschaltet, wenn eine Untersuchung aus dem Bereich der Politik- und Sozialwissenschaften eine besonders plausible und obendrein moralisch genehme Aussage trifft. Für diese Hypothese spricht der krasse Fall des niederländischen Sozialpsychologen Diederik A. Stapel. Er publizierte im Lauf einer glänzenden akademischen Karriere mehr als 100 Fachartikel, die – wie sich 2011 herausstellte – größtenteils auf manipulierten oder frei erfundenen Daten basierten. In einem – inzwischen natürlich zurückgezogenen – »Science«-Artikel hatte Stapel noch 2011 behauptet, er habe empirisch bewiesen, dass Müll auf den Straßen und andere Anzeichen von Unordnung Vorurteile gegen Minderheiten verstärkten. In einer anderen Arbeit von 2011 gab er an, der bloße Gedanke an das Essen von Fleisch verstärke aggressive und asoziale Haltungen.

Wie schön! Anstatt mühsam in Medien und Schulen gegen Vorurteile anzukämpfen, könnte man einfach die Müllabfuhr verbessern, einen fleischlosen »Veggeday« propagieren – oder, wie ich auf LaCour Bezug nehmend vorschlug, ein Schwätzchen an der Haustür einlegen!

Warum manipulierte LaCour seine Daten? Wie konnte Stapels Karriere einen derart abgründigen Verlauf nehmen? Vermutlich stellten beide fest, dass die meisten sozialwissenschaftlichen Untersuchungen außerhalb der Fachwelt kaum Resonanz finden – es sei denn, das Fazit gibt eine gute Schlagzeile her. Vermutlich hatte Stapel, wie jetzt LaCour, anfangs nur methodisch getrickst, damit ein erwünschtes Ergebnis vom Typ »persönlicher Kontakt baut Vorurteile ab« schön deutlich herauskam. Doch während LaCour gleich am Beginn seiner Laufbahn aufflog, weil ein konkurrierendes Team fand, seine Daten seien »zu schön, um wahr zu sein«, blieben Stapels Manipulationen so lange unentdeckt, dass er mit der Zeit dazu überging, zu einer willkürlich vorgefertigten Aussage völlig hemmungslos die passenden Daten zu erfinden.

Im Fall LaCour lautet die gute Nachricht: Nur ausnahmsweise lässt sich eine wissenschaftliche Karriere auf Schönheitsoperationen an den Daten gründen. Denn in der Regel fällt Betrug im Kollegenkreis schnell auf. Es wäre allerdings wünschenswert, wenn auch die Begutachter der Publikationen bei solchen Themen besonders kritisch prüfen würden.



Michael Springer

Zusätzlich zeichnete das Forscherteam auf, wie die Geschmackssinneszellen der Bienen auf Neonicotinoide in unterschiedlicher Konzentration ansprechen. Bei diesen Tests reagierten die Zellen bei allen Konzentrationen gleich. Demnach können Bienen diese Pestizide offenbar gar nicht schmecken. Die beobachtete leichte Vorliebe für damit angereicherten Nektar müsste somit einen anderen Grund haben. Eine mögliche Erklärung könnten andere Arbeiten liefern, denen zufolge Neonicotinoide im Bienenhirn Rezeptoren aktivieren, die bei Lernen und Gedächtnis mitwirken.

Eine weitere Studie führten Ökologen um Maj Rundlöf an der Universität Lund durch – und zwar im Freiland (*Nature* 521, S. 77–80, 2015). Sie untersuchten Honigbienen sowie verschiedene Wildbienen, darunter Hummeln, auf Rapsfeldern in verschiedenen Gegenden Südschwedens. Das Saatgut von acht der Äcker war mit Clothianidin gebeizt worden, das von acht weiteren in der Hinsicht unbehandelt geblieben.

Sind Wildbienen, darunter auch Hummeln, stärker gefährdet?

Für die Honigbienen fanden die Forscher keine Unterscheide bezüglich der beiden Feldersorten – wohl aber für die Wildbienen. Bei behandeltem Saatgut registrierten sie auf gleicher Fläche lediglich etwa halb so viele Hummeln und andere wilde Bienen wie bei unbehandeltem Raps. Es gab weniger Nester von solitären Bienen, und die Hummelkolonien entwickelten sich schlechter. Rundlöf vermutet, dass Honigbienen mit ihren riesigen Staaten Verluste von sammelnden Arbeiterinnen besser und länger ausgleichen können. Diesen Befund hält die Forscherin deswegen für alarmierend, weil Honigbienen als Modellorganismus für Toxizitätstests von Pestiziden genommen werden. Wenn diese Art nun aber gar nicht repräsentativ für Bienen allgemein sei, erkläre sich vielleicht, warum dermaßen viele Untersuchungen keine negativen Auswirkungen der eingesetzten Insektengifte feststellen konnten, während andere das Gegenteil aufgezeigt hatten.



FOTODIA/HELDY MARIEN

Eine Biene beim Sammeln von Blütenpollen. Gebräuchliche Insektenpestizide in ihren Nahrungspflanzen kann sie nach neuen Studien nicht schmecken.

Dass Honigbienen gegen Neonicotinoide widerstandsfähiger sind als Wildbienen, vermutet auch der Bienenforscher Dave Goulson von der University of Sussex im englischen Brighton. Er hält Rundlöfs Arbeit für die bisher beste Freilandstudie auf dem Gebiet. Zahlreiche Fehler früherer solcher Untersuchungen hätten diese Wissenschaftler vermieden, wie eine mögliche Kontamination der Kontrollgruppe mit solchen Giften. Jeder vernünftige Mensch müsse einfach sehen, dass diese Untersuchung eine handfeste Wirkung der Insektizide auf Bienen aufzeigt.

Derzeit spitzt sich der Streit darüber zu, ob diese Pestizide wirklich Schäden anrichten. Im Frühjahr 2015 hatte Goulson eine Arbeit publiziert, bei der er die Daten einer Studie des britischen Amts für Nahrungs- und Umweltforschung von 2013 nochmals analysierte. Deren Autoren waren zu dem Ergebnis gekommen, dass neonicotinoide Pestizide Bienen nicht beeinträchtigen (siehe go.nature.com/w9jlti). Goulsons Analyse ergab das Gegenteil (*PeerJ* 3, e854, 2015). Ebenfalls im Frühjahr 2015 erschien eine Studie US-amerikani-

scher Forscher, derzufolge die Beeinträchtigung von Honigbienen vernachlässigbar ist, wenn sie Pflanzen von mit Imidacloprid gebeizten Samen aufsuchen (*PLoS ONE* 10, e0126043, 2015). Zu ähnlichen Ergebnissen kam 2014 eine kanadische Untersuchung zu Clothianidin bei Raps (*PeerJ* 2, e652, 2015).

Christopher Connolly von der britischen University of Dundee erforscht als Neurowissenschaftler sowohl Menschen als auch Bienen. Von ihm erschien kürzlich eine Studie, die nachwies, dass Neonicotinoide Nervenzellfunktionen von Hummeln stören (*FASEB J* 29, S. 2112–2119, 2015). Ihm war nach eigener Aussage schon vor der Veröffentlichung der neuen Arbeiten klar, dass diese Pestizide für Bienen nicht gut sind. Jetzt müssten die Forscher die Ebene der Fragestellung wechseln, nämlich sich daran machen, die zu Grunde liegenden Mechanismen zu finden.

Daniel Cressey ist Redakteur bei »Nature«.

Nature Publishing Group
www.nature.com
 Nature 520, S. 416, 23. April 2015

JAHRGANGS-CD-ROM 2014



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) 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

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.de



Zug-, Druck- und Torsionskräfte können das Schicksal einer Zelle entscheiden.

JOHN UELAND

ZELLBIOLOGIE

Die Mechanik der Zelle

Nicht nur die Gene, auch Kräfte wie Druck oder Zug bestimmen darüber, ob eine Zelle Teil eines Knochens, des Gehirns oder eines tödlichen Tumors wird.

Von Stefano Piccolo

Die menschlichen Zellen in unserer Laborkultur sahen ganz normal aus. Sie wiesen keinerlei Anzeichen einer krebstypischen Entartung auf. Doch als wir die Zellen mechanisch in die Länge zogen, geschah etwas Unerwartetes: Die Aktivität zweier Proteine in ihrem Innern, YAP und TAZ, erhöhte sich. Als sie einen Maximalwert erreichte, begannen die Zellen sich unkontrollierbar zu teilen – ein charakteristisches Merkmal von Tumorzellen. Es war erstaunlich zu sehen, dass diese Änderung von simplen mechanischen Kräften hervorgerufen wurde und nicht etwa von genetischen Mutationen.

Biologen erklären die Funktionsweise von Zellen heute vorwiegend auf der Basis von Genen und Proteinen: Gen A kodiert für ein Protein, das die Aktivität von Gen B steuert, welches seinerseits für Protein X kodiert und so weiter. Die Erbanlagen bestimmen demnach darüber, welche Proteine exprimiert werden, und diese wiederum steuern das Zellverhalten. Mittlerweile zeigt sich jedoch immer deutlicher, dass umfassende intrazelluläre Vorgänge von mechanischen Kräften ausgelöst werden können, die beispielsweise von benachbarten Zellen oder umgebenden Flüssigkeiten ausgehen. In den vergangenen Jahrzehnten haben Wissenschaftler, die den Effekt solcher Kräfte auf Zellen untersuchen, eine neue Forschungsrichtung begründet: die Mechanobiologie.

Einzelzellen, die hinreichend viel Platz haben, teilen sich fortwährend, während solche, die zusammen mit anderen einen dichten Haufen bilden, die Teilungen stark reduzieren oder ganz einstellen. Auch die Festigkeit eines Gewebes spielt eine Rolle. So differenzieren sich bestimmte Stammzellen zu Neuronen, wenn sie sich in einer Umgebung befinden, deren Konsistenz jener des Hirngewebes entspricht, und zu Muskelzellen, wenn sie Muskelgewebe ähnelt. Solche mechanischen Einflüsse steuern die Selbstorganisation von Stamm-

zellen zu komplexen Geweben, etwa zu Augen- oder Hirnstrukturen.

Bis vor Kurzem waren die genauen Mechanismen unbekannt, mit denen Zellen die auf sie einwirkenden mechanischen Kräfte in »Handlungsanweisungen« umsetzen. Doch in den zurückliegenden Jahren sind meine Mitarbeiter und ich auf Teile dieser Maschinerie gestoßen. Unsere Arbeiten zeigen, dass die Proteine YAP und TAZ einen molekularen Schalter bilden, der Kraftwirkungen an der Zelloberfläche registriert und in biochemische Signale übersetzt, welche an Gene im Zellkern übermittelt werden. Erfährt die Zelle beispielsweise eine Dehnung, verändern YAP und TAZ ihre Aktivität und schalten Erbanlagen ein, die das weitere Verhalten der Zelle bestimmen. Zusammen mit den Arbeiten anderer Wissenschaftler erlauben diese Erkenntnisse neue Einsichten darüber, wie sich die Embryonalentwicklung abspielt, wie Wundheilung funktioniert und wie der Körper ganz allgemein die Funktion seiner Gewebe aufrechterhält. Daraus ergeben sich neue Ansätze zur Krebsbehandlung und zur Organzüchtung im Labor.

Vielerlei Gewalten

Im lebenden Körper wirken zahlreiche mechanische Prozesse und Kräfte, von denen die meisten Menschen nur die offensichtlichsten kennen, vor allem das Pumpen des Herzens, die Kontraktion der Muskeln und den Blutfluss. Die makroskopischen Effekte der damit einhergehenden Kontraktionen und Dehnungen kennen Biologen schon lange. So fördert die mechanische Belastung der Knochen bei körperlicher Bewegung deren Mineralisierung und wirkt so der Osteoporose entgegen. Die periodische Ausweitung der Blutgefäße wiederum schützt vor Arteriosklerose.

Physikalische Kräfte beeinflussen den Körper jedoch auch im mikroskopischen Maßstab und wirken auf jede seiner rund 100 Billionen Zellen ein. Diese Kräfte ergeben sich aus den Strukturen innerhalb der Körpergewebe. Jede Zelle besitzt ein inneres Gerüst, das Zytoskelett. Es besteht aus spezialisierten Proteinen, die wie Seile, Streben und Verankerungselemente funktionieren. Das Zytoskelett gibt dem Zellkern, den Organellen sowie der Zellmembran ihre Form.

AUF EINEN BLICK

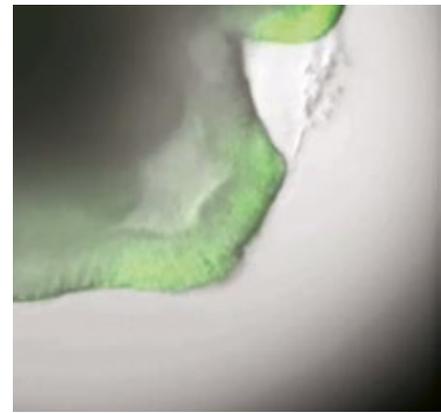
SPIELBALL DER KRÄFTE

1 Jede Zelle des menschlichen Körpers ist mechanischen Kräften ausgesetzt, etwa **Druck-, Zug-, oder Scherbelastungen**. Diese können die weitere Entwicklung der Zelle ebenso stark beeinflussen wie die Erbanlagen.

2 Zellen, die im Gewebeverband Platz haben, teilen sich häufiger als solche, die eng aneinanderliegen. Dieser Mechanismus sorgt unter anderem für die **Regeneration von Körpergewebe**.

3 Ein zellulärer **Schalter aus zwei Proteinen** bildet das Bindeglied zwischen den mechanischen und biologischen Prozessen. Er kann darüber entscheiden, ob sich eine Zelle normal verhält oder einen gefährlichen Tumor hervorbringt.

Menschliche neuronale Vorläuferzellen, die frei in einem Kulturgefäß schweben, bringen hier binnen weniger Tage die Anlage eines Auges hervor (von links nach rechts).



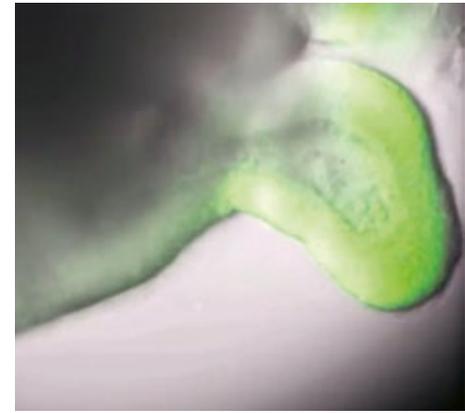
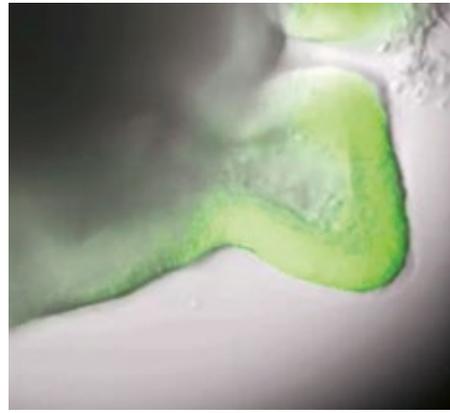
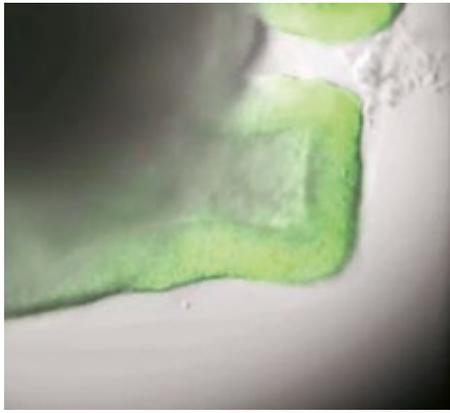
YOSHIKI SASAI, RIKEN CENTER FOR DEVELOPMENTAL BIOLOGY

Adhäsionsproteine auf der äußeren Membranoberfläche verbinden es mit der Außenwelt. Im Gewebeverband verankern sie die Zelle in einem Geflecht äußerer Filamentproteine, der extrazellulären Matrix, die wiederum mit anderen Zellen in Kontakt steht.

Das Zytoskelett und die extrazelluläre Matrix befinden sich in einer Art ständigem Gezerre miteinander. So kann eine Verformung der Matrix Adhäsionsproteine der Zelle nach außen ziehen. Ohne entgegengesetzt gerichtete Kraft würde das die Zelle dehnen. Letztere reagiert jedoch auf die Zugbelastung mit einer gleich starken Kontraktion und dem Umbau ihres Zytoskeletts. Dadurch bewahrt sie ihre Gestalt. Dieser dynamische Prozess erlaubt es der Zelle, sich an wechselnde mechanische Einflüsse anzupassen und gegebenenfalls auch ihre Form zu ändern.

Schon in den 1970er Jahren bemerkten Wissenschaftler, dass mechanische Einwirkungen auf das Zytoskelett und die extrazelluläre Matrix eine sehr große Bedeutung für die Zellteilung haben. Donald Ingber vom Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering an der Harvard University (USA) und Fiona Watt vom King's College London (England) haben Methoden entwickelt, um die Form von Zellen gezielt zu verändern. Dazu befestigen sie diese an unterschiedlich stark klebenden Flecken aus Proteinen der extrazellulären Matrix, die auf gläserne Objektträger aufgedruckt werden. Interessanterweise teilen sich die Zellen nur dann, wenn großflächiger Adhäsionskontakt es ihnen ermöglicht, sich auszustrecken und abzuflachen. Finden die gleichen Zellen nur punktförmigen Adhäsionskontakt, runden sie sich ab, teilen sich nicht mehr und aktivieren genetische Programme, die sie entweder ausreifen (differenzieren) lassen oder den programmierten Zelltod einleiten.

Diese Beobachtungen erregten großes Aufsehen in der Forschergemeinde. Doch sie ergeben kein vollständiges Bild. Denn wenn mechanische Kräfte über die Reproduktion und Differenzierung von Zellen bestimmen, dann müssen sie irgendwie den Zellkern beeinflussen und die Aktivität der dort vorhandenen Erbanlagen verändern. Welche Prozesse sind dafür verantwortlich? Wie wird Zellmechanik in veränderte Genaktivität übersetzt? Diese Fragen weckten das Interesse von mir und meinen Kollegen an der Universität degli Studi



YOSHIKI SASAI, RIKEN CENTER FOR DEVELOPMENTAL BIOLOGY

di Padova. Um das Jahr 2010 herum begann einer meiner Mitarbeiter, Sirio Dupont, eine Computerdatenbank nach Erbanlagen zu durchsuchen, die bei mechanischem Stress intensiver abgelesen werden – etwa solche, die in Aktion treten, wenn die Zelle Zugbelastungen erfährt. Sodann suchte Dupont nach Proteinen, die an der Steuerung dieser Gene beteiligt sind, und fand deren zwei: YAP und TAZ.

In darauf folgenden Laborexperimenten konnten wir zeigen, dass YAP und TAZ einen molekularen Schalter bilden, der die zelluläre Reaktion auf mechanische Kräfte in Gang setzt. Wir veränderten die intrazelluläre Aktivität dieser beiden Proteine, wodurch wir das Verhalten der Zelle kontrollieren konnten. Brachten wir beispielsweise kleine, abgerundete Zellen, die sich nicht mehr teilten, dazu, mehr YAP und TAZ zu produzieren, vermehrten sie sich wieder.

Wie funktioniert der Schalter? In abgerundeten Zellen, denen nur wenig Platz zur Verfügung steht, findet man YAP und TAZ mit hemmenden Faktoren verbunden und außerhalb des Zellkerns. Streckt sich das Zytoskelett jedoch, wird die Hemmung von YAP und TAZ aufgehoben und sie wandern in den Zellkern ein, wo sie an bestimmte Stellen auf der DNA binden und wachstumsfördernde Erbanlagen aktivieren (siehe Kasten S. 25). Die beiden Proteine ähneln sich sehr stark, auch wenn sie verschiedene Bezeichnungen haben. Ihre Molekülstrukturen sind beinahe identisch, genau wie die Funktionen, die sie ausüben. Daher werden die beiden für gewöhnlich in einem Atemzug genannt.

Die Bedeutung des YAP/TAZ-Schalters für den Organismus wird klar, wenn man seine Funktion in Geweben und Organen analysiert. Werden Gewebe verletzt, etwa beim Schnitt mit einem Messer, gehen Zellen verloren. Der Druck auf die umgebenden Zellen lässt dadurch nach, und sie bekommen mehr Freiraum. Infolgedessen strecken sie sich, was zur Dehnung ihres Zellskeletts führt. Das wiederum aktiviert YAP/TAZ und stellt die Weichen in Richtung Zellteilung. Sobald sich der verletzte Bereich erneut mit Körperzellen gefüllt hat, die sich zu einem dichten Gewebe verbinden, kommt der Prozess wieder zum Stillstand.

Experimente mit Mäusen helfen zu verstehen, wie dieser Mechanismus in vivo funktioniert. Der Molekularbiologe Duojia Pan von der Johns Hopkins University (USA) hat beob-

achtet, dass YAP eine entscheidende Rolle für die Regeneration entzündeter Darmschleimhaut (Kolitis) spielt. Und laut Eric Olson vom University of Texas Southwestern Medical Center fördern YAP/TAZ die Erholung von Herzmuskelgewebe nach einem Herzinfarkt. Greift man ins Erbgut von Mäusen ein, so dass diese in ihren Hautzellen vermehrt YAP produzieren, dann bekommen die Nager eine ungewöhnlich dicke und abnorm geschichtete Oberhaut, wie Elaine Fuchs von der Rockefeller University und Fernando Camargo vom Boston Children's Hospital (beide USA) nachwiesen. Anscheinend muss die Konzentration von YAP/TAZ im Körpergewebe einen bestimmten Wert haben, damit sich das Gewebe normal regenerieren kann. Ein Mangel führt zu beeinträchtigter Wundheilung, ein Überschuss hingegen lässt die Körperzellen zu anomalen Geweben zusammenballen, was die Entstehung eines Tumors wahrscheinlicher macht.

Die Form folgt aus der Form

Die Reparatur von Gewebeschäden ist jedoch nicht die einzige Funktion des YAP/TAZ-Systems, die für unser Wohlergehen bedeutsam ist. Auch ohne Verletzungen oder Erkrankungen bilden viele Organe ständig neue Zellen nach. Denn sie müssen jahrzehntelang funktionieren – viel länger, als eine Körperzelle durchschnittlich existiert. Träten keine neuen Gewebezellen an die Stelle der abgestorbenen, würde das Organ mit der Zeit verkümmern und eingehen.

Das Aufrechterhalten einer hinreichend großen Zellzahl ist dabei nur ein Aspekt. Mindestens ebenso wichtig erscheint, an welcher Stelle im Organ sich die neuen Zellen bilden. Körperorgane lassen sich vergleichen mit riesigen, extrem unübersichtlichen Vielparteienhäusern: Sie bestehen aus zahllosen Zellen verschiedenen Typs, von denen jede in eine komplexe dreidimensionale Architektur eingebettet ist. Dieses räumliche Muster muss von Zellgeneration zu Zellgeneration erhalten werden. Doch woher stammt die Information, welche Zelle wo hingehört? Neuen Erkenntnissen zufolge spielt das YAP/TAZ-System auch hier eine Rolle.

Organe zeichnen sich durch ein breites Spektrum dreidimensionaler Strukturen aus. Man findet in ihnen Höhlungen, Grenzflächen, konkave oder konvexe Wölbungen und flache Schichten. Sie alle bekommen ihre Form durch die Art

und Weise, wie sich Körperzellen in die extrazelluläre Matrix einfügen. Da dieses Gerüst länger überdauert als seine zellulären Bestandteile, bietet es neu hinzukommenden Zellen eine räumliche Orientierung dafür, wo sie jeweils hingehören. Die Frage lautet nun, in welchen Merkmalen der Matrix diese Information kodiert ist.

Celeste Nelson von der Princeton University, Christopher Chen von der Boston University (beide USA) sowie Maria-celeste Aragona aus meiner Arbeitsgruppe haben Belege dafür gefunden, dass die Antwort in Gestaltabweichungen des filamentösen Netzwerks der Matrix liegt. Solche Veränderungen führen zu mechanischen Kräften, die das Verhalten der Zellen beeinflussen. Als wir zum Beispiel eine Zellschicht in kleinen Bereichen aufwölbten – man denke an Buckel in einer ebenen Straße –, aktivierten nur solche Zellen, die gedehnt wurden, ihr YAP/TAZ-System und begannen sich zu teilen. Offenbar bestimmt die lokale Gewebeanatomie über die »Schnittstelle« YAP/TAZ, welchen Entwicklungsweg ihre zellulären Bestandteile nehmen.

YAP/TAZ werden dort am stärksten aktiviert und treten in den Zellkern ein, wo Gewebe sich wölben beziehungsweise strecken, und am schwächsten dort, wo ebene und dicht gepackte Zellschichten vorherrschen. Daher hilft die Gewebearchitektur selbst, die Gestalt des Organs über viele Zellgenerationen zu erhalten.

Sie fungiert als Formgedächtnis für Körperbestandteile, die sonst allmählich ihre Gestalt verlieren würden.

Die Art und Weise, wie YAP/TAZ auf die Umgebung einer Zelle reagieren, kann eine weitere Frage beantworten helfen: Woher nämlich Organe »wissen«, wann sie aufhören sollen zu wachsen. Zu der Zeit, als meine Mitarbeiter und ich entdeckten, wie YAP/TAZ mechanische Reize in zelluläre Signale übersetzen und diese an den Kern übermitteln, standen die Proteine bereits im Fokus anderer Forscher. Denn es hatte sich herausgestellt, dass Tiere mit einer erhöhten Aktivität von YAP/TAZ riesenhafte Organe entwickeln. Wie bereits dargelegt, beeinflusst die lokale Gewebearchitektur die Aktivität der beiden Faktoren; zudem ändern sich die in einem Organ wirkenden mechanischen Kräfte im Zuge seines Wachstums. Daher vermuten wir, dass sich ein Kräftegleichgewicht ein-

stellt, sobald ein Organ seine richtige Größe erreicht hat, das den YAP/TAZ-Schalter auf »aus« stellt und das Wachstum beendet.

Neben der Gewebearchitektur ist auch das Substrat, mit dem eine Zelle Kontakt hat, ein wichtiger Faktor, der über ihr Verhalten bestimmt. Die extrazelluläre Matrix, in die die Zellen eingebettet sind, ist mitnichten homogen, sondern weist ganz unterschiedliche Gefüge auf. Knochengewebe beispielsweise zeichnet sich durch eine steife, dichte und geradezu steinharte Matrix aus. Andere Gewebe, etwa im Gehirn oder in Fettpolstern, werden von einem viel weicheren Proteingeflecht zusammengehalten.

Wozu sich Stammzellen entwickeln, hängt von ihrer Umgebung ab

Die spezielle Beschaffenheit der Matrix in einem Organ bestimmt offenbar maßgeblich über dessen Entwicklung und Regenerationsmöglichkeiten. Eine besonders große Rolle spielen hierbei die mesenchymalen Stammzellen. Sie finden sich in vielen Organen ausgewachsener Lebewesen und üben wichtige Funktionen bei der Reparatur des Gewebes nach

Verletzungen aus. Diese Vorläuferzellen können sich in erstaunlich viele Typen differenzieren, beispielsweise in Knochen-, Fett-, Nerven- oder Muskelzellen. Lange Zeit nahmen Biologen an,

Die Gewebearchitektur dient als Formgedächtnis, das die Gestalt von Organen erhalten hilft

das die spezielle Zusammensetzung chemischer Faktoren am jeweiligen Ort darüber entscheidet, welcher Typ entsteht. Doch Adam Engler und Dennis Discher, damals beide an der University of Pennsylvania, stellten diese Hypothese 2006 in der Zeitschrift »Cell« in Frage. Sie hatten synthetische extrazelluläre Matrices unterschiedlicher Steifigkeit hergestellt, die in ihren mechanischen Eigenschaften verschiedenen Geweben ähnelten. Die mesenchymalen Stammzellen erwiesen sich als überraschend vielseitige Verwandlungskünstler, wenn sie in diese Matrices gelangten. Hatte das Flechtwerk die Steifigkeit von Hirngewebe, differenzierten sie sich in Neuronen; entsprach seine Festigkeit hingegen der von Muskelgewebe, differenzierten sie sich in Muskelzellen.

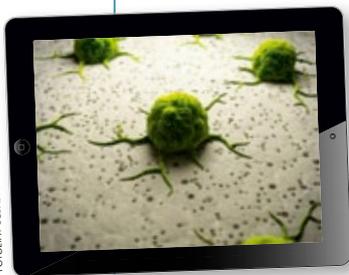
Als Dupont diese Experimente in Padua reproduzierte, erhielt er Einblick in den zu Grunde liegenden molekularen Mechanismus: Die Steifigkeit der umgebenden Matrix bestimmt über das Ausmaß, in dem das YAP/TAZ-System mesenchymaler Stammzellen aktiviert wird. In sehr festen Matrices sind YAP/TAZ außerordentlich aktiv, was die Stammzellen in Knochenzellen differenzieren lässt. In weicher Umgebung hingegen bleibt das YAP/TAZ-System weitgehend inaktiv, und es entstehen Fettzellen. Indem wir die Konzentration und Aktivität von YAP/TAZ experimentell veränderten, konnten wir den zellulären Entwicklungsweg beeinflussen. Erhöhten wir sie beispielsweise in mesenchymalen Stammzellen des Fettgewebes, verwandelten diese sich in Knochenzellen.

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Krebs« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/krebs



FOTOLIA / SEBASTIAN KAULITZKI

Stammzellen sind ein großes Thema in der Biomedizin, eben weil sie sich zu vielen verschiedenen Typen ausdifferenzieren können. Forscher hoffen, mit ihrer Hilfe eines Tages beschädigte Gewebe wiederherzustellen oder sogar komplette Ersatzorgane zu züchten. Doch bis es so weit ist, müssen die Wissenschaftler zunächst besser verstehen, wie Stammzellen auf physikalische Kräfte reagieren. Um etwa bei Muskeldystrophiepatienten neues Muskelgewebe aufzubauen, müssen

die Stammzellen zunächst im Labor stark vermehrt werden. Helen Blau von der Stanford University (Kalifornien) hat herausgefunden, dass die Stammzellen im Körper des Behandelten nur dann neue Muskelfasern hervorbringen, wenn sie auf Trägermaterialien gezüchtet werden, deren Elastizität exakt der von normalem Muskelgewebe entspricht.

Ob es gelingen wird, Ersatzorgane außerhalb des Körpers zu produzieren, hängt davon ab, ob wir verstehen, wie me-

So wirken Kräfte auf Zellen

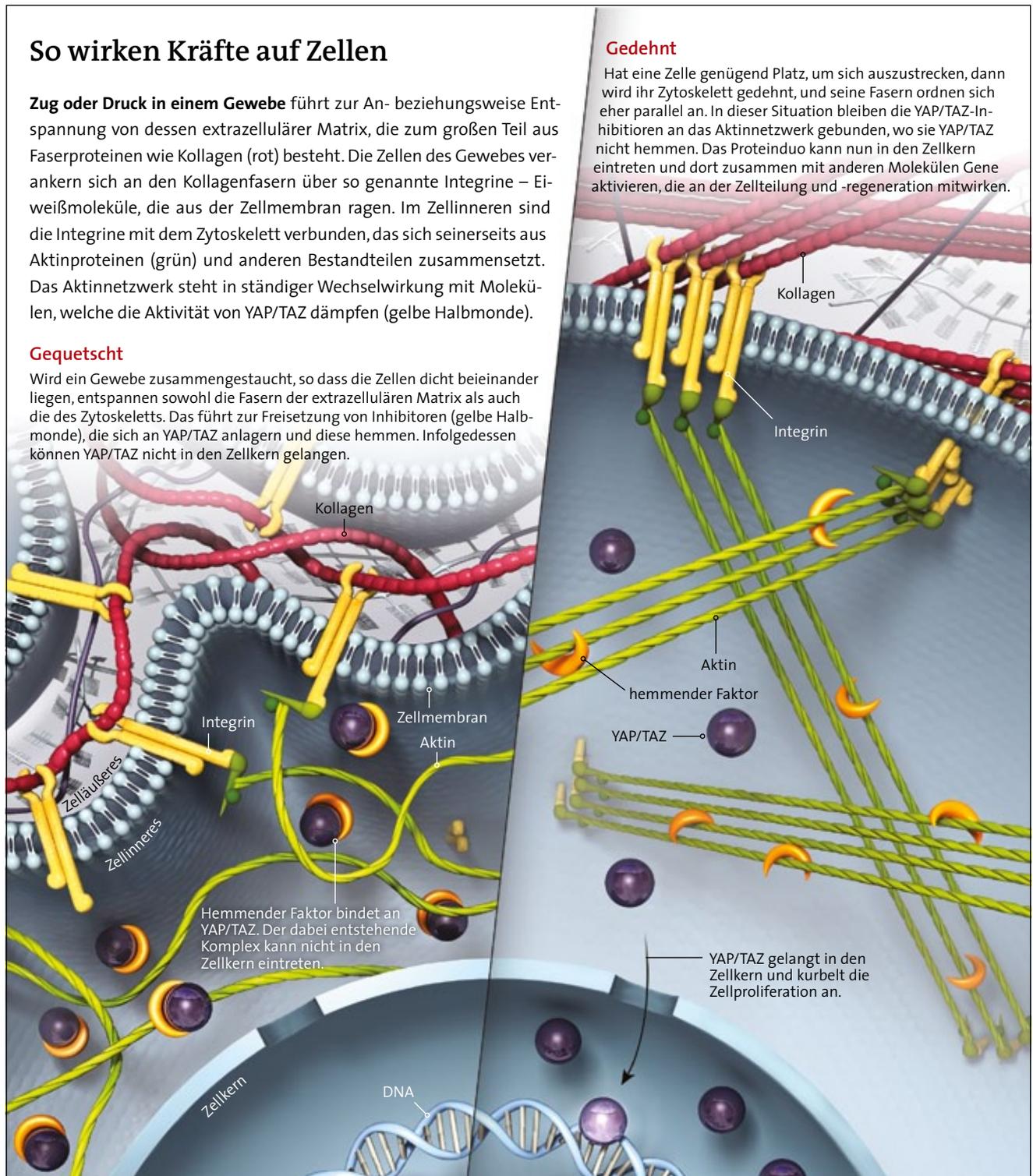
Zug oder Druck in einem Gewebe führt zur An- beziehungsweise Entspannung von dessen extrazellulärer Matrix, die zum großen Teil aus Faserproteinen wie Kollagen (rot) besteht. Die Zellen des Gewebes verankern sich an den Kollagenfasern über so genannte Integrine – Eiweißmoleküle, die aus der Zellmembran ragen. Im Zellinneren sind die Integrine mit dem Zytoskelett verbunden, das sich seinerseits aus Aktinproteinen (grün) und anderen Bestandteilen zusammensetzt. Das Aktinnetzwerk steht in ständiger Wechselwirkung mit Molekülen, welche die Aktivität von YAP/TAZ dämpfen (gelbe Halbmonde).

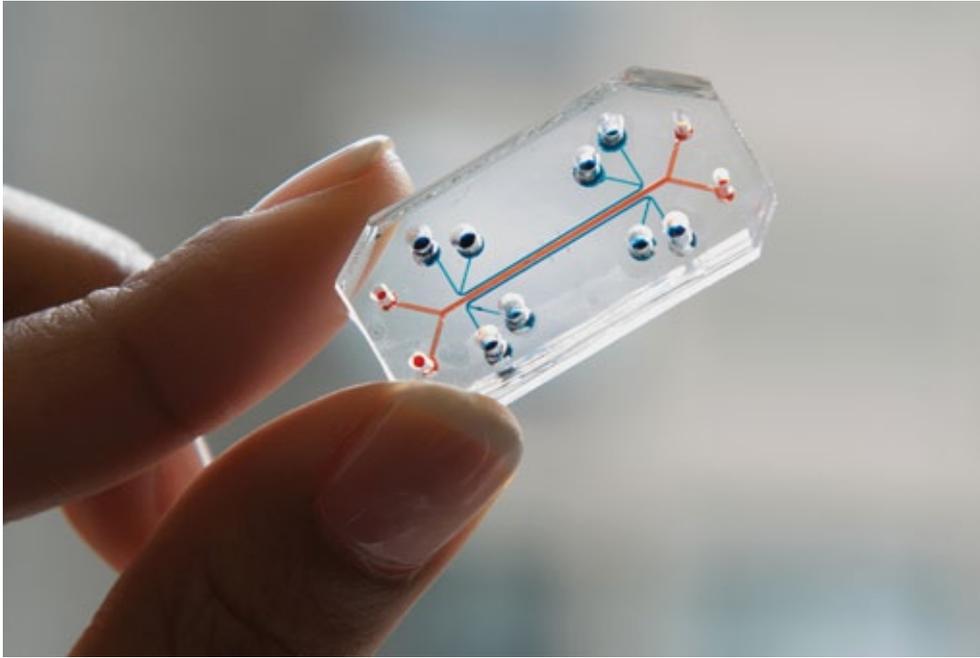
Gequetscht

Wird ein Gewebe zusammengestaucht, so dass die Zellen dicht beieinander liegen, entspannen sowohl die Fasern der extrazellulären Matrix als auch die des Zytoskeletts. Das führt zur Freisetzung von Inhibitoren (gelbe Halbmonde), die sich an YAP/TAZ anlagern und diese hemmen. Infolgedessen können YAP/TAZ nicht in den Zellkern gelangen.

Gedehnt

Hat eine Zelle genügend Platz, um sich auszustrecken, dann wird ihr Zytoskelett gedehnt, und seine Fasern ordnen sich eher parallel an. In dieser Situation bleiben die YAP/TAZ-Inhibitoren an das Aktinnetzwerk gebunden, wo sie YAP/TAZ nicht hemmen. Das Proteinduo kann nun in den Zellkern eintreten und dort zusammen mit anderen Molekülen Gene aktivieren, die an der Zellteilung und -regeneration mitwirken.





Dieses Gerät erzeugt in seinem Inneren Kräfte ähnlich jenen, die bei Atembewegungen in der Lunge auftreten. Blutgefäß- und Lungenepithelzellen bringen unter Einwirkung dieser Kräfte komplexe Strukturen hervor, die einem Lungengewebe gleichen (Organ-On-A-Chip).

chanische Reize zelluläre Aktivitäten beeinflussen. In dem Sciencefiction-Klassiker »Blade Runner« züchten Forscher in Kulturgefäßen funktionsfähige Augen. Der kürzlich verstorbene Yoshiki Sasai und seine Kollegen vom RIKEN-Zentrum für Entwicklungsbiologie in Kobe (Japan) haben bereits unreife Augen in Kultur produziert. Sie brachten Haufen von embryonalen Stammzellen durch chemische Behandlung dazu, sich in neuronale Vorläuferzellen zu differenzieren. Betteten sie diese in eine weiche extrazelluläre Matrix ein, ordneten sich die Zellen spontan in einer einlagigen Schicht an, die ein hohlkugelähnliches Gebilde formte. Die Zugabe weiterer Proteine ließ sie zu retinalen Vorläuferzellen ausreifen. Im Zuge fortwährender Teilungen begann sich die Zellschicht zu falten, zu krümmen und einzusinken. Dabei entstanden in einem mechanisch vermittelten Selbstorganisationsprozess Teile eines Auges. Das Phänomen trat allerdings nur auf, wenn die Wissenschaftler die Zellen von den ebenen Plastikoberflächen in üblichen Kulturgefäßen fernhielten und ihnen so erlaubten, einem inneren Entwicklungsprogramm zu folgen. Dieses bringt Faltungen, Streckungen und Wölbungen sowie lokale Aufweichungen und Versteifungen hervor.

Pulsierendes Umfeld

Eine recht neue Entwicklung in der Biomedizin sind Organ-On-A-Chip (Organe auf einem Chip). Dabei handelt es sich um dreidimensionale, mikrofluidische Zellkultursysteme, die das mechanische Geschehen in Körperorganen simulieren. Die Zellen wachsen dort in winzigen Behältern, in denen sich Parameter wie der Flüssigkeitsdruck und die Strömungsgeschwindigkeit exakt einstellen lassen. Dadurch kann man die Zellen mechanischen Belastungen aussetzen, die denen in echten Geweben entsprechen. Donald Ingber und sein Team setzten Lungenzellen mit Hilfe solcher Geräte periodi-

schen Druckschwankungen aus, die jenen bei natürlichen Atembewegungen im Organismus ähnelten. Zudem konfrontierten sie Zellen der Darmschleimhaut mit Zug- und Druckbelastungen, wie sie im lebenden Verdauungstrakt vorkommen. Dies führte manchmal zu unerwartetem Verhalten bei den Zellen: Einige entwickelten sich spontan zu organähnlichen Strukturen.

Vielleicht ist es auch möglich, mit Hilfe des YAP/TAZ-Systems Stammzellen zu produzieren. Stammzellen finden sich in speziellen Bereichen eines Gewebes, in so genannten Nischen mit besonderen Eigenschaften: etwa Randzonen, Ausbuchtungen oder Hohlräumen. Solche Mikroumgebungen halten offenbar stammzellartige Eigenschaften aufrecht. An einigen dieser Orte lassen sich in den Kernen dort befindlicher Stammzellen große Mengen von YAP/TAZ nachweisen, und diese Zellen können sich auffällig gut reproduzieren. Die Umgebung scheint also zu beeinflussen, in welchem Ausmaß die beiden Proteine synthetisiert werden. Indem Forscher künstliche Umgebungen schaffen, die den Stammzellnischen im Körper ähneln, könnte es ihnen gelingen, Stammzellen im Labor zu vermehren. In einer nicht allzu fernen Zukunft gelingt es vielleicht sogar, Stammzellen im lebenden Organismus zu manipulieren, etwa mit Hilfe von Wirkstoffen, welche die Aktivität von YAP/TAZ in den Zellen beeinflussen.

Stammzelltherapien haben allerdings eine Schattenseite: Sie bergen das Risiko der Tumorentstehung – dann nämlich, wenn die Stammzellen keine ausdifferenzierten Gewebe hervorbringen, sondern nur wieder Zellen, die sich immer weiter teilen. Krebsstammzellen, das gefährlichste Stadium der Entartung, verhalten sich genau so. Deshalb sind viele Mechanobiologen überzeugt davon, es müsse bei Stammzelltherapien sichergestellt sein, dass die verabreichten Zellen in der richtigen physikalischen Umgebung ankommen. Ein fal-

sches Mikromilieu könne die Zellen auf ein gefährliches Fehlverhalten programmieren.

Während der Fokus in der Stammzellforschung oder der regenerativen Medizin meist darauf liegt, Stammzellen zu vermehren und beschädigtes Gewebe zu ersetzen, verfolgen Krebsforscher das entgegengesetzte Ziel: Sie wollen Zellproliferation unterbinden. Auch hierbei spielen mechanische Kräfte möglicherweise eine entscheidende Rolle. Seit mehr als 40 Jahren ist der Kampf gegen Krebs von der Vorstellung geleitet, genetische Mutationen trieben das

Tumorwachstum voran. Zwar haben sich einige Therapien, die Auswirkungen von Krebs fördernden Mutationen unterbinden, als wirksam erwiesen. Doch zu einem großen Durchbruch in der Tumormedizin haben sie bislang nicht geführt. Schon eine einzige Krebszelle hat in der Regel zu viele Mutationen erworben, um alle von ihnen zu blockieren – und das gilt erst recht für einen ganzen Tumor, der sich aus vielen unterschiedlich stark entarteten Zellen zusammensetzt.

Krebserkrankungen basieren ebenso auf einer gestörten zellulären Mikroumgebung wie auf mutierten Erbanlagen. Veränderungen der Zellgestalt und der extrazellulären Matrix gehen der Entstehung eines Tumors voraus und können diese sogar auslösen. So hat ein Team um die Medizinerin Valerie Weaver von der University of California in San Francisco (USA) gezeigt, dass gutartige Zellen auf aggressives Tumorstadium umschalten, wenn sich die Steifigkeit der umgebenden Matrix erhöht.

Wunden, die nie heilen

Wie unsere Versuche belegt haben, führt eine erzwungene Formänderung bei Zellen zur Aktivierung ihres YAP/TAZ-Systems und zu bösartigem (malignem) Verhalten. Nachdem mein Mitarbeiter Michelangelo Cordenonsi die TAZ-Konzentration in gutartigen Zellen experimentell erhöht hatte, waren diese von Krebsstammzellen nicht mehr zu unterscheiden. Zudem wissen wir inzwischen, dass YAP/TAZ in Brustkrebsstammzellen aktiv sind und deren Malignität fördern. Tumorzellen entwickeln offenbar keine völlig neuen Methoden, um sich ungehemmt vermehren zu können. Vielmehr zweckentfremden sie einen Mechanismus, mit dessen Hilfe Körpergewebe die Zahl und den Differenzierungsgrad ihrer Stammzellen kontrollieren.

Auf Basis dieser Erkenntnisse haben meine Mitarbeiter und ich eine unorthodoxe Arbeitshypothese zur Krebsentstehung aufgestellt. Wir vermuten: Wenn Zellen bösartig werden, dann zunächst nicht auf Grund genetischer Mutationen, sondern wegen drastischer Veränderungen in ihrer Mikroumgebung. Tumoren könnten in der Tat »Wunden, die niemals heilen« sein (um eine unter Medizinern verbreitete Redewendung aufzugreifen), da sie endlos Zellen produzieren, so als ob diese für die Reparatur einer Verletzung benötigt würden.

Krebserkrankungen basieren ebenso auf einer gestörten Mikroumgebung wie auf mutierten Erbanlagen

Die normale Mikroumgebung der Zellen wiederherzustellen, könnte einen Schlüsselansatz für die Krebstherapie liefern. Valerie Weaver hat in Experimenten die Verbindungen von Tumorzellen zur extrazellulären Matrix gekappt, woraufhin deren Teilungsrate zurückging und sie wieder wie normale Zellen auszusehen begannen. Meine Kollegen und ich hegen die Hoffnung, dass YAP/TAZ einen Angriffspunkt von Krebsgeschwulsten darstellen könnten. Das Proteinduo ist in Zellen zahlreicher Tumorarten überaktiv. Es zu dämpfen, könnte entartete Zellen normalisieren und die

Bildung von Metastasen verhindern helfen. Mehrere Forschergruppen gehen diesem Ansatz bereits nach.

Natürlich sind wir uns im Klaren darüber, dass Krebs eine komplexe Erkrankung darstellt und in verschiedenen Tumoren durchaus unterschiedliche Mechanismen wirken können, die mechanische Kräfte in intrazelluläre Signale übersetzen. Nicht nur einmal haben sich Therapieansätze, die im Labor viel versprechend erschienen, im klinischen Alltag als wenig hilfreich erwiesen. Welcher Hemmstoff gegen YAP/TAZ auch immer künftig klinisch getestet wird – es muss auf jeden Fall sichergestellt sein, dass er selektiv gegen Krebszellen wirkt. Sollte es nicht gelingen, Inhibitoren zu finden, die sich direkt gegen YAP/TAZ richten, dann helfen vielleicht indirekte Wirkstoffe, die Spannungen im Zytoskelett oder in der extrazellulären Matrix von Tumoren abbauen.

Der griechische Philosoph Aristoteles bezeichnete die Gestalt als Seele alles Lebendigen. Zellbiologen beginnen jetzt, ihre fundamentale Bedeutung in einem moderneren Sinn zu begreifen. Gestalt übt einen starken Einfluss auf das Leben aus: einerseits beim Wachstum und der Regeneration von Organen, andererseits bei der Entartung von Zellen. Indem wir besser verstehen, welche große Rolle die Form spielt, können wir sie vielleicht therapeutisch nutzen. ~

DER AUTOR



Stefano Piccolo ist Professor für Molekularbiologie an der Università degli Studi di Padova in Norditalien. Gemeinsam mit seinen Mitarbeitern untersucht er, wie Zellen ihre Umgebung wahrnehmen und die dabei gewonnenen Informationen nutzen, um Gewebe aufzubauen.

QUELLEN

- Bissel, M.J., Hines, W.C.:** Why Don't We Get More Cancer? A Proposed Role of the Microenvironment in Restraining Cancer Progression. In: Nature Medicine 17, S. 320–329, 2011
- Halder, G. et al.:** Transduction of Mechanical and Cytoskeletal Cues by YAP and TAZ. In: Nature Reviews Molecular Cell Biology 13, S. 591–600, 2012
- Huh, D. et al.:** Reconstituting Organ-Level Lung Functions on a Chip. In: Science 328, S. 1662–1668, 2010

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1351067

»DIE MEDIZIN
DER ZUKUNFT«

DIE GROSSE
SPEKTRUM-
SERIE



FOTO: ISTOCK / EDUARD IZSENKO, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Neuartige Impfstoffe basieren auf Zuckerketten, die charakteristisch für bestimmte Krankheitserreger sind.

IMMUNOLOGIE

Impfen mit Zucker

Bakterien und Parasiten sind von kompliziert aufgebauten Zuckermolekülen umhüllt. Gegen diese richten sich neue Impfstoffe, die Forscher derzeit auf Grundlage synthetischer Zucker entwickeln. Sie sollen uns vor Lungenentzündung, Krankenhauskeimen und Tropenkrankheiten schützen.

Von Peter H. Seeberger

Wie würden Sie auf den Vorschlag eines Arztes reagieren, uns oder unseren Kindern eine aus den Pusteln einer Kuh entnommene Flüssigkeit zu spritzen? Die meisten fänden das sicher eklig und würden dankend ablehnen. Wenn allerdings dieses Vorgehen vor einer tödlichen Krankheit bewahren könnte, sähe die Sache vielleicht schon anders aus. Die Situation mag heute abwegig erscheinen – aber sie beschreibt präzise die Geburtsstunde der Impfung im Jahr 1796, als der britische Arzt Edward Jenner (1749–1823) Kinder mit frisch entnommenen Kuhpocken vor lebensbedrohlichen Pockeninfektionen schützte.

Seither haben sich Impfungen als volkswirtschaftlich günstigste Methode etabliert, um Menschen vor Infektionskrankheiten zu schützen. Pocken und Polio wurden dank ihnen im 20. Jahrhundert fast komplett ausgerottet. Auch einige andere, oft tödliche Infektionen wie der Wundstarrkrampf nach kleinen Verletzungen sind weitgehend in Vergessenheit geraten. Allerdings: Gerade weil die dramatischen Folgen schwerer Infektionskrankheiten heute nicht mehr täglich sichtbar sind, scheuen viele Eltern davor zurück, gesunde Kleinkinder zu immunisieren. Folglich kann man, wenn überhaupt, nur geringste Nebenwirkungen akzeptieren. Diesen Faktor gilt es bei der Entwicklung von Impfstoffen zu berücksichtigen.

Alle Impfungen beruhen auf einem einfachen Prinzip: Das menschliche Immunsystem muss dazu gebracht werden, den Krankheitserreger – sei es ein Bakterium, Parasit oder Virus – zu erkennen und zu vernichten. Die Immunreaktion stützt sich dabei auf **Antikörper**-Proteine und **T-Zellen** (siehe Glossar), die Moleküle auf der Zelloberfläche des Erregers erkennen und damit dessen Zerstörung einleiten.

Wie kann man eine Immunantwort erzeugen, die sich spezifisch gegen einen Erreger richtet? Jenners erste Impfung aus Kuhpocken gehört zum Typ der **Lebendimpfstoffe**, bei denen geringe Mengen funktionsfähiger Keime verabreicht werden. Dabei setzt man typischerweise abgeschwächte Erreger ein, die sich zwar noch vermehren, aber die Krankheit nicht mehr auslösen können. Heute sind Lebendimpfstoffe unter anderem noch zum Schutz vor Tuberkulose und Gelb-

fiel im Einsatz. Die Zelloberflächen der injizierten Erreger präsentieren dabei dem menschlichen Immunsystem Moleküle, die so bei uns nicht vorkommen. Diese Stoffe rufen eine Reaktion hervor, durch die Antikörper und Abwehrzellen entstehen, die danach weiter im Körper zirkulieren und etwaige neu eintreffende Erreger bekämpfen. Oft genügt es jedoch auch, inaktivierte Erreger (**Totimpfstoffe**) zu verabreichen, um eine Schutzwirkung zu erzielen. Beispiele hierfür sind Grippe und Hepatitis.

Die Zelloberfläche von Lebend- wie Totimpfstoffen präsentiert dem Immunsystem viele verschiedene Biomoleküle, etwa Eiweiße, Fette und Kohlenhydrate – wobei neben ausgesprochen erregerspezifischen auch solche vorkommen, die menschlichen ähneln. Immunreaktionen gegen körpereigene Moleküle können jedoch Autoimmunkrankheiten hervorrufen und müssen daher vermieden werden.

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT

- | | | |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Teil 1 | ▶ Die RNA-Revolution
<i>Christine Gorman und Dina Fine Maron</i>
Nanomedizin
<i>Dina Fine Maron, Mark Peplow und Larry Greenemeier</i> | Mai 2015 |
| Teil 2 | ▶ Designermoleküle für intelligente Medikamente
<i>Darlene K. Taylor, Uddhav Balami</i> | Juni 2015 |
| Teil 3 | ▶ Schwachstelle der Bakterienfestung
<i>Carl Zimmer</i> | Juli 2015 |
| Teil 4 | ▶ Impfen mit Zucker
Peter H. Seeberger | August 2015 |
| Teil 5 | ▶ Gezielte Gentherapie mit molekularen Scheren
<i>Margaret Knox</i> | September 2015 |
| Teil 6 | ▶ Menschliche Organe aus Tieren
<i>Jens Clausen</i> | Oktober 2015 |



DAVID ALBRECHT, MITTEL GEN. DES WIRTSCHAFTS- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG

Dieser erste Zuckersyntheseautomat namens Glycoconer produziert künstliche Mehrfachzucker wie am Fließband in einem sich stetig wiederholenden Reaktionszyklus.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts begann entsprechend die gezielte Suche nach erregerspezifischen Zelloberflächenmolekülen als Grundlage für Impfstoffe. Häufig handelt es sich dabei um Proteine. Mit der Entwicklung der automatisierten Sequenziermethoden um die Jahrtausendwende konnten Forscher die Genome vieler Erreger entschlüsseln. Das erlaubte ihnen, durch Vergleich mit dem menschlichen Genom solche Zelloberflächenproteine zu identifizieren, die sich als Ausgangspunkt für die Impfstoffentwicklung eignen.

Neben Eiweißen sind aber auch **Polysaccharide** oder Glykane eine wichtige Molekülklasse für die Impfstoffentwicklung, denn sie finden sich nicht nur auf der Oberfläche von menschlichen Zellen, sondern auch auf der von Bakterien

und Parasiten. Polysaccharide bestehen aus meist Hunderten von ringförmigen Zuckerbausteinen. Anders als die Aminosäuren in Proteinen verkettet sich diese aber nicht nur zu linearen, sondern auch zu verzweigten Strukturen. Zur Verankerung sind die Zuckerpolymere an Eiweiße oder Lipide der Zellhülle gebunden. Die auf der Oberfläche menschlicher Zellen vorkommenden Polysaccharide unterscheiden sich dabei sehr stark von denen der Bakterien – eine gute Voraussetzung für hochspezifische, nebenwirkungsarme Impfstoffe. Aber auch verschiedene Stämme der gleichen Bakterienart tragen komplett andere Zuckermuster. Die Idee, eine Immunantwort gegen bakterielle Polysaccharide zum Impfen zu nutzen, erprobten Forscher bereits in den 1920er Jahren. Dabei setzten sie von der Zelloberfläche der Erreger isolierte Zuckerketten für die Impfstoffproduktion ein.

Die ersten Polysaccharidimpfstoffe wurden 1974 eingeführt und zum Schutz vor Meningokokken, Pneumokokken und Haemophilus eingesetzt. Allerdings wiesen sie einige Nachteile auf. So ist das Immunsystem kleiner Kinder bis zum Alter von zwei Jahren nicht dazu in der Lage, eine schützende Immunantwort gegen Polysaccharide hervorzurufen, weil es komplexe Zuckerketten nicht als fremd erkennt. Bei älteren Menschen über ungefähr 60 Jahren lässt die Immunreaktion ebenfalls nach, wodurch ein wirksamer Impfschutz gegen Polysaccharide schwer zu erreichen ist. Zudem regen Polysaccharide zwar B-Zellen zur Antikörperproduktion an, lösen jedoch keine T-Zell-Antwort aus, die für einen Langzeitschutz nötig ist, der über einige Jahre hinausgeht.

Impfstoffe gegen Hirnhautentzündung

Um diese Probleme zu beseitigen, entwickelten Forscher 1983 erstmals so genannte **Konjugatimpfstoffe**. Bei ihnen ist ein aus Bakterien isoliertes Polysaccharid direkt mit einem Trägerprotein verknüpft, auf das wiederum T-Zellen reagieren. Als Eiweißkomponente dienen meist entschärfte Toxine wie Tetanus-Toxoid, Diphtheria-Toxoid oder Abwandlungen davon. Solche Zucker-Eiweiß-Konjugate immunisieren auch Kleinkinder, weil die T-Zellen dann neben dem Proteinteil auch den Zucker so präsentieren, dass eine starke und lange andauernde Immunantwort eintritt.

Derzeit werden in Deutschland Konjugatimpfstoffe gegen drei Erreger verabreicht. Der eine davon ist *Haemophilus influenzae* Typ B (Hib); die Impfung gegen ihn wird seit 1990 von der Ständigen Impfkommission (STIKO) für alle Kleinkinder empfohlen. Davor ließ sich über die Hälfte aller Hirnhautentzündungen auf diesen Erreger zurückführen, viele davon tödlich oder mit schweren Folgeschäden. Heute werden auf isolierten Polysacchariden basierende Hib-Konjugatimpfstoffe als Bestandteil von Mehrfachimpfstoffen verabreicht, wodurch in Deutschland nur noch wenige Krankheitsfälle pro Jahr bei Kindern auftreten.

Auch gegen Meningokokken (Bakterien der Art *Neisseria meningitidis*) schützen Konjugatimpfstoffe. Von diesen Erregern verursachte Infektionen führen anfänglich nur zu Mattheit, Fieber und Kopfweh – aber dadurch hervorgerufene

AUF EINEN BLICK

SCHUTZ VOR GEFÄHRLICHEN KEIMEN

- 1** **Infektionskrankheiten** durch **Parasiten** oder **Bakterien** verursachen jedes Jahr den Tod von vielen Millionen Menschen. Eine wichtige Maßnahme dagegen ist die Entwicklung von neuen Impfstoffen.
- 2** Die Oberfläche von Bakterien- und Parasitenzellen ist wie die von menschlichen Zellen von sehr unterschiedlichen und spezifischen, komplexen **Zuckerketten** umgeben. **Impfstoffe**, die das Immunsystem zu einer Reaktion gegen diese Moleküle anregen, haben sich bereits als sehr erfolgreich erwiesen.
- 3** Die automatisierte **chemische Synthese** von komplexen Zuckerketten verkürzt die Produktionsdauer von Jahren auf Stunden oder Tage. Das ermöglicht neue vollsynthetische Impfstoffkandidaten etwa gegen **Krankenhaushauskeime** und Armutskrankheiten.

Hirnhautentzündungen enden in 10 Prozent der Fälle tödlich. Genau wie bei vielen anderen Bakterien unterscheiden Forscher bei Meningokokken verschiedene **Serotypen**, die unter anderem in ihren Zuckerketten auf der Zelloberfläche voneinander abweichen. Daher muss für jeden Serotyp ein eigener Impfstoff entwickelt werden. Neben einem Vakzin gegen den Serotyp C gibt es seit 2010 aber auch ein Mittel, das vier der fünf verschiedenen Serotypen (A, C, W-135 und Y) abdeckt. Nur der Serotyp B eignet sich nicht für einen Zuckerimpfstoff, weil ein sehr ähnliches Oberflächenpolysaccharid im menschlichen Gehirn vorkommt und daher die Gefahr einer Immunreaktion gegen die eigenen Hirnzellen besteht. Diese Lücke schließt ein Impfstoff auf Proteinbasis.

Die häufigsten bakteriellen Erreger schwer verlaufender Infektionen sind Pneumokokken. *Streptococcus pneumoniae* verursacht bedrohliche Erkrankungen wie Hirnhaut-, Lungen- oder Mittelohrentzündungen. Der Keim lebt in gesunden Trägern normalerweise unauffällig und ohne Symptome im Atmungssystem. Bei anfälligen Personen wie Kleinkindern, älteren Menschen und solchen mit einem angeschlagenen Immunsystem kann der Erreger andere Teile des Körpers besiedeln und dann zu schweren Erkrankungen führen. Bei 2 bis 10 Prozent der Patienten verläuft die Infektion tödlich, bei etwa 15 Prozent entstehen bleibende Folgeschäden.

Bis heute fand man mehr als 90 verschiedene Serotypen von *S. pneumoniae*, die vielen Menschen das Leben kosteten. Zwar gibt es bereits seit 1983 einen gegen 23 der Serotypen wirkenden Polysaccharidimpfstoff. Aber auch hier besteht wieder das Problem, dass sich damit kleine Kinder – die anfälligste Gruppe – nicht effektiv impfen lassen. Eine Verbesserung erbrachte der erste Konjugatimpfstoff, der sieben Serotypen abdeckte und im Jahr 2000 in den USA eingeführt wurde. Heute empfiehlt die STIKO die Impfung aller Neugeborenen ab dem 2. Lebensmonat und seit Kurzem auch für Menschen ab 60 Jahren. Der aktuell erfolgreichste Impfstoff ist Prevenar 13 von Pfizer; er schützt vor 13 *S. pneumoniae*-Serotypen.

Warum gibt es aber nicht noch weitere derartige Impfstoffe? Diese Frage stellt sich auch deshalb, weil derzeit immer mehr Bakterien gegen Antibiotika resistent werden. Leider handelt es sich bei der Entwicklung einer solchen Vakzine um einen extrem aufwändigen und teuren Prozess. So dauerte jene des Pneumokokkenimpfstoffs Prevenar mehr als 20 Jahre und kostete fast eine Milliarde Euro. Der riesige finanzielle und zeitliche Aufwand liegt teilweise im Aufbau der Konjugatimpfstoffe begründet. Die derzeitigen verfügbaren bestehen aus drei Komponenten: Polysaccharid, Trägerprotein und **Adjuvans**.

Das Polysaccharid-Antigen als charakteristische Struktur auf der Bakterienoberfläche wird in einem sehr arbeitsintensiven Prozess durch Reinigung und Entgiftung gezüchteter Bakterien gewonnen. Dabei fällt eine Mischung verschiedener Polysaccharide an, weshalb der Impfstoff nicht durch eine eindeutige chemische Zusammensetzung definiert ist,

sondern nur durch den Herstellungsprozess. Diese Zuckermoleküle werden chemisch an ein Trägereiweiß gebunden, welches das Immunsystem erkennt. Die Immunantwort aktiviert dadurch neben B-Zellen auch T-Zellen, die einen längeren Schutz garantieren. Zudem verstärken in allen derzeit verwendeten Impfstoffen hinzugefügte Aluminiumsalze als Adjuvanzien die Immunreaktion.

Dieser bisher verwendete Herstellungsweg für Kohlenhydrat-Konjugatimpfstoffe hat mehrere Schwachpunkte. Die Polysaccharide von der Zelloberfläche gezüchteter Bakterien zu isolieren, ist zwar konzeptionell einfach, aber technisch extrem anspruchsvoll. Manche Erreger wachsen überhaupt nicht und andere nur schlecht in Kultur, und oft ist eine gute Aufreinigung der Zuckermoleküle nicht möglich. Die Trägereiweiße sind, anders als die Zucker, temperaturempfindlich, weshalb die Impfpräparate durchgehend gekühlt werden müssen, was in heißen Entwicklungsländern ungefähr die Hälfte der Kosten ausmacht. Zudem schützen die Patente nur die Produktionsprozesse und nicht den eigentlichen Impfstoff, so dass Nachahmerimpfstoffe (Generika) den langwierig entwickelten Produkte relativ schnell Konkurrenz

Glossar

- **Adjuvanzien** verstärken die Immunantwort eines Impfstoffs, indem sie eine entzündungsartige Reaktion hervorrufen.
- **Antikörper** sind Proteine, die in Wirbeltieren als Reaktion auf so genannte Antigene von einer Klasse weißer Blutzellen, den B-Lymphozyten, im Dienste des Immunsystems gebildet werden.
- **Konjugatimpfstoffe** bestehen aus dem Zuckerantigen der Bakterienhülle eines Krankheitserregers, das an ein Eiweiß gebunden vorliegt. Sie erzeugen eine stärkere und länger anhaltende Immunantwort als das unkonjugierte Antigen, vor allem bei Säuglingen und Kleinkindern.
- **Lebendimpfstoff** besteht im Gegensatz zum **Totimpfstoff** aus funktionsfähigen Keimen. Sie sind so abgeschwächt, dass sie sich zwar noch vermehren, die Krankheit jedoch bei immunkompetenten Impfungen nicht mehr auslösen können.
- **Polysaccharide** oder **Glykane** sind Kohlenhydrate aus mindestens zehn Einfachzuckern; kürzere heißen Oligosaccharide.
- **Serotypen** bezeichnen Variationen innerhalb von Spezies von Bakterien oder Viren, die sich auf molekularer Ebene durch Oberflächenantigene wie Zucker und Eiweiße unterscheiden.
- **T-Zellen** oder **T-Lymphozyten** sind weiße Blutzellen, die im Thymus ausreifen und ein Teil der erworbenen Immunantwort sind.



Ein solcher automatisierter Glykan-Array-Drucker stellt Zucker-Chips her, indem er Glaträger mit vielen verschiedenen Zuckermolekülen von Krankheitserregern bestückt. Damit lassen sich etwa Blutproben von Patienten für die medizinische Diagnostik untersuchen sowie Impfstoffkandidaten identifizieren.

machen können. Und schließlich sind die bisher eingesetzten Aluminiumsalz-Adjuvanzen nicht unumstritten, da über allerlei mögliche Nebeneffekte spekuliert wird.

Daher suchen Forscher nach neuen, präzise definierten Impfstoffen mit eindeutiger chemischer Struktur und ohne Eiweißanteil, die im Optimalfall auch nicht einmal mehr gespritzt werden müssten. Solche »Designerimpfstoffe« wären der Endpunkt einer Entwicklung, die beginnend von Jenners Lebendimpfstoff hin zu chemisch exakt aufgebauten Zelloberflächenmolekülen führt.

Bereits in den 1980er Jahren erwogen Forscher erstmals, Kohlenhydrat-Konjugatimpfstoffe chemisch herzustellen. Mehrfachzucker mit verzweigten Ketten und komplizierter dreidimensionaler Struktur, wie sie in der Natur vorkommen, zu synthetisieren, stellte sie aber vor eine zu große technische Herausforderung. Selbst Ketten aus vier oder fünf Einzelzuckern beschäftigten jahrelang mehrere Chemiker. In einem speziellen Fall konnten Forscher in Kuba einen Trick anwenden und durch Polymerisation eines Bausteins verschieden lange Zuckerketten von *Haemophilus influenzae*-Bakterien chemisch erzeugen. Dies lieferte die Grund-

lage des ersten teilweise synthetischen Kohlenhydrat-Konjugatimpfstoffs (Quimi-Hib), der inzwischen auch in verschiedenen Ländern Südamerikas eingesetzt wird.

Die chemische Herstellung von Mehrfachzuckern blieb lange der entscheidende technische Flaschenhals. Dagegen wurde in den 1970er und 1980er Jahren die Synthese von Eiweißteilen (Peptiden) und kurzen Stücken des Erbguts DNA, so genannten Oligonukleotiden, zunehmend automatisiert. Die Idee des amerikanischen Chemikers Robert Bruce Merrifield (1921–2006), eine Peptidkette an kleine Plastikkügelchen anzuheften, erleichterte hier den Herstellungsprozess immens und beschleunigte ihn von Monaten oder Jahren auf Stunden bis Tage. 1984 erhielt Merrifield dafür den Nobelpreis für Chemie. Da Zuckerketten aber nicht nur linear, sondern oft verzweigt sind und daher eine kompliziertere dreidimensionale Molekülstruktur besitzen als Eiweiße oder Nucleinsäuren, stellte ihre Herstellung eine noch viel größere Herausforderung dar.

Von Grund auf neu konzipiert

Um die chemische Synthese komplexer Zucker zu vereinfachen und zu beschleunigen, entwickelten wir am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam nach und nach alle Aspekte des Syntheseprozesses systematisch neu: etwa die Trägerstoffe sowie die Verbindungen zwischen Träger und Zucker, aber auch neuartige Einzelzuckerbausteine, die sich wie Perlen auf einer Kette chemisch aneinanderreihen lassen. Der Herstellungsprozess wurde damit zu einer sich fortlaufend wiederholenden Abfolge von Reaktionen, die verschiedene Bausteine zusammensetzen und Verzweigungen zulassen. Solche Abläufe eignen sich sehr gut für die Automation. Ein entsprechend umgebauter Peptidsyntheseautomat erlaubte schließlich die

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Impfen« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/impfen



Herstellung eines Mehrfachzuckers in Stunden anstelle von Wochen. Bis die Technologie marktreif wurde, dauerte es allerdings noch zwölf Jahre. Erst seit 2014 werden kommerzielle Kohlenhydrat-Syntheseautomaten in Forschungslaboren weltweit eingesetzt (siehe Bild S. 30).

Dieser technische Fortschritt erlaubt eine ganz andere, gezieltere Herangehensweise an die Impfstoffentwicklung, indem chemisch hergestellte Zucker die aus Bakterienkulturen isolierten Polysaccharidmischungen ersetzen. Mit Hilfe der verbesserten Synthesetechnik konnten wir in den letzten Jahren unter anderem die Immunreaktionen gegen verschiedene Zelloberflächenglykane systematisch untersuchen. Vor allem aber haben wir die Zuckerstrukturen vieler pathogener Bakterien synthetisiert. Neben den oben beschriebenen Meningokokken und Streptokokken, gegen die bereits Impfstoffe aus isolierten Kohlenhydraten vorliegen, konzentrieren wir uns auf so genannte Krankenhauskeime wie *Clostridium difficile*, die seit einigen Jahren eine zunehmende, schwer zu bekämpfende Bedrohung darstellen. Untersuchungen an unserer Abteilung zeigten, dass bereits relativ kurze, aus drei bis sechs Bausteinen bestehende Zuckerketten (Oligosaccharide) eine gute Immunantwort hervorrufen und Tiere komplett vor solchen Erregern schützen.

Viel versprechende Resultate ließen sich auch bei Parasiten erzielen. Mittels chemischer Nachbildung eines Mehrfachzuckers von der Zelloberfläche des Malariaerregers stellten wir 2008 fest, dass Menschen in Malariaebieten ab einem Alter von zwei Jahren Antikörper gegen diesen Oberflächenzucker bilden. Für unsere Versuche stellten wir »Zucker-Chips« her: Wir brachten mit einem Tintenstrahldrucker kleinste Mengen der synthetisch hergestellten Moleküle auf eine Oberfläche auf, wo sie chemisch fest verankert wurden. Dann benötigt man nur noch fünf Mikroliter Blut, die für wenige Minuten mit dem Chip in Kontakt kommen. Nach kurzem Abwaschen der Probe lassen sich die in ihr enthaltenen Antikörper, die teilweise auf den Zucker-Chips kleben geblieben sind, mit speziellen Farbstoffen detektieren (siehe Grafik). Diese Methode erlaubte es uns, dank ihres hohen Durchsatzes Tausende menschlicher Seren zu untersuchen und nachzuweisen, dass eine Immunantwort im Menschen gegen das Malariazell-Oberflächenglykan vor der schweren Erkrankung schützen kann. Dabei töten die Antikörper den Parasiten nicht, sondern blockieren nur die

entzündungsfördernde Wirkung dieses Zuckertoxins. Eine Malariaimpfung mit einem Zuckerkonjugatimpfstoff sollte daher entsprechend erfolgreich sein. Und tatsächlich: Erste Impffexperimente an Mäusen schützten 75 bis 95 Prozent der Tiere vor dem sonst sicheren Tod durch den Erreger. Die Kosten für die Herstellung des Impfstoffkandidaten waren dabei mit wenigen Cent pro Impfung extrem günstig. Weiterführende, sehr viel versprechende Tests wurden zwar zunächst trotzdem wegen kommerzieller Bedenken abgebrochen, aber Anfang 2015 an unserem Max-Planck-Institut wieder aufgenommen.

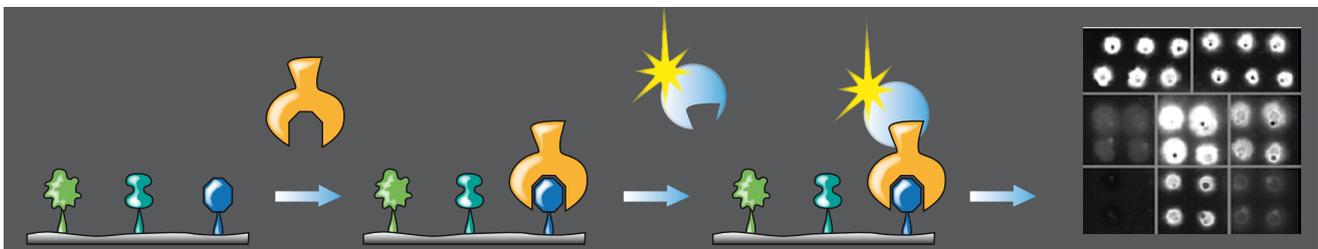
Da sich Kohlenhydrat-Konjugatimpfstoffe bisher vor allem gegen Bakterien bewährten, konzentrierten wir jedoch unsere Anstrengungen auf weitere tödliche Bakterieninfektionen. Dafür gab es bereits einige Erfolg versprechende Ansatzpunkte, denn inzwischen war die Struktur der Oberflächenzucker vieler solcher Bakterien bekannt. In den vergangenen fünf Jahren haben wir daher unter anderem Impfstoffkandidaten gegen *Streptococcus pneumoniae* und *Clostridium difficile* entwickelt. Letzteres tritt auch in Deutschland vermehrt als antibiotikaresistenter Krankenhauskeim auf.

Automatisierte Suche nach Impfstoffkandidaten

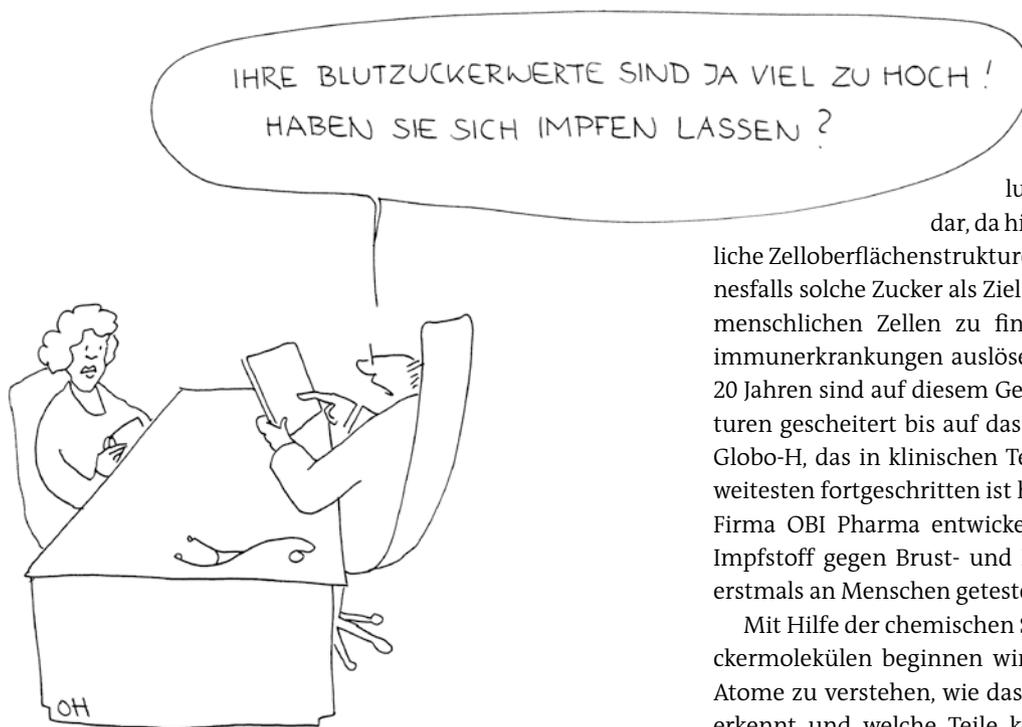
Die Entwicklung synthetischer Impfstoffe folgt immer dem gleichen Prinzip. Mit Hilfe der automatisierten Zuckersynthese produziert man verschiedene Oligosaccharide, die entweder komplette sich wiederholende Sequenzen der Zelloberfläche beinhalten oder Teile davon. Diese Zucker werden auf Oberflächen gedruckt, um Zucker-Chips zu erhalten. Mit deren Hilfe lässt sich Blut untersuchen oder – etwa im Fall des Darmbakteriums *C. difficile* – Stuhl von Patienten. Die Methode identifiziert Zuckermoleküle, auf die das menschliche Immunsystem reagiert. Diese Mehrfachzucker werden daraufhin als Konjugate an Mäusen oder Hasen getestet. Bisher ergaben alle solche Impfstudien viel versprechende Kandidaten für klinische Tests.

Im Idealfall sollten die Zuckerimpfstoffe aber molekular vollständig definiert sein, was bei Trägerproteinen nicht der Fall ist, da die Zuckerreste an verschiedenen gleichartigen Aminosäuren andocken können. Daher ersetzen wir die bisherigen Proteine durch Glykolipide, die aus einem Fettanteil und einem Einfachzucker zusammengesetzt sind. Auf diese

So funktioniert ein Zucker-Chip: Erkennt ein zugegebener Antikörper (orange) eines der Zuckermoleküle darauf, macht ein weiteres, an einen Fluoreszenzfarbstoff gebundenes Protein (blau) dies sichtbar.



STUDIUM DER WISSENSCHAFT / BLSKE-GRAFIK;
FLUORENZBILD RECHTS: PETER H. SEEBERGER



Moleküle reagieren natürliche Killerzellen, die zum angeborenen Immunsystem gehören. Synthetische Oligosaccharide, die direkt an Glykolipide gebunden sind, rufen bereits ohne den Zusatz eines Aluminiumadjuvans eine sehr gute und spezifische Immunantwort hervor. Da diese Impfstoffmoleküle keinen Eiweißanteil beinhalten, wird in Zukunft auch keine Kühlkette mehr benötigt. Vor allem Entwicklungsländer dürften hier von immensen Kosteneinsparungen profitieren.

Impfen gegen Krebs – eine besondere Herausforderung

Derzeit sind mehrere teilweise oder vollständig synthetische Zuckerimpfstoffkandidaten in verschiedenen Stadien der Erprobung. Da jedoch die Kosten der klinischen Tests für Universitäten oder wissenschaftliche Einrichtungen zu hoch sind, stellt die kommerzielle Entwicklung den einzigen realistischen Weg zum Einsatz bei Menschen dar. Die wenigen verbleibenden großen Impfstofffirmen scheuen aber meist das damit verbundene finanzielle Risiko, weshalb vorwiegend Start-up-Unternehmen an neuartigen Impfstoffen arbeiten. So entwickelt die kürzlich gegründete Firma Vaxxilon in Berlin vollsynthetische Kohlenhydrat-Konjugatimpfstoffe gegen Krankenhauskeime und andere bakterielle Pathogene. Dort und am Potsdamer Max-Planck-Institut testen Forscher derzeit viel versprechende synthetische Impfstoffkandidaten. In Tierexperimenten schnitten synthetische Varianten von drei Oberflächenpolysacchariden des Krankenhauskeims *C. difficile*, an dem derzeit jährlich in den USA und der EU jeweils rund 20 000 Menschen sterben, sehr erfolgreich ab. Und vollsynthetische Impfstoffkandidaten ge-

gen Pneumokokken stehen kurz vor der klinischen Erprobung.

Eine besondere Herausforderung stellt die Entwicklung von Vakzinen gegen Krebs dar, da hier die Immunreaktion menschliche Zelloberflächenstrukturen angreift. Daher darf man keinesfalls solche Zucker als Ziel wählen, die auch auf gesunden menschlichen Zellen zu finden sind, was schwere Autoimmunerkrankungen auslösen könnte. In den vergangenen 20 Jahren sind auf diesem Gebiet alle kleineren Zuckerstrukturen gescheitert bis auf das aus sechs Zuckern bestehende Globo-H, das in klinischen Tests gut abgeschnitten hat. Am weitesten fortgeschritten ist hier der von der taiwanesischen Firma OBI Pharma entwickelte halbsynthetische Globo-H-Impfstoff gegen Brust- und Prostatakrebs, der bereits 1995 erstmals an Menschen getestet wurde.

Mit Hilfe der chemischen Synthese einer Vielzahl von Zuckermolekülen beginnen wir nun auf der Ebene einzelner Atome zu verstehen, wie das Immunsystem Polysaccharide erkennt und welche Teile komplexer Zuckermoleküle für eine spezifische Antwort nötig sind: Sind es Bausteine, die nur auf Erregeroberflächen und nicht im Menschen vorkommen? Sind es die Seitenketten, welche die Zucker verändern? Brauchen wir lange Ketten, um bestimmte dreidimensionale Formen zu erzeugen? Umfassende Antworten darauf gibt es noch nicht. Aber die neuen, grundlegenden Erkenntnisse werden uns helfen, in Zukunft Kohlenhydrate zu Impfstoffen präzise am Reißbrett zu entwerfen. ~

DER AUTOR



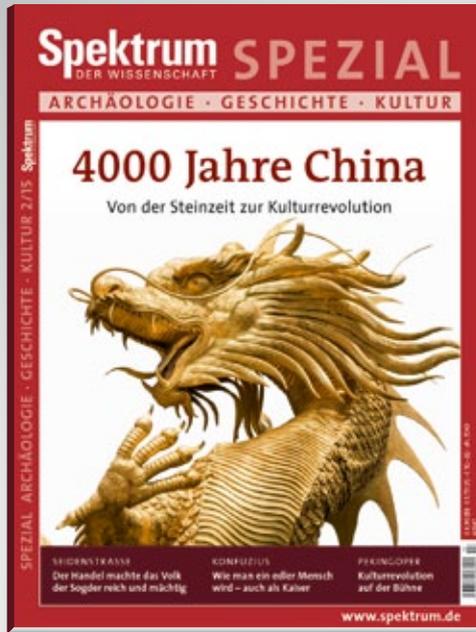
Peter H. Seeberger beschäftigt sich seit fast 20 Jahren mit der Chemie und Biologie der komplexen Zucker. Nach Professuren am MIT (Cambridge, USA) und an der ETH Zürich ist er seit 2009 Direktor der Abteilung für Biomolekulare Systeme am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam sowie Professor an der Freien Universität Berlin und an der Universität Potsdam.

QUELLEN

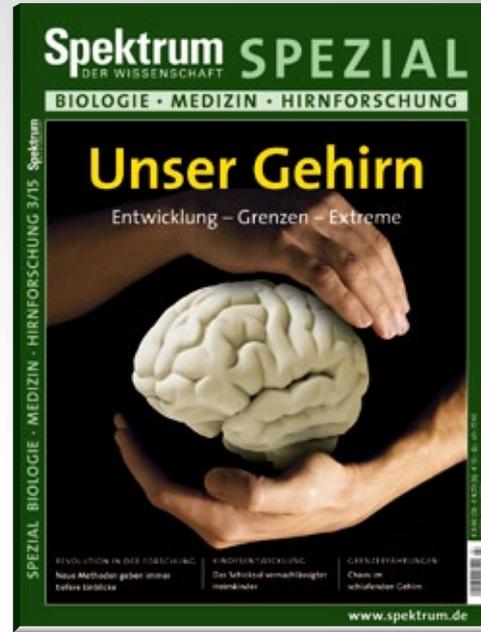
- Anish, C. et al.:** Chemical Biology Approaches to Designing Defined Carbohydrate Vaccines. In: *Chemistry & Biology* 21, S. 38–50, 2014
- Cavallari, M. et al.:** A Lipid-Carbohydrate Conjugate Vaccine Elicits Long-Lasting Anti-Carbohydrate Antibodies that Protect Against *Streptococcus pneumoniae*. In: *Nature Chemical Biology* 10, S. 950–956, 2014
- Kamena, F. et al.:** Synthetic GPI Array to Study Antitoxic Malaria Response. In: *Nature Chemical Biology* 4, S. 238–240, 2008
- Martin, C.E. et al.:** Immunological Evaluation of a Synthetic *Clostridium difficile* Oligosaccharide Conjugate Vaccine Candidate and Identification of a Minimal Epitope. In: *Journal of the American Chemical Society* 135, S. 9713–9722, 2013
- Plante, O.J., Palmacci, E.R., Seeberger, P.H.:** Automated Solid-Phase Synthesis of Oligosaccharides. In: *Science* 291, S. 1523–1527, 2001

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1351054

Unsere Neuerscheinungen



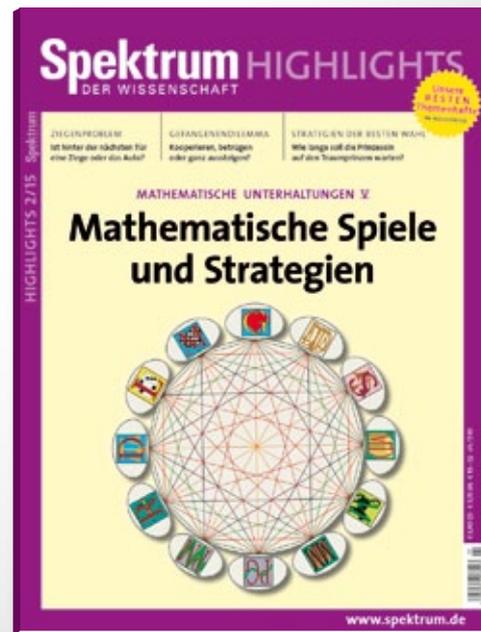
Loulan – Königreich der Wüste • Im Bann der Großen Mauer • Konfuzius: Was du nicht willst, das man dir tu ... • Das vergessene Reich der Jinsha • Marco Polo: Rehabilitation eines Forschungsreisenden • € 8,90



Die Sprache des Gehirns • Im Kopf herrscht niemals Ruhe • Hirnstimulation: Unter Strom • Die genetische Kartierung des menschlichen Gehirns • € 8,90



Warum Intimität Grenzen braucht • Online-Partnerbörsen: Chancen und Gefahren • Von Hetero bis Homo: Wie wir unsere sexuelle Orientierung finden • € 8,90



Neidfreies Teilen: Gerechtigkeit unter Gaunern • Fehler korrigierender Code: Das Hutproblem • Iteriertes Gefangenendilemma: Altruismus mit Kündigungsmöglichkeit • € 8,90

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code per Smartphone scannen!



Blick hinter den Vorhang

Forscher sehen mit Licht in Materialien, die dafür eigentlich undurchlässig sind. Selbst vom Innenleben biologischer Gewebe gelingen immer klarere Bilder.

Von Zeeya Merali

Es schien zu gut, um wahr zu sein. Nur aus Neugier schoss Allard Mosk 2007 Laserlicht auf ein mit weißer Farbe bestrichenes Glasplättchen. Der Physiker von der niederländischen Universität Twente in Enschede und sein Student Ivo Vellekoop hatten den Strahl so eingestellt, dass sich seine einzelnen Wellen hinter der Glasbarriere zu einem Lichtfleck überlagern sollten. Dabei hatten sie keine bestimmte Anwendung im Sinn. »Ich wollte nur einmal ausprobieren, was noch niemand zuvor getan hatte«, erzählt Mosk. Auf dem Schirm des Detektors erwarteten die beiden Forscher nicht viel mehr als einen blassen Lichtschimmer.

Doch es kam anders: Gleich beim ersten Versuch zeigte sich ein deutlicher Lichtpunkt – 100-mal heller, als die beiden erhofft hatten. »So etwas passiert nicht einfach zufällig am ersten Tag deines Experiments«, kommentiert Mosk. »Wir dachten, uns wäre ein Fehler unterlaufen. Vielleicht war das Glasplättchen beschädigt, so dass Licht hindurchdringen konnte.«

Es gab aber keine durchlässige Stelle. Stattdessen wurde ihr Versuch der erste, der einen vollkommen neuen Forschungsansatz demonstrierte: eigentlich lichtundurchlässige Materialien zu durchleuchten. Auch eine andere Arbeitsgruppe vollbrachte in jenem Jahr ein vergleichbares Kunststück. Heute hat es die Methode zwar noch immer nicht aus den Laboren herausgeschafft, doch die Wissenschaftler machen rasante Fortschritte. Selbst Aufnahmen durch dünnes Gewebe hindurch, wie etwa Mäuseohren, gelingen ihnen inzwischen. Nun geht es darum, auch dickere Schichten zu durchdringen. Das hätte zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten zur Folge: Aufnahmen aus dem Inneren des Körpers mit sichtbarem Licht könnten viele Biopsien und andere invasive

Untersuchungen ersetzen. Und mit Hilfe von fokussiertem Laserlicht ließen sich auch Aneurysmen im Gehirn oder Tumoren behandeln, ohne zum Messer greifen zu müssen. Doch dafür müssen die Forscherteams noch weitere Herausforderungen meistern, etwa den Umgang mit Geweben, die sich bewegen oder dehnen.

»Noch vor zehn Jahren waren Aufnahmen des Körperinneren im optischen Bereich unvorstellbar, selbst mit einer Auflösung von nur einem Zentimeter. Doch nun ist genau das möglich«, berichtet Lihong Wang von der Washington University in St. Louis, Missouri. »Auch wenn Sie mich für verrückt halten – aber ich glaube, dass wir irgendwann das gesamte Körperinnere im sichtbaren Licht abbilden können«, so der Medizintechniker.

Photonen im Gewebeflipper

Zwar können Ärzte etwa mit Röntgenstrahlen und Ultraschall bereits in ihre Patienten hineinsehen. Doch der Bereich optischer Wellenlängen dürfte grundlegend andere Bilder ermöglichen. Denn Licht aus diesem Bereich des Spektrums wechselwirkt besonders stark mit organischen Molekülen. Daher trägt es nach dem Durchgang durch Gewebe wertvolle Informationen über biochemische Vorgänge mit sich.

Gleichzeitig machen diese Wechselwirkungen das sichtbare Licht aber auch anfällig dafür, im durchlaufenen Material gestreut oder absorbiert zu werden. Absorption lässt jeden Abbildungsversuch scheitern. Das Material verschluckt dann die Lichtteilchen und mit ihnen alle transportierte Information. Nach Streuprozessen gibt es dagegen noch einen Hoffnungsschimmer. Viele Materialien – etwa Haut, weiße Farbe oder Nebel – sind opak, weil auftreffende Photonen darin so oft abgelenkt werden, bis sie schließlich völlig durcheinandergewirbelt sind (siehe »Transparenz durch Nässe«, SdW 6/2015, S. 42). Verloren gehen sie dabei allerdings nicht. Im Prinzip ließe sich das Durcheinander also wieder ordnen.

Für ein ähnliches Problem haben Astronomen bereits vor einigen Jahren eine Lösung gefunden. Turbulenzen in der Atmosphäre verzerren die Aufnahmen, die Bodenobservatorien von Sternen, Planeten und Galaxien machen. Diese Störeffekte lassen sich mit Hilfe einer adaptiven Optik kompensieren (siehe Artikel auf S. 42). Dazu beobachten die Himmelforscher das Licht eines hellen Referenzsterns und berechnen mit einem Algorithmus, wie die Luftströmungen

AUF EINEN BLICK

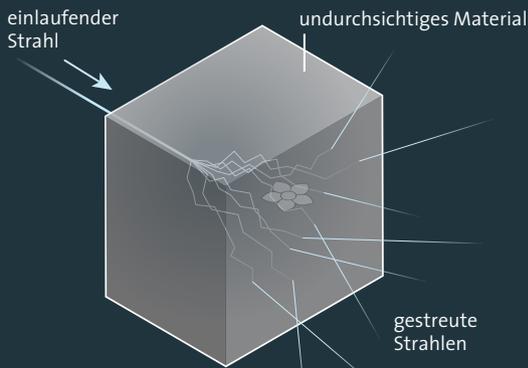
DEN SCHLEIER LÜFTEN

- 1 In opaken Gegenständen laufen **Lichtteilchen** so wirr umher, dass Details aus ihrem Inneren bislang verborgen blieben.
- 2 Mit **neuen optischen und computertechnischen Methoden** dringen Wissenschaftler immer besser durch das Diffuse und erreichen die versteckten Strukturen.
- 3 Damit könnten sie in Zukunft sichtbares Licht zielgenau sogar durch das Innere des Körpers steuern und so ganz neue **medizinische Bildgebung** und **therapeutische Verfahren** ermöglichen.

Körpergewebe ist normalerweise undurchlässig für sichtbares Licht. Doch neue Techniken könnten es bald schon erlauben, Details unter der Haut sichtbar zu machen.

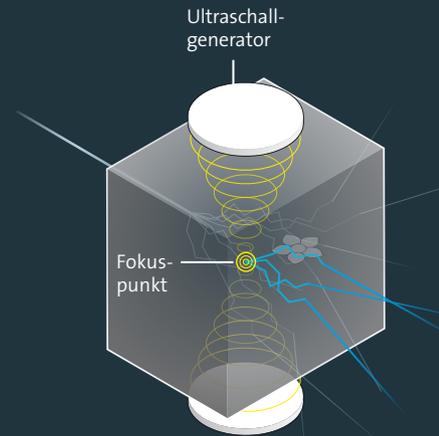


Wie ein Leuchtturm im Inneren



Lichtdurcheinander

In vielen lichtundurchlässigen Materialien, wie lebendem Gewebe, weißer Farbe oder Nebel, wird das Licht nicht absorbiert. Stattdessen wirbeln Streuvorgänge die Photonen so sehr durcheinander, dass kein Abbild des Inneren entsteht.



Ultraschallfokus

Ein Ultraschallstrahl (gelbe Ringe) wird auf einen Punkt innerhalb des Materials fokussiert. Jegliches Licht, das ihn passiert, erfährt eine leichte Verschiebung seiner Frequenz (blaue Strahlen).

NATURE / JASIEK KRZYWOSTOJAK, NATURE 518, S. 188-190, 2015

dessen punktförmiges Abbild verschmieren. Der Computer steuert einen speziellen verformbaren Spiegel, der die atmosphärischen Störeffekte ausgleicht – bis die Aufnahme des Leitsterns wieder einen Punkt zeigt. Dadurch bildet das Teleskop nun auch andere Objekte im Blickfeld scharf ab.

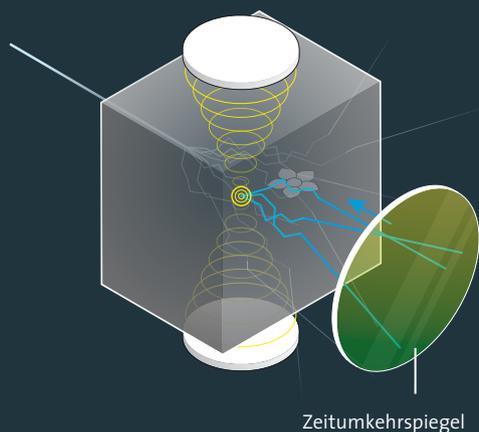
Leider lässt sich dieses Verfahren nicht einfach auf die Medizin übertragen. Zum einen leuchten die Objekte in biologischem Gewebe nicht wie Sterne und müssen von außen angestrahlt werden. Zum anderen liegen die Streuzentren viel dichter zusammen als in der Erdatmosphäre. »Um die Lichtstreuung in einer Eierschale auszugleichen, bräuchte man das Pendant zu einem deformierbaren Spiegel mit Milliarden von beweglichen Teilen«, erklärt der Physiker Ori Katz vom Institut Langevin in Paris. Aus diesem Grund rechneten Mosk und Vellekoop zunächst auch nicht wirklich mit einem Erfolg.

Die beiden Wissenschaftler setzten bei ihren Experimenten einen so genannten räumlichen Lichtmodulator ein. Mit diesem Gerät lässt sich präzise steuern, welche Teile eines Lichtstrahls wann hindurchgelassen werden. Nachdem das Laserlicht den Modulator durchquert hatte, richteten es Mosk und Vellekoop auf das angemalte Glasplättchen und überwachten, wie viel davon auf einen Detektor hinter dem Hindernis traf. Mit einer speziellen Software variierten die Forscher anschließend allmählich die Durchlässigkeit von jedem Punkt des Modulators. Letztlich prägten sie dem einfallenden Licht durch fortlaufendes Ausprobieren immer stärker ein Muster auf, das die Helligkeiten und Zeitverzögerungen beim Durchlaufen der diffusen Barriere zunehmend ausglich. Mosk

und Vellekoop ließen ihren Algorithmus rund eine Stunde lang laufen. Das Resultat übertraf all ihre Erwartungen: Der Lichtfleck strahlte 1000-mal heller als seine Umgebung. »Das Experiment von Mosk war ein Aha-Erlebnis«, sagt Katz. »Es änderte alle Vorstellungen darüber, was man mit sichtbarem Licht anstellen kann.«

Kurz nach seinem Triumph erfuhr Mosk von ähnlichen Experimenten, die der Bioingenieur Changhuei Yang und dessen Team am California Institute of Technology in Pasadena durchgeführt hatten. Die Gruppe setzte allerdings nicht nur ein anderes Verfahren ein, um gestreutes Licht wieder zu fokussieren, sondern verwendete auch ein anderes Material: eine dünne Scheibe Hähnchenbrust. Auch diese Forscher waren überrascht, wie gut ihnen das Vorhaben glückte. »Ich hatte gedacht, wir verbringen einfach mal sechs Monate damit, und wenn es nicht funktioniert, dann verbuchen wir es als Lernerfahrung«, erinnert sich Yang. »Aber dann war es gar nicht so schwer.«

Die beiden Teams berichteten in Fachzeitschriften über ihre Arbeiten, und schon wenig später widmeten sich viele weitere Physiker dieser Forschungsrichtung. Einer von ihnen war Jacopo Bertolotti, der 2010 nach Enschede kam, um dort mit Mosk und seinen Kollegen zusammenzuarbeiten. Gelockt habe ihn damals die »Schönheit des Experiments« und auch das Potenzial für die medizinische Bildgebung, so Bertolotti, der inzwischen an der University of Exeter in Großbritannien forscht. Auch wenn ihm klar war, dass dieses Ziel noch in weiter Ferne lag.

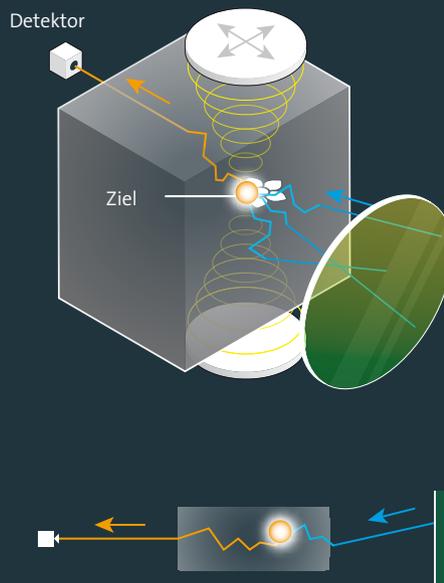


Zeitumkehrspiegel



Zeitumkehr

Ein »phasenkonjugierender« Spiegel reflektiert ausschließlich das frequenzverschobene Licht genau entgegen der Einfallsrichtung, so dass die Lichtteilchen denselben Weg zurück nehmen. Am Fokus des Ultraschalls entsteht so ein intensiver Leuchtpunkt.



Materialscan

Wenn der Leuchtpunkt mit dem Fokus durch das Material wandert und dabei ein fluoreszenzmarkiertes Ziel trifft, senden die Strukturen ein messbares Signal aus. So ergibt sich Punkt für Punkt ein Abbild des Inneren.

Im ursprünglichen Versuchsaufbau von Mosk befindet sich die Kamera hinter dem undurchsichtigen Material – ein großes Problem für medizinische Anwendungen. Schließlich müsste der Detektor unter die Haut eines Patienten gebracht werden. 2012 entwickelte das Team um Bertolotti und Mosk jedoch einen Ansatz, bei dem sich sowohl die Laserlichtquelle als auch die Kamera vor der Barriere befinden.

Ordnung aus hellem Durcheinander

Als Testobjekt wählten sie einen nur 50 Mikrometer großen, fluoreszierenden griechischen Buchstaben π , den sie hinter einem dünnen Schirm versteckten. Das stellte bereits eine gewisse Ähnlichkeit zu realen Gewebeuntersuchungen her: Das abzubildende Motiv war etwa so groß wie eine Zelle, und bei vielen etablierten bildgebenden Verfahren verwenden Mediziner ebenfalls Fluoreszenzfarbstoffe in biologischen Strukturen. Als die Forscher den Laser einschalteten, wanderten die Photonen auf Zickzackwegen durch den Schirm und tauchten das π in ein diffuses Licht. Die Fluoreszenzphotonen, die der Buchstabe daraufhin aussandte, schlängelten sich zurück durch den Schirm und riefen auf der anderen Seite ein verschwommenes Fleckenmuster hervor – als würde man durch einen Duschvorhang sehen.

Trotzdem war die exakte Form des π noch im Streulicht enthalten. Um sie zu rekonstruieren, schoss das Team den Laserstrahl aus verschiedenen Winkeln auf den Schirm und erfasste jeweils das beobachtete Lichtmuster. Nach vielen Durchgängen verglich ein Computerprogramm die Aufnah-

men Punkt für Punkt und berechnete die Gemeinsamkeiten. Anhand dieser Daten konnten Bertolotti und Musk den verborgenen Buchstaben sichtbar machen.

Das war zwar ein Fortschritt, aber noch nicht realitätsnah genug, erklärt Bertolotti. »Es funktioniert nur, wenn sich das Objekt auf der anderen Seite des streuenden Mediums befindet.« Doch bei vielen medizinischen Anwendungen liegt das Zielobjekt innerhalb des Gewebes, beispielsweise bei einem Blick in ein Blutgefäß oder ins Gehirn (für die Perspektiven solcher Methoden in der Hirnforschung siehe SdW 3/2015, S. 22).

Eine Reihe von Forschungsgruppen, einschließlich derjenigen von Yang und Wang, arbeitet daher daran, auch Objekte innerhalb eines streuenden Mediums abzulichten. Yangs Team bildete 2013 ein nur einen Mikrometer dickes, fluoreszierendes Kügelchen ab, das zwischen zwei diffus streuenden Schichten eingeklemmt war. Dazu beleuchteten Yang, der Biologe Benjamin Judkewitz und weitere Kollegen das blickdichte Material mit einem Laser. Licht, das es auf die andere Seite geschafft hatte, reflektierten sie mit einem so genannten phasenkonjugierenden Spiegel, der gewissermaßen die Zeit umkehrt. Er schickt jeden Strahl unter dem gleichen Winkel zurück in das Material, wie er gekommen ist (siehe Illustrationen oben auf dieser Doppelseite). Das Licht durchquert es dann gegenläufig auf demselben Weg und tritt genau entgegengesetzt zur Einfallsrichtung wieder aus. Unterzöge man nun jedoch alle Strahlen dieser Prozedur, würden schlicht sämtliche Streuprozesse rückgängig gemacht. Um das zu verhindern, fokussierte das Team Ultraschallwellen –

die nicht so leicht gestreut werden – auf einen Punkt im Medium. Passierte nun Licht diese Stelle, verschob sich dessen Frequenz geringfügig.

Den Zeitumkehrspiegel auf der gegenüberliegenden Seite stellten die Forscher so ein, dass er nur die leicht abgeänderten Lichtwellen zurückwarf. Das Resultat war ein dünner Strahl, der erneut durch den Ultraschallfokus lief und sich dort mit den Lichtwellen aus der ursprünglichen Einfallsrichtung überlagerte. Dadurch erhöhte sich die Intensität an dieser Stelle – »wie eine kleine Lampe in der Wand«, kommentiert Judkewitz, der inzwischen an der Charité in Berlin arbeitet. Der Ultraschallfokus ließ sich sogar innerhalb des Mediums bewegen, und sobald er die Kugel streifte, fluoreszierte diese.

Aus dem Labor in die Praxis

In tiefe Gewebeschichten lässt sich mit dieser Technik allerdings noch nicht blicken. Obendrein bewegen Blutfluss und Atmung diese Bereiche, was eine weitaus größere Herausforderung darstellt. »Von medizinischen Anwendungen sind wir noch immer weit entfernt, da die Verfahren meist nur funktionieren, wenn das Streumedium absolut still steht«, sagt Mathias Fink vom Institut Langevin. Der Physiker forschte in den 1990er Jahren an einer Variante der Zeitumkehrmethode, die nur auf Ultraschall basierte.

Indessen gelingen die Aufnahmen immer schneller. Während die gesamte Prozedur bei Mosk ursprünglich etwa eine Stunde dauerte, benötigen laut Ori Katz viele Teams dafür inzwischen weniger als eine Minute. Das ist gut, wenn man eine Kugel oder den Buchstaben π abbilden will, aber für eine Untersuchung im menschlichen Körper noch immer zu langsam. Einer Forschergruppe um Katz gelang es 2014 schließlich, das Abbild eines verdeckten Objekts anhand nur einer einzigen Kameraaufnahme zu rekonstruieren. »Es ist ein bisschen wie Magie, wenn sich der Algorithmus dem endgültigen Bild annähert«, beschreibt der Physiker Sylvain Gigan aus dem Team.

Auch Wang misst Geschwindigkeit eine entscheidende Bedeutung zu: »Alles ist in Bewegung, und uns bleibt nur ein Zeitfenster im Bereich von Millisekunden, um ein Bild zu machen.« Tatsächlich reduzierten Wang und seine Kollegen in ihrer Veröffentlichung von Anfang 2015 diese Dauer auf 5,6 Millisekunden. »Das erlaubt Aufnahmen in einigen lebenden Geweben«, erläutert der Forscher. Ihr Zielobjekt bestand aus angefärbter Gelatine, die zwischen dem Ohr einer narkotisierten Maus und einer Licht streuenden Mattglascheibe eingeklemmt war. Dieses erfolgreiche Experiment mit einem lebendigen Tier sei beeindruckend, sagt Bertolotti. Gleichzeitig weist er aber darauf hin, dass der Weg von einem dünnen Mäuseohr bis zur Bildgebung in menschlichem Fleisch noch erheblich mehr Arbeit erfordern werde.

Momentan hebe sich kein bildgebendes Verfahren von den anderen ab, ergänzt der Physiker. Jedes habe Vor- und Nachteile. »Anstatt eine Methode zu entwickeln, die sich für alles eignet, werden sich vermutlich verschiedene Techniken etablieren, die eines Tages in einem Gerät kombiniert wer-

den könnten«, sagt Bertolotti. »Ich kann nicht abschätzen, wie schnell das passieren wird, aber es handelt sich um eine junge, umtriebige Forschergemeinde – es könnte also schon in wenigen Jahren so weit sein.«

Diese Verfahren hätten auch zahlreiche Einsatzgebiete jenseits der Medizin. Mosk nennt als Beispiel die Restauration von Kunstwerken. »Die tiefer liegenden Schichten eines Gemäldes haben Einfluss auf dessen chemische und physikalische Alterung. Daher wäre es wichtig zu wissen, was drinsteckt, wenn man das Bild erhalten will.« Auch in der Telekommunikationsindustrie dürften sich die Methoden als nützlich erweisen, etwa um das störende Streulicht in Lichtwellenleitern zu beseitigen. Ein weiterer naheliegender Abnehmer ist das Militär. Fink zufolge könnten Soldaten mit Hilfe der neuen Techniken durch einen tragbaren Schild sehen – entweder einen physikalischen Schutzschirm oder einen künstlichen Nebel –, der sie ihrerseits vor dem Blick des Feindes versteckt. »Man könnte andere beobachten, ohne dabei selbst gesehen zu werden.« Zumindest bis der Gegner ebenfalls solche Technologien entwickelt.

Fast alle Wissenschaftler in diesem jungen Forschungsgebiet schwärmen aufgeregt von den potenziellen Anwendungen. Für Gigan ist dabei vor allem wichtig, jeden Einsatz auch moralisch vertreten zu können. »Immer wenn wir erzählen, woran wir arbeiten, fragt irgendwann jemand nach einer App, um mit dem Smartphone durch Duschvorhänge zu sehen«, berichtet er. »Das wäre prinzipiell sogar möglich – aber wir haben nicht vor, das zu tun.«

DIE AUTORIN

Zeya Merali ist freie Wissenschaftsjournalistin in London.

QUELLEN

- Bertolotti, J. et al.:** Non-Invasive Imaging through Opaque Scattering Layers. In: *Nature* 491, S. 232–234, 2012
- Cassereau, D., Fink, M.:** Time-Reversal of Ultrasonic Fields – Part III: Theory of the Closed Time-Reversal Cavity. In: *IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 39, S. 579–592, 1992
- Judkewitz, B. et al.:** Speckle-Scale Focusing in the Diffusive Regime with Time Reversal of Variance-Encoded Light (TROVE). In: *Nature Photonics* 7, S. 300–305, 2013
- Katz, O. et al.:** Non-Invasive Single-Shot Imaging through Scattering Layers and around Corners via Speckle Correlations. In: *Nature Photonics* 8, S. 784–790, 2014
- Liu, Y. et al.:** Optical Focusing Deep inside Dynamic Scattering Media with Near-Infrared Time-Reversed Ultrasonically Encoded (TRUE) Light. In: *Nature Communications* 6, 5904, 2015
- Vellekoop, I. M., Mosk, A. P.:** Universal Optimal Transmission of Light Through Disordered Materials. In: *Physical Review Letters* 101, 120601, 2008
- Yaqoob, Z. et al.:** Optical Phase Conjugation for Turbidity Suppression in Biological Samples. In: *Nature Photonics* 2, S. 110–115, 2008

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1351072

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 518, S. 158–160, 12. Februar 2015

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft
in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt Wissenschaft in die Schulen!

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative „Wissenschaft in die Schulen!“. Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

Unterstützen Sie das Projekt

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projekts nicht möglich. Deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: www.wissenschaft-schulen.de

TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebritzer Agrarbetriebesgesellschaft mbH | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Weinmann GmbH | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Förderverein des Thomas-Mann-Gymnasiums Stutensee | Förderverein der Leibnizschule Wiesbaden e. V. | KIT Karlsruhe | Volksbank Bigge-Lenne eG | Meissner AG | Förderverein der Justus-Liebig-Schule Darmstadt | Dominique Mayer | Rotary Club Buchloe | Förderverein des Johanneum-Gymnasiums Herborn | Freundeskreis der Konrad-Duden-Realschule Mannheim | Förderverein des Eichsfeld-Gymnasiums Duderstadt | Albertus-Magnus-Gymnasium Stuttgart

Klare Sicht für Astronomen

Mit Lasern, die sie himmelwärts schickt, hat Claire Max bodengebundenen Teleskopen zu nie geahnter Präzision verholfen.

Von Ann Finkbeiner

Wenn an klaren, mondlosen Abenden die größten optischen Teleskope der Welt ihre Arbeit aufnehmen, schießen die meisten von ihnen als Erstes einen gleißenden Laserstrahl in den Himmel. Dass der Einsatz von Lasern bei astronomischen Beobachtungen heute so weit verbreitet ist, stellt eigentlich die beste Anerkennung der Arbeit von Claire Max dar. Drei Jahrzehnte dauerte ihre Kampagne, diese Methode zur Verbesserung optischer Weltraumaufnahmen zu perfektionieren und zu fördern. Am 16. Januar zeichnete die American Astronomical Society sie für ihre Leistung mit dem »Joseph Weber Award for Astronomical Instrumentation« 2015 aus. Dabei steht die Wissenschaftlerin von der University of California, Santa Cruz, nur ungern im Rampenlicht. Ihre Leidenschaft gehört allein der Technologie. »Das packt mich immer noch«, sagt sie und zeigt Bilder über Bilder von Teleskopen, Lasern und dünnen Lichtstrahlen, die geradlinig wie ein Lineal himmelwärts leuchten (siehe Foto rechts).

Die Laser sind ein entscheidender Bestandteil der adaptiven Optik von Teleskopen, welche die Auswirkungen der Turbulenzen in der Atmosphäre korrigiert. Ohne diese Technologie würden Sterne und Galaxien bei starker Vergrößerung tanzen und verzerrt werden wie Steine, die wir durch das Wasser am Grund eines Flusses sehen. Mit adaptiver Optik bleibt ihre Position stabil, und sie lassen sich scharf abbilden. So können inzwischen selbst bodengebundene Observatorien die Präzision des Hubble-Weltraumteleskops erreichen

oder gar übertreffen. Damit gelingen ihnen hochaufgelöste Aufnahmen von Monden des äußeren Sonnensystems oder von Sternen in der Mitte der Milchstraße. Mittlerweile lassen sich dank dieser Technologie sogar Teleskope mit einem Durchmesser von 20 bis 40 Metern konstruieren, Geräte also, die viermal so groß sind und 16-mal so viel Lichtleistung einfangen wie das beste heute existierende.

Von Anfang an war Max an dieser Entwicklung beteiligt: von den ersten Tests der laserunterstützten adaptiven Optik bis zum Bau des Prototyps, und schließlich an der Einrichtung eines Trainingszentrums für Astronomen, an dem sie lernen konnten, diese Technologie bei Teleskopen auf der ganzen Welt anzuwenden.

Max' größter Triumph aber wurde zugleich auch zu ihrer größten Herausforderung. Letzten Oktober, im Alter von 68 Jahren, in dem andere Forscher bereits im Ruhestand sind, stimmte die Astronomin zu, vorübergehend die University of California Observatories (UCO) zu leiten. Diese Einrichtung ist für das gesamte astronomische Instrumentarium verantwortlich, das sich im Besitz eines der größten staatlichen Universitätssysteme der Vereinigten Staaten, der University of California, befindet.

Kämpfen für die Kleinen

Drei neue Riesenobservatorien befinden sich derzeit in unterschiedlichen Planungs- und Aufbaustadien. Jedes davon trägt ein Preisschild in der Größenordnung von einer Milliarde US-Dollar. Diese Kosten, sagt Max, stellten Besitzer wie Geldgeber vor ein Dilemma. So auch die UCO als Schlüsselpartner beim Thirty Meter Telescope (TMT), dessen Bau 2014 auf dem Mauna Kea in Hawaii startete. Wie bezahlen sie nun den Betrieb all ihrer älteren, kleineren Teleskope? Sollten die Besitzer dem finanziellen Druck nachgeben und diese Einrichtungen schließen, obwohl sie nach wie vor unerlässliche Arbeitspferde für einzelne Wissenschaftler und Übungsplätze für junge Astronomen darstellen? Oder sollten sie kämpfen und kreative Wege finden, um alle Türen offen zu halten?

Ihr Bauchgefühl sagt Max: kämpfen. Und das tut sie mit der ihr eigenen einzigartigen Mischung aus Herzlichkeit, diplomatischem Einfühlungsvermögen und Entschlossenheit. Bisher gewinnt sie. »Nach drei Jahrzehnten der Überzeu-

AUF EINEN BLICK

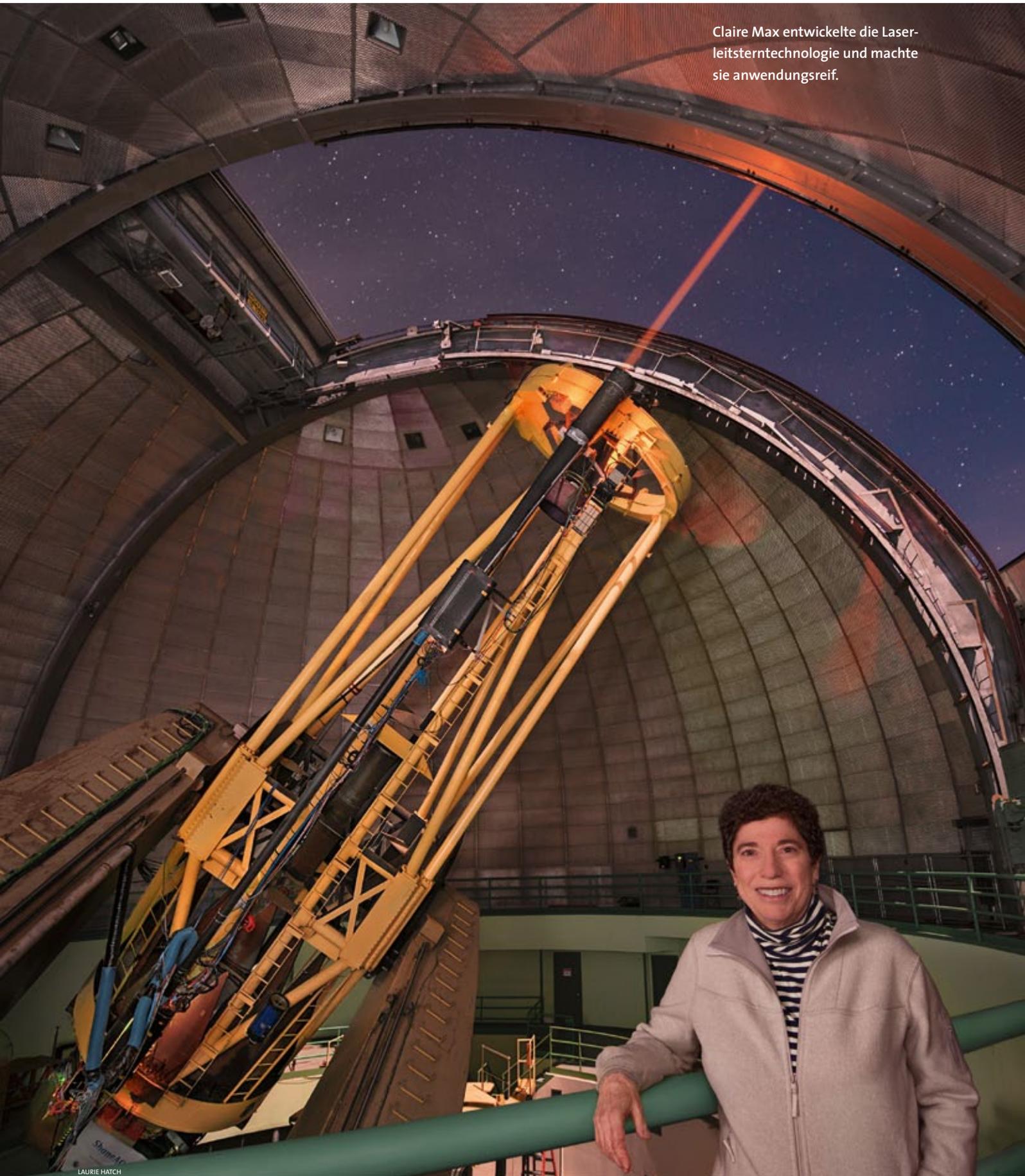
VOM MILITÄR ZUR ASTRONOMIE

1 Die US-amerikanische Astronomin Claire Max entwickelte die Technologie für einen künstlichen **Laserleitstern**, um Objekte am Himmel scharf abbilden zu können. Anfangs diente die neue Technologie nur dem Militär.

2 Damit auch die Astronomen die Technik in ihre Teleskope einbauen und sie sachgerecht anwenden konnten, hat Max sie an einem speziellen **Trainingszentrum** geschult.

3 Heute sind fast alle **Großteleskope** mit Laserleitsternsystemen ausgestattet. Sie können so schärfer sehen als das Hubble-Weltraumteleskop. Auch die neuen Riesenteleskope in Chile und Hawaii werden diese Technologie nutzen.

Claire Max entwickelte die Laserleitsternertechnologie und machte sie anwendungsreif.



LAURIE HATCH

gungsarbeit und Konsensbildung im Streben nach adaptiver Optik«, sagt Andrea Ghez, eine Astronomin an der University of California, Los Angeles, »hat Max einen sicheren Instinkt dafür entwickelt, Beziehungen zwischen Ingenieuren, Akademikern, finanzierenden Beamten, universitären Verwaltern und all den anderen herzustellen, die in Bezug auf Teleskope etwas zu sagen haben.«

Ihren ersten Blick durch ein Teleskop warf Max in den frühen 1950er Jahren, als die gebürtige New Yorkerin gerade einmal acht Jahre alt war. »Und das war's dann«, sagt sie. »Ich kann immer noch meine Augen schließen und die Berge des Mondes sehen wie damals.

Deswegen wurde ich so verrückt nach Astronomie.«

Ihre Leidenschaft führte sie zunächst an die Princeton University in New Jersey, wo sie in Astronomie promovierte, dann in einer Postdocanstellung an die University of California in Berkeley und schließlich als wissenschaftliche Mitarbeiterin an das Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien. Im Jahr 1983 wurde sie Mitglied bei JASON: Diese Arbeitsgruppe von Wissenschaftlern trifft sich von Zeit zu Zeit, um technische Ratschläge zur nationalen Sicherheit zu geben – häufig auch für das US-Verteidigungsministerium.

Die Atmosphäre – Hürde für Militär und Astronomie

Die erste JASON-Studie, an der sie beteiligt war, befasste sich mit dem Interesse der US Air Force daran, potenziell feindliche Satelliten identifizieren zu können. Bei dieser Aufgabe stellt die Atmosphäre eine ebenso große Hürde dar wie bei astronomischen Beobachtungen. Selbst bei klarem Himmel und mit einem guten Teleskop verschmiert die Turbulenz der Luft Details, die kleiner als eine Bogensekunde im Winkeldurchmesser sind. Das Hubble-Teleskop etwa, dessen Größe und Flughöhe jenen von Spionagesatelliten ähnlich sind, ist unter diesen Bedingungen als zylindrisches Objekt zu erkennen; für viel mehr Details reicht es aber nicht.

Astronomen waren bereits mit einer möglichen Lösung für dieses Problem angetreten: mit einem beweglichen Spiegel, der das Licht reflektiert, welches in das Teleskop fällt, und sich per Computer kontrolliert verformen lässt. Vom Prinzip her sollten die vom Spiegel verursachten Verzerrungen die von der Atmosphäre erzeugten genau aufheben und das Bild wieder annähernd perfekt herstellen. Zunächst musste man aber die Verzerrung messen. Vorzugsweise beobachtete man dazu die Auswirkungen der Luftunruhe auf einen hellen Stern, der sich am Himmel in der Nähe des Zielobjekts befand. Solche Leitsterne stehen jedoch nicht immer zur Verfügung, insbesondere auch nicht bei sich rasch bewegenden Zielobjekten des Pentagon.

»Einfach mit einem Laser entlang der Teleskopachse nach oben leuchten«, so lautete der Vorschlag, den Max und ihre Kollegen von JASON in einem Bericht der Air Force vorlegten.

Wenn die Wellenlänge des Lasers richtig eingestellt ist, regt er die Natriumatome, die in der Atmosphäre oberhalb von 90 Kilometer Höhe natürlich vorkommen, zur Fluoreszenz an. Auf diese Weise erzeugt er einen hellen, gelben, vom Boden aus sichtbaren Fleck. Einen Leitstern also, der an beliebiger Position am Himmel verfügbar ist (siehe Grafik rechts).

Doch Max ging noch einen Schritt weiter. Mit dem Wissen, dass der Natrium-Laserleitstern auch für Astronomen unschätzbar wertvoll wäre, schlug sie eine zusätzliche Variante vor, welche die Air Force zwar nicht angefragt hatte, die aber besser an die Forschungsbedürfnisse angepasst war.

»Ich dachte, das wäre eine tolle Idee«, gesteht sie.

Leider wurde dieses Design zusammen mit all den anderen Technologien für einen Natrium-Laserleitstern erst einmal als vertraulich eingestuft. So bemühte Max

sich zusammen mit einigen Wissenschaftlern der Air Force in den folgenden sieben Jahren darum, dass diese Einschränkungen aufgehoben wurden. Und sie gewannen: Im Mai 1991 durfte ein Forscher der Air Force, Robert Fugate, den künstlichen Leitstern bei einem offenen Treffen der American Astronomical Society in Seattle vorstellen. Die Reaktionen waren geteilt: Astronomen, die bereits an ähnlichen Technologien gearbeitet hatten, aber aus Geldmangel nicht sehr weit kamen, waren verärgert, als sie herausfanden, dass das Militär solche Instrumente längst im Geheimen baute. Die meisten Kollegen freuten sich jedoch unbändig auf die Aussicht, scharfe Aufnahmen zu bekommen, und zwar überall dort, wo sie es sich wünschten: »Es war ein einziges Chaos«, erinnert sich Fugate.

Doch allem Enthusiasmus zum Trotz war das System immer noch technisch anspruchsvoll, teuer und nicht ausgefeilt. Universitäten konnten es sich nicht leisten. »Die Leute haben darüber geschrieben«, sagt Max, »aber sie haben es nicht in die Teleskope integriert.« Kurz nach der Freigabe der Technologie für die Wissenschaft entschied Max, dass Astronomen ein funktionierendes Beispiel benötigten, um es anwenden zu können. Die Idee, wie sich dies bewerkstelligen ließe, kam ihr während eines Mittagessens mit einem Kollegen, Herb Friedman. »Wir sahen uns gegenseitig an«, erinnert sie sich, »und meinten nur: Verdammt, wir sind ja beide aus Livermore und arbeiten beide mit Lasern!«

Tatsächlich verfügte das Lawrence Livermore National Laboratory über einen besonders leistungsstarken unterirdischen Laser, der gewöhnlich dazu diente, Isotope zu trennen. Man konnte ihn aber auch auf die Wellenlänge von Natrium einstellen. Daher ließen Max und Friedman eine Abdeckung vom Dach des Lasertunnels entfernen und einen Spiegel installieren. So ließ sich der horizontal ausgerichtete Laserstrahl umlenken und durch das Loch zum Himmel schicken. Daneben stellten sie ein kleines Teleskop auf, mit dem sie nach dem künstlichen Leitstern suchten und die atmosphäri-

Im Alter von acht Jahren blickte Max das erste Mal durch ein Teleskop. Daraus erwuchs ihre Leidenschaft für die Astronomie

sche Verzerrung messen konnten. »Der Aufbau muss im Dunkeln unheimlich ausgesehen haben«, erinnert sich Max. »Das Zelt über dem Teleskop leuchtete gelb, und Laserlicht streute heraus. Der Strahl selbst war über zehn oder mehr Kilometer hinweg sichtbar. Eine ortsansässige Dame rief immer wieder bei der Polizei an, um zu berichten, dass ein UFO alle Geheimnisse aus Livermore aufsaugen würde.« Dessen ungeachtet belegten die Tests, dass ihre Konstruktion so arbeitete, wie Max es erwartet hatte.

Vom Prototyp zur Anwendungsreife

Im nächsten Schritt mussten die Wissenschaftler die für das Lasersystem benötigten komplexen Optiken und die Technik so abwandeln, dass sie auch bei einem richtigen Teleskop funktionierten. Mit einem Prototyp am Lick-Observatorium der UCO zeigten Max und ihre Kollegen Mitte der 1990er Jahre schließlich, dass das 3-Meter-Teleskop zumindest bei größeren Wellenlängen die feinstmögliche von der Wellennatur des Lichts erlaubte Auflösung erreichte.

Doch selbst das konnte die Astronomen nicht davon überzeugen, die Technologie aufzugreifen. »Zu dieser Zeit dachten die Leute, dass der Laserleitstern zu kompliziert wäre und nie mit anderen astronomischen Instrumenten vereinbar sein würde«, sagt Connie Rockosi, eine Kollegin von Max. Es brauchte also ein zentrales Schulungszentrum, an dem jeder lernen konnte, selbst ein Laserleitsternsystem zu bauen, entschied Max. Aus dieser Idee heraus entstand das Center for Adaptive Optics, das die US National Science Foundation (NSF) für zehn Jahre mit 40 Millionen US-Dollar förderte. Es öffnete 1999 auf dem Campus von Santa Cruz mit Max als Leiterin. »Als die Förderung 2010 auslief und das Center seine Türen schließen musste, war es von nur einer Hand voll Leute auf fast 100 Mitarbeiter gewachsen«, berichtet Max.

Das brachte die Wende. Die laserunterstützten Systeme mit adaptiver Optik sind Spezialanfertigungen für jedes Teleskop und mit einigen Millionen Dollar pro Stück immer noch kostspielig. Jetzt aber haben Astronomen – viele von ihnen geschult am Zentrum von Max – die Technologie bei jedem optischen Teleskop nachgerüstet, bei dem es sinnvoll ist. Darunter sind auch fast alle Prestigeinstrumente, die aktuell zu den größten der Welt gehören, angefangen bei den 10-Meter-Teleskopen des Keck-Zwillingsobservatoriums in Hawaii bis hin zum europäischen Very Large Telescope (VLT) in Chile, das aus vier identischen 8,2-Meter-Spiegeln besteht.

Je größer ein Teleskop, desto mehr kann es von adaptiver Optik profitieren. Bei einer Wellenlänge von einem Mikrometer, die im für die Astronomie besonders wichtigen infraroten Bereich des Spektrums liegt, kann der 2,4-Meter-Spiegel des Hubble-Weltraumteleskops Bilder mit einer Auflösung von 0,11 Bogensekunden erzeugen. Bei derselben Wellenlänge schafft das 3-Meter-Lick-Teleskop mit Hilfe des Laserleitsterns 0,08 Bogensekunden. 8-Meter-Instrumente wie das europäische Quartett in Chile kommen sogar auf 0,03 Bogensekunden – das ist fast viermal besser als Hubble!

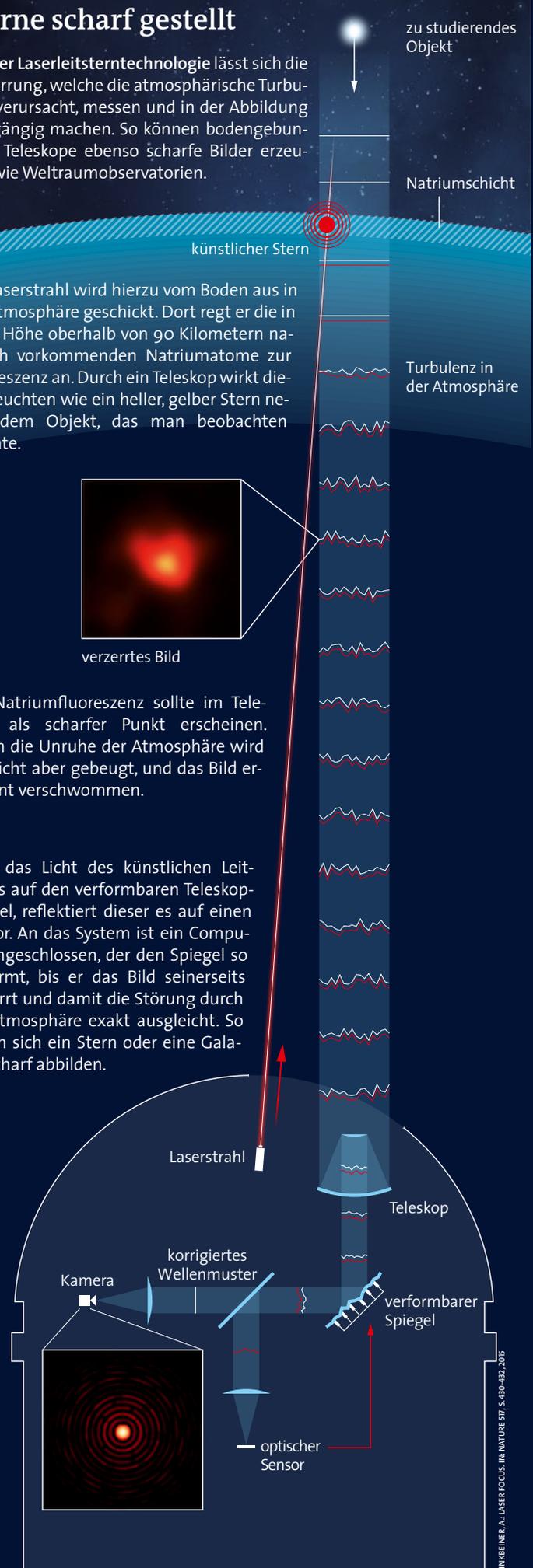
Sterne scharf gestellt

Mit der Laserleitsternentechnologie lässt sich die Verzerrung, welche die atmosphärische Turbulenz verursacht, messen und in der Abbildung rückgängig machen. So können bodengebundene Teleskope ebenso scharfe Bilder erzeugen wie Weltraumobservatorien.

Ein Laserstrahl wird hierzu vom Boden aus in die Atmosphäre geschickt. Dort regt er die in einer Höhe oberhalb von 90 Kilometern natürlich vorkommenden Natriumatome zur Fluoreszenz an. Durch ein Teleskop wirkt dieses Leuchten wie ein heller, gelber Stern neben dem Objekt, das man beobachten möchte.

Die Natriumfluoreszenz sollte im Teleskop als scharfer Punkt erscheinen. Durch die Unruhe der Atmosphäre wird das Licht aber gebeugt, und das Bild erscheint verschwommen.

Trifft das Licht des künstlichen Leitsterns auf den verformbaren Teleskopspiegel, reflektiert dieser es auf einen Sensor. An das System ist ein Computer angeschlossen, der den Spiegel so verformt, bis er das Bild seinerseits verzerrt und damit die Störung durch die Atmosphäre exakt ausgleicht. So lassen sich ein Stern oder eine Galaxie scharf abbilden.



Dank dieser neuen Präzision konnten Astronomen die Sterne verfolgen, die das zentrale Schwarze Loch der Milchstraße umkreisen, Exoplaneten bei anderen Sonnen abbilden, Braune Zwergbeobachten und viele andere sonst nicht machbare Studien durchführen. »Ohne adaptive Optik hätten wir vom Erdboden aus auf diesen Gebieten keinerlei Fortschritte machen können«, sagt David Silva, Leiter des US National Optical Astronomy Observatory in Tucson, Arizona.

Riesenteleskope – Riesenkosten

Den größten Einfluss wird diese Technologie auf die gigantischen 20- bis 40-Meter-Teleskope haben, die sich momentan in der Entwicklung befinden: das European Extremely Large Telescope und das Giant Magellan Telescope, beide in Chile, sowie das TMT auf dem Mauna Kea. Observatorien dieser Größe können genug Licht einfangen, um sehr schwach leuchtende, weit entfernte Objekte wie die ersten Galaxien nach dem Urknall und deren Entstehung zu untersuchen. Jedoch wären sie kaum ihr Geld wert, wenn sie lediglich eine Auflösung von einer Bogensekunde lieferten.

Leider sind die Kosten auch der Grund, weshalb es nur drei dieser Megateleskope geben wird. Das bedeutet wiederum, dass nur eine kleine Auswahl von Astronomen sie jemals benutzen wird. Zugleich verlieren Forscher von solchen Einrichtungen, die nicht an einem der großen Projekte beteiligt sind, ihre bisherigen 3- und 4-Meter-Teleskope. Dabei sind diese kleineren Instrumente oftmals ideal für weiträumige Himmelsdurchmusterungen oder gezielte Beobachtungen von relativ nahen Objekten. Auf Grund eines begrenzten Budgets und dessen Investition in große Projekte wie das Radioteleskop ALMA in Chile hat die NSF ihre Unterstützung für optische Teleskope dieser Größenklasse zurückgezogen. »Für den gewöhnlichen Astronomen wird es immer schwerer, Beobachtungszeit zu bekommen«, sagt Richard Barvainis, Programmkoordinator für Astronomie am NSF. »Das wird ein riesiges Problem.«

An den UCO, die mit ihrer eigenen Geldkrise kämpfen, ist Max inzwischen für den Mikrokosmos einer Situation zuständig, die sie sozusagen selbst mit geschaffen hat. Im September 2013 gab Hochschulleiterin Aimée Dorr bekannt, dass die Unterstützung der University of California für das Lick-Observatorium in fünf Jahren auslaufen würde. Grund dafür: Die Konstruktionskosten für das TMT, Ausgaben für die Wartungsarbeiten der Keck-Teleskope sowie ein schrumpfendes Budget der UCO, das sich im letzten Jahrzehnt halbiert hat. Die astronomische Forschergemeinde antwortete mit einem Proteststurm. Sie beharrte darauf, dass das Lick, seit 1888 in Betrieb, immer noch eine nützliche Testumgebung für neue Instrumente und eine Übungseinrichtung für Doktoranden sei.

Im Herbst 2014 begann Max also ihre Amtszeit als Interimsdirektorin der UCO damit, dass sie in Dorr's Büro ging

und fragte: »Was können wir tun, um daraus eine Win-win-Situation zu machen?« Für Dorr war die Sache einen Versuch wert. Max war nicht nur »zuverlässig, geradeheraus, aufrichtig und maßvoll«, sagt Dorr. Max konnte auch Budgets auf-tun, die mindestens ein ehemaliger Direktor für unmöglich gehalten hatte. In den folgenden Monaten durchforstete sie die verworrenen Partnerschaften und Etats der UCO, fand Wege, Geldtöpfe hin- und herzuschieben, beruhigte den Sturm an Unmut und stellte die Förderung für das Lick Observatory durch die Universität wieder her.

Max' nächste Priorität ist es, einen umfassenden strategischen Plan für das Observatorium sowie für die zwei Keck-Teleskope auszuarbeiten. Weil am Lick Observatory adaptive Optik installiert und für Astronomen relativ gut zugänglich ist, ließe es sich beispielsweise für hochpräzise Durchmusterungen von einigen hundert bis einigen tausend Objekten wie Quasare nutzen: »Solche Studien lassen sich eine nach der anderen abarbeiten und hinterher zu einer Untersuchung mit hoher statistischer Qualität addieren«, sagt Max.

Die Astronomin ist entschlossen, diesen Plan parat zu haben, wenn die Universität ihre Wahl für den ständigen Direktor der UCO bekannt gibt. Vielleicht wird sie es selbst werden – sie hat sich auf die Stelle beworben. Wenn nicht, sagt sie, wolle sie einfach zurückkehren und weiter die Gemeinschaft aus Astronomen und Ingenieuren fördern. In diesem Zusammenhang arbeitet sie an Systemen mit Mehrfachlasern, die sowohl die atmosphärischen Störungen korrigieren als auch das Gesichtsfeld erweitern. Sie bildet zudem Studenten darin aus, »eine Hand an den Instrumenten und eine in der Astronomie zu haben«, wie sie sagt.

»Dank ihrer Bandbreite an Fähigkeiten war es Max möglich, das zu tun, was sie getan hat«, sagt Ghez. »Ein gewöhnlicher Astronom könnte das niemals schaffen.« ~

Es wird immer schwerer, Beobachtungszeit zu bekommen. Das wird ein riesiges Problem

DIE AUTORIN



Ann Finkbeiner arbeitet als Journalistin in Baltimore, Maryland.

QUELLE

Gavel, D. T., et al.: Progress with the Lick Adaptive Optics System. In: Adaptive Optical Systems Technology, Proc. SPIE 4007, S. 63–70, 2000

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1351070

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 517, S. 430–432, 22. Januar 2015

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 komplette E-Paper-Heftarchiv!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/digitalabo

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



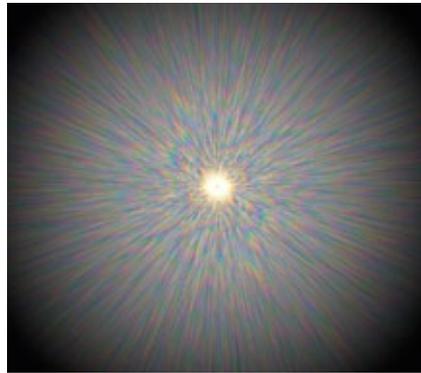
Schönheit im Auge des Betrachters

Manche farbenprächtige Erscheinung lässt sich nur beschreiben, jedoch nicht direkt fotografieren – denn sie entsteht erst in unserem Sehorgan selbst.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Als ich vor einiger Zeit mit noch künstlich geweiteten Pupillen von einer Untersuchung beim Augenarzt kam, blendeten mich helle Lichtquellen fast schmerzlich. Der einzige Trost in dieser Situation war die Schönheit eines hellen Lichthofs mit einem regenbogenartigen Band um sie herum. So etwas war mir bislang nur im Dunkeln beim Blick auf ferne Leuchtpunkte begegnet.

Die seltsame Erscheinung unterscheidet sich von den bekannten farbigen Ringen, die man zuweilen sieht, wenn man durch eine beschlagene Fensterscheibe eine Laterne betrachtet (Bild unten). Dieses Phänomen verursachen winzige Wassertröpfchen zwischen Lampe und Auge, die das Licht beugen. Auch beim Blick durch dünne Schleierwolken auf Sonne und Mond können solche Farbkreise auftauchen, die Koronen heißen (siehe »Weihnachtliche Krönung«, SdW 12/2009, S. 35).



So in etwa sieht die Korona um eine entfernte Lichtquelle durch weit gestellte Pupillen aus. Das Bild ist das Ergebnis einer Computersimulation, denn fotografieren lässt sich dieser subjektiv wahrgenommene Effekt nicht.

Hier allerdings füllte der farbige Hof die ganze Fläche um ein helles Zentrum. Es befand sich auch nichts zwischen Lichtquelle und Auge, was ich für den Effekt hätte verantwortlich machen können. Das zeigte ein einfacher Trick: Ich blickte mit einem Auge auf die ferne Laterne und blendete sie – nicht aber den verbleibenden Teil des umgebenden Lichthofs – mit dem

Blick durch eine beschlagene Fensterscheibe auf eine Straßenlaterne.

Dieses farbige Ringsystem (rechts) entstand in einem Freihandexperiment beim Durchstrahlen eines winzigen Lochs mit weißem Licht einer Punktlichtquelle.

»Alles, was wir sehen, könnte auch anders sein.«

Ludwig Wittgenstein (1889–1951)

Finger meines ausgetreckten Arms aus. Sobald das eigentliche Leuchten abgedeckt war, verschwand schlagartig auch der Regenbogenkranz. Das Phänomen musste also etwas sein, was mit meinen Augen zu tun hatte und was nur bei weit geöffneten Pupillen auftritt.

Augenheilkundler erkannten schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts den Effekt von ringförmig angeordneten, radial orientierten Zellfasern, die bei der Bildung der Augenlinse entstehen und an ihrem äußeren Rand liegen. Die Gewebestrukturen wirken wie ein optisches Gitter, welches das Licht einer weit entfernten und daher fast punktförmigen Quelle beugt. Die gebeugten Wellen überlagern sich auf der Retina zu einem farbigen Bogen, dem so genannten Linsen-Halo. Tagsüber wirkt dieses Gitter nicht, weil dann die klein gestellte Pupille die Augenlinse vom Rand her abdeckt. Daher sieht man den Halo nur bei Dunkelheit – oder wenn die medikamentös erweiterte Pupille das Beugungsgitter freigibt.

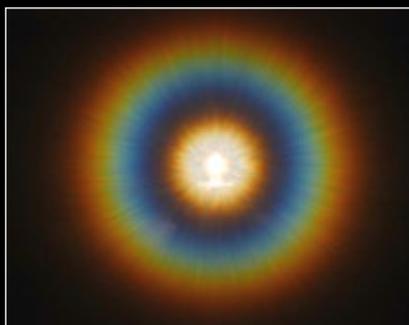
Dieser Linsen-Halo ist aber nur ein Teil dessen, mit dem sich sehr helle Lichtquellen zu schmücken scheinen.



H. JOACHIM SCHLICHTING

THOMAS JF/VAN DEN BERG/ABDRUCK MIT FREI. GEN. VON ARNDT / CCC

H. JOACHIM SCHLICHTING



Der Effekt einer Ziliar-Korona, nachgestellt durch eine Druckerfolie. Bei einem großen Sehwinkel ergeben sich verschwommene Farbringe (links), bei einem kleinen zerfallen sie in einzelne radiale Strahlen (rechts).

Wesentlich stärker noch machen sich farbig irisierende Strahlen bemerkbar, die vom Zentrum der Lichtquelle radial nach außen gehen (Bild linke Seite oben). Man kann sie auch am Tag sehen, etwa dann, wenn man in eine helle Halogenlampe oder LED blickt.

Bunte Nadelstreifen aus dem Inneren der Linse

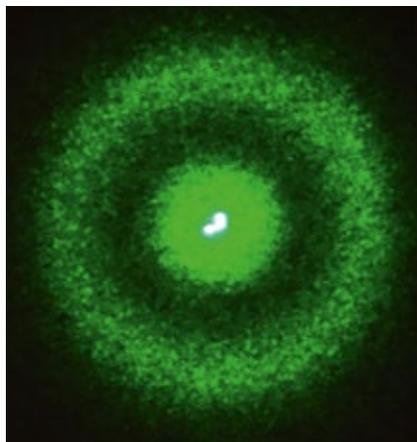
Dieses Phänomen erwähnte bereits René Descartes (1596–1650). Es wird heute als Ziliar-Korona bezeichnet und wird nach neueren Erkenntnissen vermutlich von kleinen Teilchen verursacht, die in der Augenlinse eingelagert sind. Sie wirken ähnlich wie die winzigen Wassertröpfchen bei einer Sonnen- oder Mondkorona. Anders als dort ergeben sich hier aber keine Ringe, sondern in der Farbe variierende radiale Strahlen. Wie kommt es dazu?

Im Normalfall ist die Ziliar-Korona nicht besonders lichtstark. Um sie dennoch eingehender zu untersuchen, lässt sich die Zahl der beugenden Teilchen künstlich vergrößern. Dazu muss man nur durch eine geeignete Folie für Tintenstrahldrucker blicken. Denn manche Fabrikate enthalten kleinste Teilchen, die einen ähnlichen Beugungseffekt bewirken wie die Wassertröpfchen einer dünnen Wolke oder die Partikel in unserem Auge.

Haben wir es mit einer ausgedehnten Lichtquelle zu tun, sehen wir die typischen Farbringe einer Korona. Beispielsweise funktioniert das bei einer matten Glühlampe bis zu einer Entfernung von etwa acht Metern (Bild oben links). Dieser Abstand entspricht bei einer Größe des Leuchtkörpers von rund vier Zentimetern einem Sehwinkel von

zirka 0,3 Grad. Erscheint er bei größerer Entfernung unter kleinerem Winkel, fransen diese Ringe immer mehr aus und gehen schließlich in eine Strahlenstruktur über (Bild oben rechts). Diese tritt offenbar nur unterhalb von 0,3 Grad auf und ist umso ausgeprägter, je kleiner der Sehwinkel wird. Daher kann man bei Sonne und Mond, die am Himmel unter 0,5 Grad erscheinen, keine Strahlen in der Korona sehen. Bleibt zu klären, was diesen Unterschied bewirkt.

Um farbige Ringe hervorzurufen, genügt im Prinzip ein einziger winziger Wassertropfen. Er beugt das Licht und zerlegt es in viele Teilwellen, die je nach ihrer Wellenlänge in leicht verschiedene Richtungen laufen. Auf der Netzhaut des Auges oder auf dem Chip einer Kamera überlagern sie sich. Es muss nicht unbedingt ein Tropfen sein – ein Loch vom selben Querschnitt ruft ein ganz ähnliches Farbmuster hervor. Piekst



Das Beugungsbild eines einfarbigen Lasers wird körnig, wenn die gebeugten, aber immer noch kohärenten Teilwellen sich im Auge oder auf dem Kamerachip erneut überlagern.

man über einer festen Unterlage mit einer spitzen Nähnadel in eine Haushaltsalufolie und blickt durch die winzige Öffnung auf eine Punktlichtquelle, umgibt diese ein solches Ringsystem (Bild linke Seite unten).

Jeder Tropfen beziehungsweise jedes Streuzentrum erzeugt ein eigenes ringförmiges so genanntes Beugungsscheibchen, das sich mit den anderen überlagert. Bei den ausgedehnten Lichtquellen wie Sonne und Mond addieren sich dabei nur die Farben, so dass lediglich deren Intensität zunimmt. Im Fall eines kleineren Winkels hingegen ist das Licht immer noch weit gehend kohärent, was bedeutet, dass die einzelnen Wellen beim Betrachter abermals interferieren können. Dadurch wird das Beugungsscheibchen feiner strukturiert. Mit Hilfe von kohärentem Laserlicht kann man diese Details zumindest einfarbig sichtbar machen. Auf dem Schirm zerfällt dann das ringförmige Beugungsbild in ein granulares Muster (Bild unten).

Bei weißem Licht werden die verschiedenen Wellenlängen mehr oder weniger stark vom Zentrum des Ringsystems weg beziehungsweise zum Mittelpunkt hin abgelenkt. Die körnigen Lichtflecke spreizen sich also in radialer Richtung. Das führt schließlich zu den schillernden Farbstrahlen, die wir bei einer Ziliar-Korona sehen. ∞

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

Van den Berg, T. et al.: The Ciliary Corona: Physical Model and Simulation of the Fine Needles Radiating from Point Light Sources. In: Investigative Ophthalmology & Visual Science 46/7 2627–2632, 2005

Dieser Artikel und Links im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1351055

Asteroiden im Visier

Manchmal kommen kosmische Gesteinsbrocken der Erde gefährlich nahe. Mit Suchprogrammen spüren Astronomen mittlerweile auch kleinere Objekte auf. Außerdem entwickeln Weltraumexperten Abwehrtechnologien, um im Fall einer drohenden Kollision die Gefahr für die Bevölkerung so weit wie möglich abzuwenden.

Von Felicitas Mokler

Am 15. Februar 2013 blickten Astronomen – Profis wie Amateure – gebannt in den Himmel. Gegen Abend sollte der Asteroid 2012 DA14 die Erde in einem Abstand von nur 27 000 Kilometern über der Oberfläche passieren. Das ist näher als die Orbits von geostationären Satelliten, die zur Telekommunikation oder Wetterbeobachtung eingesetzt werden. Anders ausgedrückt: Näher als ein Zehntel des Abstands zum Mond. Die Bahn dieses kosmischen Gesteinsbrockens war bereits sehr gut bekannt; einen Einschlag auf der Erde konnten die Experten daher im Vorfeld ausschließen – kein Grund zur Sorge also.

2012 DA14 hat einen Durchmesser von rund 50 Metern und umläuft die Sonne auf einem ähnlichen Orbit wie die Erde. Dabei kreuzt er ihre Bahn zweimal. Dieser kosmische Vagabund zählt zu den so genannten erdnahen Objekten oder NEOs (englisch: Near Earth Objects). So bezeichnen Astronomen sämtliche Asteroiden oder Kometen, die auf ihrem Orbit der Erdbahn näher als 45 Millionen Kilometer (0,3 Astronomische Einheiten) kommen können. All diese Objekte sind Relikte aus der Entstehungsphase des Sonnensystems. Ausgehend von kleinsten Staubteilchen bildeten sich damals immer größere Gesteinsbrocken heraus, bis sich daraus schließlich die erdähnlichen Planeten und möglicherweise auch die Kerne von Gasriesen wie Jupiter oder Saturn

formten. Ein Großteil davon schaffte es jedoch nicht, über einen gewissen Umfang hinaus anzuwachsen. Einige wiederum kollidierten miteinander und zerbrachen dabei in viele kleinere Bruchstücke. Die Überreste davon ziehen noch heute im Sonnensystem ihre Bahn.

Als potenziell für die Erde gefährlich stufen die Forscher in der Regel solche Objekte ein, deren Orbit sich der Erdbahn um weniger als 7,5 Millionen Kilometer annähert. Wie zerstörerisch ein möglicher Einschlag letztlich werden kann, hängt vor allem von der Größe des Himmelskörpers und seiner Zusammensetzung, aber auch vom Eintrittswinkel in die Atmosphäre ab.

Schutz durch die Atmosphäre

Bis zu einem Durchmesser von zehn Metern oder etwas mehr schützt die Atmosphäre sehr gut vor kosmischen Geschossen. Die meisten zerbersten und verglühen, wenn sie in die Lufthülle eintreten, und sind als Feuerbälle oder Boliden sichtbar. Kleinere Bruchstücke davon gehen durchaus auf die Erde nieder, richten jedoch in der Regel keine Schäden an.

»Dass aber auch kleinere Objekte einen Krater schlagen können, wissen wir eigentlich seit dem Meteoritenfall von Carancas in Peru 2007. Das war ein normaler Gesteinsmeteorit von etwa eineinhalb Meter Durchmesser, der wegen seines flachen Eintrittswinkels in die Atmosphäre bis auf den Erdboden durchgedrungen ist und einen Krater geschlagen hat«, erklärt Detlef Koschny. Der Weltraumforscher leitet die Abteilung für erdnahe Objekte des Programms für Welt- raumlageerfassung der European Space Agency (ESA).

Am Morgen jenes 15. Februar 2013 bereitet Koschny in seinem Hotelzimmer den Arbeitstag vor. Wenig später wird er sich zum Wiener Amtssitz der Vereinten Nationen begeben. Dort tagt der wissenschaftlich-technische Unterausschuss des UN-Komitees für die friedliche Nutzung des Weltraums (COPOUOS). Delegierte der Raumfahrtorganisationen werden ebenfalls dabei sein. An diesem Tag beabsichtigt das Gremium, seine Empfehlung in Sachen erdnahe Asteroiden abzugeben. Künftig sollen zwei Expertengruppen auf fachli-

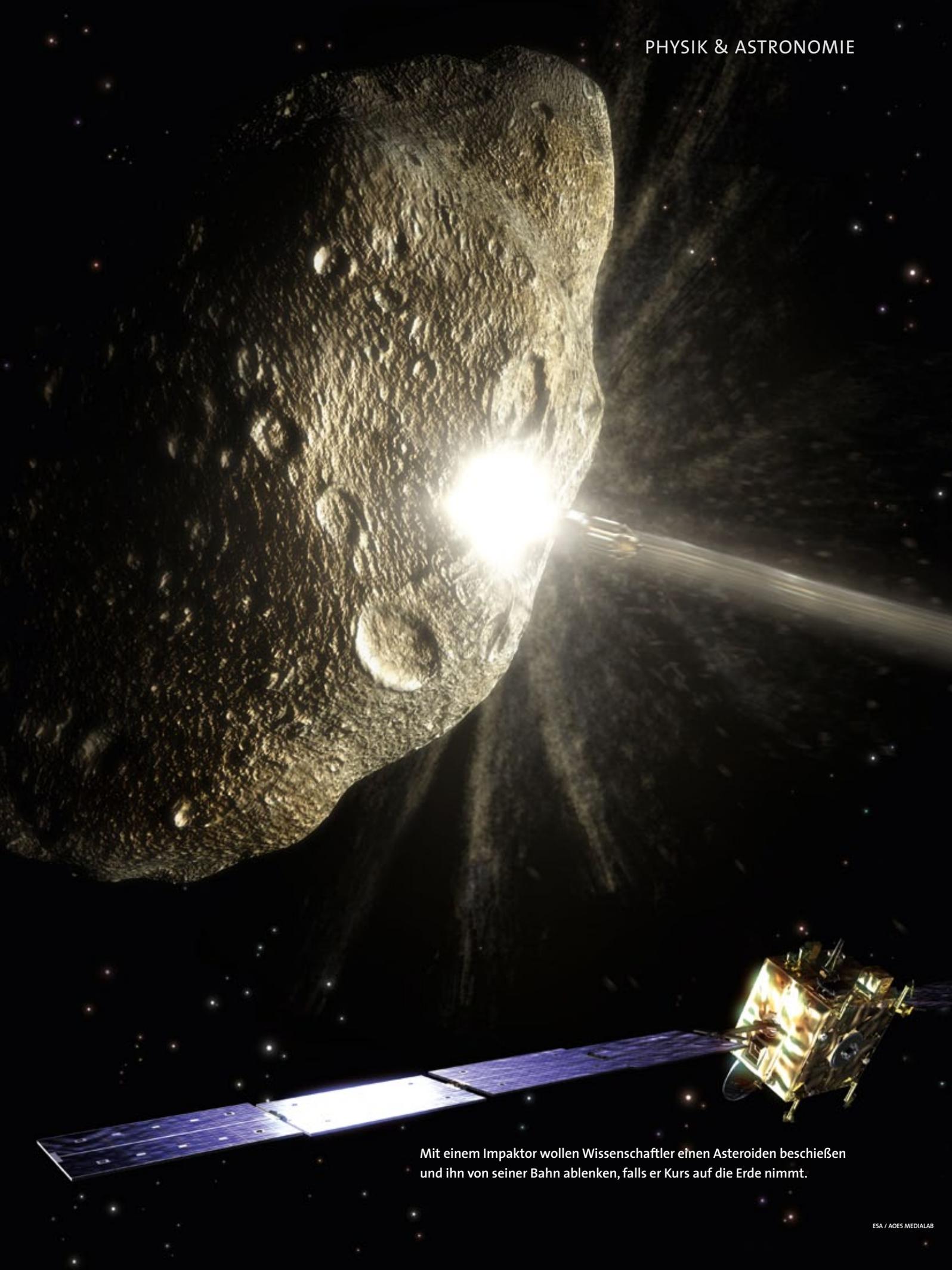
AUF EINEN BLICK

GEFAHR AUS DEM ALL

1 Seit Ende der 1990er Jahre suchen Astronomen gezielt nach **erdnahen Asteroiden**. Vor allem die Anzahl der entdeckten mittelgroßen und kleineren Objekte nimmt noch zu.

2 Derzeit bauen ESA und NASA **spezielle Suchprogramme** aus, mit denen sich der gesamte Himmel in einer Nacht abschnappen lässt.

3 Sollte in Zukunft ein Asteroid gefährlicher Größe Kurs auf die Erde nehmen, wollen Forscher versuchen, ihn beispielsweise mit einem **kinetischen Impaktor** von seiner Bahn abzulenken.



Mit einem Impaktor wollen Wissenschaftler einen Asteroiden beschießen und ihn von seiner Bahn ablenken, falls er Kurs auf die Erde nimmt.

cher wie auf logistischer Ebene Strategien entwickeln, um gewappnet zu sein, falls ein Felsbrocken aus dem All doch einmal Kurs auf die Erde nehmen und zur Bedrohung werden sollte.

Noch kämpft Koschny etwas gegen die Müdigkeit, während er die letzten Meldungen auf Facebook liest. Plötzlich ist er hellwach. Ein Asteroid soll über Russland niedergegangen sein? Wenig später erhält er die Bestätigung seiner russischen Kollegen: Über der Provinzhauptstadt Tscheljabinsk war in den frühen Morgenstunden ein Asteroid von rund 20 Meter Durchmesser in die Erdatmosphäre eingetreten und dabei explodiert. Durch die Druckwelle gingen vor allem Fensterscheiben zu Bruch, es gab rund 1500 Verletzte durch herumfliegende Glassplitter. Direkt getroffen von dem kosmischen Gesteinsbrocken wurde jedoch niemand; einzelne Teile gingen über weit gehend unbewohntem Terrain nieder.

Bald war klar, dass dieses Ereignis in keiner Weise mit dem nahen Vorbeiflug von 2012 DA 14 an jenem Tag zusammenhing. Der kleine Asteroid von Tscheljabinsk hatte eine völlig andere Flugbahn. Da er aus Richtung der Sonne auf die Erde zuflog, konnten ihn nicht einmal die empfindlichsten visuellen Teleskope kurz vor seinem Eintritt in die Atmosphäre aufspüren. Diesmal hatte die Natur auch die Experten überrascht.

Dass der ungebetene Gast aus dem All ausgerechnet hereinplatzt, als sich das Gremium in Wien mit seinesgleichen befasste, mutet wie eine Ironie des Schicksals an: Beeinflusst

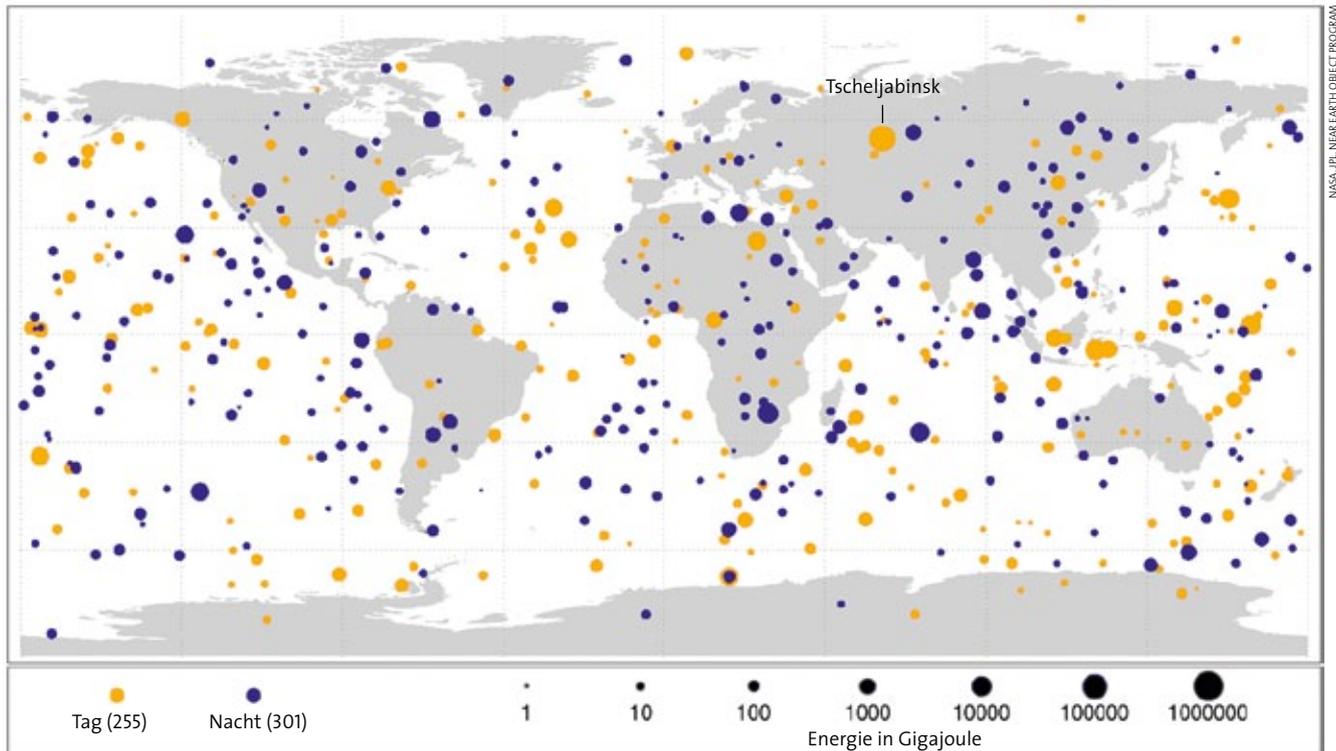
habe das Ereignis die an jenem Tag getroffenen Entscheidungen aber keineswegs, gibt Koschny zu verstehen. »Zu diesem Thema war sich die Expertenrunde bereits vorher einig.«

Schon 1999 hatten Wissenschaftler das Thema NEOs im Rahmen der Konferenz UNISPACE III bei den Vereinten Nationen diskutiert. Nach einer mehrjährigen Beratungs- und Sondierungsphase und der Empfehlung durch COPOUOS gab Ende 2013 schließlich auch die Generalversammlung der Vereinten Nationen grünes Licht für die Empfehlungen des Expertengremiums.

Gezielte Suche

Anfang 2014 nahmen die beiden Arbeitsgruppen SMPAG und IAWN unter dem UN-Mandat ihre Arbeit auf. Die Space Mission Planning Advisory Group (SMPAG) trägt unter anderem all das bei den verschiedenen Raumfahrtagenturen bereits vorhandene technische Wissen zur Abwehr eines potenziellen Asteroideneinschlags zusammen und schlägt weitere Möglichkeiten für eine gemeinsame Missionsplanung vor. Das International Asteroid Warning Network (IAWN) koordiniert hingegen die Suche nach NEOs. Zudem tauscht es sich regelmäßig mit Regierungs- und Katastrophenschutzbehörden aus, um im Ernstfall rechtzeitig zu warnen und Gegenmaßnahmen zu empfehlen.

Gezielt nach erdnahen Asteroiden suchen Wissenschaftler bereits seit Ende der 1990er Jahre. 1998 gab der US-Kon-



In diesem Diagramm sind Treffer kleinerer Asteroiden von 1 bis 20 Meter Durchmesser aus den Jahren 1994 bis 2013 eingetragen, die beim Eintritt in die Erdatmosphäre zerplatzt und verglüht sind. Solche Ereignisse lassen sich als Feuerbälle oder Boliden, über-

große Sternschnuppen also, beobachten. Gelbe Punkte kennzeichnen »Einschläge« bei Tag, blaue bei Nacht. Die Größe der Kreise gibt die in sichtbarer Strahlung freigesetzte Energie in Milliarden Joule (Gigajoule) an.

Asteriod Day

Mit der kürzlich aus der Taufe gehobenen Kampagne »Asteriod Day« soll weltweit auf die Thematik der Asteroidenabwehr aufmerksam gemacht werden. Zudem fordert die Organisation auf ihrer Website, die Anzahl der pro Jahr entdeckten Asteroiden in Erdnähe innerhalb der nächsten Dekade zu ver Hundertfachen und die verfügbare Technologie dazu zu verwenden, um potenziell gefährliche Objekte zu verfolgen. Ziele, an denen Forscher, allen voran die NASA und die ESA bereits arbeiten. Hinter der Aktion stehen Experten wie etwa Russell Schweickart, Astronaut der Apollo-9-Mission, und weitere Wissenschaftler, aber auch illustre Persönlichkeiten wie Brian May, dem Gitarristen

der Rockband Queen und ebenfalls promovierter Astrophysiker. Bemerkenswert: Teilweise handelt es sich dabei um dieselben Personen, die auch hinter der Stiftung B612 zu finden sind. Diese hat derzeit Probleme, die Sentinel Mission zu finanzieren. Doch auch wenn es zunächst nach einer Werbekampagne der Stiftung für ihre Mission aussah, hat die Aktion Asteroid Day nun weitere Kreise gezogen. Auch ESA, NASA oder NEOShield haben am 30. Juni, dem ersten offiziellen Asteroid Day, speziell zu ihren Projekten informiert. Denn: »Man erreicht so die Leute dort draußen«, meint Koschny. »Es ist wichtig, dass die Öffentlichkeit mehr von dem mitbekommt, was wir tatsächlich machen.«

gress eine Direktive an die US-Raumfahrtbehörde NASA aus, innerhalb von zehn Jahren 90 Prozent aller erdnahen Objekte mit einem Durchmesser von mindestens einem Kilometer zu finden. Heute sind rund 95 Prozent davon bekannt. Von der Größenklasse ab 300 Meter aufwärts kennen wir etwa die Hälfte. Aktuell haben die NASA und ESA mit ihren Suchkampagnen vor allem Objekte ab einem Durchmesser von 140 Metern und mehr im Blick. Dabei gehen ihnen aber auch am laufenden Band kleinere Asteroiden ins Netz.

Einige der derzeit laufenden Himmelsdurchmusterungen sind der von der University of Arizona geleitete Catalina Sky Survey, die Suche mit dem 2012 in Hawaii in Betrieb genommenen Teleskop Pan-STARRS und das Projekt LINEAR, das unter anderem Beobachtungstechnologien einsetzt, die ursprünglich zur Überwachung von Satelliten in der Erdumlaufbahn entwickelt wurden.

»Da die größeren derzeit aktiven Surveys rund einen Monat brauchen, um den gesamten Himmel abzuscannen, ist es schwierig, damit ein lichtschwaches Objekt zu finden, das nur eine Nacht im Gesichtsfeld eines solchen Teleskops zu sehen ist«, erläutert Detlef Koschny.

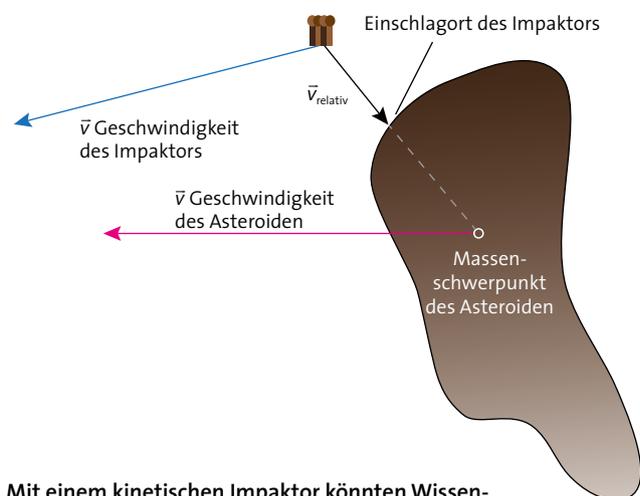
Deshalb entwickeln sowohl NASA als auch ESA neue Technologien für Himmelsdurchmusterungen, mit denen sich Objekte von einem Durchmesser bis hinab zu 30 Metern serienweise aufspüren lassen. Die ESA betreibt seit Kurzem das so genannte Fly-Eye-Projekt, bei dem mehrere Teleskope mit einem großen Gesichtsfeld den ganzen Himmel in nur einer Nacht absuchen können. Für das vergleichbare Projekt ATLAS der NASA wurde kürzlich das erste Teleskop ausgeliefert. Weiterhin plant die NASA ein weltraumbasiertes Infrarotobservatorium namens NEOCam. Übrigens denkt auch die private Stiftung B612 über ein Infrarot-Weltraumobservatorium namens Sentinel für diese Zwecke nach (siehe Kasten oben).

Zwar ist bisher kein Asteroid mit Kollisionskurs auf die Erde bekannt. Aber an der realen Gefahr eines Asteroideneinschlags mit möglicherweise verheerenden Folgen zweifeln auch die Experten nicht (siehe Kasten S. 54). So spielen sie etwa in dem europäischen Forschungsverbund NEOShield verschiedene Abwehrszenarien durch. Die Art der si-

mulierten Technologien richtet sich dabei nach Größe und Beschaffenheit eines Asteroiden sowie nach Machbarkeit und technologischem, aber auch finanziellem Aufwand. Wichtig ist zudem die Zeitspanne, innerhalb derer eine Asteroidenabwehrmission notwendig würde.

Unter anderem konzentrieren sich die Forscher auf Objekte der Mittelklasse, also der Größenordnung von einigen hundert Metern. Aus gutem Grund, denn von ihnen gibt es viele. Und auch wenn wir derzeit keinen kennen, der die Erde in naher Zukunft trifft, kann jederzeit ein noch nicht bekanntes Objekt auftauchen. Solche Brocken würden zwar nicht die Menschheit auslöschen, aber verheerenden Schaden anrichten, wenn sie auf besiedeltem Gebiet niedergingen.

»Am weitesten fortgeschritten ist der kinetische Impaktor«, erklärt Alan Harris. »Damit würden wir einen Asteroiden mit einer Sonde anschießen und so kontrolliert auf eine andere Bahn lenken.« Harris ist Koordinator von NEOShield



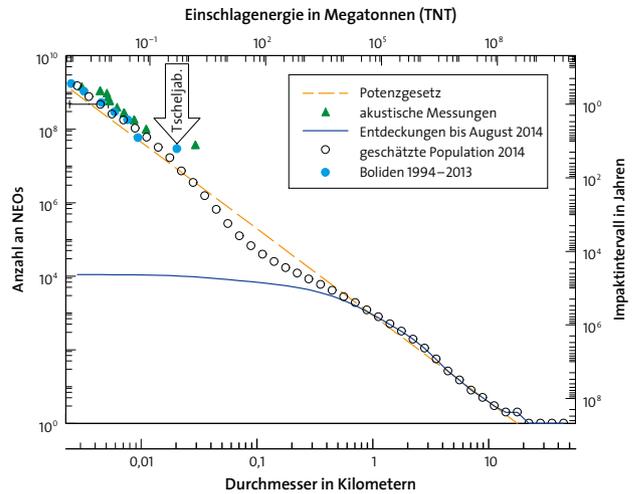
Mit einem kinetischen Impaktor könnten Wissenschaftler einen Asteroiden von seiner Bahn ablenken, falls er Kurs auf die Erde nimmt. Bei dieser Technologie nutzen sie die Impulserhaltung aus. Die Ablenkung würde hier nach schräg links unten erfolgen, wäre aber in diesem Maßstab nicht erkennbar.

Statistik und potenzielle Gefährdung

Dank der sich stetig verbessernden Beobachtungstechnologien ist die Anzahl der bekannten erdnahen Objekte in den vergangenen Jahren rapide angestiegen. Anhand dieser Messwerte und von statistischen Modellen lässt sich abschätzen, wie viele Asteroiden es bei welcher Größenklasse vermutlich gibt. Die Größenverteilung verhält sich fast wie ein Potenzgesetz mit negativem Index (siehe Grafik). Bei Durchmessern von wenigen hundert Metern scheint es allerdings weniger Objekte zu geben, als dieses Modell es vorhersagt. Weshalb das so ist, ist noch unklar.

Zwar mag die vermutete Gesamtzahl der NEOs nachdenklich stimmen. Doch nimmt ihr Anteil zu größeren Durchmessern und damit stark steigendem Gefährdungspotenzial hin deutlich ab. In der Größenklasse von 50 Metern, zu der etwa 2012 DA14 gehört, gibt es wohl 500 000 solcher Objekte (siehe Tabelle). Dennoch ist mit einem derart nahen Vorbeiflug wie jenem vom 15. Februar 2013 nur etwa alle 40 Jahre zu rechnen; mit einem Treffer auf die Erde noch deutlich seltener: alle 1000 Jahre. Ab 300 Meter aufwärts gibt es schätzungsweise rund 7000 Objekte, ab einem Kilometer Durchmesser nur noch etwa 1000. Entsprechend niedriger sind auch statistisch betrachtet die Kollisionsintervalle.

Je größer außerdem ein Objekt ist, umso eher wird es sich beobachten lassen, bevor es der Erde gefährlich nahekommen



Das Modell für die Größenverteilung von erdnahen Objekten (NEOs) sagt annähernd ein Potenzgesetz vorher. Ein Vergleich mit den bereits entdeckten NEOs zeigt, dass es insbesondere von kleineren unterhalb einiger hundert Meter noch wesentlich mehr geben sollte, als wir bisher kennen.

kann. Gesteinsbrocken ab einigen hundert Meter Durchmesser findet man in der Regel einige Jahre im Voraus, so dass ausreichend Zeit für eine Abwehrmission bleiben sollte.

Gefährdungspotenzial durch Asteroiden und Gegenmaßnahmen

Durchmesser eines NEOs	geschätzte Anzahl mit diesem Durchmesser oder größer	Einschlagsintervall in Jahren, geschätzt	mögliche Folgen eines Einschlags in bevölkerten Gebieten	Abwehrmaßnahmen
10	100 Millionen	5	Meteoritenfall, Krater unwahrscheinlich	Bevölkerungsschutz/ Evakuierung
30	3 Millionen	150	Explosion in Atmosphäre wie bei Tscheljabinsk; Krater je nach Zusammensetzung möglich, Verletzte oder einige Tote	Bevölkerungsschutz/ Evakuierung
50	500 000	1000	verheerende Explosion in Atmosphäre, Krater je nach Zusammensetzung, viele Verletzte und Tote möglich	Ablenkung des Asteroiden durch langsamen Gravitations- oder kinetischen Impaktor, wenn sinnvoll; sonst Bevölkerungsschutz, Evakuierung
100	50 000	10 000	Krater von einem bis zwei Kilometer Durchmesser, Tsunami-gefahr bei Einschlag in Küstennähe, viele Tote möglich	Bevölkerungsschutz und Ablenkung des Asteroiden durch Impaktor
300	7 000	70 000	Krater von einigen Kilometern Durchmesser, regionale oder nationale Zerstörung, Tsunami-gefahr, Millionen Tote möglich	Ablenkung des Asteroiden durch Impaktor oder durch Teilsprengung, Zivilschutz wenn möglich
500	3 500	140 000	Krater von einigen zehn Kilometern Durchmesser, internationale Zerstörungen, Tsunami-gefahr, Millionen Tote möglich	Ablenkung des Asteroiden durch mehrere kinetische Impaktoren oder durch Teilsprengung
1000	1 000	500 000	globale Verwüstungen, Auslöschung von Teilen der Zivilisation	Ablenkung durch mehrere kinetische Impaktoren oder starke Teilsprengung
10 000	3	100 Millionen	Ende der derzeitigen Zivilisation	Ablenkung oder Zerstörung durch mehrere Teilsprengungen

und Mitarbeiter des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Dies sei derzeit die bevorzugte Methode und im Prinzip technologisch bereits machbar (siehe Bild S. 53). Dabei nutzen die Forscher die Impulserhaltung aus. Die Sonde soll mit einer Geschwindigkeit von rund zehn Kilometern pro Sekunde auf dem NEO einschlagen. Den Impaktsatelliten soll eine Erkundungs- sonde zu dem betreffenden Objekt begleiten, die dessen Orbit vor dem Beschuss präzise vermisst.

Testmissionen geplant

Ein Ziel für eine derartige Testmission ist bereits ausgewählt: Der Asteroid NEO 2001 QC 34 kommt der Erde nicht näher als das Elfache der Distanz zwischen Erde und Mond und ist damit weit genug entfernt, so dass auch eine unplanmäßige Bahnänderung durch die Mission keinen Einschlag verursachen kann. Außerdem ist er mit einem geschätzten Durchmesser von 240 bis 420 Metern klein genug, um eine Ablenkung auch messen zu können. Zugleich ist für diese Größe die Technologie für eine Impaktmission bereits ausgereift.

Denn je größer ein Asteroid ist, desto einfacher ist es, ihn anzusteuern und optimal zu treffen, so dass sich seine Umlaufbahn wie gewünscht ändert. »Für Objekte mit einem Durchmesser ab 200 Meter aufwärts ist die Genauigkeit der Leit- und Navigationssystemkontrolle kein Problem.« Je kleiner er aber ist, desto schwieriger sei dies. In der kürzlich angelaufenen zweiten Forschungsphase von NEOShield werden sich die Wissenschaftler deshalb darauf konzentrieren, die Methode auch für kleinere Objekte weiter zu präzisieren. »75 Meter wären für die heutige Technologie noch problematisch«, erklärt der Weltraumexperte.

Bis hinauf zu einer Größe von 75 oder vielleicht maximal 100 Metern würde man wohl das Risiko eingehen können und sich darauf beschränken, die betroffene Region zu evakuieren, meint Harris. Da der Schaden, den ein Asteroid auf der Erde verursachen kann, aber nicht nur von der Größe, sondern auch von seiner Zusammensetzung abhängt, befassen sich die Wissenschaftler außerdem intensiv damit, diese Objekte zu charakterisieren. Weiterhin denken sie über die Möglichkeit nach, einen Asteroiden durch Teilsprengung von seiner Bahn abzubringen. Dabei werden sowohl eine nicht nukleare als auch eine nukleare Vorgehensweise diskutiert. Letztere ist jedoch höchst umstritten und wird wohl für einen sehr unwahrscheinlichen Notfall vorbehalten bleiben, etwa wenn ein besonders großer Asteroid mit Kurs auf die Erde ohne viel Vorlaufzeit auftauchen sollte.

ESA und NASA planen derzeit gemeinsam die Mission AIDA, mit der sie gezielt einen Asteroiden anfliegen und ein Ablenkungsmanöver testen wollen. »Außerdem sind eine Menge kleinerer Studien am Laufen, in denen die besten möglichen Abwehrszenarien durchgespielt werden«, sagt Koschny. Zum Beispiel untersuchen zwei seiner Studenten die Möglichkeit, einen Satelliten in einem Orbit um den Mond zu parken, von wo aus er auf einen Asteroiden losgeschickt werden könnte. Dies würde im Ernstfall Zeit raubende Vorbereitungen für einen Start von der Erde aus ersparen.



Am 15. Februar 2013 detonierte ein rund 20 Meter großer Asteroid über der russischen Provinzhauptstadt Tscheljabinsk beim Eintritt in die Atmosphäre. Einzelne Meteoritenteile gingen in der Umgebung nieder. Im Bild zu sehen ist die typische Rauchspur.

Ob und auf welche Weise sich ein drohender Asteroideneinschlag verhindern lässt oder mit welchen Maßnahmen sich die Folgen eines solchen Ereignisses minimieren lassen, wird vom Einzelfall abhängen. Nicht zuletzt dürfte die Entscheidung darüber eine politische sein. Welche Instanz dazu schließlich autorisiert sein wird, steht derzeit noch nicht fest. Mit dem UN-Mandat sind die Staatengemeinschaft sowie die beteiligten Raumfahrtorganisationen jetzt aber auf einem guten Weg. ~

DIE AUTORIN



Felicitas Mokler ist promovierte Astrophysikerin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin und Redakteurin in Heidelberg.

QUELLE

Harris, A. et al.: Asteroid Impacts and Modern Civilisation: Can we prevent a Catastrophe? In: *Asteroids IV*, University of Arizona Press 2015

LITERATURTIPPS

Koschny, D.: Empfehlungen zur Asteroidenabwehr. In: *Sterne und Weltraum* 1/2011 S. 41–43

Mokler, F.: Auf Asteroidenkurs. Interview mit Detlef Koschny. In: *Sterne und Weltraum* 7/2014, S. 48–49
Näheres zur Asteroidenabwehr und wie man selbst bei der Suche nach Asteroiden mitwirken kann

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1353127

If we consider the transform $q^8 \frac{1}{(1-q^8)} + \dots$ (5)

(A) And so $f(v)$ is a Mock \mathcal{D} function.

where $q = -e^{-t}$ and $t \rightarrow 0$

$$f(v) + \sqrt{\frac{\pi}{24}} e^{\frac{\pi^2}{24t} - \frac{t}{24}} \rightarrow 4.$$

The coefft of q^n in $f(v)$ is

$$(-1)^{n-1} \frac{e^{\frac{\pi\sqrt{24n-1}}{24}}}{2\sqrt{n-\frac{1}{24}}} + O\left(\frac{e^{\frac{\pi\sqrt{24n-1}}{24}}}{\sqrt{n-\frac{1}{24}}}\right)$$

It is inconceivable that a single \mathcal{D} function could be found to eat out the singularities of $f(v)$.

Mock \mathcal{D} -functions

$$\phi(v) = 1 + \frac{v}{1+v} + \frac{v^4}{(1+v)(1+v^2)} + \dots$$

$$\psi(v) = \frac{v}{1-v} + \frac{v^4}{(1-v)(1-v^2)} + \frac{v^7}{(1-v)(1-v^2)(1-v^4)} + \dots$$

There are

$$\chi(v) = 1 + \frac{v}{1-v+v^2} + \frac{v^4}{(1-v+v^2)(1-v^2+v^4)} + \dots$$

These are related to $f(v)$ as shown below.

$$2\phi(-v) - f(v) = f(v) + 4\psi(-v)$$

$$= \frac{1-2v+2v^4-2v^9+\dots}{(1+v)(1+v^2)(1+v^4)} + \dots$$

Mock \mathcal{D} -functions (of 5th order)

$$f(v) = 1 + \frac{v}{1+v} + \frac{v^4}{(1+v)(1+v^2)} + \frac{v^9}{(1+v)(1+v^2)(1+v^4)} + \dots$$

$$\phi(v) = 1 + \frac{v}{(1+v)(1+v^2)} + \frac{v^4}{(1+v)(1+v^2)(1+v^4)} + \frac{v^9}{(1+v)(1+v^2)(1+v^4)(1+v^8)} + \dots$$

$$\psi(v) = \frac{v}{1+v} + \frac{v^3}{(1+v)(1+v^2)} + \frac{v^6}{(1+v)(1+v^2)(1+v^4)} + \frac{v^{10}}{(1+v)(1+v^2)(1+v^4)(1+v^8)} + \dots$$

$$\chi(v) = 1 + \frac{v}{1-v} + \frac{v^2}{(1-v^2)(1-v^4)} + \frac{v^3}{(1-v^2)(1-v^4)(1-v^6)} + \dots$$

$$= 1 + \left\{ \frac{v}{1-v} + \frac{v^2}{(1-v^2)(1-v^4)} + \frac{v^3}{(1-v^2)(1-v^4)(1-v^6)} + \dots \right\}$$

$4\chi(v) - f(v) = 3 \cdot \frac{1-2v^2+2v^4}{(1-v)(1-v^2)(1-v^4)}$

$\frac{v^2}{(1-v^2)(1-v^4)} + \frac{\psi(v)}{v+2v^4-2v^9+\dots}$
 $\frac{v^4}{(1-v^2)(1-v^4)(1-v^8)}$
 $\frac{v^7}{(1-v^2)(1-v^4)(1-v^8)(1-v^{12})}$
 $\frac{v^{10}}{(1-v^2)(1-v^4)(1-v^8)(1-v^{12})(1-v^{16})}$
 of order 12 +
 $\frac{v}{(1+v)(1+v^2)}$
 $\frac{v^4}{(1+v)(1+v^2)(1+v^4)}$
 $\frac{v^7}{(1+v)(1+v^2)(1+v^4)(1+v^8)}$
 $\frac{v^{10}}{(1+v)(1+v^2)(1+v^4)(1+v^8)(1+v^{12})}$
 has relation
 of 7th order
 $\frac{v^4}{(1-v^2)(1-v^4)}$
 $\frac{v^9}{(1-v^2)(1-v^4)(1-v^8)}$
 $\frac{v^{13}}{(1-v^2)(1-v^4)(1-v^8)(1-v^{12})}$
 $\frac{v^{17}}{(1-v^2)(1-v^4)(1-v^8)(1-v^{12})(1-v^{16})}$
 related to ϕ

Ever yours
S. Ramanujan

MIT FRDL GEN. VON JON SMITH, TRINITY COLLEGE, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

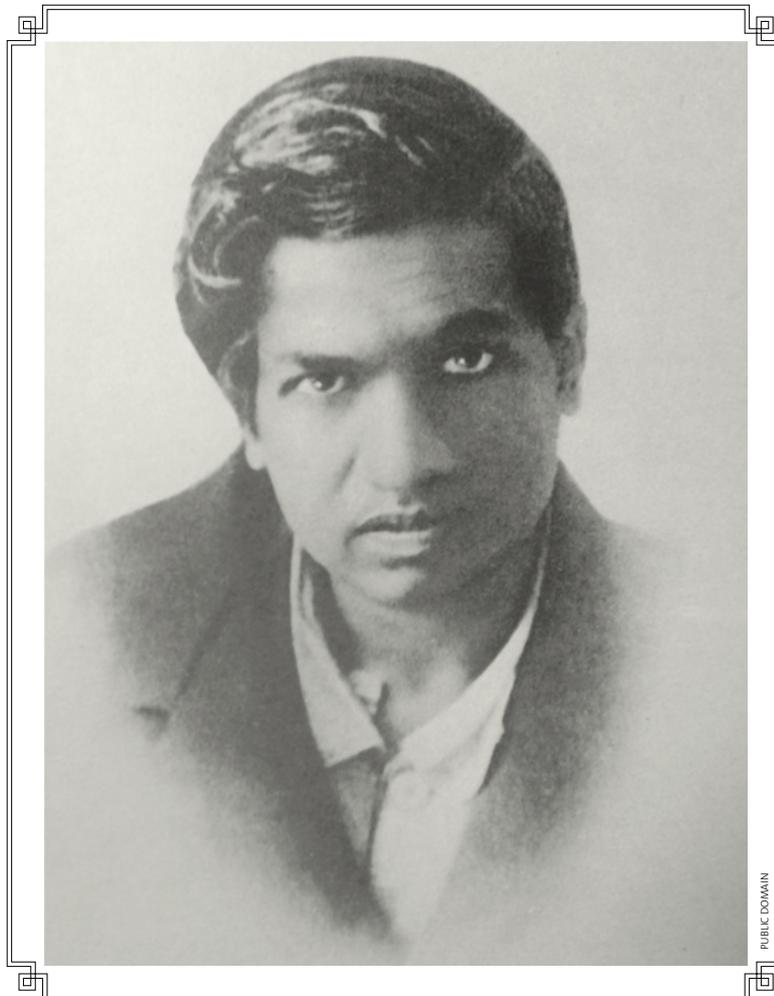
Srinivasa Ramanujan füllte mehrere Notizbücher mit mehr als 3000 Fakten, darunter sehr tiefgründigen, zur Zahlentheorie. Seine Schriften (oben) inspirieren seit damals die Mathematiker.

ZAHLENTHEORIE

Das Orakel

Der Mathematiker Ken Ono hat ein lange offenes Rätsel gelöst – indem er Erkenntnisse nutzte, die er in den unveröffentlichten Arbeiten des indischen Ausnahmetalents Srinivasa Ramanujan entdeckt hatte.

Von Ariel Bleicher



Srinivasa Ramanujan (1887–1920)

PUBLIC DOMAIN

An einem Samstagmorgen im Jahr 1984 fand der 16-jährige Schüler Ken Ono aus Baltimore in der Post einen Umschlag, dünn wie Reispapier und vollgeklebt mit bunten Briefmarken. Adressiert war er an seinen Vater, den japanischen Mathematiker Takashi Ono. Die Absenderin S. Janaki Ammal, laut rot gedrucktem Briefkopf die »Witwe des (verstorbenen) Srinivasa Ramanujan (Mathematisches Genie)«, dankte Ono dafür, dass er für die Skulptur zur Erinnerung an ihren Gatten gespendet hatte.

Bei dieser Gelegenheit hörte der jüngere Ono den Namen des legendären Ramanujan (1887–1920) zum ersten Mal. Das mathematische Ausnahmetalent aus Indien hatte Anfang des 20. Jahrhunderts rätselhafte Behauptungen aufgestellt, die »kaum glaubhaft schienen«, so sein britischer Fachkollege Godfrey Harold Hardy, der intensiv mit ihm zusammenarbeitete (Spektrum der Wissenschaft 4/1988, S. 96). Ramanujans Arbeiten haben den Weg zu völlig neuen Gebieten der Mathematik gebahnt; aus einigen gingen Theorien hervor, die mit einer Fields-Medaille ausgezeichnet wurden – dem mathematischen Äquivalent des Nobelpreises.

Während seines Mathematikstudiums fand Ken Ono – heute Professor für Zahlentheorie an der Emory University in Atlanta (Georgia) – keinen Anlass, sich über Ramanujans Arbeiten Gedanken zu machen. Soweit er wusste, hatte das »mathematische Genie« nichts zu Onos Spezialgebiet hinterlassen, den Modulformen. Das sind spezielle Funktionen komplexer Zahlen, die wegen ihrer bemerkenswerten Symmetrieeigenschaften geschätzt werden.

Erst 1998, als Ono 29 Jahre alt war, trat Ramanujan auf spektakuläre Weise wieder in sein Leben. Der Mathematiker Bruce C. Berndt von der University of Illinois, der die Notizbücher des Genies aufarbeitete, war auf ein weit gehend unbe-

achtetes Manuskript gestoßen. Da es um Modulformen ging, schickte Berndt Ono per E-Mail eine Kopie und bat ihn um Hilfe bei der Entzifferung einiger seltsamer Behauptungen.

Nach zwei Dritteln des Manuskripts stutzte Ono. In sauberer Schülerschrift hatte Ramanujan sechs kühne mathematische Aussagen notiert, die Onos Spezialgebiet berührten – und die er auf Anhieb für völlig falsch hielt. »Das muss Unsinn sein«, dachte er und machte sich daran, sie zu widerlegen.

Ramanujan irte sich nicht

Es ist völlig unklar, auf welche Weise Ramanujan zu den mathematischen Erkenntnissen kam, die er in seinen Manuskripten festhielt. Die Grundlagen hatte er sich mit Hilfe eines veralteten Schulbuchs aus England angeeignet. Mit Mitte 20, im Hauptberuf Angestellter bei der Hafenbehörde in Madras (heute Chennai), schrieb er Briefe mit seinen Ergebnissen an Mathematiker in England. Nur einer antwortete: Hardy, damals ein Professor am Beginn seiner Karriere, lud Ramanujan zu gemeinsamer Forschung nach Cambridge ein. Nach drei Jahren in England erkrankte Ramanujan; heute vermutet man, dass er wegen seiner vegetarischen Ernährungsweise bei der Nahrungsknappheit des Ersten Weltkriegs unter schwerem Vitaminmangel litt. Entkräftet kehrte er nach dem Krieg nach Indien zurück, wo er 1920 mit nur 32 Jahren starb.

Neben seinen 37 veröffentlichten Artikeln hinterließ Ramanujan etliche Briefe, halb fertige Manuskripte sowie drei in Leder gebundene Notizbücher. Bei der Sichtung fanden Hardy und seine Kollegen, dass er klassische Sätze der Zahlentheorie wiederentdeckt hatte, darunter solche, deren erstmaliger Beweis nur den größten Meistern des Fachs gelungen war. Darüber hinaus hatte Ramanujan Gesetzmäßigkeiten vermerkt, die außer ihm noch niemand gesehen hatte.

Ein Universitätsmathematiker hätte gewusst, dass er zu jeder seiner Entdeckungen einen Beweis zu liefern hatte, eine logische Abfolge von Argumenten, die seine Kollegen überzeugen würden. Aber das kümmerte Ramanujan nicht. Er füllte Seite um Seite mit langen Listen von Behauptungen und Berechnungen, die er im Kopf oder an der Tafel ausgearbeitet hatte, und hielt sich selten damit auf, zu erklären, wie er darauf gekommen war. Allein die drei Notizbücher enthalten mehr als 3000 solcher Behauptungen. Sie zu beweisen oder zu widerlegen, bereitet den Mathematikern seit Ramanujans Tod viel Mühe.

Bruce Berndt hatte schon 20 Jahre Arbeit an Ramanujans Nachlass hinter sich, als er auf das Manuskript mit den sechs rätselhaften Aussagen stieß, die Ono nicht glauben konnte. Diese Behauptungen stellen eine Beziehung zwischen Modulformen und den so genannten Partitionszahlen her. Zu jeder natürlichen Zahl n gibt die Partitionszahl $p(n)$ an, auf

Ramanujans Notizbücher enthalten mehr als 3000 Behauptungen, die zu beweisen seinen wissenschaftlichen Nachfahren große Mühe bereitet

AUF EINEN BLICK

AUF DEN SPUREN EINES GENIES

1 Srinivasa Ramanujan, Autodidakt und höchst begabter Mathematiker, füllte Anfang des 20. Jahrhunderts zahlreiche **Notizbücher mit Formeln**, die den Fachleuten große Rätsel aufgaben.

2 Darunter waren Aussagen zur **Zahlentheorie**, die sich später als korrekt erwiesen und **gänzlich neue Gebiete der Mathematik** eröffneten.

3 Ken Ono und seine Kollegen von der Emory University fanden bisher unbekannte Erkenntnisse in einigen von Ramanujans unveröffentlichten Schriften, insbesondere zu den so genannten **falschen Theta-Funktionen**.

4 Denkbare Anwendungen liegen in der **Kryptografie** und der **Theorie Schwarzer Löcher**.



Ken Ono von der Emory University ist ein Experte für Partitionszahlen (Beispiele an der Tafel im Hintergrund).

wie viele verschiedene Weisen sich n in kleinere Zahlen zerlegen lässt. Zum Beispiel ist $p(4) = 5$, denn man kann die Zahl 4 auf fünf verschiedene Weisen als Summe kleinerer Zahlen schreiben: $4 = 1 + 1 + 1 + 1 = 1 + 1 + 2 = 2 + 2 = 1 + 3$. Die Abbildung p , die jeder natürlichen Zahl n ihre Partitionszahl $p(n)$ zuordnet, heißt Partitionsfunktion.

Das sieht auf den ersten Blick ganz harmlos aus; aber seit Jahrhunderten suchen die Mathematiker in der Fülle dieser Zahlen nach irgendwelchen Gesetzmäßigkeiten: Mustern, mit denen sich die Werte der Funktion p vorhersagen, berechnen oder zu anderen mathematischen Erkenntnissen in Beziehung setzen lassen. Insbesondere gibt es keine schöne, handliche Formel, mit der man zu jedem n den Wert $p(n)$ ausrechnen könnte.

Es war Ramanujan, dem der erste Durchbruch gelang. Er und Hardy fanden gemeinsam eine Methode, mit der man $p(n)$ zumindest näherungsweise schnell berechnen kann. Um deren Qualität zu prüfen, beauftragten sie den pensionierten britischen Artillerieoffizier und bekannten Rechen-

künstler Percy Alexander MacMahon, die ersten 200 Partitionszahlen von Hand auszurechnen. Es stellte sich heraus, dass die Näherungsformel von Ramanujan und Hardy erstaunlich präzise war.

Wichtiger noch war ein Zufallsfund. MacMahon hatte die Werte von $p(n)$, mit $n=0$ beginnend, in fünf Spalten notiert (siehe Tabelle S. 60). Ramanujan bemerkte, dass jeder Eintrag in der letzten Spalte – also jede fünfte Partitionszahl von $p(4)$ an – durch 5 teilbar ist, und konnte sogar beweisen, dass sich dieses Muster bis ins Unendliche fortsetzt. Das war eine überaus verblüffende Erkenntnis. Immerhin handeln die Partitionszahlen von der Addition natürlicher Zahlen. Dass sie Gesetzmäßigkeiten in Bezug auf die Division aufweisen, passte überhaupt nicht ins Bild.

Ramanujan fand sogar noch weitere Muster dieser Art. So bewies er, dass von $p(5)$ an jede siebte Partitionszahl durch 7 teilbar ist und ab $p(6)$ jede elfte Partitionszahl durch 11. Merkwürdigerweise scheinen diese »Ramanujan-Kongruenzen« hier bereits ein Ende zu finden. »Anscheinend gibt es keine ebenso einfachen Eigenschaften für andere Primzahlmoduli« als 5, 7 und 11, so Ramanujan in einer Arbeit aus dem Jahr 1919.

Kongruenzen sind nicht selten

Nach seinem Tod suchten die Mathematiker nach weiteren Ramanujan-Kongruenzen und ähnlichen, möglicherweise nicht ganz so einfachen Gesetzmäßigkeiten. Bis Ende der 1990er Jahre war die Ausbeute äußerst mager: Sie fanden nur eine Hand voll weiterer Kongruenzen mit Primzahlen oder Primzahlpotenzen, darunter 29, 173 und 236. Es sah ganz so aus, als wären solche Muster unvorhersagbar und vor allem sehr, sehr selten.

Zu diesem Befund standen die sechs Aussagen Ramanujans in krassem Widerspruch – weswegen Ono ihnen so misstrauete. Bislang kannten die Mathematiker lediglich eine Beziehung zwischen Partitionszahlen und einer sehr speziellen Familie von Modulformen, mit denen sich nur mühsam arbeiten lässt. Dagegen behaupteten Ramanujans sechs Aussagen zu Onos großer Verblüffung, dass zwischen den beiden Gebieten eine bislang ungeahnte, viel tiefer liegende Verbindung bestehe.

Bei einer derart unplausiblen Behauptung hätte Ono normalerweise deren Beweis auf Fehler durchsucht. Da aber Ramanujan keine Beweise aufgeschrieben hatte, setzte Ono ersatzweise konkrete Zahlen in dessen Formeln ein. An wenigstens einem dieser Beispiele müsste sich ja bemerkbar machen, dass die Formeln falsch waren. Es kam aber in jedem einzelnen Fall das Richtige heraus. Also musste Ramanujan Recht haben, folgerte Ono, schloss die Augen und dachte lange darüber nach, was Ramanujan gefunden hatte und niemand sonst.

Ono wusste, dass es unter Modulformen »von Kongruenzen nur so wimmelt« – jenen Teilbarkeitsmustern, von denen Ramanujan einige unter den Partitionszahlen gefunden hatte. Also könnte man die sechs Sätze vielleicht beweisen, indem

man die Partitionsfunktion irgendwie als verkleidete Modulform auf-fasste.

Dann aber, so erkannte Ono mit zunehmender Erregung, konnte er den umfangreichen theoretischen Apparat einsetzen, den er selbst für die Modulformen entwickelt hatte, und damit nicht nur Ramanujans Ergebnisse bestätigen, sondern noch tiefere Geheimnisse der Partitionsfunktion offenlegen. »Es war, wie wenn du ein tolles neues Teleskop geschenkt bekommst«, erinnert sich Ono. »Kaum ist es da, durchsuchst du den Himmel nach Sternen – was in diesem Fall die Partitionszahlen sind – und findest jede Menge Galaxien!«

Auf diesem Wege gelang es Ono, zu zeigen, dass Kongruenzen zwischen Partitionszahlen alles andere als selten sind. Es gibt nicht nur die für 5, 7, 11 und einige verstreute Primzahlpotenzen, sondern unendlich viele.

Onos Kollegen feierten diese Erkenntnis als bahnbrechend. Aber er selbst war nicht zufrieden, denn sein Zugang war ihm noch nicht konstruktiv genug. Er konnte zwar beweisen, dass es überall in den Partitionszahlen Kongruenzen geben muss, aber nicht angeben, wo sie zu finden sind. Noch nicht einmal ungefähre Aussagen der Art »Unter 100 aufeinanderfolgenden Primzahlen gibt es mindestens drei Kongruenzen« oder »Ist p eine Primzahl mit Kongruenz, dann ist die nächste nicht größer als $2p$ « konnte er treffen.

Ono zählt nicht zu den Typen, die sich in ein ungelöstes Problem verbeißen, bis es zäh geworden ist wie ein alter Kaugummi. Stattdessen legt er es in seinem Kopf bei den anderen ungelösten Problemen ab und wartet auf einen günstigen Moment, der die Sache wieder voranbringt. Der kam im Fall der Partitionskongruenzen nach fünf Jahren, als ein Postdoc namens Zachary A. Kent im Frühling 2010 an der Emory University eintraf. Zufällig kamen die beiden auf das Thema zu sprechen – und redeten bald über nichts anderes mehr: in ihren Büros, beim Kaffee und auf langen Wanderungen in den Wäldern nördlich von Atlanta.

Stück für Stück bauten sie in ihren Gedanken eine labyrinthartige Superstruktur, in die sich die Partitionszahlen fein säuberlich einpassen ließen. Und zwar nahmen sie dafür die bizarren Gebilde zu Hilfe, die unter dem Namen » p -adische Zahlen« bekannt sind (Spektrum der Wissenschaft Spezial 2/2005 »Unendlich (plus eins)«, S. 24). Wie die gewöhnlichen reellen Zahlen haben sie unendlich viele Stellen, aber nicht wie üblich hinter, sondern vor dem Komma. Zu allem Überfluss ist die Basis des Zahlensystems

1	1	2	3	5
7	11	15	22	30
42	56	77	101	135
176	231	297	385	490
627	792	1002	1255	1575

Ramanujan bemerkte, dass jede fünfte Partitionszahl durch 5 teilbar ist (rechte Spalte), und bewies, dass dieses Muster sich ewig fortsetzt – eine verblüffende Entdeckung.

nicht wie gewohnt die Zehn, sondern eine Primzahl p . In diesem gewöhnungsbedürftigen System geschrieben, nehmen die Partitionszahlen eine fraktale Struktur an: Sie bilden Muster, die sich fast identisch auf verschiedenen Größenskalen wiederfinden, wie die Verästelungen einer Schneeflocke oder eines Blumenkohls (»Selbstähnlichkeit«). Die Partitionszahlen sind also nicht ein ungeordneter Haufen, in dem sich rein per Zufall ein paar Regelmäßigkeiten einstellen. Vielmehr, so Ono, zeigen sie eine »wunderschöne innere Struktur«, womit sie zu einem dankbaren Forschungsobjekt avancieren. Nun bestand wieder Aussicht, allgemeine Aussagen über sie beweisen zu können.

Ono, Kent und ihre Kollegin Amanda Folsom von der Yale University benötigten mehrere Monate, um alle Einzelheiten ihrer neu-

en Theorie auszuarbeiten. Schließlich konnten sie beweisen, dass es Partitionskongruenzen für jede Primzahl und jede Primzahlpotenz gibt. Jenseits von 11 werden die Muster allerdings deutlich komplizierter; wahrscheinlich hat Ramanujan sie deshalb nie ausgearbeitet.

Ono und seine Koautoren präsentierten ihre Ergebnisse 2011 auf einem speziell einberufenen Symposium an der Emory University. Wenig später quoll sein E-Mail-Postfach von Glückwünschen aus aller Welt über. »Das ist eine dramatische und überraschende Entdeckung«, sagt George E. Andrews, ein Experte für Partitionen von der Pennsylvania State University. »Ich glaube, das hätte nicht einmal Ramanujan sich träumen lassen.«

Schöne Antworten

Ono ruhte sich auf seinen Lorbeeren jedoch nicht aus. Vielmehr nutzten er und seine Kollegen den erzielten Durchbruch, um mächtige Berechnungsverfahren zu entwickeln, die ihrerseits über die reine Mathematik hinaus Anwendungen finden könnten.

Gemeinsam mit Jan Bruinier von der Technischen Universität Darmstadt entwickelte Ono eine Formel, mit der man große Partitionszahlen schnell und exakt berechnen kann – das Fernziel, das Ramanujan nie erreichte. Ono nennt sein Verfahren das »Orakel«. Es verkündet Wahrheiten, ohne dass man nachvollziehen könnte, wie es sie gewinnt, und das nicht nur über Partitionen, sondern möglicherweise auch über spezielle elliptische Kurven (Spektrum der Wissenschaft 1/2009, S. 62).

Elliptische Kurven zählen zu den Hilfsmitteln, mit denen Kryptografen Algorithmen zur Verschlüsselung von Daten gewinnen. Derartige Verfahren arbeiten mit Problemen, deren Lösung zwar existiert, aber so schwer zu berechnen ist, dass die besten heutigen Computer sie in 1000 Jahren nicht finden würden. Paradebeispiel ist das Faktorisierungsproblem: Zerlege eine sehr große Zahl in ihre beiden ebenfalls sehr großen Primfaktoren. Neuere Verfahren verwenden an Stelle der Primzahlen Punkte auf einer elliptischen Kurve, deren Beziehungen untereinander noch weitaus schwerer zu entschlüsseln sind (Spektrum der Wissenschaft 5/2014, S. 20). Sollten das Orakel oder verwandte Entdeckungen neue Wege zu noch exotischeren Relationen weisen, dann könnten Kryptografen daraus vielleicht noch sicherere Verschlüsselungssysteme machen.

Onos Arbeiten haben darüber hinaus eines der größten Geheimnisse in Ramanujans mathematischem Erbe enthüllt. Drei Monate vor seinem Tod schrieb er, mit Fieber und Schmerzen im Bett liegend, noch einen letzten Brief an Hardy in England. »Ich bedaure sehr, Ihnen bisher nicht eine einzige Nachricht geschickt zu haben. Unlängst habe ich sehr interessante Funktionen entdeckt, die ich ›falsche Theta-Funktionen‹ [›mock theta functions‹] nenne ... Sie fügen sich in die Mathematik ebenso wundervoll ein wie die gewöhnlichen Theta-Funktionen.«

Theta-Funktionen sind im Wesentlichen Modulformen. Die »falschen« Theta-Funktionen, die Ramanujan im Sinn hatte, sollten keine Modulformen sein, aber so gut »nachgemacht«, dass sie sich an speziellen Stellen, den »Singularitäten«, wie ihre Vorbilder verhalten. Eine Singularität einer Funktion ist eine Stelle, an der die Funktion keinen Wert hat, sondern in deren Nähe sie über alle Grenzen wächst, so wie zum Beispiel die Funktion $f(x) = 1/x$ bei $x = 0$. Modulformen besitzen unendlich viele solcher Singularitäten. Ramanujan ahnte voraus, dass es zu jeder Modulform eine falsche Theta-Funktion gibt, die nicht nur ihre Singularitäten an denselben Stellen hat, sondern auch in deren Nähe auf fast genau dieselbe Weise gegen unendlich strebt.

Erst im Jahr 2002 lieferte der niederländische Mathematiker Sander Zwegers eine saubere Definition der falschen Theta-Funktionen, unter Verwendung von Konzepten, die erst Jahrzehnte nach Ramanujans Tod formuliert wurden. Noch immer aber konnten Mathematiker dessen Behauptung, diese Funktionen imitierten das Verhalten von Modulformen in der Nähe ihrer Singularitäten, nicht verifizieren.

Am Ende lieferte das Orakel des Rätsels Lösung. Gemeinsam mit Folsom und Robert Rhodes von der Stanford University leitete Ono aus dem zugehörigen Formelapparat ein Verfahren her, mit dem man das Verhalten falscher Theta-Funktionen in der Nähe von Singularitäten berechnen konnte. Damit gelang es ihnen, zu zeigen, dass Ramanujans Vermutung richtig war.

In einem Fall konvergiert die Differenz zwischen der echten und der nachgemachten Theta-Funktion in der Nähe einer Singularität gegen den Wert 4 – ein überraschendes und

geradezu komisches Ergebnis. So genau hätte man es schließlich gar nicht wissen müssen, denn bei Funktionen, die gegen unendlich streben, kann man eine Differenz von 4 getrost vernachlässigen; und ein Wert von beispielsweise 372 statt 4 wäre auf dasselbe Ergebnis hinausgelaufen.

Neuerdings studieren Physiker mit Hilfe falscher Theta-Funktionen eine Eigenschaft Schwarzer Löcher, die so genannte Entropie – ein Maß dafür, wie nahe das System einem Zustand perfekten Energiegleichgewichts ist. Ono warnt jedoch davor, die potenziellen Anwendungen seiner Arbeiten überzubewerten. Wie viele Theoretiker bemisst er die Bedeutung eines Ergebnisses nicht nach dessen Anwendbarkeit für die Praxis. Wichtige Entdeckungen seien in demselben Sinn herausragend wie ein Gemälde oder eine Sonate.

Das sieht auch George Andrews so. »Kens Theoreme werden uns weder mit einem unendlichen Vorrat an grüner Energie versorgen noch Krebs heilen oder etwas Ähnliches.« Es dauert oft mehrere Jahrzehnte, bis mathematische Entdeckungen eine bedeutende Rolle in der Wissenschaft oder Technologie zu spielen beginnen – und welche, lässt sich kaum oder überhaupt nicht vorhersagen.

Ono kann sich noch daran erinnern, wie die ruhige Hand seines Vaters die seltsamen Symbole mit Ramanujans Kongruenzen zum ersten Mal auf seinem gelben Schreibblock notierte. »Warum sind es nur drei?«, war damals seine erste Frage. »Das weiß niemand«, antwortete ihm sein Vater.

Ono sitzt im Esszimmer seiner Familie in Georgia. An der Wand hinter ihm hängt eine gerahmte Fotografie jener Bronzestatuette Ramanujans, die von Spenden hunderter Wissenschaftler aus aller Welt, darunter Onos Vater, finanziert wurde. »Auch in meinen wildesten Fantasien hätte ich mir nicht vorstellen können, dass ich eines Tages sagen würde: ›Weißt du was, Papa? Diese Kongruenzen sind nicht die einzigen – ganz und gar nicht.« ~

DIE AUTORIN



Ariel Bleicher hat für die Fachzeitschrift »IEEE Spectrum« geschrieben und ist Wissenschaftsjournalistin in New York.

QUELLEN

Folsom, A. et al.: ℓ -Adic Properties of the Partition Function. In: Advances in Mathematics 229, S. 1586–1609, 2012
Griffin, M. et al.: Ramanujan's Mock Theta Functions. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 110, S. 5765–5768, 2013

WEBLINKS

www.spektrum.de/artikel/1030269
 Der mathematische Monatskalender über Ramanujan

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1351079

Das Weltbild der Hethiter

In alten Kulturen galt das Jenseits mal als düsterer Ort des Schreckens, mal als Spiegelbild der Erde. In den kosmologischen Vorstellungen der Hethiter existierten sogar beide Ansichten nebeneinander – als Ergebnis unterschiedlicher religiöser Traditionen.

Von Susanne Görke

Das bronzeitliche Ägypten blieb durch seine monumentalen Bauwerke im Gedächtnis der Menschheit präsent, an die Reiche Mesopotamiens erinnert das Alte Testament, die Epen Homers an das mykenische Griechenland. Die vierte Großmacht jener Epoche hingegen geriet in Vergessenheit: das in Anatolien verankerte Reich der Hethiter. Erst Ende des 19. Jahrhunderts stießen Archäologen auf erste Hinweise – im Archiv Amarnas, der Hauptstadt der Pharaonen Amenhotep III. und IV. Seitdem wird diese altanatolische Kultur intensiv erforscht. Tausende Keilschriftdokumente, die meisten aus der Metropole Hattuscha, vermitteln nicht nur Einblicke in ihre Politik und Wirtschaft, sondern auch in die Ge-

dankenwelt der Menschen bis hin zu ihren kosmologischen und religiösen Vorstellungen. Dabei erweisen sich die Hethiter als ausgesprochen weltoffen: Sie integrierten häufig Ideen anderer Kulturen, selbst die ihrer Konkurrenten.

Zum Beispiel übernahmen die Hethiter die babylonische Keilschrift, statt ein eigenes Zeichensystem zu entwickeln. Dazu holten sie Lehrer ins Land oder schickten künftige Schreiber zur Ausbildung nach Mesopotamien. Weil diese auch das Studium und Kopieren literarischer Werke beinhaltete, gelangte Gedankengut von dort nach Hattuscha.

Eine weitere Ideenquelle bildeten in der so genannten Vorgroßreichszeit (um 1400 – 1350 v. Chr.) die in Nordmesopotamien siedelnden Hurriter, deren Reich als Mittani



CHINA CRISIS / CC-BY-SA-2.5 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/2.5/LEGALCODE)

bezeichnet wird (siehe Karte S. 64). So fanden verschiedene Gottheiten in der hethitischen Götterwelt ihren Platz, darunter der hurritische Wettergott Teschschub, seine Frau Hebat und deren Sohn Scharruma, ebenso die wichtigste Göttin der Hurriter: Schauschga, die Schwester des Wettergotts. Hier lief der Import über Königinnen aus dem kleinen Reich Kizzuwadna. Die Hurriter übten dort großen Einfluss aus, dem versuchte Hattuscha durch Eheschließungen zu begegnen. Und mit den Prinzessinnen aus Kizzuwadna gelangte hurritisches Gedankengut an den eigenen Hof. Dass sich die Hethiter nicht dagegen sperrten, entsprach einer pragmatischen Grundhaltung, die sie auch in Sachen Religion zeigten: Man ließ unterworfenen Völkern ihren Glauben und integrierte diesen gegebenenfalls in den eigenen, möglicherweise um örtliche Gottheiten nicht zu erzürnen.

Gebieten über Wind und Regen

Das galt allerdings nicht für die Hauptgottheiten. Wie andere Völker Altanatoliens sahen die Hethiter einen Wettergott als Herrn des Pantheons und des Himmels: Tarhun, in einer älteren Form Taru, gebot über die Winde wie den Regen und beschützte das Königshaus. Da ihm gemeinsam mit einer Sonnengöttin der Kern des gesamten Reichsgebiets gehörte, setzte er den König dort als Verwalter ein. Anders als etwa in Ägypten galt dieser mithin nicht als irdische Verkörperung des höchsten Gottes, sondern war dessen Beamter, der ihm Rechenschaft schuldig war und ihm in Festen huldigte, um dem Reich und der Dynastie Wohlstand zu sichern.

Etliche weitere Wettergötter erfuhren in Städten außerhalb Hattuschas Verehrung. Einige erlangten aber auch überregionale Bedeutung, darunter der in der heiligen Stadt Nerik verehrte Wettergott (dessen Name heute nicht mehr bekannt ist). Eine wichtige Rolle spielte auch Tarus/Tarhuns Sohn Telipinu, der Herr aller Pflanzen. Als dieser einmal zornig verschwand – der Grund dafür ist leider nicht überliefert –, stand dem Mythos nach alles Wachstum still. Emsig suchte man nach ihm, doch erst die Biene wurde fündig. Ihr gelang es, den Gott zu besänftigen, so dass sich die Natur regenerieren konnte. Große Bedeutung kam auch dem »Sonnengott des Himmels«

AUF EINEN BLICK

DIE TEILUNG DES KOSMOS

1 Im 14. Jahrhundert v. Chr. stieg das **anatolische Königreich der Hethiter** zur Großmacht auf. Von seiner Hauptstadt Hattuscha aus beherrschte es im 13. Jahrhundert weite Gebiete bis in den Norden Mesopotamiens.

2 Umfangreiche **Keilschriftfunde** vermitteln ein Bild der hethitischen Kultur, auch der religiösen Vorstellungen. Dabei zeigt sich immer wieder, dass fremdes Ideengut auf verschiedene Weise Eingang fand.

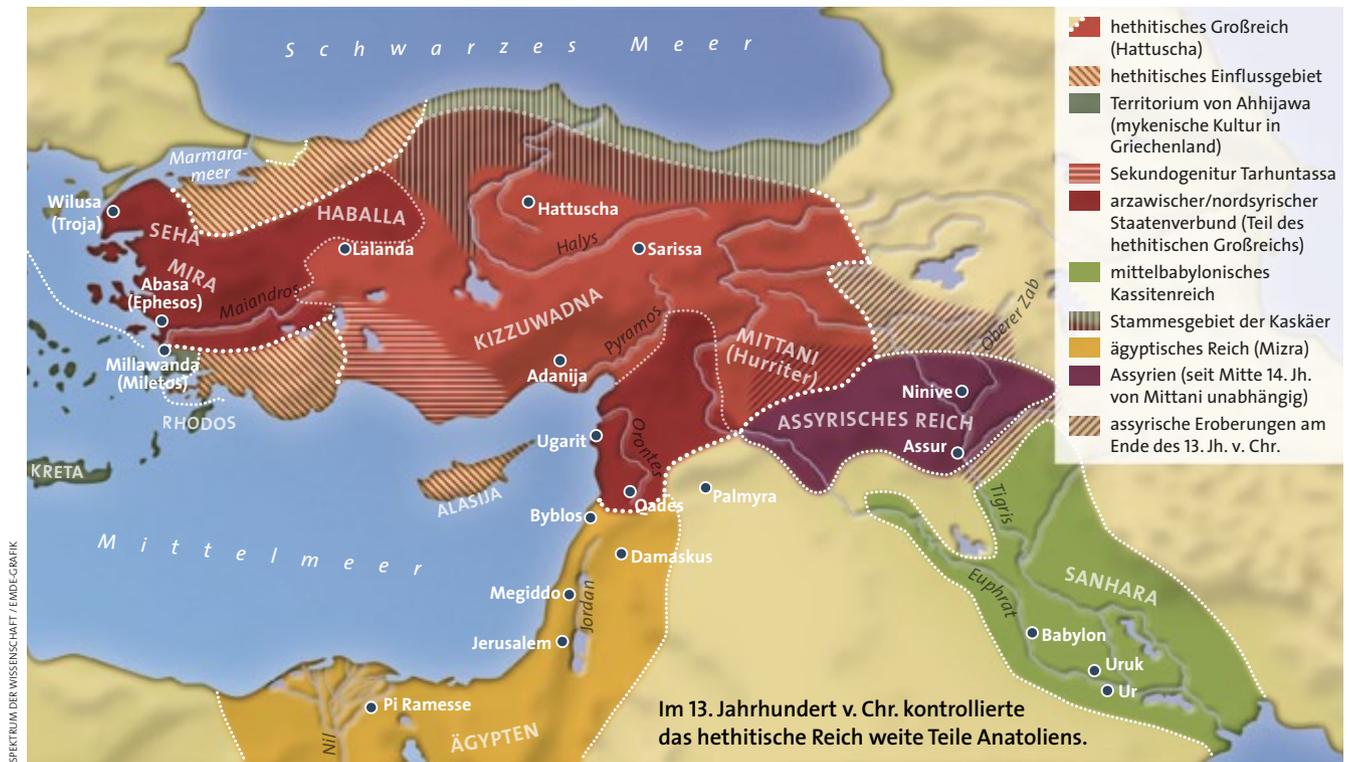
3 Insbesondere existierten **zeitgleich zwei kosmologische Vorstellungen**: In der einen wurden Erde und Jenseits nicht scharf voneinander getrennt, in der anderen gab es eine selbst für Götter nur schwer zu überwindende Grenze. Diese Traditionen prägten neueren Forschungen zufolge auch rituelle Feste.

Ein Relief aus einer in Yazilikaya bei Hattuscha entdeckten Kammer repräsentiert vermutlich zwölf Unterweltsgötter, denn die Anlage ist wohl Teil einer Gedenkstätte für den im 13. Jahrhundert verstorbenen Großkönig Tuthaliya IV. Außerdem barg sie eine Abbildung des Unterweltsgotts Nergal. Weil viele Götterdarstellungen dort Inschriften mit hurritischen Namen besitzen, dürfte Yazilikaya von einer mesopotamischen Kosmosvorstellung geprägt sein, in der die Unterwelt vom Diesseits strikt getrennt ist.

Diese gut vier Zentimeter hohe Goldfigur aus dem 15. bis 13. Jahrhundert v. Chr. (Fundort unbekannt) stellt vermutlich die Herrscherin der Unterwelt dar, die »Sonnengöttin der Erde« – der Kopfschmuck repräsentierte die Sonnenscheibe. Auf ihrem Schoß saß dann ihr Sohn Telipinu, Herr der Pflanzenwelt. Diese in dem überregional wichtigen Kultort Arinna verehrte Göttin entstammte der altanatolischen Glaubenswelt, die das Betreten und Verlassen der Unterwelt kannte.



PHIGCOM / CC-BY-SA-3.0 (ERLATIVECOMMONS/UCLES/IN/SA/9.0/LEGALCODE)



und der »Sonnengöttin der Erde« zu, die den täglichen Lauf des Gestirns über den Himmel beziehungsweise seinen angenommenen nächtlichen Gang durch die Unterwelt repräsentierten.

Neben diesen Hauptgottheiten verehrte man zahllose Nebengötter, darunter auch lokale Ausprägungen der eben genannten. Von vielen Unsterblichen kennt man nur noch die Namen aus so genannten Opferlisten, die bei rituellen Festen genau festhielten, welche Gaben wem in welcher Menge dargebracht wurden. Zu den aus Mesopotamien importierten Nebengöttern zählten beispielsweise die Liebes- und Kriegsgöttin Ischtar, der Gott der Weisheit Ea sowie einige Unterweltgottheiten. Andere wie der erwähnte Telipinu entstammten der Glaubenswelt der Hattier, jenem Volk, das schon vor der Einwanderung der Hethiter im 3. Jahrtausend v. Chr. in Zentralanatolien beheimatet gewesen war.

Wohlgemerkt: Fremde Religionselemente in den eigenen Glauben aufzunehmen, war in der Antike nicht unüblich.

Der griechische Gott Apollon etwa stammte ursprünglich aus Kleinasien, und die ägyptische Göttin Bastet prägte eine Variante der griechischen Artemis. Auffällig ist aber, dass in das hethitische Pantheon übernommene Gottheiten unverändert blieben. Das erforderte eine beachtliche Integrationsleistung, denn zwischen den altorientalischen Religionen gab es durchaus grundlegende Unterschiede.

So dürften die Hethiter dem Jenseits optimistischer entgegengesehen haben als ihre Nachbarn in Mesopotamien: Einem nordsyrischen Mythos nach floh der Gott Alalu, als Anu ihn vom Himmelsthron stieß, nicht an einen anderen Ort in dieser Sphäre, sondern in die Unterwelt. Auch der für das Umland von Hattuscha Regen bringende Wettergott von Nerik verbargte sich mitunter dort – was wohl Phasen anhaltender Trockenheit erklären sollte. Er gelangte offenbar problemlos in die Welt der Toten und ebenso leicht wieder zurück.

Hingegen durfte die Göttin Ischtar laut einer aus Assyrien bekannten Erzählung nur nackt und bar ihrer göttlichen Kräfte vor die Herrin der Unterwelt Inanna treten. Der Mythos sprach von einem »Land ohne Wiederkehr« und einem »Haus, dessen Eintretende des Lichts beraubt sind«, mit nichts als Staub und Lehm als Nahrung. Zwar gibt es nur wenige hethitische Beschreibungen der Unterwelt, die auch »unteres Land« oder »dunkle Erde« genannt wurde. Aber die Verhältnisse wurden offenbar weniger deprimierend gesehen. Allerdings standen dort hinter sieben Türen bronzene Kessel voller Unheil und Unreinheiten; ihre Deckel verhinderten, dass die Welt der Lebenden davon heimgesucht wurde.

Himmel und Jenseits spielten auch in den Vorstellungen von der Entstehung der Welt eine wichtige Rolle. Sehr auf-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Hochkulturen« finden Sie unter

www.spektrum.de/t/hochkulturen



FRALWE FÖCKE

schlussreich ist ein Text aus Hattuscha, der den Machtkampf des Wettergotts Teschschub mit seinem Sohn, dem Steindämonen Ullikummi, schildert. Eine wichtige Rolle spielte dabei eine Sichel. Diese habe Himmel und Erde auseinandergeschnitten. Die Passage eines anderen Mythos verrät: »Als sie Himmel und Erde nahmen, trennten sich die Götter. Die oberen Götter nahmen sich den Himmel, die unteren Götter aber nahmen sich Erde und Unterwelt.« Im Kumarbi-Zyklus wird vom Kampf eines himmlischen und eines unterweltlichen Göttergeschlechts berichtet. Während der erste Herrscher, von seinem Nachfolger vertrieben, in die Unterwelt flüchtete, floh der Usurpator bei seiner eigenen Vertreibung in den Himmel. Dieser Zyklus zeigt deutlich eine Dreiteilung der weltlichen Sphären: Himmel – Erde – Unterwelt, während das davor erwähnte Fragment nur eine Zweiteilung kennt: Himmel – Erde und Unterwelt nebeneinander.

Das Phänomen unterschiedlicher Kosmologien findet sich auch in anderen Schriften. Dem deutschen Hethitologen Heinrich Otten von der Philipps-Universität Marburg und seiner Prager Kollegin Jana Siegelová war das 1970 erstmals aufgefallen. Die Idee wurde Mitte der 1990er Jahre wieder aufgegriffen und wird heute von den meisten Altorientalisten anerkannt. Demnach existierten im hethitischen Reich

gleichzeitig zwei Vorstellungen der Weltkonstruktion: eine zweigeteilte, welche Erde und Unterwelt als eine Sphäre zusammenfasste, sowie eine dreigeteilte, die sie separierte. Das erste Konzept lässt sich auf hattisch-anatolische Vorstellungen zurückführen, während das dreigeteilte System mesopotamische Sichtweisen widerspiegelt. Sind zwei Versionen eines Mythos oder Gebets überliefert, dürfte diejenige, die eine Zweiteilung des Kosmos schildert, demnach die ältere sein.

Reisen in die Unterwelt

Weil es im altanatolischen Glauben zwischen Erde und Unterwelt einen fließenden Übergang gab, erschien das Jenseits wohl auch weniger schrecklich. Vermutlich spiegelte es in der Vorstellung jener Menschen die ihnen vertrauten Verhältnisse auf der Erdoberfläche und konnte damit per se nicht unwirlich sein. Das erklärt auch, warum in der hattisch-anatolischen Religion verankerte Gottheiten unbeschadet in die Unterwelt hinab- und wieder hinaufsteigen konnten.

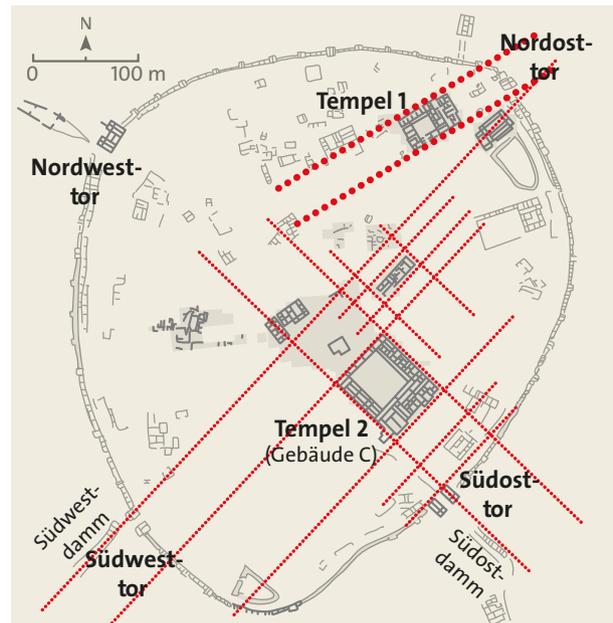
Wie aber wirkten sich solche feinen Differenzen in der Praxis aus? Religion war ein zentrales Element des Lebens in jener Zeit, sollte das Land gedeihen und wollte man Krankheiten vom eigenen Haus fernhalten. Weil das Geschehen auf der Erde als Abbild des Willens der Gottheiten galt, richtete

Orientierung an der Sonne

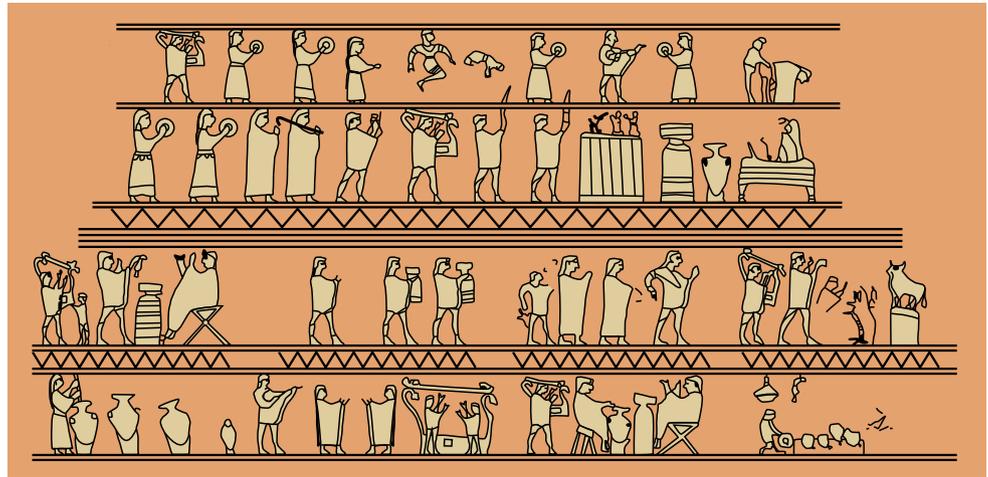
Bei Ausgrabungen in Kuschakli in Zentralanatolien durch Archäologen der Philipps-Universität Marburg von 1992 bis 2004 kam eine hethitische Stadtanlage zum Vorschein, die anhand von Keilschrifttexten als das antike Sarissa identifiziert wurde. Sie war gegen Ende des 16. Jahrhunderts v. Chr. offenbar planmäßig entlang zweier Hauptachsen angelegt worden: eine in Richtung Nordwest-Südost, die zweite nach Südwest-Nordost (siehe Bild). Diese Achsen endeten jeweils an Stadttoren; größere Tempel und öffentliche Gebäude waren an ihnen aufgereiht.

Leider lieferte das Studium hethitischer Texte bislang keine Anweisungen zur Achsenorientierung. Für die Ausrichtung des Tempels 1 nimmt der leitende Ausgräber Andreas Müller-Karpe kosmologische Gründe an. In Frage kommen archäoastronomischen Berechnungen nach ein Venusaufgang am Tag der großen Venuswende, der Sonnenaufgang am Tag der Sommersonnenwende oder ihr Untergang zur Wintersonnenwende. Da Venus- und Wintersonnenwende auf Grund der Umlaufbahn des Planeten mitunter nahe beieinanderliegen, könnten sogar beide die Ausrichtung bestimmt haben. Weil der Tempel vermutlich einer Ischtar-Variante geweiht war – einige Texte erwähnen die Göttin –, wäre das Bauwerk wohl auf ein mit ihr assoziiertes Himmelsereignis ausgerichtet worden, doch genauer lässt sich das nicht sagen.

Auch die Stadtanlage von Hattuscha konnte Müller-Karpe hinsichtlich der astronomischen Gegebenheiten zur Zeit ihrer Erbauung im 13. Jahrhundert v. Chr. deuten. Demnach wäre die



Sonne am Tag der Sommersonnenwende über dem so genannten Königstor auf- und über dem Löwentor untergegangen; zwischen beiden verlief ein Prozessionsweg. Während der Tag- undnachtgleichen beschien sie außerdem kurz nach ihrem Aufbeziehungsweise kurz vor ihrem Untergang Yerkapi, einen gepflasterten Wall, der vermutlich eine repräsentative Funktion hatte. Unter diesen Prämissen wäre die hethitische Hauptstadt bewusst auf den Sonnenlauf ausgerichtet worden.



Die Indandik-Vase ist eines der wenigen erhaltenen Exemplare althethitischer reliefverzierter Kultkeramik. Das 82 Zentimeter hohe Gefäß zeigt Szenen eines Festes aus anatolischem Kontext. Auf dem untersten Fries trifft man die Vorbereitungen; in dem darüber wird einem Gott eine Kanne gereicht und ein Stier geopfert; auf den beiden oberen Friesen begleiten Musiker eine Hochzeit.

te man ganze Städte nach Himmelsereignissen aus (siehe Kasten S. 65). Zudem wurden die Gottheiten in großen, rituellen Festen verehrt. Zahlreiche Texte beschreiben solche Inszenierungen in Hattuscha und anderen Städten. Auch hier lassen sich hattisch-anatolische Traditionen von solchen unterscheiden, deren Ursprung den verehrten Gottheiten nach in Südostanatolien, Nordsyrien oder Mesopotamien lag.

In die erste Kategorie gehörte das »Krokusfest«, das den neuen Frühling feierte. Es dauerte 35 bis 40 Tage und fand hauptsächlich in Hattuscha statt. Das Königspaar reiste aber auch zu wichtigen Heiligtümern in der näheren Umgebung, so am neunten Tag zu einem Tempel in der Stadt Arinna. Auch dort wurde ein enormer Aufwand getrieben: Es galt, Speisen zu bereiten, den Boden des Heiligtums zu fegen, zu musizieren, dem König Wasser zum Händewaschen zu reichen und vieles mehr. Die zugehörigen Ritualtexte listeten Personen auf, die sich während dieser Phase mit Priestern und dem König im Tempelbezirk befanden: ein Herold, mehrere Sänger und Rezipitoren, Köche und ein Mundschenk, Leibwächter samt Offizier, diverse sonstige Palastangestellte und etliche Personen, deren Funktion heute nicht mehr klar ist. Ein ähnliches Bild boten dann die eigentlichen Kulthandlungen im Allerheiligsten mit Trankopfern, bei denen beispielsweise zudem Tänzer, Bronzeschalenhalter, Handwerker und sogar Fremde anwesend sein durften.

Hingegen führen die Teilnehmerlisten mesopotamisch oder hurritisch beeinflusster Feste stets nur reines Kultpersonal auf wie Priester, Musiker und den König. Die bunte Vielfalt von Personen und Funktionen fehlte hier völlig, bei diesen Ritualen war das Allerheiligste der Tempel offenbar nur einem ausgewählten Kreis vorbehalten.

Wie ich 2013 erstmals zeigen konnte, dürfte dies den unterschiedlichen kosmologischen Konzepten geschuldet sein: Wo Erde und Unterwelt als derart strikt voneinander

getrennt galten, dass selbst Götter die Grenze nicht so einfach überschreiten konnten, mussten zwangsläufig auch die entsprechenden Kulthandlungen Auserwählten vorbehalten sein. Archäologisch ist dieses Phänomen noch schwer greifbar, da es bisher nicht gelang, ein Heiligtum eindeutig einem einzelnen Gott zuzuweisen. Einen Hinweis aber gibt es: Große Höfe, wie sie im Tempelviertel Hattuschas mitunter nachgewiesen wurden, sollten offenbar zahlreichen Personen Platz bieten, dienten also möglicherweise der Verehrung hattisch-anatolischer Gottheiten. Kleinere Gebäude wären dann für den Dienst an mesopotamischen Gottheiten errichtet worden. ~

DIE AUTORIN



Die promovierte Altorientalistin und Hethitologin **Susanne Görke** erforscht die hethitische Religion und Mythologie am Institut für Altertumswissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

QUELLEN

Görke, S.: Hints at Temple Topography and Cosmic Geography from Hittite Sources. In: Ragavan, D. (Hg.): Heaven on Earth. Temples, Ritual, and Cosmic Symbolism in the Ancient World, Oriental Institute Seminars 9, The Oriental Institute of the University of Chicago, Chicago 2013, S. 41–54

LITERATURTIPP

Klinger, J.: Die Hethiter. C.H. Beck, München 2007. Ein gut verständliches Kompendium zur hethitischen Geschichte, Kultur, Religion und Sprache.

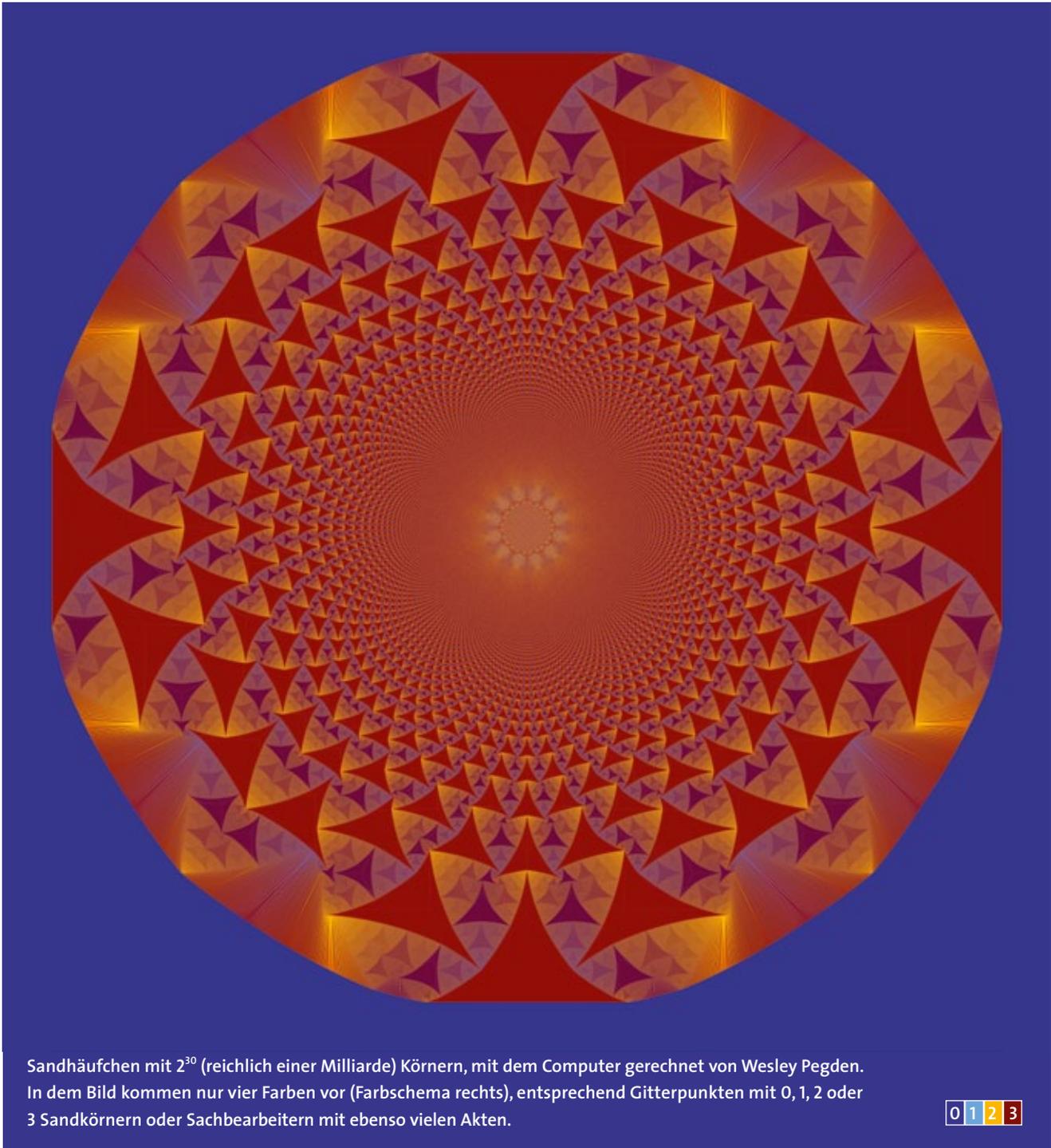
Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1351075

SELBSTORGANISIERTE KRITIZITÄT

Das Wahnsinnsamt, Sandhäufchen und apollonische Dreiecke

Was passiert, wenn man Sandkörner auf eine ebene Fläche rieseln lässt? Aus einem idealisierten, sehr einfachen Bildungsgesetz entsteht völlig überraschend eine unendlich vielgestaltige Struktur.

VON CHRISTOPH PÖPPE



Sandhäufchen mit 2^{30} (reichlich einer Milliarde) Körnern, mit dem Computer gerechnet von Wesley Pegden. In dem Bild kommen nur vier Farben vor (Farbschema rechts), entsprechend Gitterpunkten mit 0, 1, 2 oder 3 Sandkörnern oder Sachbearbeitern mit ebenso vielen Akten.

0 1 2 3

WESLEY PEGDEN, CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

In einem Großraumbüro stehen viele Schreibtische nebeneinander in einer sehr langen Reihe; an jedem sitzt ein Sachbearbeiter und brütet dumpf über irgendwelchen Akten, die vor ihm liegen. Ab und zu kommt der Chef herein, knallt dem Mann, der genau in der Mitte sitzt, eine Akte auf den Tisch und geht wieder.

Auf Grund eines speziellen Seelenzustands fühlt sich jeder Sachbearbeiter außer Stande, einen Vorgang zu bearbeiten. Schlimmer noch: Sowie sich auf seinem Schreibtisch mehr als zwei Akten stapeln, erleidet er einen Anfall von Überlastungswahn. Panikartig wirft er dem Nachbarn zur Rechten und zur Linken je eine Akte hin, womit er seine eigene Arbeitslast von – zum Beispiel – drei Akten auf eine abgesenkt hat.

Wenn aber der Nachbar schon vorher an der Belastungsgrenze von zwei Akten lebte, löst der Wahnsinnsakt seines Kollegen bei ihm einen entsprechenden Anfall aus. Daraufhin wirft er ihm nicht nur die soeben empfangene Akte zurück, sondern belastet auch seinen Kollegen zur anderen Seite. Gesetzt den Fall, jeder Sachbearbeiter wäre bereits mit zwei Akten eingedeckt gewesen, so löst eine einzige zusätzliche Akte eine Welle von Wahnanfällen aus, die sich durch das ganze Amt ausbreitet und auch über den ursprünglichen Auslöser hinwegschwappt. Denn der hat ja von beiden Seiten seine abgeworfene Akte zurückbekommen und sieht sich daher in derselben Notlage wie zuvor.

Gut, dass das Amt in einem alten Wasserschloss untergebracht ist. Der Rechtsaußen unter den Sachbearbeitern wirft zwar wie jeder andere bei einem Wahnanfall je eine Akte nach rechts und links, aber rechts von ihm ist kein Kollege mehr, sondern nur ein Fenster und dahinter der Wassergraben, in welchem die Akte ihre endgültige Erledigung findet. Entsprechendes gilt für den Kollegen zur äußersten Linken. Man stelle sich nur vor, es gäbe keine Stelle, an der eine Akte aus dem System verschwinden könnte, zum Beispiel weil die Schreibtische im Kreis angeordnet sind! Der Wahn würde kein Ende nehmen.

Aber auch so lebt das Amt ständig am Rand der Katastrophe. In den vielen Jahren seines Bestehens sind die armen Beamten mit so viel Arbeit eingedeckt worden, dass sie alle die gerade noch erträglichen zwei Akten auf dem Tisch haben – bis auf einen. Das ist derjenige, mit dessen Panikakt die letzte Welle endete, weil seine beiden Nachbarn nur je eine Akte auf dem Tisch hatten. Jede neu eintreffende Akte – die nicht gerade diesen Glücklichen trifft – löst wieder eine Lawine aus, die erst dann zum Stillstand kommt, wenn mindestens eine Akte im Graben verschwunden und das System daraufhin zu einem prekären Gleichgewicht zurückgekehrt ist.

Akten in Sandkorngröße

Natürlich gibt es ein solches Amt nicht; noch nicht einmal annähernd. Vielmehr dient das »Wahnsinnsamt« (»crazy office«) als Modell für ein Systemverhalten, das unter dem Namen »selbstorganisierte Kritizität« große Beachtung gefunden hat (Spektrum der Wissenschaft 3/1991, S. 62). Die zahlreichen Komponenten eines solchen Systems üben auf ihre jeweils nächsten Nachbarn Wirkungen aus, auf deren Einzelheiten es nicht besonders ankommt; in ihrer Gesamtheit steuern sie das System jedoch regelmäßig nicht

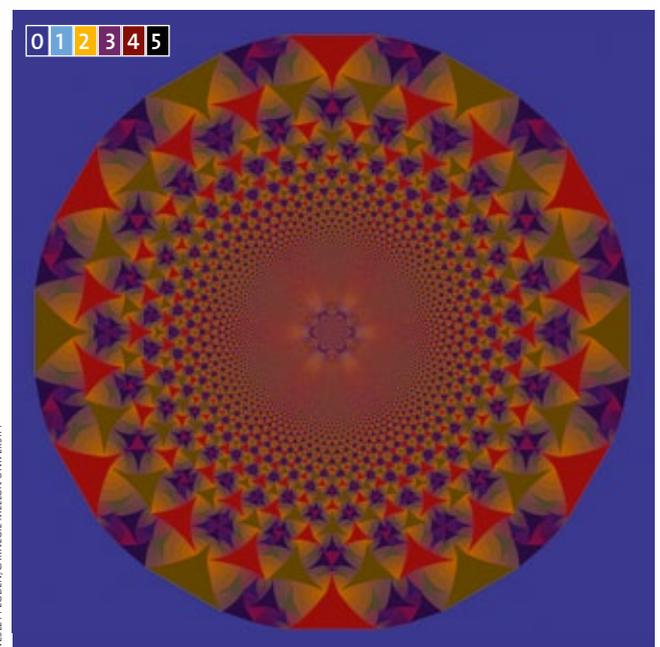
auf ein stabiles Gleichgewicht hin, sondern auf einen so genannten kritischen Zustand, hart am Rand des Wahnsinns sozusagen.

In einem solchen Zustand löst jede Störung eine Lawine von Reaktionen aus: meistens eine kleine, in seltenen Fällen jedoch eine, die das ganze System erfasst. Per Bak und Kan Chen, die Schöpfer dieses Konzepts, machen damit unter anderem plausibel, warum Erdbeben in allen Größenordnungen von harmlos bis katastrophal vorkommen, und können mit ihrem Modell sogar deren Häufigkeitsverteilung reproduzieren.

Die klassische Realisierung der selbstorganisierten Kritizität ist jedoch weit aus harmloser: Sandhäufchen. Lässt man lauter Sandkörner auf dieselbe Stelle rieseln, so bildet sich ein Kegel, dessen Neigungswinkel sich genau auf den kritischen Wert einstellt. Ist der Haufen an irgendeiner Stelle flacher, bleiben die nächsten Sandkörner dort einfach liegen; ist er steiler, so bringt irgendwann ein Korn die Flanke ins Rutschen, und die mehr oder weniger große Lawine dauert an, bis der kritische Neigungswinkel wieder erreicht ist.

Was hat nun das Wahnsinnsamt mit einem Sandhäufchen zu tun? Das ist nicht offensichtlich, selbst wenn wir jede Akte in Gedanken auf Sandkorn-

Sandhäufchen mit Gitterpunkten an den Ecken eines Dreiecksgitters (links, jeder Gitterpunkt hat sechs Nachbarn), eines Bienenwabenmusters (Mitte, drei Nachbarn) und an der Aufteilung der Ebene in gleichseitige Dreiecke und Sechsecke im Wechsel (rechts, vier Nachbarn). Erst wenn ein Sandturm so viele Körner enthält, wie er Nachbarn hat, kippt er über, indem er an jeden Nachbarn ein Korn abwirft.



größe verkleinern. Unsere Sachbearbeiter sind entlang einer eindimensionalen Linie angeordnet, während der Sandkegel auf der zweidimensionalen Ebene ruht. Aber diesem Mangel ist leicht abzuhelfen: Wir setzen die Beamten wie bei der Abiturklausur in vielen säuberlich ausgerichteten Reihen in eine riesengroße Halle, so dass jeder von ihnen einen Kollegen zur Rechten, zur Linken sowie vor und hinter sich hat. Aus Gründen der Gleichbehandlung müssen wir die Schwelle zum Panikakt hochsetzen: Erst wenn jemand vier Akten auf dem Tisch hat, verteilt er sie an seine nächsten Nachbarn und bleibt von aller Arbeit befreit zurück. Das entspricht nicht genau dem eindimensionalen Fall, bei dem niemand, der je auch nur eine Akte auf dem Tisch hatte, in den paradiesischen Urzustand zurückfällt; aber auf solche Einzelheiten kommt es nicht an.

Wieder findet an den Wänden der Halle Aktenvernichtung statt, entsprechend einem Sandhäufchen auf einem Tisch begrenzter Größe: Was über die Tischkante zu Boden fällt, nimmt nicht mehr am Spiel teil. Zahlreiche Forscher bevorzugen allerdings unendlich große Hallen, in denen entsprechend nie ein Sandkorn verloren geht (und kein Beamter bis auf endlich viele je mit einer Akte in Berührung kommt).

Selbst ein zweidimensionales Wahnsinnig unterscheidet sich jedoch von einem echten Sandhäufchen insofern, als die Beamten im Gegensatz zu den Sandkörnern ein eher autistisches Verhalten zeigen. Ob ein kleiner Turm aus Sandkörnern umkippt, hängt davon ab, wie hoch die Nachbartürme sind; ob ein Sachbearbeiter überschnappt, entscheidet nur sein eigener Zustand. Aber das hat Per Bak, Chao Tang und Kurt Wiesenfeld nur mäßig beeindruckt, als sie 1987 ihr erstes Modellsystem mit selbstorganisierter Kritizität durchrechneten und es »Sandhäufchenmodell« (»sandpile model«) nannten, obgleich es genau einem zweidimensionalen Wahnsinnig entspricht.

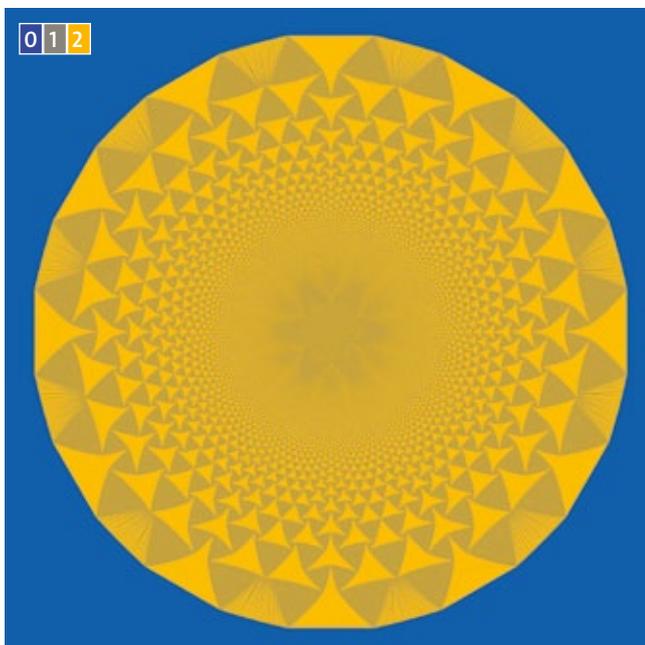
Überraschende Ordnung

Übrigens: Auch wenn der Wahn im Amte wütet, muss man sich über die zeitlichen Reihenfolge der einzelnen Aktenwürfe keine Gedanken machen. Es kommt nicht darauf an, ob ein Beamter auf jede Überlastung sofort mit einer Umverteilung reagiert oder erst stoisch die Akten von allen Seiten auf sich hereinprasseln lässt und sie dann möglicherweise gebündelt von sich wirft. Der stabile Zustand, in dem niemand mehr einen Anlass für einen Panikakt sieht – jedenfalls bis die nächste Akte ins System gerät –, ist stets der-

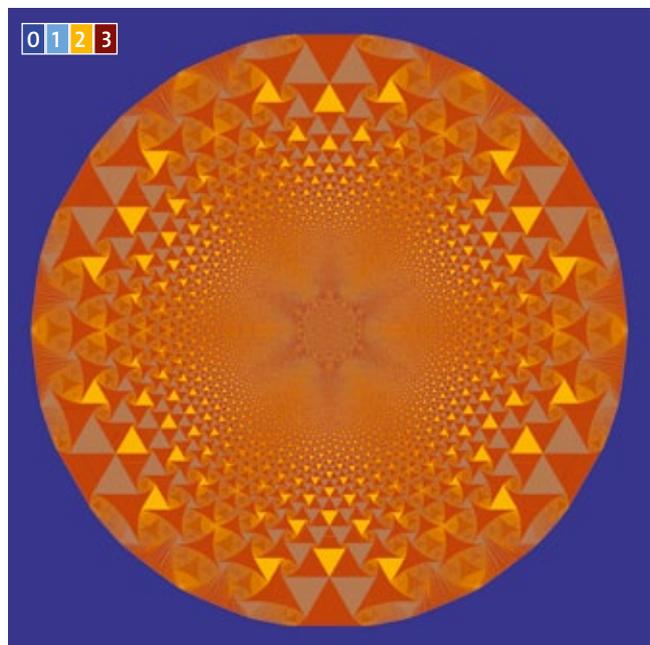
selbe. Deswegen sprechen die Forscher präzisierend von kommutativen Sandhäufchen (»abelian sandpiles«).

Mögen sie auch mit echten Sandhäufchen nicht viel gemein haben – das schadet nicht, solange die theoretischen Physiker an ihnen die vielen interessanten Aspekte der selbstorganisierten Kritizität unbeeinträchtigt von den Schmutzeffekten der Realität in Reinform studieren können. Dazu zählt vor allem eine spezielle Form chaotischen Verhaltens, die als $1/f$ -Rauschen bezeichnet wird: Zeitpunkt und Größe einer einzelnen Sandlawine sind praktisch nicht vorherzusagen, aber man kann statistische Aussagen machen. So kommen Lawinen umso häufiger vor, je kleiner sie sind, und die Häufigkeitsverteilung folgt einem Potenzgesetz.

Also erwartet man, dass ein – computersimuliertes – Sandhäufchen, nachdem ein paar Millionen Körner gefallen sind und einen vorläufigen Ruheplatz gefunden haben, einen irgendwie chaotischen Anblick bietet. Aber genau das passiert nicht, zur großen Überraschung aller Beteiligten. Vielmehr entsteht ein sehr regelhaftes Muster mit einer Fülle von Strukturen. Man muss allerdings etwas Geduld haben. Mit einer Million Körner ist das Bild noch etwas unscharf, aber ab der ersten Milliarde wird es ganz ansehnlich (Bild S. 67).

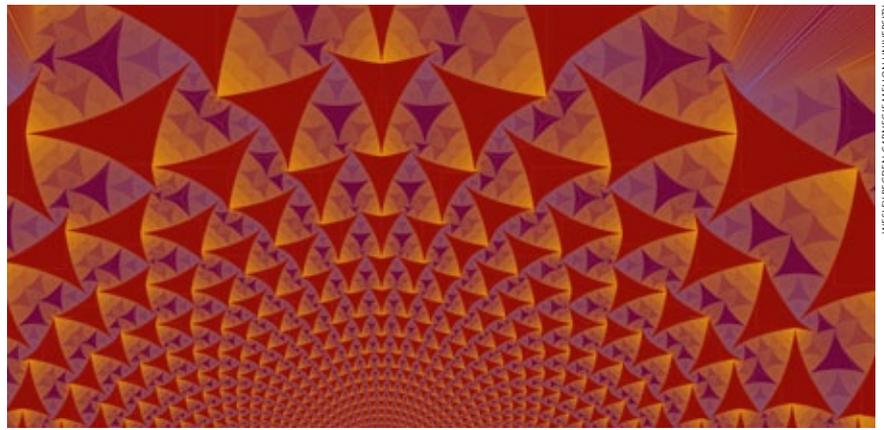


WESLEY PECDEN, CARNEGIE MELLON UNIVERSITY



WESLEY PECDEN, CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

Das Sandhäufchen aus dem Bild S. 67, in immer stärkerer Vergrößerung betrachtet. Man sieht nicht nur Linien durch einzelne Dreiecke verlaufen, die unter weiter rieselndem Sand wieder verschwinden, sondern erkennt auch, dass scheinbar einheitlich gefärbte Dreiecke in Wirklichkeit aus einem Karomuster unterschiedlich gefärbter Gitterpunkte bestehen.



WESLEY PEGDEN, CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

Was steckt dahinter, wenn man ausdrücklich Chaos bestellt und eine geordnete Struktur geliefert bekommt? Das Bildungsgesetz für das Sandhäufchen ist so einfach, dass es doch nicht so schwer sein könnte, der Struktur auf die Schliche zu kommen – dachte man zunächst. Aber mehrere Forscher, darunter vor allem Lionel Levine und Charles Smart von der Cornell University, Wesley Pegden von der Carnegie Mellon University und Anne Fey von der Technischen Universität Delft (Niederlande), mussten viel Mühe und raffinierte mathematische Werkzeuge einsetzen, um zumindest zu einer Teillösung zu gelangen.

Niemand würde sich darüber wundern, dass ein echtes Sandhäufchen, entstanden durch Berieselung an einem einzigen Punkt, eine kreisförmige Fläche bedeckt; es ist ja keine Raumrichtung bevorzugt. Das theoretische Sandhäufchen dagegen hat zwei ausgeprägte Vorzugsrichtungen, nämlich die, an denen die Schreibtische im Wahnsinnsamt ausgerichtet sind. Man sollte daher erwarten, dass sich der Wahnsinn entlang einer geraden Schreibtischreihe schneller ausbreitet als in der Diagonalen, die er im Zickzack durchlaufen müsste. Gleichwohl nähert sich auch das theoretische Sandhäufchen zunehmend der Kreisform an. Wie kann das sein?

Eine Verallgemeinerung bringt uns der Lösung dieses Rätsels näher. Man braucht die Sachbearbeiter nicht unbedingt an die Knotenpunkte eines Gitters mit quadratischen Maschen zu setzen; andere regelmäßige Anordnungen liefern Bilder, die in den Einzelheiten

geringfügig anders aussehen, aber einen bemerkenswert ähnlichen Gesamteindruck liefern (Bilder S. 68/69).

Die numerischen Mathematiker sind mit einer ganz ähnlichen Situation konfrontiert: Eigentlich ist ihr Forschungsobjekt ein Kontinuum, zum Beispiel eine Funktion, die an jedem Punkt der Ebene einen Wert hat. Sie berechnen die Funktion jedoch nur – näherungsweise – für gewisse Stellvertreterwerte, etwa an den Knotenpunkten eines Gitters mit quadratischen Maschen. Damit führen sie unweigerlich gewisse Vorzugsrichtungen in ihr genähertes System ein, die das ursprüngliche nicht hatte. Bemerkenswerterweise richtet das meistens keinen Schaden an. Für ein Problem, das eine kreisförmige Lösung hat, findet auch eine numerische Berechnung, die an einem solchen Gitter hängt, eine annähernd kreisförmige Näherungslösung – wenn das Gitter feinmaschig genug ist.

Sandhäufchen-Grenzwert

Levine, Pegden und ihre Fachkollegen standen nun vor dem umgekehrten Problem. Ihr Sandhäufchen lebt ja eigentlich auf einer Gitterstruktur; aber nun wollten sie es so uminterpretieren, als ob es auf einem Kontinuum existiere. Dieser Schritt drängte sich sogar geradezu auf. Denn sie hatten beobachtet, dass die Gestalt ihres Sandhäufchens sich mit zunehmender Körnerzahl immer mehr einer gewissen »endgültigen Form« nähert. Das Bild auf S. 67 gibt davon schon einen guten Eindruck.

Nur darf man sich nicht vorstellen, dass das Sandhäufchen mit der Zeit

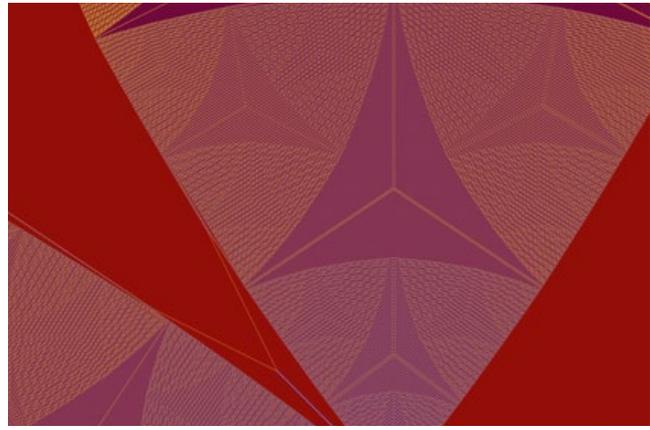
eine stabile Struktur annimmt. Vielmehr wächst es immer weiter, solange neuer Sand herniederrieselt, und während dieses Anwachsens werden auch alle Strukturen im Inneren größer und wandern entsprechend nach außen. Die von Sand bedeckte, annähernd kreisförmige Fläche wächst proportional zur Anzahl n der Sandkörner und ihr Radius sowie alle Längen innerhalb der Struktur proportional zur Wurzel aus n .

Mit anderen Worten: Will man ein sich allmählich stabilisierendes Bild sehen, so muss man an der Kamera, die das ganze Geriesel betrachtet, während des Prozesses die Bildgröße mit einem Faktor proportional zu \sqrt{n} verkleinern (»herauszoomen«). Dabei schnurrt aus Sicht der Kamera das Gitter immer weiter zusammen. Nicht die Anzahl der Körner auf einem bestimmten Gitterpunkt strebt einem gewissen Grenzwert zu, sondern die Anzahl der Körner an jedem Bildpunkt der Kamera.

In einer gewissen Umgebung jedes Bildpunkts der Kamera, um genau zu sein. Denn da die Körnerzahl nur in Gitterpunkten überhaupt existiert, muss man über die Gitterpunkte in der Umgebung jedes Bildpunkts mitteln, um überhaupt einen Wert zu erhalten – aber nicht zu sehr, sonst wird das Bild unscharf. Diese heikle Balance will in mathematischen Termen ausgedrückt werden, was einen erheblichen theoretischen Apparat erfordert. Zu allem Überfluss ist die Mittelung schon deshalb erforderlich, weil gewisse einheitlich aussehende Unterstrukturen sich bei genauem Hinsehen als aus ver-



WESLEY PEGDEN, CARNEGIE MELLON UNIVERSITY



WESLEY PEGDEN, CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

schiedenen Farben im Wechsel bestehend herausstellen (Bilder oben).

Am Ende konvergiert die Funktion, die jedem Gitterpunkt seine (ganzahlige) Körnerzahl zuordnet, gegen eine Funktion, die jedem Punkt der Ebene eine möglicherweise krumme Zahl zuordnet, und zwar in einem sehr speziellen Sinn, den die Mathematiker mit »schwach *« (»schwach Stern«) bezeichnen.

Apollonische Dreiecke

Und wie kommen diese merkwürdigen Dreiecke zu Stande, die in so unübersehbaren Mengen die Sandhäufchen bevölkern? Fast hat es den Anschein, als seien die Seiten jedes Dreiecks deshalb nach innen gekrümmt, weil das nächstkleinere Dreieck nebenan seinen großen Bruder mit der Ecke in die Seite pikst. Und so wie es aussieht, gibt es eine unendliche, selbstähnliche Hierarchie noch kleinerer Dreiecke, die sich in die immer kleineren Zwischenräume drängen. Nur verschwinden alle bis auf die ersten Dreiecke dieser Hierarchie im Nebel; der würde sich vermutlich erst lichten, wenn man die Zahl der computerberechneten Sandkörner ein paar Größenordnungen höher treiben würde.

Eine vollständige Theorie dieser Dreiecke ist aus den Arbeiten der genannten Forscher nicht herauszulesen (zumindest gelingt mir das nicht); aber es gibt eine erstaunliche Fülle von Einzelheiten.

Wie passt eine unendliche Menge von Dreiecken so präzise in eine endliche Fläche? Um diese Frage zu beantworten, greift man auf das Werk des an-

tiken Geometers Apollonios von Perge (um 262–um 190 v. Chr.) zurück. Der hatte eine Methode zur Konstruktion eines Kreises gefunden, der drei gegebene Kreise berührt. (»Berühren« heißt nicht nur einen Punkt gemeinsam haben, sondern in diesem Punkt auch eine gemeinsame Tangente.) Seine neuzeitlichen Nachfahren, vor allem Allan R. Wilks von den AT&T-Laboratorien in Florham Park (New Jersey), haben diese Konstruktion nicht nur in algebraische Formeln umgesetzt, sondern auch so erweitert, dass man in drei einander berührende »Urkreise« eine unendliche Schar apollonischer Kreise einschachteln kann (Spektrum der Wissenschaft 11/2002, S. 116; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 106). Aus solchen apollonischen Kreispackungen konstruieren Levine, Pegden und ihre Kollegen apollonische Dreieckspackungen.

Die Dreiecke, die man in den Sandhäufchen vorfindet, sind wegen ihrer nach innen gekrümmten Seiten extrem spitz: Ihre Winkel sind gleich null, denn in jeder Ecke haben die beiden Seiten, die dort zusammentreffen, dieselbe Tangente.

Die Seiten selbst sind zwar differenzierbare Kurven (sonst hätten sie keine Tangenten), aber nicht zweimal differenzierbar; sie gehören also zu der seltsamen Klasse von gerade noch hinreichend glatten Kurven, die unter dem Namen C^1 -Fraktale den unendlich zerknitterten Torus beranden (Spektrum der Wissenschaft 1/2015, S. 44). Für die Dreiecksseiten gibt es keine einfache Formel, wohl aber für den Flächeninhalt des ganzen Dreiecks: Er beträgt $4/7$

des Inhalts seines gewöhnlichen (geradlinig begrenzten) Kollegen mit denselben Eckpunkten.

Bis aus diesen bruchstückhaften Einzelheiten ein konsistentes Gesamtbild entsteht, wird wohl noch einige Forschung erforderlich sein. Aber faszinierend wirkt diese »Struktur aus dem Nichts« schon jetzt. ~

DER AUTOR



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

QUELLEN

Ellenberg, J.: The Amazing, Autotuning Sandpile. In: Nautilus 23, 2. April 2015.

<http://nautil.us/issue/23/dominoes/the-amazing-autotuning-sandpile>

Levine, L. et al.: Apollonian Structure in the Abelian Sandpile.

<http://arxiv.org/abs/1208.4839>

Levine, L. et al.: The Apollonian Structure of Integer Superharmonic Matrices.

<http://arxiv.org/abs/1309.3267>

Pegden, W., Smart, C. K.: Convergence of the Abelian Sandpile. In: Duke Mathematical Journal 162, 627–642, 2013

Redig, F.: Mathematical Aspects of the Abelian Sandpile Model. In: Bovier, A. et al.: Les Houches 83, École d'été des Houches. Elsevier, Amsterdam 2006, S. 657–729

WEBLINKS

Dieser Artikel und zahlreiche weitere Links zum Thema im Internet:

www.spektrum.de/artikel/1351056



WELTERNÄHRUNG

Fischfarmen für eine Milliarde Chinesen

Als größter Fischproduzent und -konsument der Welt entwickelt China Süß- und Salzwasserfarmen für Fische und Meeresfrüchte in nie da gewesenen Dimensionen. Dabei haben die Forscher auch die ökologische Nachhaltigkeit im Blick.

Von Erik Vance



Zwei Unternehmen betreiben auf dem 300 Quadratmeter großen See Liangzi am Mittellauf des Jangtsekiang große Fischfarmen, die sie mit Netzen abgrenzen.

An jenem Januartag 2007 fuhr der vietnamesische Fischer Nguyễn Phú mit seiner Crew wie gewohnt hinaus aufs Meer – als am Horizont mehrere chinesische Kanonenboote auftauchten. Im ersten Moment dachte Phú an Flucht, doch er wusste: Mit seinem kleinen Gefährt hatte er keine Chance. »Mit den Chinesen legen wir uns nicht an«, erzählt er mir über den Dolmetscher. »Wir wehren uns nicht. Wir kauern uns zusammen, mit den Armen über dem Kopf, so, und beten, dass wir es überstehen.« Die chinesischen Soldaten hätten sein Boot beschlagnahmt, alle auf eine nahe Insel gebracht und dort ins Gefängnis gesteckt. Über einen Monat lang musste Phú in einer engen Zelle ausharren – ohne Verhandlung, ohne Richter, ohne Erklärung – und wurde täglich geschlagen. Dann ließ man ihn gehen. Wie einen Fisch, den man nach Belieben fängt und freilässt.

Diese Geschichte passt zu anderen aus den letzten Jahren. Nach Aussage von Tunfischfängern der Fidschi-Inseln respektieren chinesische Kapitäne dort keine Fangquoten. Auch in japanischen Gebieten belasten unrechtmäßige Fischzüge die ohnehin angespannten Beziehungen zwischen den beiden Ländern. Die Philippinen haben ihre militärische Präsenz vor ihren Küsten wegen der dort patrouillierenden chinesischen Fischerboote verstärkt. China behauptet, dass südchinesische Meer gehöre seit Jahrhunderten zu seinem Territorium.

Eines ist unbestreitbar: Das Land hat einen immensen Bedarf an Meeres- und Süßwasserfrüchten. Der Pro-Kopf-Verbrauch ist dort schon traditionell sehr hoch, und der zunehmende Lebensstandard steigert die Nachfrage nach Fisch, Muscheln, Krebsen und Ähnlichem weiter. Die 1,4 Milliarden Chinesen verzehren heute mehr Fisch und dergleichen als die zehn nächstgrößten Nationen zusammen (siehe Bild S. 77). Tatsächlich fängt und erzeugt die Volksrepublik mit Abstand die meisten Fischprodukte im weiten Sinn: 2012 waren es laut der Welternährungsorganisation FAO 57 Millio-

nen Tonnen – ein Drittel der Weltproduktion. Seine 700 000 Fischereischiffe sind rund um den Globus im Einsatz, schleifen riesige Käfige über den Meeresboden und ziehen fußballfeldgroße Netze hinter sich her. Andere Nationen machen das nicht anders, aber China übertrifft bei der Ausbeutung der Meere inzwischen sogar Japan und die USA. Es trägt hierdurch wesentlich dazu bei, dass die Bestände etwa von Seegurken, Haien oder den beliebten Abalonen (auch Meereshorn genannte Meeresschnecken) überall zurückgehen.

Auf öffentliche Proteste hin gab es von Seiten Chinas lediglich ein paar symbolische Gesten. So wird bei offiziellen Empfängen keine Haifischflossensuppe mehr gereicht. Sonst weigert sich die Regierung bisher, das Problem überhaupt anzuerkennen. Dagegen sind manche chinesischen Wissenschaftler und Geschäftsleute alarmiert: Sie befürchten, dass die Meere schneller leergefischt sein werden, als sie sich von den Zugriffen erholen können. Einige von ihnen unternehmen Anstrengungen, den gegenwärtigen Trend umzukehren. Zu dem Zweck möchten sie die traditionelle Aquakultur in China grundsätzlich neu gestalten – von den zigtausenden kleinen Fischfarmen in Süßwasserseen, die oft noch auf uralte Weise betrieben werden, bis hin zu den riesigen industriellen Zuchtbetrieben im Ozean.

Das chinesische Modell

An Stelle von alten unwirtschaftlichen Verfahren und modernen umweltverschmutzenden Methoden wollen diese Visionäre ein besonderes chinesisches Modell für nachhaltige Produktionsformen einführen. Diese sollen nicht nur ökologisch verträglicher sein, sondern auch kleine Fischwirte ebenso wie Großunternehmen voranbringen. Ein guter Anreiz, die entsprechenden ambitionierten Maßnahmen umzusetzen, wäre die Nachfrage der Verbraucher nach gesunder, unbelasteter Nahrung. Gelänge es beispielsweise, beliebte Speisefische wie Karpfen umweltschonend zu produzieren, wäre dies bereits ein bedeutender Beitrag, der den Fischbeständen generell eine Zukunft gäbe.

In der Bucht bei der Insel Zhangji nahe Korea, wo ich mich zum Tauchen rüste, ist das Wasser trotz des warmen Wetters ziemlich kalt. Von hier sollen die besten Meeresfrüchte der Welt stammen. Die Bucht ist berühmt, seit der amerikanische Präsident Richard Nixon bei seinem denkwürdigen Staatsbesuch 1972 mit Abalonen von dort bewirtet wurde. Außer dem Fotografen begleiten mich zwei Fischer der Zhangzidao-Gruppe als Führer. Sie sind freundlich, aber auch ein bisschen misstrauisch, denn wir sind hier die ersten ausländischen Journalisten.

Zuerst sieht alles wie ein ganz normales küstennahes Ökosystem aus, als wir im dunklen Wasser tiefer hinabgleiten. Man erkennt Seegraswiesen, Tangfelder und zwischendurch offene sandige Stellen. Doch dann fallen mir die unzähligen Seegurken, Muscheln und Seeigel auf, die überall im Freien herumkriechen, statt in Winkeln und Spalten zu stecken. Die Fischer beginnen sie gleich einzusammeln wie Kinder Ostereier.

AUF EINEN BLICK

FISCH UND MEERESFRÜCHTE – AUS GESUNDER MASSENPRODUKTION

1 Die Chinesen sind Weltmeister im **Abfischen der Meere** und im Verzehr von Meeresfrüchten aller Art, aber auch in der Karpfenzucht. Nur wenn es gelingt, den weiter steigenden Bedarf auf nachhaltig betriebene Süß- und Salzwasserkulturen umzulenken, wird die Fischerei in den Weltmeeren überdauern können.

2 Einige chinesische Wissenschaftler und Unternehmer gestalten nun zunehmend **Meeres- und Süßwasserkulturen**, die sich weit gehend selbst sauber halten, indem die Organismen Abscheidungen von anderen verwerten. Im Meer sind das **gigantische Projekte**, im Binnenland umfassen sie zahllose, auch künstliche Gewässer, die traditionell ganze Landschaften prägen.

3 Noch sind solche Erzeugnisse für die meisten Verbraucher viel zu teuer. Aber weil das **Bewusstsein für gesunde Nahrung** in China wächst, könnte schließlich die Umwelt davon profitieren.



Ein Taucher erntet auf der Zhangzidao-Farm im chinesischen Meer Seegurken, wie sie im rechten Bild zu sehen sind.

Diese Farm für Meeresfrüchte verfolgt einen neuen Ansatz. In großem Maßstab wird hier versucht, die natürlichen Ökosysteme nachzuahmen. Zum Beispiel sind in dieser Bucht, wie in sämtlichen anderen der Gegend, über riesige Flächen reihenweise Käfige mit jungen Kammuscheln ausgebracht. Wenn die Tiere etwas größer sind, werden sie freigelassen und können dann an Ort und Stelle weiterwachsen, bis sie die richtige Größe zum Verzehr haben und Taucher sie ernten. Sonst gibt es hier keinerlei Zäune, Gehege oder künstliche Barrieren – und ebenso keine zusätzliche Fütterung, auch nicht Düngemittel für die Pflanzen oder Antibiotika. »Wir arbeiten nach dem Modell IMTA«, erklärt Liang Jun, der Wissenschaftsleiter der Betreibergesellschaft. »Die Ausscheidungen einer Art liefern Nahrung für andere.«

Die Bezeichnung steht für integrierte multitrophische Aquakultur, was die Kombination diverser Nahrungsebenen durch den Einsatz mehrerer Arten mit unterschiedlichem ökologischen Stellenwert meint. In verschiedenen Versionen taucht dieses Konzept auch in Ländern wie Kanada, Schottland, den USA und Norwegen auf. Nach dieser Idee ist die Wasserverschmutzung geringer, wenn die gezüchteten Tiere Ausscheidungen von anderen ebenfalls genutzten Arten als Nährstoffe verwerten. Üblicherweise leben diese verschiedenen Organismen gestaffelt in Käfigen. Das bekannteste IMTA-Projekt läuft in Ostkanada in der wegen der enormen Gezeitenunterschiede spektakulären Bay of Fundy zwischen Nova Scotia und New Brunswick. Dort verfrachtet die Meeresströmung die Exkremente von Behältern mit Lachsen zu Käfigen mit Muscheln und zum ebenfalls verwerteten Seetang.

Der Zhangzidao-Ansatz verfolgt einen völlig anderen Kurs. Einzelne Inseln vor der Küste eignen sich von Natur aus als passable Käfige. Juns Team hat genau registriert, wohin die dortigen Meeresströmungen die Nährstoffe bringen und steuert dies stellenweise zusätzlich mit künstlichen Riffen aus Naturstoffen. In besonders reichhaltigen Abschnitten

werden dann junge Kammuscheln ausgebracht, deren Fressfeinde man akribisch entfernt.

Unter diesen Bedingungen gedeihen die wenigen gewünschten Arten normalerweise gut. Die Betreiber müssen meist nur ein paar Kenngrößen wie die Wassertemperatur beobachten und greifen sonst nicht ein, bis Taucher die ernterreifen Tiere einsammeln können. Man muss auch keinen störenden Beifang entsorgen wie bei normaler Fischerei, wobei viele Meeresorganismen überflüssigerweise verenden. Die anfallenden Muschelschalen werden zu Blöcken für künstliche Riffe verarbeitet.

Riesenernten von Abalonen, Kammuscheln, Seegurken und Austern

Von den Projekten in westlichen Ländern unterscheidet sich dieses insbesondere in den Dimensionen. »Bei uns wäre es nicht möglich, einfach eine ganze Bucht in Kultur zu nehmen«, kommentiert der Biologe Thierry Chopin von der University of New Brunswick in Fredericton (Kanada), ein Mitarbeiter bei dem IMTA-Unterfangen in der Bay of Fundy. »Dadurch läuft die Sache in China völlig anders.«

Das kanadische Projekt umfasst nur wenige Hektar. Lediglich neun Muschelflöße filtern die Nährstoffe. Die Ozeanfarm bei Zhangzi hat zum Vergleich die dreifache Fläche Berlins. Bei der Zucht in der Bay of Fundy fallen jährlich 200 Tonnen Seetang und 300 bis 400 Tonnen Muscheln an.

Dagegen liefern die Inseln um Zhangzi 60 000 Tonnen Seetang im Jahr, von dem das meiste vor Ort als Nebenprodukt verkauft wird. Das eigentliche Geschäft beruht auf den 200 Tonnen Seegurken, 300 Tonnen Austern und 700 Tonnen Seeschnecken jährlich sowie 2000 Tonnen Abalonen und unglaublichen 50 000 Tonnen Kammuscheln. Wegen der hohen Produktivität betreibt Zhangzidao jetzt auch einen Angeltourismus, weil die zahlreichen Meeresfrüchte viele räuberische Fische anlocken.

Laut Jun kann diese spezielle Form von Aquakultur nur in Riesengröße funktionieren. Damit es sich rechnet, seien mindestens 100 Quadratkilometer erforderlich, die Fläche einer Stadt von der Größe Heidelbergs. Obendrein sei es unabdingbar, eine Menge Forschung in die Erkundung der Strömungsverhältnisse und die Dynamik der anderen Umweltbedingungen zu stecken. Am Computer zeigt er mir eine genaue Karte der Inseln, auf der man erkennt, wo sich Nährstoffe konzentrieren und wo jeweils die höchsten Erträge erzielt werden. Weil dies alles weit gehend mit den Strömungen zusammenhängt, helfen die Forscher mitunter auch mit Kunstriffen nach. Dann kommen metergroße Blöcke aus Muschelkalk zum Einsatz. Rund 20000 haben sie bereits versenkt.

Nach Ansicht einiger westlicher Wissenschaftler stellt Zhangzidao kein eigentliches IMTA-Modell dar, weil man dort nicht auch Fische züchtet – deren Exkremate den anderen Organismen zugutekommen. Eine neutralere Bezeichnung wäre Ozeanfarm. Bei aller Effizienz – rundum perfekt funktioniert das chinesische Unterfangen bei Weitem nicht. Ein Firmensprecher sagt, über die Hälfte der Gewässer seien zu tief zum Abernten per Hand durch Taucher. Auf solchen Flächen werden nach wie vor schwere, fünf Meter breite Schleppnetze über den Boden gezogen, die Schäden anrichten. Außerdem sind die Produkte von Zhangzidao besonders teuer. Seegurken etwa kosten in China 250 Dollar das Stück – Luxus für die Reichen, wie oft auch anderswo.

Umweltschutz

hat für Chinesen nicht Vorrang

Nachhaltig gewonnene Meeresfrüchte an alle Einkommensgruppen heranzutragen sei momentan noch eine große Herausforderung, gibt Yuming Feng, der Präsident von Zhangzidao, zu. Die Konsumenten müssten entscheiden, wie viel ihnen solche Produkte Wert sind. Bislang steht Umweltschutz für die Chinesen nicht an erster Stelle. Ihr Hauptaugenmerk gilt gesundheitlich unbedenklichen Nahrungsmitteln, erklärt An Yan vom marinen Aufsichtsrat für den asiatischen Pazifik. Die Menschen waren mit Bleivergiftungen wegen kontaminierter Nahrung konfrontiert und mit melaminverseuchter Milch – einem gebräuchlichen Ausgangsstoff vieler Leime und Klebstoffe, der auch oft in Plastik steckt. Yan glaubt aber, die Sorge für eine höhere Nahrungsmittelsicherheit könne schließlich auch dem Naturschutz dienen. Waren anfangs umweltbewusste Verbraucher in den USA, in Australien und Europa Hauptabnehmer der Kammmuscheln von Zhangzidao, so verkaufen sich seine Meeresfrüchte heute sämtlich in China, und zwar weniger unter dem Aspekt des Umweltschutzes, sondern weil sie als gesund und unbelastet gelten.

Auf dem Markt der nahen Hafenstadt Dalian mache ich mir von dieser Einstellung selbst ein Bild. Es gibt reihenweise Stände, die neben Fischen, Seegurken oder Garnelen diverse Muscheln und Flügelschnecken anbieten. Fast alle Verkäufer preisen an, ihre Ware komme von der Zhangzi-Farm, was kaum möglich erscheint, denn an sich beliefert das Un-



Weil Karpfen den Luhu-See zu sehr verreckt haben, züchten die Bauern darin jetzt Mandarinfische – hier führen sie Futter zu.

ternehmen hauptsächlich Großhändler und Spitzenrestaurants. Aber offenbar ist die Marke sehr gefragt. Das Wasser bei der Farm gilt als sauberer als anderswo, und ein Händler erklärt mir, die künstlichen Riffe seien für die Meeresfrüchte besonders gesund. Für Zhangzi-Produkte verlangt er 20 Prozent mehr. Umweltaspekte erwähnt kein einziger Verkäufer. Auf Nachfrage sagen sie durchgehend, dass sei den Kunden nicht so wichtig. Dennoch gibt es an den chinesischen Küsten, etwa bei Dalian oder mehr südlich in der Sanggou-Bucht bereits eine Anzahl weiterer Betriebe, die auch mit der IMTA-Idee experimentieren. Ein Teil davon sind vorrangig Seegrassfarmen, die allerdings meist mit weniger verschiedenen Arten arbeiten.

Auch wenn Chinas Meeresfischerei den Weltmarkt dominiert – die im eigenen Land konsumierten Fischprodukte einschließlich Schalenfrüchten stammen zu über 70 Prozent aus Binnengewässern. Meldungen aus letzter Zeit über stark verschmutzte Flüsse und Seen könnten manche Verbraucher veranlassen, sich nun mehr auf Meeresfrüchte umzuorientieren. Um die Ausbeutung der Meere zu drosseln, wäre es deshalb dringlich, die vielen Süßwasserfarmen in einen sauberen und nachhaltig wirtschaftenden Zustand zu versetzen. Genau das versucht ein Netzwerk von Forschern am Mittellauf des Jangtsekiangs in der bedeutendsten Fisch produzierenden Region Chinas.

Deren Zentrum ist Wuhan, 500 Kilometer Luftlinie flussaufwärts von Shanghai. Schon rund um den Flughafen, entlang der Straßen und unter Überführungen scheint bis zum Horizont jeder verfügbare Quadratzentimeter für Aquakulturen ausgebaggert zu sein: Fischteiche, so weit das Auge reicht. Völlig zu Recht nennen die Menschen die Provinz Hubei das Land der 1000 Seen, betont Shouqi Xie von der chinesischen Akademie der Wissenschaften. Chinas Fischteiche bedecken 18400 Quadratkilometer, so viel wie die Fläche Sachsens. Ein Fünftel des Weltbedarfs an tierischem Protein

soll aus Süßwasser stammen, und die Hälfte davon aus dieser Kernregion Chinas, sagen chinesische Experten.

Xie findet es lächerlich, dass Schlagzeilen über Wasserverschmutzung und kontaminierte Nahrungsmittel das Vertrauen vieler Verbraucher in Produkte wie Karpfen und Wels aus traditioneller Aquakultur erschüttert haben. Die Fischzuchten würden durchgehend überwacht, während bei Wildfisch keiner verfolgt, womit die Tiere in Berührung kommen.

Wirklich nachhaltig arbeiten die traditionellen Süßwasserfarmen jedoch nicht. Die chinesische Aquakultur geht bis ins fünfte Jahrhundert vor Christus zurück. Damals zog sich der Philosoph Fan Li nach einer Karriere als Feldherr und königlicher Berater in die Stadt Wuxi zurück, die in der Nähe des Jangtsekiang an einem See liegt. Dort verfasste er die erste Anleitung zur Aquakultur und führte zum Beispiel auf, wie viele Karpfen man anfangs in einen Teich setzen sollte, in welcher Jahreszeit sie am besten gedeihen und dass man auch Wasserschildkröten halten sollte, weil sie den Flutdrachen abwehren würden.

Zweieinhalbtausend Jahre lang hatten die alten Praktiken funktioniert. Zwischen ihren normalen Feldern betrieben die Bauern kleine Fischteiche, in deren sauberem Wasser sie gesunden Fisch erzeugten. Der Umschwung kam in den 1980er Jahren, als sich eine ausgedehnte industrielle Teichwirtschaft breitmachte und gleichzeitig auch andere Industrien rasant wuchsen. Beides trug zu einer massiven Umweltverschmutzung bei, die dem See von Wuxi 2007 eine verheerende Algenblüte bescherte. Das Leitungswasser der Stadt, welches aus dem See kam, wurde schwarz und stank. Die »schwarze Flut« rüttelte China endlich wach. Obwohl die Aquakulturen nicht die Hauptschuld an der Misere trugen, begann auch hier ein Umdenken. Menschen wie Xie bemühen sich bei der Fischzucht um umweltschonendere Methoden, mit denen das Wasser bei hohen Erträgen trotzdem sauber bleibt.

Verheerende Karpfenzucht

Die Gesundheit eines Süßwasserökosystems hängt entscheidend von der richtigen Menge und Balance der Nährstoffe ab. Gibt es davon zu wenig – wie mancherorts in den großen nordamerikanischen Seen, wo eingewanderte Arten zu viel davon wegnehmen – ist das Wasser zwar klar und sauerstoffreich, aber in ihm existiert kaum noch Leben. Im Gegensatz dazu ist der Jangtsekiang unter anderem mit Stickstoff und Phosphat überdüngt, doch es mangelt an Sauerstoff. Das Wasser sieht dann grün und trüb aus, weil darin fast nur noch Algen gedeihen können.

Während vieler Jahrhunderte befanden sich die meisten chinesischen Süßwasserfischfarmen anscheinend in einem gesunden natürlichen Gleichgewicht. Dass dem heute nicht mehr so ist, darf man der allgemeinen Umweltverschmutzung nicht allein anlasten. Denn zu den heutigen Missständen tragen die Aquakulturen selbst gehörig bei. Als beliebtester Speisefisch gilt in China der Karpfen. Seine verschiedenen Zuchtformen wachsen rasch und fressen so ziemlich alles, was sie an organischem Material finden, von Algen

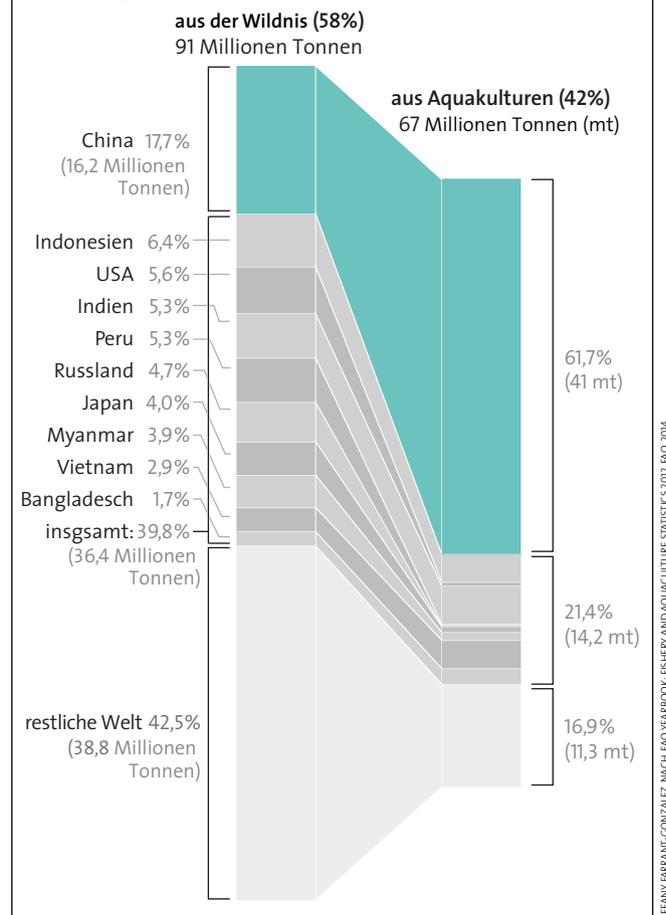
über diverse kleine Tiere bis zu Abfällen. Doch weil Karpfen ihre Nahrung schlecht verwerten, sind ihre Exkremte stickstoffreich. Der viele Stickstoff fördert das Wachstum von Algen, die Sauerstoff produzierenden Pflanzen das Licht nehmen. Am Ende leben in so einem Gewässer vorwiegend nur noch Karpfen und Algen. Einer Studie zufolge war die Algenmenge in einem See voller Karpfen der Provinz Hubei binnen zehn Jahren auf das 20-Fache gestiegen und die Wasserklarheit gleichzeitig auf die Hälfte gesunken.

Hieran muss ich denken, als ich in einem kleinen Boot auf den Liangzi hinausfahre, den zweitgrößten See der Provinz.

Weltspitze

China war 2012 von allen Ländern der mit Abstand größte Lieferant von Fisch und anderen Meeres- und Süßwasserspeisetieren. Zum Wildfang aus Ozeanen und Binnengewässern – 58 Prozent der Gesamtmenge – trug es fast 18 Prozent des Weltverbrauchs bei (linke Säule), zum Angebot aus Aquakulturen sogar nahezu 62 Prozent (rechte Säule). Nur wenn die Fischfarmen noch mehr erzeugen als jetzt schon, werden sich die Wildbestände erhalten können. Dabei könnte China ein Vorreiter werden.

Fang- und Produktionsmengen von Fischen, Schalentieren und anderem aus Meeren und Binnengewässern zusammen im Jahr 2012





DOMINIC BRACCO II

Ein Ehepaar düngt einen von ihm versorgten Fischteich bei Wuhan.

Das Wasser schimmert grünlich wie dünne Erbsensuppe und wirkt gespenstisch still. Vor zehn Jahren hatte man die Ufer mit Käfigen voller Karpfen bestückt, deren Exkremente und Abfälle bald alles andere Leben vernichteten. Die örtliche Regierung wandte sich an die Universität Wuhan um Rat, und der Forscher Jiashou Liu, ebenfalls Mitglied der chinesischen Akademie der Wissenschaften, stellte fest, dass die Algenblüte auf die reichlich vorhandenen Abfallprodukte zurückging.

Heute liegen hier keine Fischkäfige mehr. Stattdessen betrachten die Fischer jetzt den gesamten See als einen riesigen Käfig, in dem die Natur stärker das Sagen haben darf als vorher. Karpfen sind kaum noch vorhanden, dafür leben hier jetzt hochwertigere Fische und Schalentiere, die den See weniger verschmutzen, etwa Mandarinfische und Krebse. Zu den weiteren Maßnahmen gehören ein verringerter Gesamtbestand und eine Uferbepflanzung, die wieder Sauerstoff ins Wasser bringt. Einmal im Jahr werden sämtliche Fische zusammengetrieben und herausgefangen. Diese Bewirtschaftungsform macht Düngung und Zusatzfütterung überflüssig, was beides die Nährstofflast ohnehin nur noch erhöhen würde. Bei mehr Platzangebot sind die Fische außerdem weniger krank. Und die Ausbeute ist trotz des niedrigeren Besatzes gut. Laut Fu Jun Deng, Manager bei einem der beiden

Unternehmen, die den See betreiben, ist der Gewinn höher als bei herkömmlicher Teichwirtschaft. Man habe damit wenig Aufwand. Normalerweise müsse man nur aufpassen, dass niemand den Fisch stiehlt. Der See ist zwar immer noch trüb und voller Algen, aber die Wasserqualität verbessert sich allmählich. Der Sauerstoffgehalt steigt und der Stickstoffgehalt fällt. Ob es gelingen wird, die Erträge letztlich zu steigern – denn der Bedarf Chinas wächst –, ist eine andere Frage.

Hunger im Land auf Fisch – aber bitte gesund

Ähnliche Maßnahmen laufen bei anderen großen natürlichen Seen der Gegend, die umzukippen drohten. Sie alle stehen dennoch im Schatten tausender künstlich angelegter Fischteiche oder kleiner Seen, die diese Landschaft prägen. Viele sind nur ungefähr so groß wie ein Fußballfeld, aber sie liefern hohe Hektarerträge und tragen wesentlich zur Ernährung des ganzen Landes bei. Sie nachhaltig zu bewirtschaften und dabei zugleich viel gesunden Fisch zu produzieren, erfordert einiges an Erfahrung und Fingerspitzengefühl – eine Herausforderung auch für die Forscher, die neue Bewirtschaftungsmethoden zu entwickeln versuchen, welche ohne hohen technischen Aufwand funktionieren.

Der Agrarexperte Congxin Xie von der Huazhong-Universität für Wissenschaft und Technik Zentralchina in Wuhan experimentiert mit künstlichen schwimmenden Inseln, die Pflanzen tragen und das Wasser reinigen sollen. Frühmorgens fahren wir zu einem Versuchsteich bei der kleinen Stadt Gong'an. Auf dem See treibt ein halbes Dutzend einige Meter großer weißer Plastikrahmen mit Wasserspinat. Das in China beliebte Gemüse gedeiht hier offenbar prächtig. Diese Pflanze erweist sich zur Wasserreinigung als besonders geeignet, weil sie rasch wächst und viel Wurzelwerk bildet, das reichlich Nährstoffe aufnimmt. In nur drei Monaten, sagt Xie, sei hier der hohe Ammoniakgehalt – den Fische nicht verträ-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Meere« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/meere



FOTOLIA / ERMSTOCKMEDIA

gen – bereits um ein Drittel gesunken. Der Fischfarmer Yung Chang Xu bestätigt mir, dass nicht mehr so viele Fische sterben wie im Jahr zuvor und das Wasser klarer geworden ist.

Die Investition in ein paar solche frei treibende Kästen amortisiert sich innerhalb eines Jahres durch Verkauf des leckeren, auch bei Restaurants gefragten Spinats. Experten wie Xie haben begriffen, dass Neuerungen sowohl der Umwelt als auch den Bauern zugutekommen sollten. Das gelingt nur bei enger Zusammenarbeit vor Ort. Die Fischwirte hier möchten nun auf mindestens fünf Prozent ihrer Teichflächen Wasserspinat ziehen. Überall werden bereits Rahmen dafür gezimmert.

Überhaupt hat sich seit der Katastrophe mit dem faulen Wasser in Wuxi die Erkenntnis durchgesetzt, dass man für saubere Aquakulturen am besten Pflanzen mit einbezieht. Damals begannen Experten, zum Reinigen des Wassers Feuchtgebiete anzulegen oder vorhandene hinzuzunehmen. Die chinesische Akademie der Wissenschaften am Jangtsekiang fördert mittlerweile zahlreiche Projekte gegen Wasserverschmutzung, bei denen Süßwasserschnecken und Lotosblumen sowie zahlreiche weitere Arten für Sauberkeit sorgen. Ein Beispiel ist der See Ge Hu ein Stück flussaufwärts von Wuxi. Fischgehege weist er heute gar keine mehr auf, aber auf 2,6 Quadratkilometern wachsen Wasserhyazinthen. Selbst der nahe gelegene, expandierende Aquakulturbetrieb Wu Jing säubert schon ein Drittel seiner Teiche mit Pflanzenhilfe über Feuchtgebiete.

Ein anderes Beispiel bilden die Zuchtteiche einer Aquafarmkooperative am See LuHu in Wuhan. Früher erntete man dort jährlich 12000 Kilogramm Karpfen. Doch der immense Fischbesatz leistete Krankheiten und Nährstoffbelastung Vorschub. Mit Hilfe der chinesischen Akademie der Wissenschaften schloss der Betrieb 2008 deswegen Feuchtgebiete an die Abflusszone zum See an. Inzwischen haben die Farmer zudem von Karpfen auf den teureren, umweltschonenderen Mandarinfisch umgestellt und den Bestand auf ein Zehntel verringert. Geld verlieren würde er nie, erzählt ein 50-jähriger Fischer. Aber jedes Jahr müssten sie aufs Neue herausfinden, welche Fische in einem Teich gerade am besten zurechtkommen.

In anderen Fällen braucht es noch mehr Einfallsreichtum. Nährstoffe filternde Pflanzen benötigen für ihre Fotosynthese, also zum Wachstum, ausreichend Phosphor. An sich sind die kleineren Seen voll davon, meint Hao Xu von der Akademie für Fischwissenschaften in Shanghai und weist auf die erbsengrünen Testteiche um uns. Allerdings liegt der Phosphor am Grund. Die Ingenieure haben nun ein Gerät entwickelt, das den Schlamm aufwirbelt. Es ist solarbetrieben, arbeitet also nur bei Sonnenschein – wenn die Pflanzen intensiv Fotosynthese betreiben.

Der Wohlstandszuwachs der letzten Jahre hat in China die Nachfrage nach tierischem Protein in einem weltweit bisher wohl ungekannten Ausmaß angekurbelt. Entsprechend gigantisch müssen die Schutzmaßnahmen für die Binnengewässer und Meere sein. Entlang dem Jangtsekiang betreut

die Akademie der Wissenschaften 30000 Hektar an Aquakulturfleichen. Und das Projekt Zhangzidao, das sich an den nachhaltigen Ideen von IMTA orientiert, ist weltweit das bei Weitem größte seiner Art für Meeresfrüchte, die riesigen mit ähnlichem Ziel bewirtschafteten Tangfelder in seiner Nähe noch nicht einmal mitgerechnet.

Auch wenn China viele amerikanische und europäische Ansätze aufgegriffen hat, sind die Aquakulturen doch kaum miteinander vergleichbar. Der Westen bevorzugt Kaltwasserfische wie Forellen und Lachse, die sauerstoffreiches Wasser benötigen. Die Chinesen lieben Karpfen und Welse, Fische aus wenig belüfteten Gewässern. Die Vorstellung von einem heilen Ökosystem differiert ebenfalls völlig. »Ein See, den wir verschmutzt nennen, gilt für Chinesen als effizienter Nahrungsmittellieferant«, bemerkt Trond Storebakken von der Universität für Umwelt- und Biowissenschaften in Ås bei Oslo. »Er darf nur nicht umkippen, und das gelingt ihnen. Das finde ich bemerkenswert.«

Der Fischereiexperte hat sich bei der chinesischen Akademie für Fischwissenschaften gründlich informiert und das Land bereist. Er wundert sich, wie die Forscher natürliche Systeme nachahmen, indem sie einfach räuberische Arten mit Pflanzenfressern und Organismen, die ihre Nahrung aus dem Wasser filtern, zusammenbringen. Er traut China zu, bei seiner jahrtausendealten Tradition mit Aquakulturen ein neues Kapitel zu eröffnen. Auf völlig andere Weise als im Westen, und keineswegs ohne Fehler, aber immerhin besser als anderswo. ~

Für diesen Bericht erhielten Autor und Fotograf finanzielle Unterstützung von Mongabay Special Reporting Initiatives (mongabay.org).

DER AUTOR



Erik Vance lebt als Wissenschaftsautor in Mexico City. In den USA absolvierte er ein Biologiestudium. Unter anderem forschte und lehrte er über Delfinintelligenz und über Meeresökologie. Er schreibt für verschiedene große amerikanische Zeitungen und Magazine.

QUELLEN

Guilford G.: Rich Countries Pay Zombie Fishing Boats \$5 Billion a Year to Plunder the Seas. In: Quartz, online 25. Juni 2014:

<http://qz.com/225432/rich-countries-pay-zombie-fishing-boats-5-billion-a-year-to-plunder-the-seas>

Draft Intertek Fisheries Certification Report on Zhangzidao Scallop Fishery: www.msc.org/track-a-fishery/fisheries-in-the-program/in-assessment/pacific/zhangzidao-scallop/assessment-downloads-1/20141103_PCDR_SCA326.pdf

Wang, Q. et al.: Freshwater Aquaculture in PR China: Trends and Prospects. In: Reviews in Aquaculture. Online 25. Oktober 2014

World Wide Fund for Nature International: Sustainable Seafood and Integrated Fish Farming in China. Onlinevideo 2012. www.youtube.com/watch?v=18xyR8KWrgE#t=220

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1351077



Können wir von einem Roboter lernen,
was es heißt, eine Person zu sein?

TITELTHEMA: KÜNSTLICHES BEWUSSTSEIN

Roboter mit Ego

Die Ich-Vorstellung eines Menschen, der sich seiner selbst bewusst ist, setzt sich aus einer Reihe von Einzelaspekten zusammen. Wissenschaftler haben damit begonnen, diese Komponenten Stück für Stück in einen Roboter einzubauen. Am Ende hoffen sie so ein künstliches Bewusstsein zu schaffen.

Von Tony Prescott

Wer bin ich? Worin besteht mein inneres Selbst, die Essenz meines Wesens? Der Philosoph René Descartes (1596–1650) erhob mit seinem berühmten Diktum »cogito, ergo sum« (»Ich denke, also bin ich«) die Existenz des denkenden Ich zur Grundlage jeglichen Wissens über die Welt. Schon David Hume (1711–1776) bezweifelte allerdings die Existenz eines zeitlosen Ich. Vielmehr sah er das Wesen des Menschen geprägt durch den stetig wechselnden Strom von Erfahrungen. Auch nach buddhistischer Lehre ist die Vorstellung eines unveränderlichen Selbst eine Illusion.

Dieser Ansicht stimmt heute eine wachsende Zahl von Philosophen und Psychologen zu. Demnach bilden wir uns nur ein, lebenslang ein- und dieselbe Person mit unveränderlichem Wesenskern zu bleiben. Unser Selbstbild ist ein Konstrukt unseres Gehirns, das uns lediglich vorspiegelt, das eigene Ich sei eine feste, unwandelbare Größe.

Doch auch wenn die Ich-Erfahrung insgesamt trügerisch ist, sind Komponenten davon real und der wissenschaftlichen Analyse zugänglich. Wie unterscheide ich zum Beispiel zwischen mir und den anderen? Warum erfahre ich die Welt von einem bestimmten Blickpunkt aus, der typischerweise irgendwo mitten in meinem Kopf liegt? Wie erinnere ich mich an mein früheres Ich und stelle mir mein künftiges vor? Und wie schaffe ich es, die Welt aus der Perspektive eines anderen Menschen zu sehen? Untersuchungen mit Computermode-llen beginnen allmählich, Antworten auf solche Fragen zu liefern, und diese Antworten gewähren zugleich tiefere Einblicke in das Rätsel, wie unser Bewusstsein zu Stande kommt.

Die Grundidee ist, das Ich nicht als statisches Gebilde, sondern als dynamisches Produkt von Prozessen zu betrachten. Einen solchen Prozess muss man sich als virtuelle Maschine im Innern eines realen Geräts vorstellen – ähnlich wie ein Programm, das auf einem Computer abläuft. In diesem Sinn stellen gewisse Aktivitätsmuster im Gehirn Prozesse dar, die das Selbstbild eines Menschen erzeugen. In Einklang damit war schon Hume der Meinung, dass sich das Ich verflüchtigt,

sobald man zu denken aufhört. Wenn Sie zum Beispiel einschlafen, hört Ihr von bestimmten Gehirnvorgängen generiertes Selbstbild auf zu existieren. Nach dem Aufwachen machen diese Prozesse im Wesentlichen da wieder weiter, wo sie angehalten haben, und rufen so den subjektiven Eindruck von Kontinuität hervor.

Das Ich zerlegen und neu zusammensetzen

Solche Überlegungen haben meine Kollegen und mich dazu angeregt, die Ich-Vorstellung in einem Roboter nachzubilden. Indem wir sie zerlegen und dann Stück für Stück wieder zusammensetzen, hoffen wir mehr darüber zu lernen, was das Selbst ausmacht. Dabei arbeiten wir mit Forschern in verschiedenen europäischen Institutionen zusammen. Obwohl wir zugegebenermaßen noch einen weiten Weg vor uns haben, bin ich doch zuversichtlich, dass es uns eines Tages gelingt, ein künstliches Ich – zumindest in groben Zügen – zu

AUF EINEN BLICK

AUF DEM WEG ZUM KÜNSTLICHEN BEWUSSTSEIN

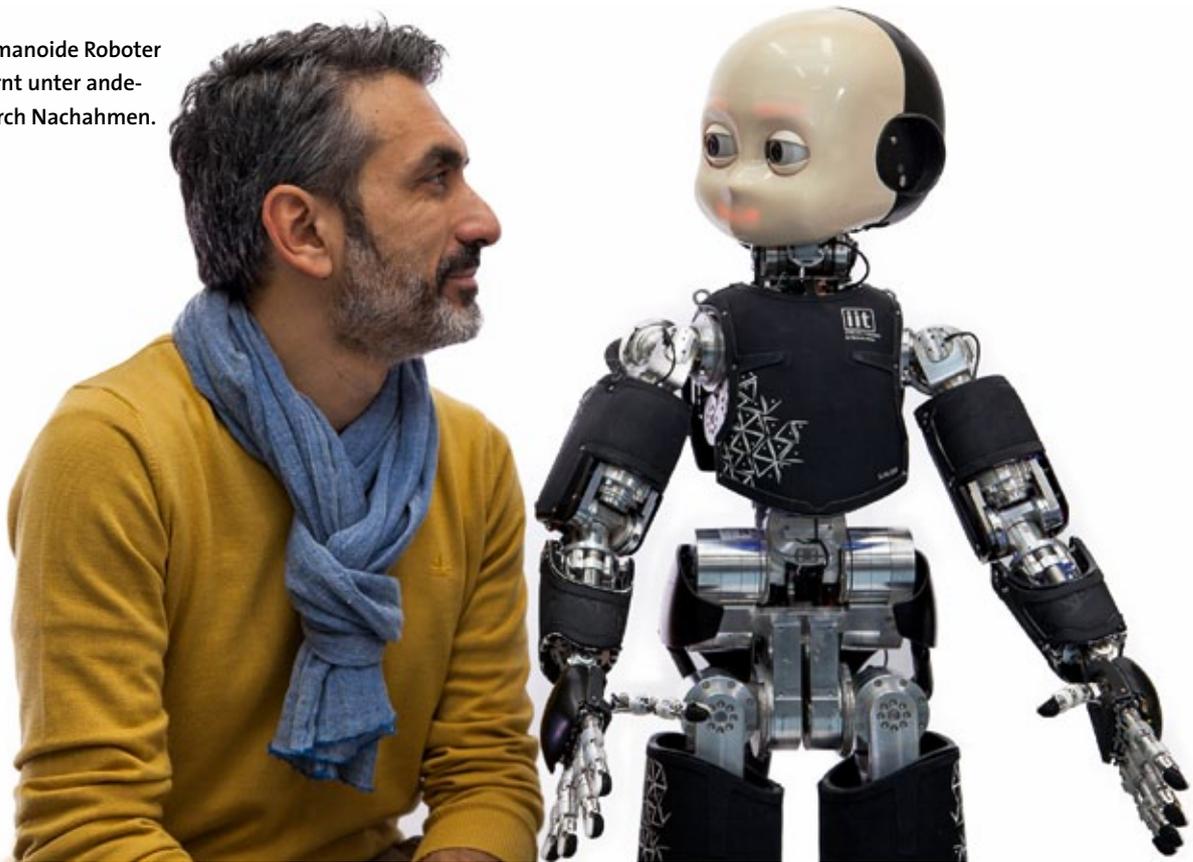
1 Unsere **Vorstellung von der eigenen Person** ist das Ergebnis von Prozessen im Gehirn, die jeweils einzelne Aspekte unseres **Selbstbilds** erzeugen. Dazu gehört etwa die Unterscheidung zwischen mir und den anderen.

2 Forscher haben einem **Roboter** namens iCub beigebracht, selbsttätig ein **Körpermodell** von sich zu entwickeln, indem er kleine zufällige Bewegungen ausführt und ihre Konsequenzen beobachtet. Außerdem lernt er durch **Nachahmen**.

3 Der Roboter verfügt ferner über ein **erinnertes Selbst**, indem er die Ergebnisse von Interaktionen mit Objekten und Personen so speichert, dass er sie möglichst leicht in späteren Situationen anwenden kann.

4 Die Forscher sind zuversichtlich, auch die noch fehlenden Aspekte des Selbstbilds einbauen zu können. Wenn das passiert ist, fragt sich, inwieweit man iCub dann als **Person** betrachten kann oder muss.

Der humanoide Roboter iCub lernt unter anderem durch Nachahmen.



AGNESE ABRUSCI & DUILIO FARINA / ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA (IIT)

Aspekte des Selbst

Die nuancierte Beschreibung des Selbst durch den Psychologen Ulric Neisser liefert sinnvolle Etappenziele auf dem Weg zu einem Roboter mit einer Art Bewusstsein.

Das ökologische Selbst

sich als unterschieden vom Rest der Welt erkennen; ein Gefühl für den eigenen Körper entwickeln

Das interpersonale Selbst

sich von außen sehen; andere Wesen als solche wahrnehmen, sich in sie einfühlen können

Das zeitlich ausgedehnte Selbst

sich seine eigene Vergangenheit und Zukunft vergegenwärtigen können

Das konzeptuelle Selbst

eine Vorstellung davon haben, wer man ist; über eine Lebensgeschichte, persönliche Ziele, Motivationen und Werte verfügen

Das private Selbst

sich seiner selbst bewusst sein; um sein ganz persönliches Innenleben wissen

erschaffen. Wir glauben, dass unsere Arbeit helfen wird, das zentrale Geheimnis der Ich-Vorstellung zu lösen: dass sie absolut real wirkt, sich jedoch umso mehr zu verflüchtigen scheint, je genauer man hinsieht.

An dieser Stelle darf ich Sie mit iCub bekannt machen: dem humanoiden Roboter, der das Objekt unserer Bemühungen ist. Er kann sehen, hören, fühlen und dank seines Lage-, Kraft- und Bewegungssinns seine 53 Gelenke koordiniert einsetzen. Er ist im Stande zu sprechen und mit seiner Umwelt zu interagieren, und er steigert seine Fähigkeiten durch Lernen. Seine Steuerung ist dem menschlichen Gehirn nachgebildet, so dass er ähnlich »denkt« wie Sie und ich.

Philosophie, Psychologie und Neurowissenschaften liefern viele Erkenntnisse darüber, was die Ich-Vorstellung eines Menschen ausmacht und wie sich Aspekte davon bei Erwachsenen, Kindern und sogar Tieren beobachten und messen lassen. Unsere eigenen Arbeiten setzen bei der Psychologie an, fügen sich jedoch nahtlos in das immer deutlicher hervortretende Bild davon ein, wie das psychologische Selbst aus Gehirnaktivitäten hervorgeht.

William James (1842–1910), einer der Väter der modernen Psychologie, unterschied zwischen dem erkennenden und dem erkannten Selbst (englisch »I« und »me«). Das erste umfasst die Erfahrung, eine eigene Person zu sein, und das zweite die Vorstellungen, die man über sich hat. Ein Stück weiter ging in den 1990er Jahren Ulric Neisser (1928–2012), der zu den führenden Vertretern der kognitiven Psychologie gehörte. Er machte fünf Schlüsselaspekte des Selbst aus: das rein

physisch wahrgenommene ökologische Selbst, das im Kontakt mit anderen erfahrene interpersonelle Selbst, das erinnerte, zeitlich ausgedehnte Selbst, das ungeteilte private Selbst und das Selbstkonzept, das die Überzeugungen des Individuums über die eigene Person enthält (siehe Kasten). Neissers Analyse ist sicher nicht das letzte Wort, beruht im Unterschied zu klassischen philosophischen Theorien wie denen von Hume und Descartes jedoch nicht nur auf Mutmaßungen, sondern auf gesicherten Erkenntnissen über die kognitive Entwicklung des Menschen. Außerdem ergeben sich daraus nützliche Hinweise darauf, was nötig sein könnte, um Schritt für Schritt ein künstliches Selbst zu erschaffen.

Bei dem Unterfangen, Neissers Aspekte in unserem Roboter umzusetzen, folgen wir den Prinzipien der Neurorobotik. Das bedeutet, dass wir in unseren Computerprogrammen Erkenntnisse darüber berücksichtigen, wie ein reales Gehirn funktioniert. So haben wir das Steuerungssystem von iCub darauf ausgerichtet, Schlüsselprozesse im Säugerhirn nachzuahmen. Die Interaktionen zwischen diesen Prozessen vollziehen sich im Rahmen einer Architektur, die mein Kollege Paul Verschure von der Universität Pompeu Fabra in Barcelona (Spanien) entwickelt und »verteilte adaptive Steuerung« genannt hat. Sie ist an die kognitive Architektur des Gehirns angelehnt.

Wie realisieren wir nun einen Prozess, der zum Beispiel das ökologische Selbst widerspiegelt? Entscheidend für die-

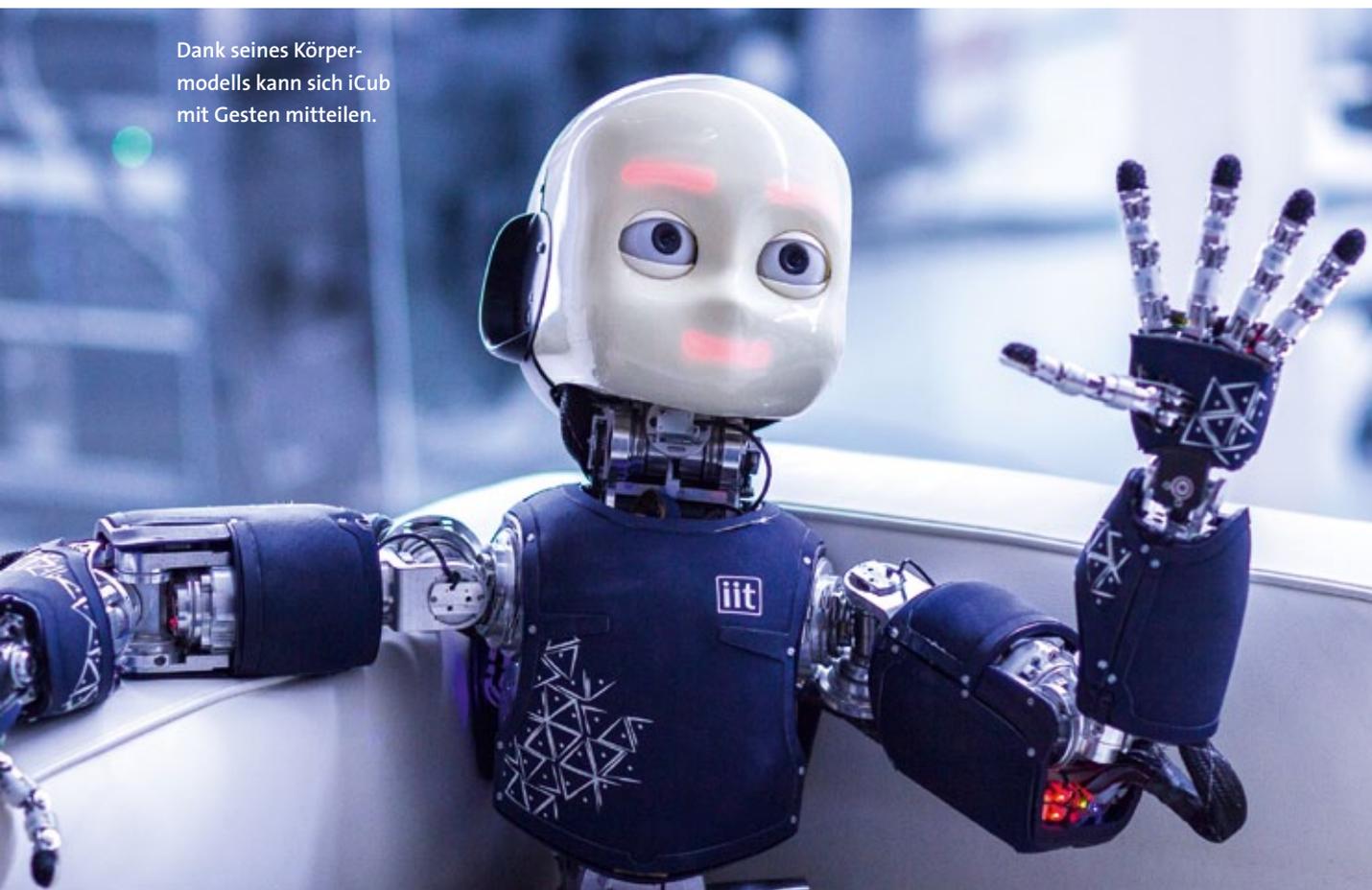
sen Aspekt ist es, sich des eigenen Körpers und seiner Stellung in der Welt bewusst zu sein. Um dahin zu kommen, braucht iCub ein inneres »Körperschema«: einen Prozess, der ein Modell seiner physischen Teile und seiner aktuellen Körperposition beinhaltet. Statt ihm dieses Körperschema direkt einzuprogrammieren, was nahe gelegen hätte, haben wir iCub befähigt, es sich selbstständig anzueignen. Er lernt, indem er kleine zufällige Bewegungen ausführt und deren Konsequenzen beobachtet. Säuglinge zeigen ein ähnliches Erkundungsverhalten – motorisches Brabbeln genannt – im Mutterleib und in der ersten Zeit nach der Geburt. Demnach scheinen wir Menschen unseren Körper auf ganz ähnliche Art kennen zu lernen.

Unterscheidung des Selbst vom Rest der Welt

Mit Hilfe dieses Ansatzes bringen Giorgio Metta und seine Kollegen am Istituto Italiano di Tecnologia in Genua unserem iCub bei, den Unterschied zwischen sich und dem Rest der Welt herauszufinden. Der Roboter lernt dabei auch, auf Verlangen eine bestimmte Pose einzunehmen (Bild unten). Durch Kombination seines Körpermodells mit Kenntnissen über Objekte und Oberflächen in der Nähe schafft er es zudem, sich umherzubewegen, ohne irgendwo anzustoßen.

Wie steht es mit dem zeitlich ausgedehnten Selbst? Informationen darüber liefert etwa der Fall eines Manns, nennen wir ihn N.N., der bei einem Unfall in den 1980er Jahren die

Dank seines Körpermodells kann sich iCub mit Gesten mitteilen.



AGNESE ABRUSCI & DUILIO FARINA / ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA (IIT)

Fähigkeit verlor, sich Dinge längere Zeit zu merken. Durch seinen Gehirnschaden kann er zudem, wie sich zeigte, nicht mehr vorausschauend denken. Sich künftige Ereignisse vorzustellen, ist für ihn nach eigenem Bekunden »wie mitten in einem See zu schwimmen; da gibt es nichts, woran man sich festhalten oder womit man etwas anfangen könnte«. Zusammen mit der Vergangenheit hat N.N. also auch seine Zukunft verloren. Sein ökologisches Selbst ist intakt geblieben, aber es steckt unverrückbar in der Gegenwart fest.

Das Phänomen Zeit stellt unseren iCub vor erhebliche Probleme. Es reicht nicht, dass wir seinen kompletten sensorischen Input kontinuierlich auf einer Festplatte speichern. Vielmehr muss der Roboter jederzeit selbst entscheiden können, was davon er am besten zur Bewertung von Vorgängen in der Gegenwart heranzieht. Peter Dominey und seine Arbeitsgruppe am Institut des Sciences Cognitives In Lyon (Frankreich) befassen sich mit diesem Problem. Sie haben iCubs Interaktionen mit Objekten und Personen auf eine Weise kodiert, die es ihm erleichtert, die Bedeutung früherer Erfahrungen für die momentane Situation zu erfassen. Allerdings nutzten sie dafür herkömmliche Programmiermethoden. Deshalb sind wir dabei, mit ihnen zusammen eine Neurorobotikversion zu erstellen. Sie soll die Informationsverarbeitung in Hirnregionen, von denen bekannt ist, dass sie eine zentrale Rolle beim Erzeugen autobiografischer Erinnerungen spielen, möglichst getreu nachahmen.

Jüngste Untersuchungen der Gehirnfunktion mit bildgebenden Verfahren haben bestätigt, was sich aus den Schilderungen von N.N. folgern lässt: dass dieselben Hirnsysteme,

mit deren Hilfe wir uns an frühere Ereignisse erinnern können, auch dafür benötigt werden, sich die Zukunft auszumalen. Sobald iCub gelernt hat, kontextbezogene Informationen aus der Vergangenheit sinnvoll auf die Gegenwart anzuwenden, sollte er dennoch besser voraussehen können, was wohl als Nächstes passiert.

Die Prozesse, aus denen unser Selbstverständnis besteht, müssen miteinander verquickt sein. Zum Beispiel gehört zum interpersonellen Selbst ganz wesentlich die Empathie, das heißt die Fähigkeit, sich in andere hineinzuversetzen. Wir Menschen erreichen das, indem wir innerlich nachvollziehen, was wir über die Situation des Gegenübers wahrnehmen, wobei wir das Modell benutzen, das unserem ökologischen Selbst zu Grunde liegt. Das interpersonale Selbst bezieht sich somit auf das ökologische Selbst. Aber was kommt sonst noch hinzu? Meiner Ansicht nach spielt eine entscheidende Rolle, dass wir im Stande sind, durch Nachahmen zu lernen.

Auf dem Weg zu einem mitfühlenden Wesen

Wir verdanken unsere Fähigkeit, mit Hilfe des eigenen Körperschemas die Handlungen anderer Menschen zu deuten, zum großen Teil den Spiegelneuronen: Zellen im Gehirn, die sowohl feuern, wenn wir selbst eine Bewegung ausführen, als auch dann, wenn wir dieselbe Bewegung bei jemand anderem beobachten. Vor diesem Hintergrund hat Yiannis Demiris vom Imperial College in London das Programm zum motorischen Brabbeln von iCub zu einem Nachmachlersystem erweitert. Dadurch kann sich der Roboter nun schnell neue Gesten aneignen und die Abfolge von Aktionen bei einem Spiel oder beim Lösen einer Aufgabe lernen, indem er Menschen dabei zuschaut. Damit iCub Empathie aufbringt, also nicht nur die Bewegungen, sondern zugleich die Gemütslage einer Person erkennt und widerspiegelt, muss das System allerdings noch erweitert werden.

Überhaupt gibt es noch reichlich zu tun. Unsere Modelle des ökologischen, interpersonellen und temporalen Selbst sind fraglos grobschlächtig im Vergleich zu den Gegenstücken im menschlichen Gehirn. Und noch gar nicht in Angriff genommen haben wir die Simulation des konzeptuellen und des privaten Selbst, also jene Aspekte, die iCub eine Vorstellung davon vermitteln würden, was – oder wer – er ist, und ihm zum Bewusstsein brächten, dass er über eine innere Welt verfügt, die er nicht mit anderen teilt.

Bei allem Ehrgeiz, iCub ein immer realistischeres Selbstverständnis zu verschaffen, gibt es allerdings gewisse Aspekte unseres eigenen Ich, die wir lieber nicht implementieren wollen. Beispielsweise haben wir dem Roboter seine Motivationen und Ziele fest einprogrammiert, und wir dürften gut daran tun, es dabei zu belassen und keineswegs zu erlauben, dass sie sich wie beim Menschen unabhängig weiterentwickeln.

Große Mühe geben wir uns dagegen damit, iCubs Sprachverständnis zu verbessern. Obwohl er gesprochene Wörter und Sätze erkennt, ist er von einem wirklichen Verstehen



iCub verfügt über einen Lage-, Kraft- und Bewegungssinn, der ihm erlaubt, seine 53 Gelenke so koordiniert einzusetzen, dass er zum Beispiel einen Stift halten und damit zeichnen kann.



Unser Online-Dossier zum Thema »Roboter« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/roboter

noch weit entfernt, kann das Gehörte also nur sehr eingeschränkt auf Objekte und Handlungen beziehen. Unsere Kollegen in Lyon arbeiten an einer neurorobotischen Lösung für dieses Problem, doch derzeit vermag iCub lediglich Unterhaltungen über sehr wenige Themen zu führen – etwa über das Spiel, das er gerade mit einem spielt.

Obwohl wir erst am Anfang stehen, zeichnet sich das Potenzial von Robotern mit Selbstbild doch bereits deutlich ab. Dank des ökologischen Selbst bewegt sich iCub recht sicher in seiner Umgebung. Das zeitlich ausgedehnte Selbst erlaubt ihm, sich an die Vergangenheit zu erinnern und die Zukunft vorwegzunehmen. Das interpersonale Selbst lässt ihn begreifen und damit auch in gewissem Umfang vorhersehen, was Menschen wollen und tun. Ein solcher Roboter könnte auf diversen Gebieten – von der Produktion von Gütern über die Suche und Rettung von Verunglückten bis zur Betreuung von Behinderten – Seite an Seite mit Menschen agieren.

Allerdings fehlt unseren Modellen ein entscheidendes Element, nämlich das, was James als erkennendes Selbst bezeichnet hat und was sich auch mit dem Begriff Bewusstsein umschreiben lässt. Aber vielleicht ergibt sich diese Fähigkeit ja von allein, wenn die übrigen Aspekte des Selbst zusammenkommen. Mit anderen Worten handelt es sich womöglich um eine emergente Eigenschaft eines geeignet konfigurierten Satzes von Selbstprozessen und kein gesondertes Element. Um auf die buddhistische Lehre zurückzukommen, wonach das Selbst eine Illusion ist: Wenn man die verschiedenen Teilprozesse entfernt, bleibt am Ende vielleicht wirklich nichts übrig.

Unsere Idee des Selbst ist eng verknüpft mit dem, was es heißt, eine Person zu sein. Wäre es also denkbar, eines Tages einem Roboter mit einem künstlichen Ego den Status einer Person zuzubilligen? Als solche definierte der Philosoph John Locke (1632–1704) im 17. Jahrhundert ein Wesen, das über Vernunft und Sprache sowie geistige Zustände wie Überzeugungen, Wünsche und Absichten verfügt und das zu Beziehungen fähig und moralisch für seine Handlungen verantwortlich ist. Sein heutiger Kollege Daniel Dennett von der Tufts University in Boston (Massachusetts) fügt ein weiteres Kriterium an: Eine Person sei jemand, sagt er, den andere als Person behandeln.

Weder Locke noch Dennett verlangen also, dass eine Person aus biologischem Material besteht. Aber unser iCub er-

füllt die Bedingungen derzeit sowieso noch nicht alle. Er kann zwar schlussfolgern, sprechen, Überzeugungen und Absichten bekunden und eine Art von Beziehungen knüpfen. Teils staunt man sogar darüber, wie angemessen er auf Situationen reagiert. Dennoch ist zweifelhaft, ob seine geistigen Zustände den unsrigen irgendwie ähneln. Und auf keinen Fall ist er ein moralisches Wesen im üblichen Sinn, weil sich seine Entscheidungen nicht auf Wertvorstellungen gründen.

Im Übrigen beruht unser Urteil über den Status als Person ohnehin mehr auf unserem spontanen Eindruck als auf dem Abarbeiten einer philosophischen Checkliste. Wie Dennett sagt, liegt es zum großen Teil im Auge des Betrachters, ob er seinem Gegenüber einen personalen Status zuerkennt. Wenn ich mit iCub zu tun habe, kommt es mir manchmal ganz natürlich vor, mich ihm gegenüber zu verhalten, als zeige er erste Ansätze einer eigenen Persönlichkeit. Und gelegentlich habe ich das überraschende Gefühl, als sei da wirklich so etwas wie ein fühlendes Wesen. ~

DER AUTOR



Tony Prescott ist Professor für kognitive Neurowissenschaften an der University of Sheffield (England) und Leiter des Forschungsverbunds Sheffield Robotics.

QUELLEN

- Metta, G. et al.:** The iCub Humanoid Robot: An Open-Systems Platform for Research in Cognitive Development. In: *Neural Networks* 23, S. 1125–1134, 2010
- Natale, L. et al.:** Sensorimotor Coordination in a Humanoid Robot: Building Intelligence on the iCub. In: Cingolani, R. (Hg.): *Bioinspired Approaches for Human-Centric Technologies*. Springer, Heidelberg 2014, S. 155–197
- Natale, L. et al.:** The iCub Platform: A Tool for Studying Intrinsically Motivated Learning. In: Baldassarre, G., Mirolli, M. (Hg.): *Intrinsically Motivated Learning in Natural and Artificial Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg 2013, S. 433–460
- Rea, F. et al.:** Event-Driven Visual Attention for the Humanoid Robot iCub. In: *Frontiers in Neuroscience, Neuromorphic Engineering* 7, S. 1–11, 2013
- Parmiggiani, A. et al.:** The Design of the iCub Humanoid Robot. In: *International Journal of Humanoid Robotics* 9, S. 1–24, 2012
- Sandini, G. et al.:** The iCub Cognitive Humanoid Robot. Springer, Heidelberg 2007
- Tikhonoff, V. et al.:** Integration of Speech and Action in Humanoid Robots: iCub Simulation Experiments. In: *IEEE Transactions of Autonomous Mental Development* 3, S. 1–14, 2011

WEBLINKS

<http://www.icub.org/>
Homepage des iCub-Projekts

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1351076

© New Scientist

www.newscientist.com



Ute Schneider, Stefan Braknsiek (Hg.)

Gerhard Mercator

Wissenschaft und Wissenstransfer

WBG, Darmstadt 2015

376 S., € 49,95

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Die Erde auf einem Blatt Papier

Vor rund 450 Jahren entwickelte Gerhard Mercator eine Methode der Kartenherstellung, die noch heute angewendet wird.

Eigentlich waren die Arbeitsbedingungen für den Kartografen und Geografen Gerhard Mercator (1512–1594) ungünstig. Sein Duisburger Familienunternehmen lag im 16. Jahrhundert geografisch an der Peripherie des europäischen Buchhandels- und Verlagsnetzwerks. Mercator selbst galt in diesem Bereich eher als Laie, und seine Einkünfte als Mathematiklehrer des Duisburger Gymnasiums dürften für die Ausstattung einer Gravurwerkstatt kaum ausgereicht haben. Dennoch brachte er es zu einem der bedeutendsten Kartografen seiner Zeit.

Wie alle Landkartenzeichner stand er vor dem Problem, die Oberfläche der kugelförmigen Erde in der Ebene abzubilden, wobei es unweigerlich zu perspektivischen Verzerrungen kommt. Um diesem Dilemma beizukommen, entwickelte er die nach ihm benannte Projektionsmethode (Mercator-Projektion), die sich als großes Erfolgsmodell erweisen sollte. Noch heute wird sie in der Kartografie eingesetzt.

Die Autoren des vorliegenden Sammelbands untersuchen Mercators Wirken im zeit- und kulturhistorischen Kontext. Ebenso betrachten sie die Rezeption seiner Karten und fragen, inwiefern diese die Auffassung von der Wirklichkeit prägten und prägen. Wie die Herausgeber konstatieren, ist das Gelehrtennetzwerk, auf das sich Mercator stützte, bislang kaum untersucht worden. Dabei war er schon allein deshalb auf gute Kon-

takte angewiesen, weil er kaum aus Duisburg herauskam, wie der Beitrag »Lebensform und Habitus« darlegt. Seine Geschäftsbeziehungen, die der Beschaffung wissenschaftlicher Informationen sowie der unternehmerischen Tätigkeit dienen, lassen sich in starke und schwache untergliedern. Zu den ersten zählte ein kleiner Kreis von Gelehrten in Duisburg und Köln, mit denen Mercator auch geselligen Umgang pflegte. Zu den letzten gehörte die Briefkorrespondenz mit Sachkundigen in aller Welt.

Der Beitrag über Mercators Vertriebsstrategien zeigt, dass dessen verlegerisches Netzwerk unter anderem kapitalträchtige Großunternehmer umfasste,

die selbst wichtige Kontakte hatten. Dazu zählten die Kölner Unternehmerfamilie Birckmann und der Antwerpener Verleger Christoph Plantin. Letzterer übernahm zwischen 1566 und 1576 nicht nur die Weiterverarbeitung der Mercator-Karten, etwa deren aufwändige Kolorierung, sondern kümmerte sich auch um deren Vertrieb bis nach Paris, Brüssel, London und Sevilla. Zu den Käufern zählten Gelehrte, Buch- und Kunsthändler, Bibliotheken, aber auch wohlhabende Bürger, die Grafiksammlungen anlegten oder die Karten als repräsentativen Wandschmuck nutzten.

Doch der Markt war hart umkämpft, weshalb sich Mercator-Karten gegen eine Vielzahl von Konkurrenzprodukten behaupten mussten. Dazu gehörten beispielsweise die Seekarten der niederländischen Vereinigten Ostindischen Kompanie (VOC), aber auch die vom niederländischen Kartografen Adriaen Veen (1572–1631) entwickelten gewölbten Karten. Veens Erfindung wurde 1594 für zwölf Jahre durch Privileg geschützt. Keine dieser Lösungen konnte vollends überzeugen, alle erwiesen sich in der Abbildung geografischer Realität als ungenau und verzerrt. Für die Werke Mercators, die spätestens ab 1608 auf Schiffen der VOC verwendet wurden, kam noch erschwerend hinzu, dass sie den Seeleuten zur nautischen Berechnung umfangreiche Mathematik-



Weltkarte Gerhard Mercators von 1569. Die mit zunehmendem Breitengrad immer größere Verzerrung der Mercator-Projektion ist deutlich zu sehen.

CARTA DO MUNDO DE MERCATOR, 1569 / PUBLIC DOMAIN

kenntnisse abverlangten, wie ein Buchbeitrag darlegt. Daher mussten sie durch Gebrauchsanweisungen und Tabellen ergänzt werden.

Kritik an den Mercator-Karten blieb deshalb nicht aus. Doch wichtige Entscheidungsträger argumentierten, dass die Karten eine gelungene Vereinigung von Theorie und Praxis darstellten und ihr Einsatz »zum Besten« der Seeleute erfolge. So setzte sich die Mercator-Projektion innerhalb der VOC offenbar deshalb durch, weil die Kompanie die Nutzung der Karten vorschrieb.

Die perspektivischen Verzerrungen der Mercator-Projektion, so der Tenor einer breiten Diskussion in den 1960er Jahren, führten zu einem entstellten

Weltbild, indem sie manche Länder größer erscheinen lassen, als sie im Vergleich zu anderen tatsächlich sind. Ein weiterer Buchbeitrag plädiert deshalb dafür, dass heutige Herausgeber historischer Atlanten sich die Wirkung der gewählten Projektionsform vergegenwärtigen sollten. Zwar mache die durchgängige Beibehaltung einer bestimmten Form die Karten untereinander besser vergleichbar. Doch der Gebrauch verschiedener Projektionsarten ermögliche es, die Karten besser an das jeweilige Thema und den jeweiligen Kontext anzupassen. Keine der vielen verschiedenen Projektionsmöglichkeiten in die Ebene könne die akkurate Abbildung der Erdoberfläche für sich beanspru-

chen, alle beruhten letztlich auf Kompromissen.

Die insgesamt 16 Beiträge des Buchs bieten einen detaillierten Einblick in die Produktionsbedingungen wie in die Entstehungs- und Rezeptionsgeschichte der Mercator-Karten. Es gelingt den Autoren, Mercator in den Kontext seiner Zeit einzubetten und den Lesern die politischen und historischen Probleme der Kartografie bewusst zu machen. Für eine ergiebige Lektüre sollte man allerdings über Vorkenntnisse auf diesem Gebiet verfügen.

Martin Schneider

Der Rezensent ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.



Bernhard Kegel
Die Herrscher der Welt
Wie Mikroben unser Leben bestimmen
DuMont, Köln 2015
382 S., € 22,99

BIOLOGIE

Als Minderheit im eigenen Körper

Die menschlichen Zellen sind in unserem Organismus nur eine Randgruppe. Bei anderen Tieren ist das ähnlich.

Müssen wir grundlegende Konzepte der Biologie überdenken?

Bakterien sind Überlebens- und Wandlungskünstler und daher selbst dort anzutreffen, wo man kein Leben vermutet. Allein im menschlichen Körper tummeln sich schätzungsweise 100 Billionen Kleinstlebewesen, das sind etwa dreimal so viele, wie der Organismus selbst Zellen besitzt. Da kann man sich durchaus als eine Minderheit im eigenen Körper fühlen und steht vor der Frage, ob wir überhaupt Individuen sind. Aus biologischer Sicht lautet die Antwort nein. Vielmehr handelt es sich bei uns um »Holobionten« – Gemeinschaften verschiedener Lebe-

wesen, die sich zu einem »Superorganismus« zusammengefunden haben. Und die menschlichen Anteile in uns sind auf die mikrobiellen angewiesen: Der Versuch, ohne sie leben zu wollen, käme einem schleichenden Selbstmord gleich. Das trifft nicht nur auf Menschen zu, sondern auch auf zahlreiche andere vielzellige Lebewesen.

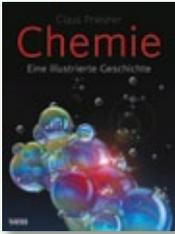
Der renommierte Wissenschaftsautor Bernhard Kegel entführt seine Leser im vorliegenden Band auf eine Reise in die aufregende Welt der Mikroorganismen. Als Biologe und versierter Buchschreiber versteht er es, ein gleicherma-

ßen informatives und verständliches wie unterhaltsames Werk zu verfassen. Er beleuchtet das Thema aus biologischer Sicht, nicht aus medizinischer. Deshalb handelt »Die Herrscher der Welt« größtenteils von den Vorteilen für die Wirte, die sich mit Bakterien und anderen Einzellern zusammentun.

Der Autor reiste nach Jordanien, um einem Forscherteam aus Deutschland bei ihrer Arbeit über die Schulter zu schauen. Die Wissenschaftler untersuchten Korallen, die in Symbiose mit anderen Organismen leben. Kegel beschreibt den Alltag und die Herausforderungen der Forscher und erzählt von deren Erkenntnissen. So können die Korallen im nährstoffarmen Meer nur überleben, wenn sie mit Algen und Bakterien eng »zusammenarbeiten«.

In ähnlicher Form treffe das auch auf andere Lebewesen zu, etwa Tintenfische, Termiten oder Pflanzen, hält der Autor fest. Unter den irdischen Vielzellern sind Holobionten demnach keine Ausnahme, sondern die Regel. Sie sind in ihrer Existenz von anderen Organismen abhängig – ebenso wie wir.

Allerdings, konstatiert Kegel, gehöre unser Darm zu den am dichtesten besiedelten Orten der Welt. Wir brauchen die Mikroben als Verdauungshelfer. Und nicht nur wir: Auf diesem Planeten dürfte es keine Tierart geben, die ohne



Claus Priesner

Chemie – Eine illustrierte Geschichte

Theiss, Darmstadt 2015. 224 S., € 39,95

Claus Priesner, studierter Chemiker und Wissenschaftshistoriker, beschreibt die Geschichte der Chemie von der Entdeckung des Feuers vor etwa 400 000 Jahren bis hin zur Entwicklung moderner Medikamente. Sein Buch ist reich bebildert und wirkt hochwertig verarbeitet. Priesner pflegt einen sachlichen und faktenorientierten Schreibstil; pro Seite finden sich mitunter 20 Jahreszahlen und mehr als 10 verschiedene Namen. Bei seinen Lesern setzt der Autor ein gewisses chemisches Grundverständnis voraus, was sich etwa darin äußert, dass er organische Stoffklassen oder Herstellungsverfahren nicht weiter erklärt. Wer einen Überblick über wichtige Meilensteine der Chemiegeschichte sucht und bereits über einschlägige Kenntnisse verfügt, ist mit diesem Buch gut beraten. Freilich hätten einige humorvolle Anekdoten oder andere auflockernde Elemente dem Werk nicht geschadet.

JUDITH MERKELT



Manfred Fishedick, Klaus Görner, Margit Thomeczek (Hg.)

CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung

Springer Vieweg, Berlin und Heidelberg 2015. 855 S., € 99,99

Seit einigen Jahren wird diskutiert, Kohlendioxid großtechnisch aus Kraftwerksabgasen abzuspalten und unterirdisch zu lagern. Dieser Ansatz stößt jedoch auf breite Skepsis. In diesem Fachbuch möchten die Herausgeber eine »ganzheitliche Bewertung« der Methode vornehmen. Es gelingt ihnen gut, denn das Werk vermittelt einen sehr umfassenden Einblick. Es behandelt naturwissenschaftliche Grundlagen des Klimawandels und chemische Eigenschaften von Kohlendioxid ebenso wie technische, ökonomische, rechtliche und politische Aspekte der CO₂-Abscheidung. Autoren aus Wissenschaft, Politik, Umweltschutz und Industrie beleuchten das Thema aus sehr unterschiedlichen Blickwinkeln. Angesichts der vielen Streitpunkte wahren die Herausgeber Objektivität und Neutralität, wie unter anderem ein abschließendes Kapitel bezeugt, in denen diverse Akteure zu Wort kommen – darunter Vertreter der Wirtschaft, der Gewerkschaften sowie verschiedener Naturschutzorganisationen und Parteien.

TIM HAARMANN



Bruno P. Kremer, Klaus Richarz

Ins Bockshorn gejagt – Tierische Sprichwörter und blumige Redewendungen

Theiss, Darmstadt 2015. 160 S., € 19,95

Der sprichwörtliche »Blümchenkaffee« hat nichts mit der Pflanzenwelt zu tun, der Ausdruck »hanebüchen« aber wohl: In diesem Band erklären die Biologen Bruno Kremer und Klaus Richarz unterhaltsam den naturwissenschaftlichen Hintergrund geläufiger Redensarten. Fragen wie, warum man »zittert wie Espenlaub«, dienen den Autoren als Ausgangspunkt, um biologische Phänomene zu beschreiben und amüsante Geschichten zu erzählen. Lesern mit guten Vorkenntnissen bietet das Buch nicht allzu viel Neues, doch interessierte Laien stoßen immer wieder auf Unvertrautes – etwa den Unterschied zwischen Rechts- und Linksfludern. Gelegentlich unterlaufen den Autoren Fehler auf fachfremdem Gebiet, etwa die Behauptung, schon antike Statuen hätten Feigenblätter vor der Scham gehabt. Auch wirkt das Layout stellenweise lieblos, und das Lektorat hätte sorgfältiger arbeiten können. Trotzdem bietet das Werk manch vergnüglichen und lehrreichen Ausflug in die Biologie.

LENA NÜCHTER



Jürgen Beetz

E = mc²: Physik für Höhlenmenschen

Springer, Berlin und Heidelberg 2015. 359 S., € 19,99

Dem Buch liegt eigentlich eine originelle Idee zu Grunde: Die Grundzüge der Physik am Leben unserer steinzeitlichen Vorfahren zu erläutern. Und zwar so, dass sogar die es verstehen würden. Man ist gespannt und voller Vorfreude – und erlebt beim Lesen eine große Enttäuschung. Nur wenige Abschnitte spielen tatsächlich in der Steinzeit, stattdessen präsentiert sich der Autor als allwissender Erzähler, der über moderne Physik doziert. Beetz' erfundene Urahren, die problemlos Differenzialgleichungen lösen, sind allzu offensichtlich konstruiert; ihre langweiligen und platten Dialoge alles andere als unterhaltsam. Das Vorzeit-Entertainment funktioniert vorn und hinten nicht und kann kaum kaschieren, dass es sich bei dem Band um ein gewöhnliches Lehrbuch handelt. Das Werk vermittelt durchaus eine Menge Stoff – nur etwas Besonderes ist es eben nicht.

THERESA MOEBUS

bakterielle Stoffwechselhilfe auskommt. Bakterien sind einfach die »besseren Chemiker«. Kein Wunder, dass ein Drittel aller Stoffe, die mit dem Blut durch unseren Körper transportiert werden, von Mikroben stammt. Ihr chemischer Einfluss reicht mit Hilfe des Kreislaufsystems bis in entlegenste Körperregionen – auch bis zum Gehirn, wo sie elementare Funktionen des Nervensystems beeinflussen.

Unsere Vorstellung von Bakterien und Mikroben war jahrzehntelang verzerrt – und zwar infolge der Fixierung auf Krankheitserreger. Folgerichtig verstand man unser Immunsystem als Antwort auf die mikrobielle Bedrohung. Kegel verdeutlicht allerdings, dass das Immunsystem kein Abwehrbollwerk ist, sondern die Beschaffung und den Erhalt der artspezifischen Partnergemeinschaft organisiert. Die Bekämpfung von Krankheitserregern ist nur eine seiner vielen Aufgaben, und auch das erledigt die Körperabwehr nicht allein, sondern

mit Unterstützung seitens der bakteriellen Symbionten. Ein Interaktions- statt ein Abwehrsystem: Das ist eine fundamental andere Art, der Welt außerhalb des eigenen Körpers gegenüberzutreten.

Für den Autor stellt sich die Frage: Brauchen wir nun, da wir verstanden haben, dass zahlreiche Vielzeller Holobionten sind, eine neue Evolutionstheorie? Zumindest sollten wir seiner Meinung nach die Bedeutung von Mikroorganismen in der Evolution überdenken, denn die Einzeller seien an der Bildung neuer Arten maßgeblich beteiligt. Der Biologe spricht sich dafür aus, unser Konzept davon, was Lebewesen sind, radikal zu verändern. Viele Fragen müssten neu gestellt, viele biologische Phänomene neu betrachtet und bewertet werden. Dazu gehörten grundlegende Konzepte wie das der Evolution und der Ontogenese.

Auf den letzten Seiten des Buchs zaubert der Autor noch eine Überraschung aus dem Hut: Tiere haben nicht nur ein eigenes Mikrobiom, sondern

auch ein artspezifisches Viriome, also einen eigenen Satz an Viren, wie neue wissenschaftliche Erkenntnisse belegen. Etwa 60 Prozent dieser Kleinstpartikel sind so genannte Phagen, infizieren also ausschließlich Bakterien. Das lässt viele Forscher vermuten, dass Viren die eigentlichen Kontrolleure des spezialtypischen Mikrobioms sind. Inwieweit diese Hypothese tatsächlich stimmt, bleibt herauszufinden. Mit Sicherheit aber macht die Biologie im Hinblick auf die neuen Befunde gerade turbulente Zeiten durch. Nach der fesselnden Lektüre von »Die Herrscher der Welt« bleibt zu hoffen, dass Kegel ein weiteres Buch über die Mikrowelt schreiben wird – vielleicht über das mindestens ebenso faszinierende Reich der Viren.

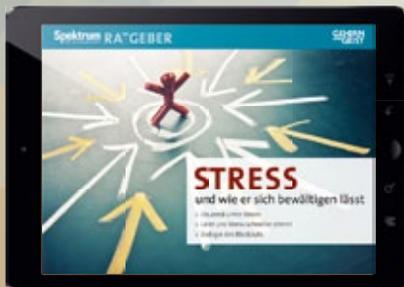
Peggy Freede

Die Rezensentin ist promovierte Biochemikerin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Leipzig.

WENN DER SCHUH EINMAL DRÜCKT: Spektrum RATGEBER

ALS PDF
ZUM
DOWNLOAD

In unserer Digitalreihe **Spektrum RATGEBER** finden Sie wichtige Tipps zu Themen, die den Alltag betreffen – ob beruflich oder privat.



Ratgeber »Stress« (€ 4,99)



Ratgeber »Glück« (€ 4,99)



Ratgeber »Beruf und Karriere« (€ 4,99)

ISTOCK / BOBLUE

Diese und weitere Ausgaben erhalten Sie unter:
www.spektrum.de/ratgeber

Hier QR-Code per Smartphone scannen!





Ingo Klöckl
Chemie der Farbmittel
In der Malerei
 De Gruyter, Berlin 2015
 678 S., € 149,95

CHEMIE

Drachenblut und Heidelbeeren

Vom antiken Bleiweiß als Malfarbe bis zum modernen Toner für Laserdrucker: Dieses umfassende Werk führt in die große Welt der Pigmente in der Kunst ein.

»Hätt'ich ein Kind, so weiß wie Schnee, so rot wie Blut und so schwarz wie Ebenholz!« Wer sieht bei diesen Worten nicht Schneewittchen vor dem inneren Auge? Ingo Klöckl hingegen denkt dabei an die chemischen Strukturformeln von Titandioxid, Cadmiumselenid und Lampenruß. Der passionierte Maler und Chemiker will es genau wissen: Was enthält die Tube mit gelber Ölfarbe? Warum

torische und moderne Farbstoffe eingeteilt. Er behandelt Streuung, Glanz und Reflexion und erörtert, inwiefern sie von der Partikelgröße abhängen.

Die Leser erfahren auch, wie der Aufbau von Molekülen deren Farbe bestimmt. Dabei geht es beispielsweise um elektronische Mechanismen in Halbleitern, in Ligandenfeldern, bei Charge-Transfer-Übergängen oder in Molekül-

Klöckl unternimmt souveräne Exkurse in die physikalische Chemie und steuert Einzelheiten aus der Milchwirtschaft, der Welt der Klebstoffe sowie des professionellen Backens bei

bildet das Leinöl darin einen klaren Film? Und weshalb wirkt Chromocker rein, im Gegensatz zum verschmierten gelben Ocker?

Die Antworten darauf liefert Klöckl im vorliegenden Buch, das die optische Wirkung von Farbmitteln chemisch und physikalisch detailliert erklärt. Darüber hinaus beleuchtet das Werk, wie sowohl historische als auch moderne Farbmittel in der Kunst hergestellt und eingeteilt werden. Zudem beschreibt der Autor verschiedene Malhilfsmittel wie Papier oder Leinöl und erläutert deren Effekte auf den Farbeindruck. Im Anhang laden knapp 900 Literaturreferenzen zum Weiterlesen ein.

Klöckl erklärt zunächst physikalische Wechselwirkungen zwischen Licht und Pigmentpartikeln, wobei er auf his-

torischen. Anschließend stellt der Autor ein breites Spektrum natürlicher und synthetischer Farbmittel vor, von Altägyptischblau über scheeles Grün und Schneeweiß bis zum Goldrubin in Gläsern. Warum sie welchen optischen Eindruck ergeben und wie sie hergestellt werden, erklärt Klöckl an jedem einzelnen Stoff, wobei er auf die jeweiligen chemischen und physikalischen Prozesse eingeht.

Die schönste Farbe nützt wenig ohne geeigneten Untergrund und Hilfsstoffe. Welch große Rolle diese spielen, geht aus dem Buch gut verständlich hervor. So können beispielsweise Papier, Glas, Keramik, Ochsen-galle oder ölhaltige Bindemittel wie fette Eitempera die Farbe deutlich verändern. Der Vollständigkeit halber befasst sich der Autor

zum Schluss mit allerlei Tinten: Von Rußtinten über solche in der Buchmalerei bis hin zu Tinten für Drucker und Kopierer.

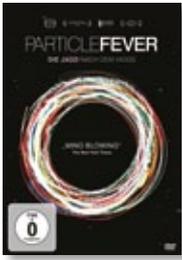
Bei der Lektüre scheint immer wieder durch, wie gründlich Klöckl recherchiert hat. Er unternimmt souveräne Exkurse in die physikalische Chemie; vertiefte Einzelheiten steuert er aus seinem Studium der Milchwirtschaft, der Welt der Klebstoffe und des professionellen Backens bei. Vieles davon hat er sicherlich selbst ausprobiert. Man merkt ihm die Freude am Thema auf jeder Seite an. Leider verzichtet der Autor auf farbliche Darstellungen, womit er in einem Buch über Farbe didaktische Möglichkeiten verschenkt.

Die enorme Wissensfülle, die das Werk bereithält, ist eine Fundgrube sowohl für Wissenschaftler als auch für Künstler. Das Buch lässt sich als Nachschlagewerk nutzen und kann gewiss auch Impulse für neue Entwicklungen in der Welt der Farbmittel geben – beispielsweise in der industriellen Forschung und Produktion. Besonders in den theoretischen Abschnitten scheut Klöckl nicht vor chemisch-physikalischen Details zurück. Sein Band ist daher keine leichte Kost und setzt bei den Lesern entsprechende Kenntnisse voraus.

Dennoch kommen auch interessierte Laien durchaus auf ihre Kosten. Wer weiß schon, dass das in der Buchmalerei verwendete Drachenblut nicht von Sagenhelden erkämpft werden musste, sondern aus dem Harz des Drachenblutbaums gewonnen wurde und ein kräftiges Rot ergibt? Oder dass die Farbe Saftgrün aus bräunlichen Pflanzensäften etwa von unreifen Heidelbeeren hergestellt wird, aber erst nach dem Zusatz von Alaun grün wird? Solche interessanten Fakten mögen viele Laien für die zahlreichen chemischen Strukturformeln und detaillierten physikalischen Beschreibungen entschädigen.

Katja Maria Engel

Die Rezensentin ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften und arbeitet an der Erforschung neuer Materialien in der Glasindustrie.



Mark Levinson

Particle Fever

Die Jagd nach dem Higgs

Dokumentation, USA 2013

polyband, München 2015

Laufzeit 99 Minuten

DVD € 15,99 / Blu-ray € 16,99

PHYSIK

Jagd nach dem Allerkleinsten

Ein Film über sechs Teilchenphysiker, die nach Antworten suchen – und noch mehr Fragen finden.

Das Higgs-Teilchen ist ein undankbarer Filmpartner: In der Theorie schon unanschaulich, hat es in der Praxis erst recht keine fotogenen Qualitäten. Was es aber hat, ist Glamour. Als letzter Baustein in einer der größten Theorien der Physik, dem Standardmodell, war sein Nachweis am Teilchenbeschleuniger LHC eine Sensation. Über die Fachwelt hinaus sorgte es als »Gotesteilchen« für Schlagzeilen.

Der Film ist eine Liebeserklärung an die Physik und die Menschen, die sie betreiben

Die Macher der Dokumentation »Particle Fever – Die Jagd nach dem Higgs« möchten zeigen, wie die Suche nach dem Teilchen das Leben von Wissenschaftlern geprägt hat. Von 2007 bis 2012 begleiteten sie sechs Physiker zu ihren Vorträgen und Seminaren, nach Hause und vor allem: zum LHC. Aus den dabei entstandenen Szenen setzt sich die Doku zusammen.

Beide Filmemacher kommen vom Fach. Mark Levinson hat einen Doktor in theoretischer Physik, wechselte aber schon vor Jahren ins Filmgeschäft. David Kaplan ist theoretischer Physiker an der Johns Hopkins University in Baltimore. Er arbeitete am LHC und hatte die Idee zum Film. Folgerichtig handelt es sich bei einem der sechs porträtierten Physiker um ihn selbst.

Mit seiner überzeugenden Dramaturgie schafft es »Particle Fever«, weder

den Faden noch die Zuschauer zu verlieren. Allerdings herrschte mit Walter Murch auch ein echter Schnittmeister über das Filmmaterial, der bereits an weltberühmten Produktionen wie »Der Pate«, »Apocalypse now« oder »Der englische Patient« mitwirkte. Levinson und Kaplan gaben ihm neben professionell gedrehten Aufnahmen auch Amateurclips in die Hand, die von Forschern stammen. Herausgekommen ist

eine Dokumentation, die ohne allwissenden Erzähler auskommt und die Geschichte nur anhand der Wissenschaftler selbst erfahrbar macht.

Am Anfang macht das Zuschauen etwas Mühe, weil einem die Namen und Gesichter fremd sind. Doch dann lernt man sie langsam kennen: etwa Savas Dimopoulos, der für jede seiner Veröffentlichungen den Nobelpreis erwartet; Monica Dunford, die Physik früher nie leiden konnte; und Fabiola Gianotti, eine Projektleiterin am LHC. Mit den drei anderen Physikern haben sie eines gemeinsam: Sie lieben den Teilchenbeschleuniger und die Möglichkeiten, die er bietet – und berühren den Zuschauer mit ihrer Begeisterung dafür.

Es ist die großartige Leistung des Films, Gefühle zu vermitteln und damit etwas zu liefern, das man von einem solchen Werk als Letztes erwartet. Über-

zeugung, Begeisterung und Hingabe der Wissenschaftler werden erfahrbar. Allerdings macht der Film dafür Abstriche bei der Objektivität. Er präsentiert einzig die Perspektive der »Scientific Community«, die Milliarden Euro sowie Unmengen an Ressourcen und Zeit in den LHC investierte – mit ungewissen Erfolgsaussichten. Kritik daran wird allenfalls gestreift und rhetorisch gekonnt weggewischt.

In seinem Überschwang gerät der Film manchmal zu pathetisch, etwa wenn er die erste Kollision der Teilchenstrahlen mit der »Ode an Freude« untermauert. Oder wenn er in gestellten Szenen die Wissenschaftler über große Fragen der Physik grübeln und dabei massenweise Formeln an Tafeln kritzeln lässt. Dennoch bleibt die Dokumentation authentisch – vor allem wohl wegen des Filmmaterials, das die Forscher selbst aufgenommen haben und das ohne Inszenierung und Schminke auskommt.

Die Formeln, die gelegentlich über den Bildschirm flirren, sind nur Dekoration, denn die Physiker nehmen bei ihren Erklärungen keinerlei Bezug auf sie. Dessen ungeachtet gelingt es Kaplan und Levinson, Modellvorstellungen wie Supersymmetrie und Multiversum zu umreißen und in einem »Wettstreit« gegeneinander antreten zu lassen, den das Higgs-Teilchen entscheiden soll. Natürlich ist das fachlich nicht ganz korrekt; beide Modelle müssen sich nicht gegenseitig ausschließen. Aber es erzeugt Spannung, fesselt den Laien und auch den Wissenschaftler, sofern dieser ein wenig Vereinfachung zu Gunsten der Anschaulichkeit aushält.

Der Film ist eine Liebeserklärung an die Physik und die Menschen, die sie betreiben. Das Versprechen, hinterher den Higgs-Mechanismus zu verstehen, gibt er seinen Zuschauern wohlweislich nicht. Denn je tiefer man in die Physik eintaucht, umso mehr Fragen schwimmen mit. Doch von eben diesen Fragen bekommt der Zuschauer eine Ahnung.

Theresa Moebus

Die Rezensentin hat angewandte Naturwissenschaften studiert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in München.



David J. Hand

Die Macht des Unwahrscheinlichen
 Warum Zufälle, Wunder und
 ungläubliche Dinge jeden Tag passieren

Aus dem Englischen von Werner Roller

C.H.Beck, München 2015

288 Seiten, € 19,95

MATHEMATIK

Wenn das Unglaubliche passiert

Dieses Buch liefert Antworten darauf, warum extrem unwahrscheinliche Ereignisse manchmal doch eintreten.

Es gibt Menschen, die erzielen zweimal einen Lotto-Hauptgewinn oder werden mehrfach vom Blitz getroffen. Und waren Sie im Urlaub schon einmal auf einem fernen Kontinent in menschenleerer, abgelegener Gegend, und trafen dort zufällig Ihren Nachbarn? So etwas erscheint uns als praktisch unmöglich – und doch passiert es. Wie kann das sein? Hat nicht der berühmte französische Mathematiker Émile Borel (1871–1956) schon gesagt, dass wir mit hinreichend unwahrscheinlichen Ereignissen im Alltag nicht rechnen müssen?

Der englische Statistiker David Hand zeigt im vorliegenden Buch, warum wir das Unerwartete erwarten sollten. Verantwortlich für das Eintreten extrem unwahrscheinlicher Zufälle macht er nicht Götter oder Wunder, sondern das Unwahrscheinlichkeitsprinzip. Es ergibt sich im Wesentlichen aus fünf Gesetzen, die Hand sorgfältig erklärt und mit vielen Beispielen unterhaltsam veranschaulicht. Dabei verlangt er seinen Lesern keinerlei mathematisches Vorwissen ab. Er legt den Stoff sehr verständlich dar und beschränkt die mathematischen Inhalte auf ein notwendiges Minimum.

Das Gesetz der ganz großen Zahlen (nicht zu verwechseln mit dem Gesetz der großen Zahlen) besagt etwa, dass sogar das äußerst Unerwartete geschieht, sofern es nur genug Gelegenheiten dafür gibt. Wenn man sich vergewissert, wie oft die Rouletteräder

in den Casinos dieser Welt bereits gedreht wurden (sicher mehr als 137 Millionen Mal), dann ist man nicht mehr so erstaunt darüber, was am 18. August 1913 in Monte Carlo geschah: Damals wurden 26 schwarze Zahlen nacheinander angezeigt – ein Ereignis mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 1 zu 137 Millionen.

Spannend ist auch das Gesetz des Wahrscheinlichkeitshebels. Ihm zufolge kann eine kleine Veränderung der Begleitumstände eine gewaltige Auswirkung auf die Wahrscheinlichkeit haben. Geht man etwa davon aus, dass die Kursschwankungen bei Marktpreisen einer so genannten Normalverteilung genügen, dann liegt die Wahrscheinlichkeit für den Absturz des S&P-500-Aktienindex, wie er sich am 19. Oktober 1987 ereignete, bei 1 zu 10^{160} (eine Eins mit 160 Nullen). Ein solcher Crash sollte anschaulich gesprochen nicht einmal dann auftreten, wenn das Universum noch weitere 20 Milliarden Jahre bestehen würde. Lässt man hingegen die Annahme der Normalverteilung fallen und verwendet für die Modellierung die Cauchy-Verteilung, die in Diagrammdarstellung optisch ähnlich aussieht, dann ergeben sich Werte, die den Vorfall so wahrscheinlich machen, dass wir ihn im Lauf eines Menschenlebens erwarten können.

Zu den weiteren Elementen des Unwahrscheinlichkeitsprinzips gehören das Gesetz von der Unvermeidlichkeit

(irgendein Ereignis wird sich mit Sicherheit einstellen, auch wenn für jedes einzelne nur eine winzige Wahrscheinlichkeit besteht) oder das Gesetz von der annähernden Genauigkeit (betrachtet man ähnliche Ereignisse als identisch, erhöht sich die Anzahl der entsprechenden Fälle und damit die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses). Auch wenn diese Gesetze auf den ersten Blick nicht besonders aussagekräftig anmuten, sind sie doch wirkmächtig. Um dies einsichtig zu machen, führt Hand sehr viele Beispiele und lebensnahe Anekdoten an. Die Leidenschaft für das Thema ist ihm dabei stets anzumerken.

Hand kann mit seiner Begeisterung die Leser durchaus anstecken. Leider besteht jedoch die Gefahr, dass man angesichts der unzähligen Geschichten und Musterfälle irgendwann genug hat. Zwar kann man in einem solchen Fall prinzipiell einige Seiten überspringen. Doch die manchmal unzusammenhängende Darstellung und die mitunter sehr beliebigen Überschriften fördern nicht unbedingt den Überblick. Zum Glück enthält der Buchepilog eine gute Zusammenfassung.

Wer leicht verständliche Exkurse in die Mathematik mag, anekdotische Erzählweise zu schätzen weiß und ein Faible für Statistik hat, dem lässt sich das Werk empfehlen.

Roland Pilous

Der Rezensent arbeitet als Dozent für Mathematik und ihre Didaktik an der Fachhochschule Nordwestschweiz.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

Mehr Rezensionen
finden Sie unter:
[www.spektrum.de/
rezensionen](http://www.spektrum.de/rezensionen)



1915

Schwebende Sümpfe

»Als vor einigen Jahren die brasilianische Bergbahn bei

Sao Paulo gebaut wurde, erkrankten und starben viele Arbeiter am Wechselfieber. Das war auffallend. Denn die Malaria entsteht durch das in Sümpfen lebende und durch Moskitos übertragene *Plasmodium malariae*. Auf den steil abfallenden Bergen war aber kein Sumpf zu fin-

den. Erst später entdeckte die Wissenschaft in schwebenden Sümpfen die Eier, Puppen und Larven. Diese Sümpfe sind die in den Urwäldern auf den höchsten Bäumen wachsenden und stets mit Wasser gefüllten Krauttrichter der Bromeliazee. Die agavenartigen Blät-

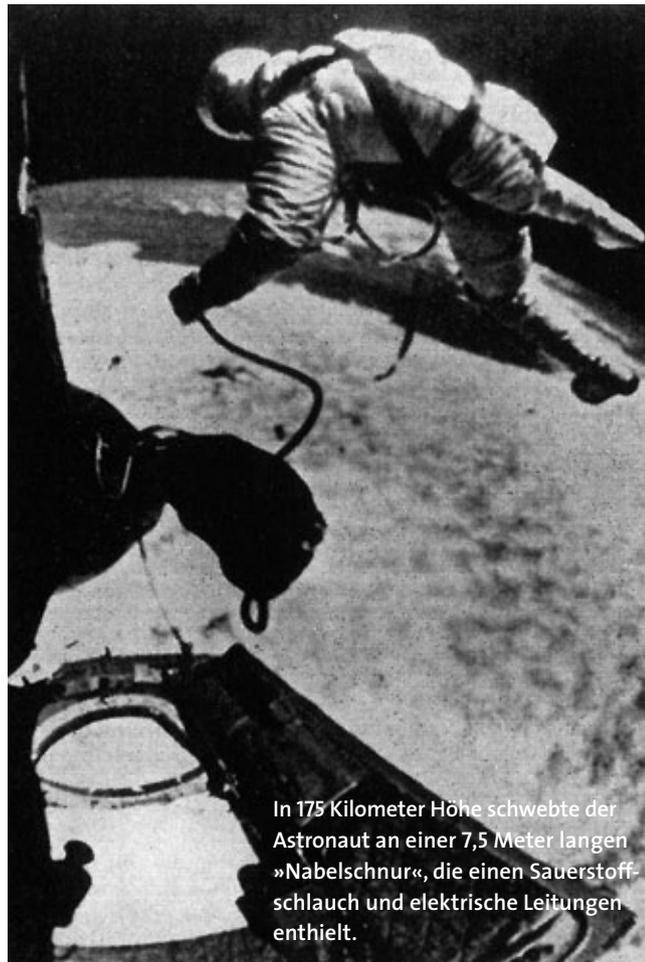
ter fangen nicht nur Tau, Dunst und Regen, sondern auch viele hineinstürzende oder verwehte kleine tote Tiere und Pflanzenteile auf. Nicht weniger als 250 verschiedene Tierarten hat man bis jetzt an und in diesen Schaukeltümpeln festgestellt.« Kosmos 8, S. 280

Licht im Schwerefeld

»Nach der neuen Theorie von Prof. Einstein muß jeder Lichtstrahl beim Durchgang durch ein Gravitationsfeld von seiner gradlinigen Bewegung abgelenkt werden. Es gelang Dr. Freundlich-Potsdam, den Einfluß der Schwerkraft im Sonnenspektrum nachzuweisen. Untersucht man nämlich das Sonnenlicht am Rande des Gestirns, so zeigt es eine größere Verschiebung nach Rot als in der Mitte. Diese Lichtstrahlen kommen aus größerer Tiefe, in der eine erheblich größere Schwerkraft herrschen muß.« Central-Zeitung für Optik 23, S. 221

Heilende Strahlen

»Im Radiuminstitut der Kgl. Charité wurden seit Kriegsbeginn im ganzen 81 Soldaten wegen Narben bestrahlt. In zehn Fällen wurden die Narben weich und beweglich, die bestandene Schmerzhaftigkeit schwand und die bis dahin gestörte Beweglichkeit wurde fast oder vollkommen wieder hergestellt. Es wurde fünfmal nach der Bestrahlung eine leichte, schnell heilende Hautentzündung beobachtet. Die Radiumbestrahlung der Narben eröffnet somit eine höchst aussichtsvolle Heilmethode.« Die Umschau 33, S. 657



In 175 Kilometer Höhe schwebte der Astronaut an einer 7,5 Meter langen »Nabelschnur«, die einen Sauerstoffschlauch und elektrische Leitungen enthielt.

(Fast) völlig losgelöst

»Erstmals haben die USA einen Einbruch in die bisher fest bei der UdSSR liegenden

Rekordleistungen von Satellitenfahrzeugen mit Besatzung erzielt, als die Majore James A. McDivitt und Edward H. White sich vom 3. bis 7. Juni 1965 98 Stunden lang in einer zweiseitigen Gemini-Kapsel aufhielten und dabei die Erde 62 mal umrundeten. Besonders eindrucksvoll war der 20 Minuten währende Aufenthalt Whites im freien Raum. Zu diesem Zweck mußte die Kapsel mangels Luftschleuse völlig dekompriert werden. Anders als sein russischer Vorgänger Leonow wurde White von Bord aus mit Sauerstoff versorgt. Er hatte aber für Notfälle einen eigenen Behälter bei sich. Einen wichtigen Fortschritt stellte die Ausrüstung Whites mit einem Rückstoßaggregat dar, das ihm eine gewisse Beweglichkeit verlieh.« Naturwissenschaftliche Rundschau 8, S. 327

Tauchrekord

»Am Mc-Murdo-Sund in der Antarktis wurden Weddell-Robben noch 60 km jenseits der Schelfeisbarriere beobachtet. Zwei erwachsenen Tieren befestigte man Tiefenmesser am Rücken. Die in 5 Messungen festgestellte maximale Tiefe schwankte zwi-

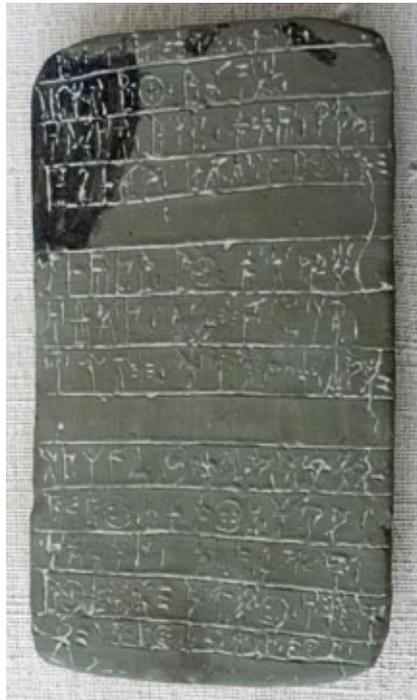
schen 295 und 350 m und die mittlere zwischen 235 und 320 m. Bei durchschnittlicher Tauchtiefe können die Tiere in 10,5 min. 2,2 km zurücklegen. Innerhalb dieses Bereichs müssen die Robben ein Eisloch oder eine Eisspalte finden, um Luft zu bekommen.« Die Umschau 15, S. 481

Tägliche Notizen, in Ton geritzt

Der Althistoriker Josef Fischer diskutiert, ob in der frühgriechischen Mykenekultur ein Großkönig die Macht hatte oder ob mehrere Herrscher regierten (»Wer saß einst auf Mykenes Thron?«, Juni 2015, S. 44).

Walter Weiss, Kassel: Die gefundenen Tontäfelchen waren nur tägliche Notizen, deren Inhalt dazu bestimmt war, nach Ablauf vielleicht einer Woche in größere Register eingetragen zu werden. Dabei sind aber nur die Tontäfelchen erhalten und auch nur dort, wo ihr Aufbewahrungsort vor der Übernahme in die Register gebrandschatzt wurde, etwa während der damals häufigen Überfälle der Seevölker. Diese Bedingungen mussten zusammenkommen, um die Täfelchen zu brennen und zu erhalten. Die größeren Register sind niemals aufgefunden worden; sie waren offenbar auf Pergament oder Papyrus geschrieben und verbrannten natürlich.

Die abgebildete Tafel ist eine von mehreren, auf denen namentlich be-



F&E / CC-BY-SA-3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/UT/ENSEMBLE/SF/SA/3.0/LEGALCODE)

In Linear B beschriebene Tafeln wie diese entstammen den Archiven von Palastverwaltungen. Sie sind eine der wichtigsten Quellen bei der Aufklärung der politischen und wirtschaftlichen Strukturen der mykenischen Staaten. Das Bild zeigt einen Text aus Pylos, der das Installieren einer Wache an der Küste behandelt.

einen Angriff der Seevölker rechtzeitig zu bemerken und die Stadt verteidigungsbereit zu machen.

Tragisch: Offenbar kamen die Angreifer aber schon, bevor diese Befehle den einzuteilenden Beobachtern der Küste auch nur ausgehändigt worden waren, denn die Stadt brannte gleich nach dem Ausstellen der Befehle ab, so dass die in den weichen Ton geschriebenen Anweisungen hart brannten und bis heute erhalten blieben.

nannte Personen als Beobachtertrupps für die Küste eingeteilt wurden – einschließlich eines (vermutlich berittenen) Boten, der die einzelnen an verschiedenen Plätzen positionierten Gruppen verband und wohl auch für die schnelle Benachrichtigung der Stadt eingesetzt war. Das diente dazu,

Andere Täfelchen enthielten Listen der Nahrungsmittel, die Flüchtlingsfamilien aus bereits überfallenen Städten ausgehändigt werden sollten. Wieder andere Täfelchen enthielten lange und sorgfältige Listen von Einrichtungsgegenständen und Möbeln einer Wohnung, die einem beförderten – heute

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, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Dr. Gerhard Trageser, E-Mail: redaktion@spektrum.de

Ständige Mitarbeiter: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer

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

Assistentin des Chefredakteurs: Ann-Kristin Ebert

Redaktionsassistentz: Barbara Kuhn

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

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:

Dr. Markus Fischer, Dr. Ursula Loos, Maria Lubs, Dr. Andreas Nestke, Nicole Paschek, Maike Pollmann.

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 Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Prof. Dr. Carsten Könneker.

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: DE526010070002706708, BIC: PBNKDE33

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, Gesamtanzeigenleitung: Michael Zehentmeier, 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. 36 vom 1.1.2015.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffath 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: © 2015 (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.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



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



würden wir wohl sagen – Beamten übergeben wurde, mit allen Beschädigungen, die einzelne Möbel hatten. Dies diente wohl dazu festzuhalten, was dieser Beamte bei seinem Auszug wieder zurückgeben musste.

Antwort des Autors Josef Fischer:

Es ist richtig, dass die Tontafeln nur kurzfristige Notizen darstellten (in meinen Vorlesungen bezeichne ich sie immer als die Post-its der Mykenen) und die Informationen später auf andere Schreibmaterialien übertragen wurden. Das geschah aber sicher nicht wöchentlich, sondern wohl am Ende des Verwaltungsjahrs. Wir besitzen vage Hinweise, dass es sich bei diesem anderen Schreibmaterial um Papyrus gehandelt haben könnte (kleine beschriftete Tonklumpen, so genannte noduli, zeigen den Abdruck von Papyrus). Es ist auch richtig, dass die Tontafeln nur dort erhalten sind, wo sie durch den Brand, der den jeweiligen Palast zerstörte, gebrannt wurden.

Wir wissen nicht, ob es sich bei der Aufstellung dieser Küstenwache wirklich um eine Notfallmaßnahme gehandelt hat, wie immer wieder vermutet wurde, oder vielmehr um eine Routineaktion. Auch die Rekonstruktion, dass die letzten Befehle nicht mehr an die Truppen überbracht werden konnten, weil der Feind schon vor den Toren stand, entbehrt jeder Grundlage (und ist vielleicht davon beeinflusst, was wir über den Untergang von Ugarit zu wissen glauben).

Ob in den Linear-B-Texten Flüchtlinge verzeichnet sind, wie vor einigen Jahrzehnten vermutet wurde, ist höchst fraglich. Meiner Meinung nach ist das nicht der Fall. Bei den erwähnten Einrichtungsgegenständen handelt es sich um die so genannten Ta-Texte aus Pylos. Die dort aufgeführten Möbel stellen jedoch kaum das Mobiliar einer Wohnung dar (in diesem Fall müssten etwa auch Betten erwähnt sein!), sondern es handelt sich vermutlich eher um ein Kultinventar – darauf deutet auch das Verzeichnen von Beschädigungen (bei Gefäßen, nicht bei Möbeln!) hin.

Simulation des Selbst

Brauchen wir bald auch eine Ethik für intelligente und empfindsame Roboter, fragte der Physiker Michael Springer (Springers Einwürfe, Mai 2015, S. 18).

Norbert Klaus Günther, Gießen: Wie kann ein Roboter, wie können mechanische und elektronische Bauteile, Prozessoren, Speicher, Programme und Algorithmen ihrer selbst bewusst werden? Bewusstsein setzt meiner Meinung nach einen lebendigen Organismus voraus, untrennbar verknüpft und verschaltet mit allen physiologischen Vorgängen des Körpers, seinem Metabolismus. In welchem Bereich sollte ein Roboter Emotionen empfinden, warum und für welche Ziele sollte er aus eigenem Willen aktiv sein? Auch wenn Computer rationale Erkenntnisse und Urteile produzieren, besser und schneller, als es Menschen vermögen: Sind nicht Intelligenz und Bewusstsein zwei sehr verschiedene Dinge? Der Vollzug logischer Operationen allein – und ich vermute, Computer können nur »denken«, indem sie logische Operationen ausführen – generiert noch kein Bewusstsein, kein »Selbst«, bestenfalls dessen Simulation.

Blaue Augen und helle Haut

Wir Menschen passen uns genetisch fortlaufend an, so der Anthropologe John Hawks (»Unsere Evolution geht weiter«, Juni 2015, S. 58).

Wilfried Paarmann, Rosdorf/Atzenhausen: Hellhäutigkeit und Helläugigkeit unter Europäern wird als eine relativ junge Neuerwerbung durch Mutation hingestellt. Hellhäutigkeit stellt einen Selektionsvorteil in höheren Breiten dar, da sie eine bessere Ausnutzung der geringen UV-Einstrahlung während der kühleren Jahreszeit zur Vitamin-D-Produktion ermöglicht. Das würde tatsächlich ihre schnelle Ausbreitung in der Population bewirken.

Andererseits ist davon auszugehen, dass der Neandertaler, der Jahrtausende unter Eiszeitbedingungen im

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

Norden überlebte, entsprechende Anpassungen besaß. Es gibt Hinweise darauf, dass die Neandertaler hellhäutig und blauäugig waren. Auch von der Übernahme von Neandertalergenen in die Population der modernen Europäer sind die Forscher heute weitgehend überzeugt. Sie selbst illustrierten Ihre Märzausgabe 2003 mit einem blauäugigen Neandertaler, um auf den Beitrag »Ursprung der Menschheit« hinzuweisen. Die beiden Arten (Unterarten?) dürften sich nur begrenzt vermischt haben. Der Selektionsvorteil hat dann aber wohl relativ schnell zur Verbreitung der Pigmentarmut geführt. Im Übrigen wird unsere Evolution so lange weitergehen, wie es uns als Art gibt, wobei sie aber immer auf der Ebene von Populationen stattfindet.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.de

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

MEIN FREUND, DER GEHWEG

VON BETH CATO

Emma stolperte, aber der Bürgersteig fing sie auf. Kaum berührte ihr abgemagerter Körper den Beton, da gab das Pflaster nach wie die Schaumgummimatte, auf der sie in der Schule Purzelbäume geübt hatte. Wie lange war das her?

»Oje! Tut mir schrecklich leid. Anscheinend hat sich meine dritte Platte um vier Millimeter angehoben. Hoffentlich geht es Ihnen gut. Soll ich Hilfe anfordern?« Die Stimme klang jung, weiblich und irgendwie keck. Sie kam aus dem Pflaster unter ihr.

Emma blieb liegen und keuchte; nicht der Sturz hatte sie schockiert, sondern die Worte. »Du bist ... der Gehweg! Und du hast gesprochen?« Ihre Stimme krächzte, als wäre sie vom langen Schweigen eingerostet. Die Fläche unter ihr wurde wieder härter.

»Aber sicher! Ich bin Cy Anara, der freundliche Gehweg. Ich wünsche einen guten Morgen. Bitte verzeihen Sie die Plattenanhebung während meiner Offlinephase. Das wurde inzwischen korrigiert. Benötigen Sie medizinische Hilfe?«

Emma stützte sich auf und kroch wieder auf die Knie. Tränen liefen ihr über die Wangen. Es war so lange her, dass sie eine menschliche Stimme gehört hatte, und es war egal, dass die hier von einem Computer kam. Sie schaute sich um. Die Straße lag in Trümmern, genau wie die übrige Stadt. Sie blickte

zu dem Gebäude, das ein Stück zurückversetzt lag. Auf einem verkohlten Schild konnte sie noch ein paar Buchstaben entziffern: »OSPIT« und ein »L«. Ein Krankenhaus! Das erklärte den intelligenten Bürgersteig.

»Kannst du denn die Notfallhilfe rufen?«, fragte sie.

»Aber natürlich!« Pause. »Oh weh. Der Server meldet sich nicht. Aber ich habe Ihre Anfrage im Ausgangsordner gespeichert und werde sie bearbeiten, sobald das Netzwerk wieder verfügbar ist.«

»Es war einen Versuch wert. Wie ... wie lange warst du offline?«

»Meiner Systemuhr nach sieben Monate, fünf Tage und drei Stunden. Das ist lange. Im Durchschnitt bin ich drei Stunden, neun Minuten offline.«

Vor sieben Monaten! Also hatte seit dem Angriff niemand mehr diesen Weg betreten.

»Ich bin wirklich allein«, flüsterte Emma. Der letzte Mensch in dieser Stadt, vielleicht der letzte im ganzen Land, auf der ganzen Welt. Wen die Explosionen verschont hatten, den hatte das Virus umgebracht.

»Aber Sie sind nicht allein. Ich bleibe online, und wir warten gemeinsam auf die Notfallhilfe. Es kann nicht mehr lange dauern, bis der Defekt behoben ist.«

Wie hatte der Gehwegcomputer den elektromagnetischen Puls überstanden? Bestimmt steckte er nicht in ei-

nem faradayschen Käfig. Emma streichelte das Pflaster. Es fühlte sich an wie Beton, nur ein wenig nachgiebiger.

»Sprichst du immer mit Fremden?« Sie kicherte hysterisch und dachte: Ich unterhalte mich mit einem Bürgersteig!

»Für einen freundlichen Gehweg ist niemand ein Fremder!«, erwiderte Cy. »Ich diene als Begrüßer für das Hospital. Pro Tag geleite ich im Durchschnitt 53 Insassen und 22 Stammgäste zu der Anlage. Ich hoffe auch Sie als Stammgast zu gewinnen.«

Das Gebäude war zur Hälfte niedergebrannt. Eigentlich wollte Emma nachsehen, ob es drinnen etwas zu hamstern gab – Nahrung und Kleidung konnte sie immer brauchen –, aber nun hockte sie auf dem Gehweg, während ihr Körper von leisem Schluchzen bebte.

»Ich ... ich möchte gern ein Stammgast werden. Kannst du mir etwas über freundliche Gehwege erzählen? Wie groß ist die Fläche, die du hier bedeckst?«

»Meine Sensoren verteilen sich über zehn Gehwegplatten. Da Sie sich für freundliche Gehwege interessieren, könnte ich Ihnen per Mail eine Einführung in unser System senden. Wir werden Sie nur auf Ihren ausdrücklichen Wunsch weiter über unsere Angebote auf dem Laufenden halten!«

Zehn Platten. Emma hätte Cy nur zu gern mit nach Hause genommen, aber

sie hatte keine Ahnung, wie sie ein im Boden verlegtes System ausbauen sollte. »Woher bekommst du den Strom? Batterien? Wie ... wie viel Energie hast du noch übrig?«

»Korrekt, ich werde von Batterien angetrieben! Mit ihrer Energie werde ich noch eine Stunde und 13 Minuten online bleiben können. Oje. Anscheinend ist meine jährliche Wartung überfällig. Das System ist leider immer noch abgeschaltet, aber gewiss wird sich demnächst ein Techniker melden.« Pause. »Vor nunmehr drei Minuten habe ich Notfallhilfe für Sie angefordert. Bitte entschuldigen Sie. Ich frage erneut nach.«

»Eine Stunde und 13 Minuten.« Emma ballte die Fäuste und stöhnte. »Nur noch eine Stunde und 13 Minuten.«

»Bitte entschuldigen Sie die begrenzte Batteriedauer. Das Aufladen wird bei der Wartung erledigt werden. Ich glaube, Sie haben meine Frage noch nicht beantwortet, ob Sie mehr Informationen über freundliche Gehwege wünschen. Wie gesagt, nur Sie entscheiden über ein Newsfeed-Abonnement!«

Das Pflaster fühlte sich warm an. Rau, porös, tröstend. »Gehwege? Du bist nicht der einzige?«

»Aber natürlich nicht! Ich bin froh, dass Sie das fragen. Im 15-Kilometer-Radius gibt es zwölf weitere Vertreter zukunftsweisender Infrastruktur. Derzeit veranstalten wir eine Schnitzeljagd.

Wenn Sie alle zwölf Orte besuchen, erhalten Sie eine umweltfreundliche Wasserflasche! Auf unserer Website finden Sie alle Regeln und Wettbewerbsbedingungen.«

Emma rappelte sich endgültig auf und öffnete ihren Rucksack. Sie nahm ein von Regentropfen und Tränen gewelltes Notizbuch heraus. »Die Orte? Kannst du sie mir nennen?«

»Gewiss. Nummer eins ...«

Wenn der da überlebt hatte, dann vielleicht auch ein paar andere. Vielleicht hatten die mehr Saft in ihren Batterien. Sie kritzelte zwei Seiten mit den Adressen voll, die Cy ihr nannte. »Für wie lange reicht die Batterie jetzt?«

»Noch eine Stunde und fünf Minuten. Das Wartungssystem reagiert derzeit nicht. Ich habe nochmals angefragt. Benötigen Sie noch Notfallhilfe?«

»Ja.« Emma stand auf. »Nein. Ich werde jetzt gehen, Cy. Ich ... ich darf dich nicht auf einen Schlag aufbrauchen. Ich komme morgen wieder. Versprochen. Ich werde Stammgast.« Sie trat in den Rinnstein. »Leb wohl.«

»Ich bin froh, dass wir Freunde geworden sind! Noch einmal Entschuldigung wegen der angehobenen Platte. Cy Anara, der freundliche Gehweg, wünscht Ihnen alles Gute!«

Emma starrte ein paar Minuten lang auf den Bürgersteig, dann rannte sie los, das Notizbuch in der Hand.

Sie musste mehr Freunde finden. 

DIE AUTORIN

Beth Cato lebt in Arizona. Ihr Romandebüt »The Clockwork Dagger« erschien 2014. Ihre Website ist www.bethcato.com.

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

Nature 513, S. 580, 25. September 2014

Der Stammbaum der Mythen

Anthropologen und Ethnologen analysieren Märchen, Mythen und Sagen – und stoßen auf erstaunliche Entwicklungslinien. Mit Algorithmen aus der Genetik verfolgen sie die Evolution der »Mythenfamilien« (etwa jene von »Pygmalion«, siehe Bild) bis in vorgeschichtliche Zeit und rekonstruieren sogar die Urformen.

JEAN LEON GEROME: PYGMALION UND GALATHEA, 1890 / PUBLIC DOMAIN



Verräterische Phytolithe

Winzige, artspezifische Siliziumeinlagerungen aus Pflanzen dienen Geologen, Archäologen, Paläontologen, Historikern und Kriminalisten als eindeutige Indizien. Sie berichten über Aufenthaltsorte von Mensch und Tier, Lebensweisen, das Alter von Fossilien oder einstige Klimabedingungen.

Flexible Maschinen aus einem Guss

Heutige Maschinen sind meist in komplizierter Weise aus vielen starren Teilen aufgebaut. Neuartige Konstruktionsmethoden nutzen dagegen die Elastizität von Werkstoffen, um mit möglichst wenig Einzelteilen auszukommen. Das spart Montagekosten und erhöht die Haltbarkeit und Effizienz.



DREAMSTIME / RICHARD WHITCOMBE

Was geschieht mit dem Plastikmüll im Meer?

Stellenweise gleicht das Meer einer Müllhalde. Das meiste schwimmende Plastik endet in der Tiefsee, nachdem Organismen es besiedelt haben, so dass es schwer genug zum Absinken wurde. Immer öfter landen die Kunststoffteilchen aber auch in den Mägen von Tieren.



RON MILLER

Wasser vom Himmel

Wie kamen die Ozeane auf die Erde? Haben Kometen das Wasser gebracht oder nicht doch eher Asteroiden? Neueste Beobachtungen heizen die Debatte um die noch immer ungeklärte Frage an.

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

JETZT BESTELLEN:
DAS SPEKTRUM-DER-WISSENSCHAFT-ABO
mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE
KEINE AUSGABE
DES MAGAZINS!

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!



54 BIT DRIVER KIT :
Das umfassende Standardset mit
Präzisionsschraubeinsätzen enthält
54 ausgewählte 4mm-Bits.

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.
Weitere Vergünstigungen unter:
www.spektrum.de/aboplus

+ WUNSCHGESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten.
Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten,
erhalten Sie das Präsent.

+ PÜNKTLICHE LIEFERUNG:

Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen
im Handel.

+ KEINE MINDESTLAUFZEIT:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



2. Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM

Die CD-ROM bietet Ihnen alle
Artikel (inklusive Bilder) des
vergangenen Jahres im PDF-
Format.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/abo

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hoch qualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hoch qualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.de