Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR 44
31.10.
2018

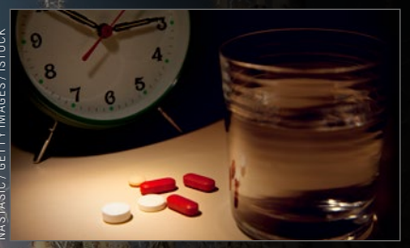
DAVID SCHWIMBECK / GETTY IMAGES / ISTOCK

- Mexikobeben brach komplette Erdplatte
- Ein Stück Grand Canyon in Tasmanien
- Kakao ist viel älter als gedacht
- Die Speerspitze der ersten Einwanderer
- Darmflora in den Kinderschuhen

TITELTHEMA: WALD UND KLIMA

# Der Sommer hat dem Wald zugesetzt: Was jetzt?

Wie groß sind die Waldschäden dieses Jahr nach Hitze, Dürre und Borkenkäfer? Forscher fragen sich, was dem Wald jetzt hilft und wie ein langfristig robustes Ökosystem aussehen kann.



NASTASIC / GETTY IMAGES / ISTOCK

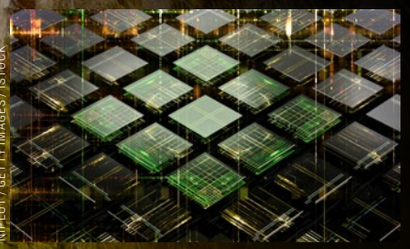
**MEDIZINISCHE BEHANDLUNG**

## Alles zu seiner Zeit

FXQUADRO / GETTY IMAGES / ISTOCK

**FORSCHUNGSSKANDALE IN DEUTSCHLAND**

## Macht und Machtmissbrauch in der Wissenschaft



NIPLOT / GETTY IMAGES / ISTOCK

**»QUANTENFLAGGSCHIFF« GESTARTET**

## Europas Antwort auf den Quantencomputer-Hype

Mit ausgewählten Inhalten aus nature

# EDITORIAL

Folgen Sie uns:

Daniel Lingenhöhl
Redaktionsleiter »Spektrum – Die Woche«
E-Mail: lingenhoehl@spektrum.de
Twitter: @lingenhoehl

## Liebe Leserin, lieber Leser,

der Jahrhundertsommer 2018 mit seiner teils monatelangen Trockenheit hat auch dem Wald hierzulande schwer zugesetzt – zur Freude des Borkenkäfers. Welche Schäden, auch langzeitige, sind entstanden? Und wie muss der Wald umgebaut werden, um ihn fit für die Zukunft zu machen.

Ein schönes Wochenende wünscht

# IMPRESSUM

**Chefredakteur:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
**Redaktionsleiter:** Dr. Daniel Lingenhöhl
**Redaktion:** Jan Dönges, Lars Fischer, Robert Gast, Christiane Gelitz, Dr. Jan Osterkamp, Daniela Zeibig
**Art Director Digital:** Marc Grove
**Layout:** Oliver Gabriel
**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15-17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE229038528
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle
**Marketing und Vertrieb:** Annette Baumbusch (Ltg.), Michaela Knappe (Digital)
**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**Bezugspreise:** Einzelausgabe € 1,99.
**Im Abonnement jährlich:** € 48,00; ermäßigt € 36,00.
Alle Preise verstehen sich inkl. Umsatzsteuer.

**Anzeigen:** Wenn Sie an Anzeigen in »Spektrum – Die Woche« interessiert sind, schreiben Sie bitte eine Mail an service@spektrum.com

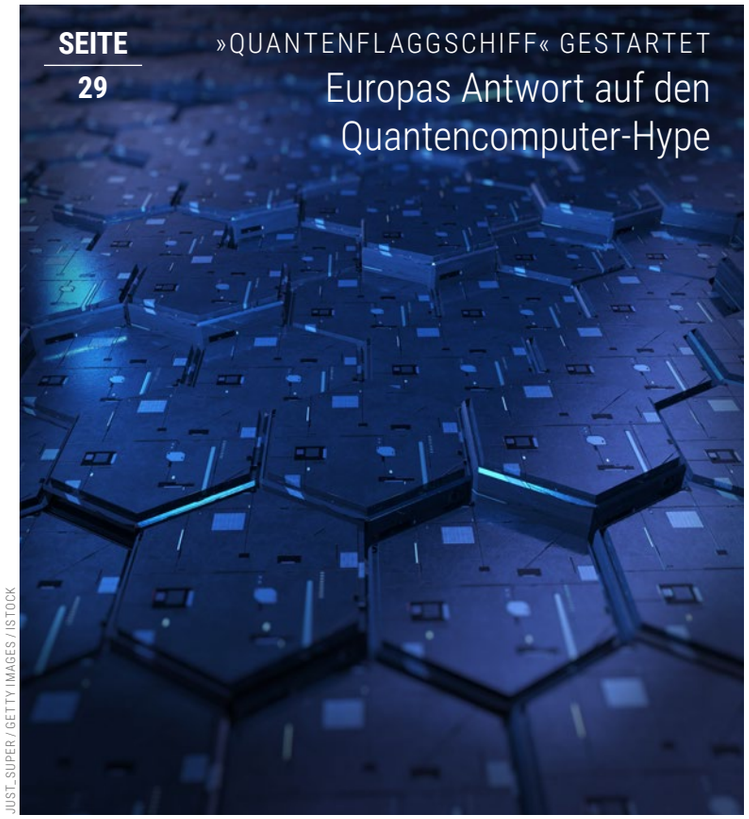
Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des 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: © 2018 (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. Bildnachweise: 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.

# INHALT

SEITE 19

WALD UND KLIMA
Der Sommer hat dem Wald zugesetzt: Was jetzt?

UNSPLASH / JESSE GARDNER



SEITE 29

»QUANTENFLAGGSCHIFF« GESTARTET
Europas Antwort auf den Quantencomputer-Hype

JUIST_SUPER / GETTY IMAGES / ISTOCK

MEDIZINISCHE BEHANDLUNG
Alles zu seiner Zeit

SEITE 33

KUKAI / GETTY IMAGES / ISTOCK

FORSCHUNGSSKANDALE IN DEUTSCHLAND
Macht und Machtmissbrauch in der Wissenschaft

SEITE 38

CYAN066 / GETTY IMAGES / ISTOCK

RUBRIKEN:

4 BILD DER WOCHE
Geburtsstation der Oktopusse

46 REZENSION
»Die Bändigung der Unendlichkeit« von Armin Barth

48 FREISTETTERS FORMELWELT
Die Wurstkatastrophe der Mathematik

NEWS

5 MIKROBIOM
Darmflora in den Kinderschuhen

7 PLATTENTEKTONIK
Mexikobeben brach komplette Erdplatte

10 ERDGESCHICHTE
Ein Stück Grand Canyon in Tasmanien

12 AMERIKA
Die Speerspitze der ersten Einwanderer

14 ENDE EINER EXOPLANETEN-ÄRA
Keplers letzte Stunde

17 URSPRUNG DER SCHOKOLADE
Kakao ist viel älter als gedacht

TIEFSEE

# Geburtsstation **der Oktopusse**

von Daniel Lingenhöhl

OCEAN EXPLORATION TRUST

Vor der kalifornischen Küste bei Monterey in rund drei Kilometer Tiefe entdeckten Meeresbiologen an Bord des Forschungsschiffs »Nautilus« ein besonderes Schauspiel: Hunderte blassblauer Kraken der Art *Muusoctopus robustus* hatten sich hier an der östlichen Flanke eines Unterwasserbergs versammelt, zusammengekauert und wie von innen nach außen gedreht. Ihre Armen waren nach oben gekehrt, was für die Forscher nur einen Schluss zuließ: Rund 1000 Weibchen hatten sich hier versammelt, um ihren heranwachsenden Nachwuchs zu behüten. In Einzelfällen zeichnete die Kamera des Tauchroboters sogar winzige Kraken-Embryos auf. Wahrscheinlich hatten sich die Tiere an Stellen eingefunden, an denen warmes Wasser aus Spalten des Bergs sickert, was das Brutgeschäft erleichtern könnte. ↩

PETROGRAD99 / GETTY IMAGES / ISTOCK

MIKROBIOM

# Darmflora in den Kinderschuhen

von Christiane Gelitz

Der Darm von Neugeborenen ist weitgehend unbewohntes Land. Im Verlauf der ersten Lebensjahre siedeln sich dort Millionen Kleinstlebewesen an und stärken unter anderem die Widerstandskraft gegen Krankheitserreger. Wie diese Entwicklung vom Neubaugebiet zur mikrobiellen Metropole verläuft, hat jetzt ein Forschungsteam um Joseph Petrosino vom Baylor College of Medicine in Houston anhand von rund 12 000 Stuhlproben von mehr als 900 Kindern analysiert.

Die Besiedlung des Darms lasse sich in drei Phasen gliedern, berichten die Wissenschaftler in der Fachzeitschrift »Nature«: zunächst die »Entwicklungsphase« vom 3. bis 14. Monat, die »Übergangsphase« vom 15. bis 30. Monat und die »stabile Phase« vom 31. bis zum 46. Monat. Dabei förderten besonders vier Bedingungen die Vielfalt der Mikrobengemeinschaften: eine vaginale Geburt, die Stilldauer, der Ort und das Zusammenleben mit Geschwistern oder Haustieren. Ob das Kind – zumindest phasenweise – gestillt wurde, hatte im Schnitt den stärksten Einfluss auf seine Darmflora.

Hatten die Babys den Geburtskanal der Mutter passiert, befanden sich in ihrem Darm in der Folge mehr Bakterien der Gattung *Bacteroides*, die unabhängig von der Art der Geburt zur schnelleren Entwicklung und größeren Vielfalt der Darmbewohner beitrugen. Stillte die Mutter ihr Kind zumindest phasenweise, traten außerdem vorübergehend vermehrt zwei Arten von Bifidobakterien auf, und je länger sie die Brust gab, desto früher erreichte das kindliche Mikrobiom die »stabile Phase«, gekennzeichnet unter anderem durch mehr Bakterien vom Stamm Firmicutes. Und auch das Zusammenleben mit Geschwistern oder mit felligen Haustieren beschleunigte das Heranreifen des Mikrobioms. Das typische Mikrobenprofil unterschied sich zwar von Land zu Land, aber die Vielfalt der Bakteriengemeinschaft entwickelte sich ortsunabhängig in vergleichbarer Weise.

Im Körper eines erwachsenen Menschen leben schätzungsweise zehnmal mehr Mikroben als Zellen, aus denen der Körper selbst besteht, erläutert der Mikrobiologe und Immunologe Petrosino. Allein im Dickdarm sollen sich mehrere hundert verschiedene Stämme tummeln, darunter zum Beispiel Milchsäurebakterien, aber auch Streptokokken, die anderenorts zwar Krankheiten verursachen können, im Darm jedoch nützlich sind. Mikrobielle Vielfalt gilt typischerweise als vorteilhaft, so Petrosino, »doch wir verstehen immer noch nicht ganz, welche Mikroben beim Start ins Leben für die Entwicklung wichtig sind«.

Das neu gewonnene Wissen könne helfen, die Bedeutung des schnellen Heranreifens sowie Unterschiede zu identifizieren, die möglicherweise mit Krankheiten in Verbindung stehen. Die Daten dienten bereits dazu, die Rolle von Umwelteinflüssen bei Typ-1-Diabetes aufzuklären: Die von Petrosinos Team verwendeten Proben stammen aus der TEDDY-Studie (The Environmental Determinants of Diabetes in the Young), die nach Auslösern von Typ-1-Diabetes bei Kindern mit erhöhtem genetischem Risiko forscht. Dafür gaben mehr als 8600 genetisch vorbelastete Kinder ab dem Alter von drei Monaten monatlich Stuhlproben an klinischen Zentren in den USA, Schweden, Finnland und Deutschland ab. Es handle sich um die bisher größte Mikrobiomstudie an Säuglingen, so das Team in einer Presseerklärung. ⮌

PLATTENTEKTONIK

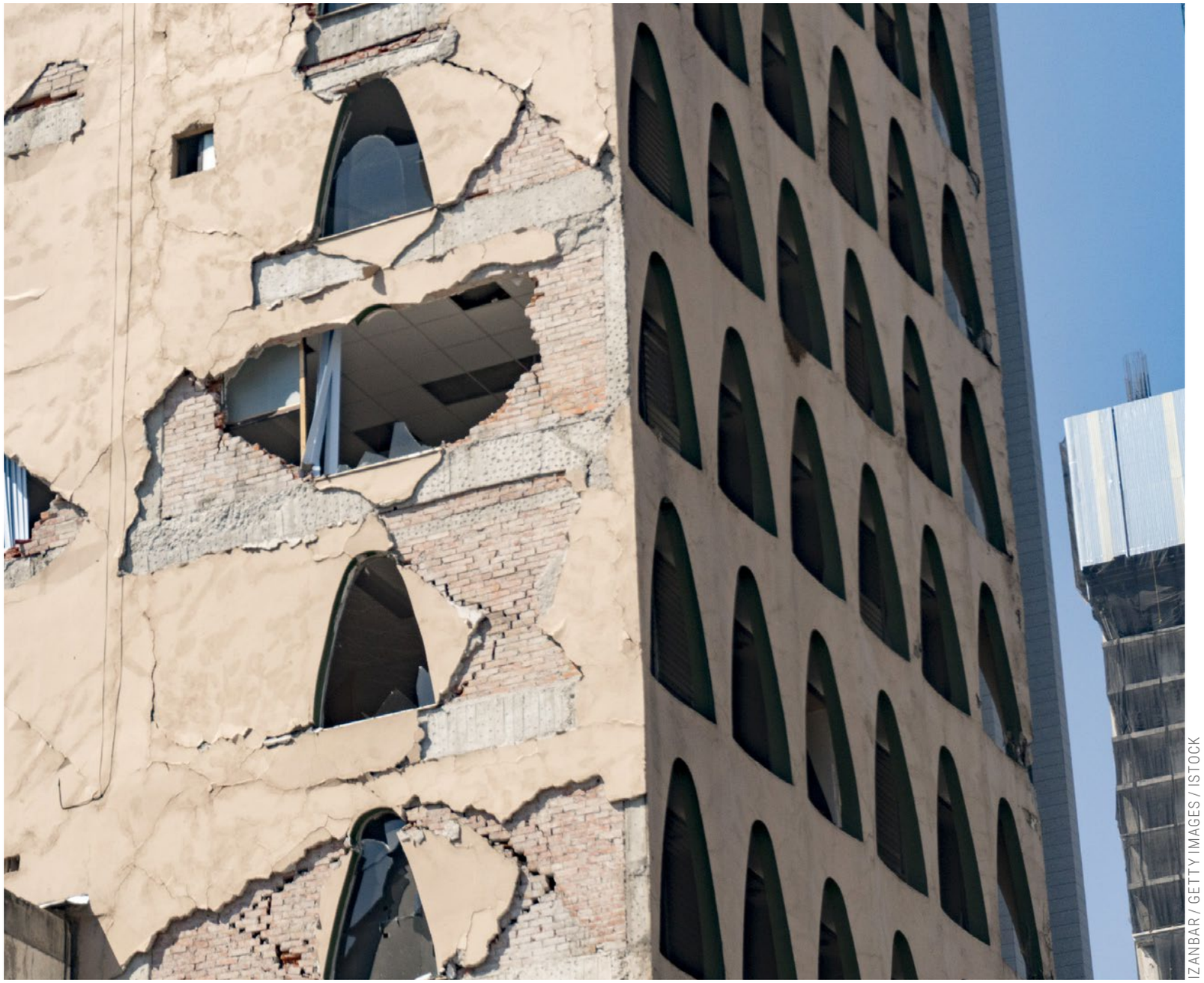
# Mexikobeben brach komplette Erdplatte

von Daniel Lingenhöhl

BRINA BUNT / GETTY IMAGES / ISTOCK

Am 8. September 2017 wackelte die Erde an der mexikanischen Pazifikküste: Das Tehuantepec-Beben mit einer Stärke von 8,2 tötete knapp 100 Menschen und verletzte Hunderte. Dennoch ging die Katastrophe relativ glimpflich aus, denn neue Daten zeigen, dass der Erdstoß extrem ungewöhnlich war – auch was den Bebenort selbst anbelangt. Das Erdbeben war so stark, dass es eine der beteiligten Erdplatten an dieser Stelle bis tief ins Erdinnere entzweiriss. Das habe man so zuvor noch nicht beobachtet, schreiben die Wissenschaftler um Diego Melgar von der University of Oregon in Eugene in »Nature Geoscience«. Wäre sein Epizentrum weiter draußen im Pazifik gelegen, hätte es gewaltige Tsunamis auslösen können, so Melgar und Co.

Die betroffene Region vor der Küste der mexikanischen Bundesstaaten Chiapas und Oaxaca wird regelmäßig von Erdbeben heimgesucht, da sich hier die Cocos- unter die Nordamerikanische und Karibische Platte schiebt. Dabei verhakt sich das Gestein immer wieder, wird verbogen und bricht, was die Erde erzittern lässt. Das Tehuantepec-Beben und ein nachfolgendes schweres Erdbeben am 19. September – das Zentralmexiko erschütterte – unterscheiden sich jedoch



IZANBAR / GETTY IMAGES / ISTOCK

von diesen typischen Subduktionsbeben an den Rändern der Platten. Beide gelten als so genannte Intraplattenbeben, die innerhalb einer Platte stattfinden. Die Cocos-Platte taucht zwar an der Subduktionszone unter die Nordamerikanische ab und wird dabei nach unten gebogen. Unter dem Festland wechselt dieses aus dichter und schwerer ozeanischer Kruste bestehende Segment jedoch seinen Kurs, denn hier wird es wieder

ein Stück nach oben gebogen. Ab diesem Punkt gleitet die Cocos-Platte rund 200 Kilometer horizontal durch die Platte, auf der Mexiko sich befindet, berichten die Forscher in »The Conversation«.

Erst ein kurzes Stück südlich der Hauptstadt Mexico City ändert sie dann wieder ihre Richtung und taucht fast senkrecht in die Tiefe ab – was das Plattenstück mehrfach massiv staucht, quetscht und biegt, bis es neuerlich bricht. Und das sorgt dafür, dass es auch weit entfernt von der Plattengrenze krachen kann. An diesem Punkt unterscheiden sich das Tehuantepec-Beben und sein Nachfolger erneut von klassischen Intraplattenbeben. Wenn das Gestein gekrümmt wird, dehnen sich die äußersten Lagen an diesem Punkt, während die inneren zusammengedrückt werden. Deshalb sollte auch der äußere und nicht der innere Bereich brechen. Doch im September 2017 riss die Cocos-Platte an dieser Stelle bis in eine Tiefe von 80 Kilometern komplett durch. Dort herrschen normalerweise Temperaturen von 1100 Grad Celsius, weshalb Gestein eigentlich relativ plastisch ist – was Brüche ebenfalls verhindern sollte. Dafür haben Melgar und Co noch keine wirkliche Erklärung. Zwei Ansätze kommen für sie aber in Frage. Zum einen ist die gravitative Kraft, welche die Platte weiter ins Erdinnere zieht, vielleicht so stark, dass sie der Gesteinserweichung entgegenwirkt: Ihr Zug würde dann dafür sorgen, dass selbst weiches Material reißt. Auf der anderen Seite spielt vielleicht auch Meerwasser eine Rolle, das bei der Subduktion tief mit ins Erdinnere eindringt. Es kühlt das Material und reagiert mit diesem, was die Brüchigkeit erhöhen könnte. Das stehe jedoch im Widerspruch zu bisherigen Modellen oder Beobachtungen, wie tief Meerwasser einsickert, schreiben die Wissenschaftler.

Glück im Unglück war wohl, dass das Tehuantepec-Beben im landseitigen Bereich der Verwerfungslinie auftrat. Hätte es weiter seewärts auf der Ozeanseite stattgefunden, wäre es womöglich zu einem verheerenden Tsunami gekommen. Die Forscher vergleichen dieses Szenario mit einem Intraplattenbeben aus dem Jahr 1933 am Japangraben, das Wellen bis zu 20 Meter Höhe ausgelöst haben soll. Im aktuellen Fall vom September 2017 kam es nur zu einem kleinen Tsunami mit Wellenhöhen von 1,75 Metern über dem normalen Flutniveau. ↩

SEAN PAVONE / GETTY IMAGES / ISTOCK

ERDGESCHICHTE

# Ein Stück Grand Canyon in Tasmanien

von Daniel Lingenhöhl

Vor 5,3 Millionen Jahren begann wahrscheinlich die Geschichte des Grand Canyons im Westen der USA; heute durchschneidet die imposante Schlucht Gesteine, deren Geschichte sogar noch weiter zurückliegt: Bis zu 1,5 Milliarden Jahre sind die untersten Schichten alt, an denen sich der Colorado River heute abarbeitet. Ein Teil der freigelegten Gesteine ist nun auch an einer unerwarteten Stelle nachgewiesen worden – zehntausende Kilometer entfernt in Tasmanien, wie Jacob Mulder von der Monash University in Clayton und sein Team in »Geology« schreiben. Dort fanden sich Formationen, die oberflächlich schon immer eine Ähnlichkeit mit Gesteinen aus der so genannten Unkar Group aufwiesen, die in den tiefsten Bereichen des Grand Canyons ans Tageslicht treten. Geologische und geochemische Analysen bestätigten, dass es sich dabei um praktisch identische Minerale handelt, die einst zusammenhingen.

Dieses Ergebnis habe weit reichende Konsequenzen für die Erdgeschichte und die Plattentektonik, so die Geowissenschaftler. Denn das Ergebnis spreche dafür, dass das Gebiet des heutigen Grand Canyons und die obere Rocky Cape Group in Tasmanien einst eine Einheit waren – die sich im Lauf der Zeit getrennt haben und in verschiedene Richtungen der Erde gedriftet sind. Dafür sprechen das gleiche Ablagerungsalter, eine sehr ähnliche Abfolge der Schichten sowie identische Isotopensignaturen. Beide Gesteinsformationen waren vor 1,3 Milliarden Jahren Teil des Superkontinents Rodinia, der wiederum vor 750 Millionen in kleinere Kontinente und Plattenteile zerbrach. Wie diese Einzelteile Rodinias allerdings zusammenpassten, ist noch weitgehend unbekannt. Sicher scheint mit dem Fund allerdings, dass ein Teil des heutigen Australien mit dem Westen Nordamerikas zusammenhing. ↩

AMERIKA

# Die Speerspitze der ersten Einwanderer

von Jan Dönges

**15 000 Jahre alte »Western-Stemmed«-Spitze aus der Friedkin-Fundstätte**

CENTER FOR THE STUDY OF THE FIRST AMERICANS, TEXAS A&M UNIVERSITY

Lange galten die Menschen der Clovis-Kultur als die ersten Amerikaner. Aus Sibirien über die Beringstraße kommend sollten sie in Windeseile den menschenleeren Kontinent besiedelt haben – vor ungefähr 13 500 Jahren. Inzwischen ist klar: Das kann nicht stimmen. Funde zeigen, dass schon lange vor ihnen andere dagewesen sein müssen. Doch das Clovis-Rätsel blieb; ihre typischen, mit höchster Steinschlägerkunst gefertigten Speerspitzen scheinen wie aus dem Nichts aufzutauchen. Nun haben Archäologen in Texas möglicherweise die Spuren ihrer Vorläufer entdeckt.

Fündig wurden sie über 60 Kilometer nordwestlich von Austin an der »Friedkin site« genannten Ausgrabungsstätte. Dort entdeckte das Team um Michael Waters von der Texas A&M University Steinwerkzeuge in Fundschichten, die zwischen 13 500 und 15 500 Jahre alt sind. Damit stammen sie eindeutig aus der Prä-Clovis-Ära. Während die jüngsten Schichten die typischen Clovis-Spitzen enthielten, bargen Waters und Kollegen aus den ältesten Schichten Speerspitzen der so genannten Western Stemmed Tradition. Die Forscher kennen sie aus dem gesamten Westen der USA, allerdings aus späterer Zeit. Die Friedkin-Funde – die ältesten, eindeutig datierten und zuordenbaren Waffen Amerikas – belegen nun, dass die Western Stemmed Tradition viel älter ist.

Könnte es sich bei ihr sogar um die gesuchten Clovis-Vorläufer handeln? Möglicherweise ja, sagen nun die Wissenschaftler in ihrer Publikation in »Science Advances«. In den mittleren Fundschichten tauchten nämlich erstmals auch solche Speerspitzen auf, die als Übergangsformen zwischen Western Stemmed Tradition und Clovis interpretiert werden können und zudem von ihrem Alter her passen. Sie erinnern in ihrer lanzettförmigen Gestalt an die späteren Clovis-Spitzen.

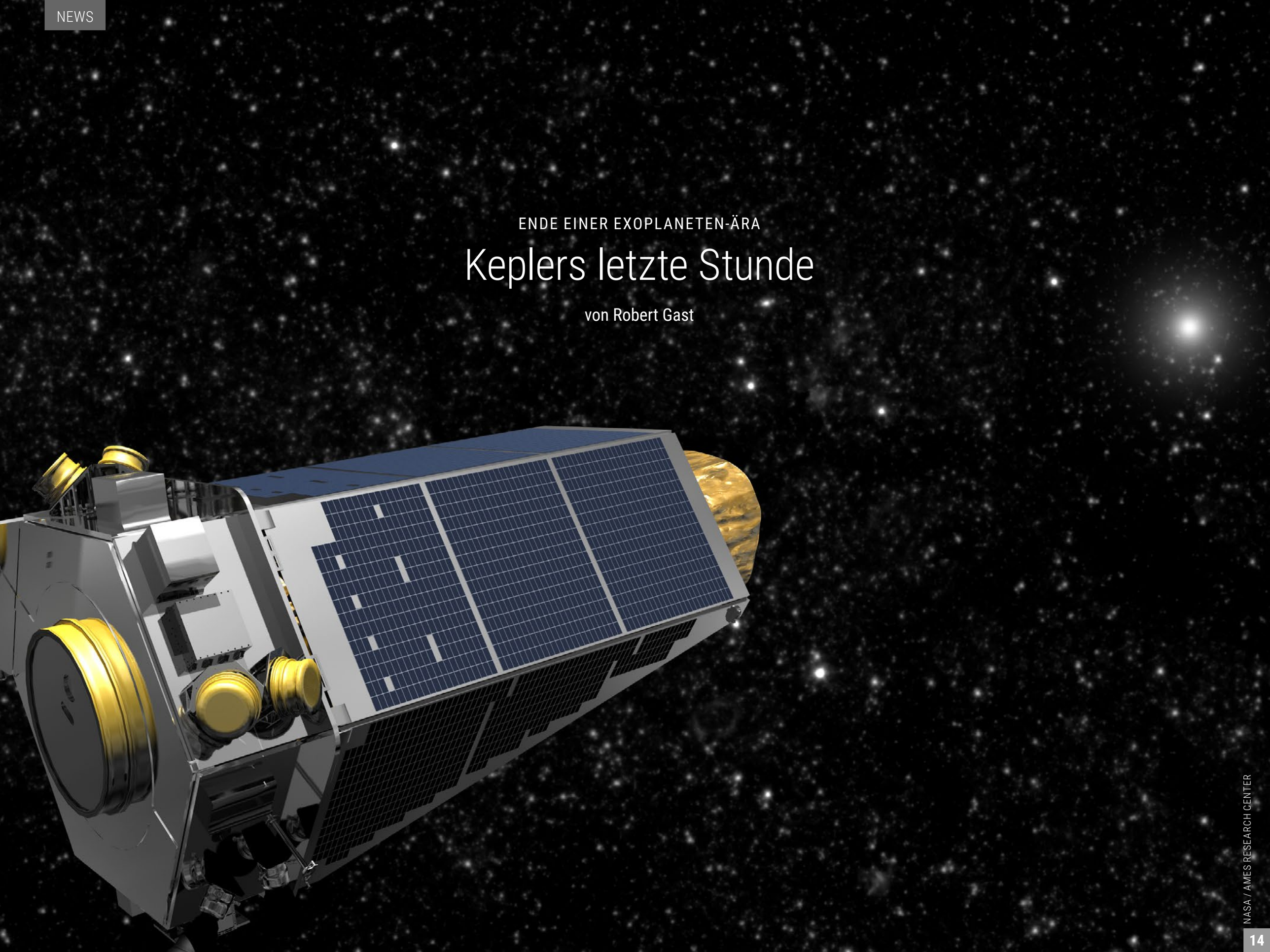
Die Angehörigen der Western Stemmed Tradition scheinen demnach bereits vor über 15 000 Jahren in den Süden der USA gelangt sein – vermutlich entlang der Pazifikküste, denn zu jener Zeit versperrten noch große Gletscher den Landweg durch Kanada. Im Süden der USA entwickelten womöglich einige von ihnen die typische Clovis-Technik, andere behielten die robusten Spitzen ihrer Vorfahren bei.

Einen direkten Beweis für diese Annahme liefern die Funde allerdings nicht. Waters und Kollegen halten es für ebenso plausibel, dass Träger jener vermeintlichen Zwischenformen aus anderen Teilen des Kontinents nach Texas eingewandert seien – etwa auf der Landroute durch Kanada. Eine Kontinuität zwischen Western Stemmed Tradition und Clovis bestünde dann nicht. Die Besiedlung Amerikas bleibt somit in vielen Aspekten rätselhaft, auch wenn DNA-Untersuchungen der letzten Jahre den Raum für Spekulationen erheblich eingeengt haben. ↩

ENDE EINER EXOPLANETEN-ÄRA

# Keplers letzte Stunde

von Robert Gast

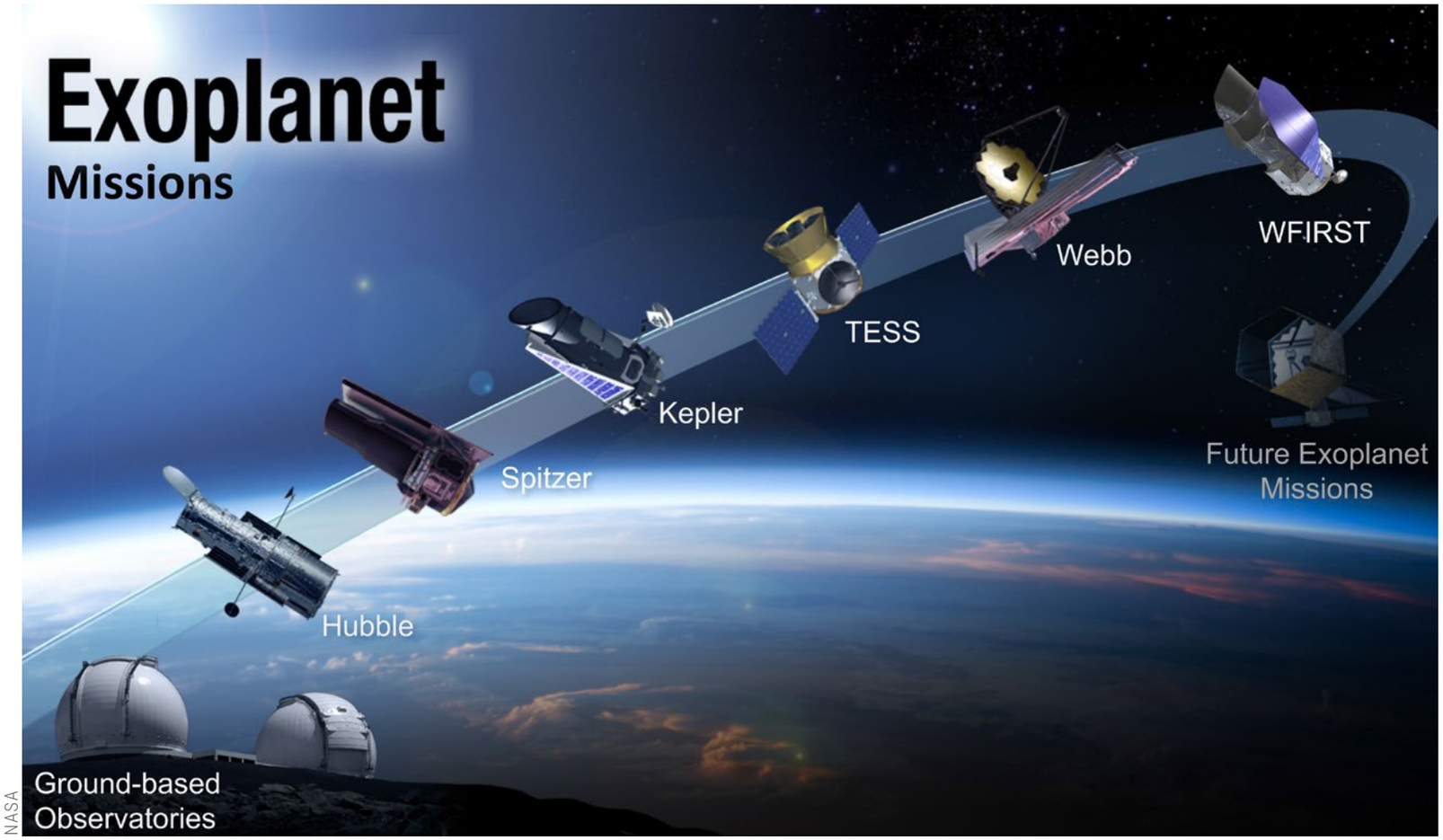


NASA / AMES RESEARCH CENTER

Das Weltraumteleskop Kepler hat nach neuneinhalb Jahren endgültig seinen Betrieb eingestellt. Das teilte die NASA am Dienstagabend auf einer Pressekonferenz mit. Kepler zählt zu den bekanntesten Weltraummissionen der Gegenwart: Das schwebende 95-Zentimeter-Teleskop hat tausende bis dato unbekannte Exoplaneten entdeckt und damit den Blick der Menschheit auf das Universum nachhaltig verändert.

Als der Forschungssatellit im März 2009 ins All startete, waren gerade einmal einige Hundert solcher Welten im Orbit ferner Sterne bekannt. Heute führt der Katalog der NASA rund 3800 bekannte Exoplaneten. Einen Großteil davon hat Kepler entdeckt.

Mehrere Dutzend der fernen Planeten kreisen in der so genannten habitablen Zone um ihren Stern, schätzen Astrophysiker. Gemeint ist der Abstand von einem Stern, in dem es lauwarme Temperaturen – und damit flüssiges Wasser – auf der Oberfläche eines Planeten geben könnte. In den vergangenen Tagen kamen allerdings Zweifel an dieser Rechnung auf: Möglicherweise sei die Zahl der Planeten mit lebenskompatiblen Eigenschaften auch deutlich geringer, teilte die NASA mit.




NASA

## Minineptune, überall

Auch so gilt Kepler als großer Erfolg. Dank des Teleskops, das bis August 2013 einen kleinen Himmelsausschnitt im Sternbild Schwan beobachtete, konnte die Menschheit erstmals abschätzen, wie häufig bestimmte Planetentypen im Weltall vorkommen. Eine der größten Überraschungen: Mit der häufigste Typ scheinen so genannte Minineptune zu sein – vergleichsweise kleine Gasplaneten, die in unserem Sonnensystem nicht auftauchen.

Kepler spürte weit entfernte Welten auf, indem es minutiös die Helligkeit von rund 190 000 Sternen in seinem Blickfeld aufzeichnete. Verdunkelte sich einer der Sterne in periodischen Abständen ein wenig, war das ein Indiz dafür, dass ein Exoplanet zwi-

**EXOPLANETEN-MISSIONEN DER NASA**

**Die NASA plant nach Kepler eine Reihe weiterer Weltraummissionen, die Beiträge zur Exoplanetenforschung liefern sollen.**

schen Stern und Teleskop vorüberzog; Experten sprechen von der Transitmethode.

Eine Frage konnte Kepler nicht beantworten, obwohl sie Teil der offiziellen Missionsziele war: Wie häufig sind Gesteinsplaneten vom Format der Erde, welche ihren Stern in einem ähnlichen Abstand wie die Erde die Sonne umrunden? Letztlich spürte Kepler keine einzige Welt auf, deren Eigenschaften unserer Heimat gleichen.

## Ärger mit den Drallrädern

Solche Zwillingserden sind besonders schwer nachzuweisen. Und letztlich schaute Kepler vermutlich nicht lange genug ins Sternbild Schwan, um einige von ihnen zweifellos nachzuweisen, wie der 2017 veröffentliche Beobachtungskatalog der Mission nahelegt.

2013 fiel auch noch das zweite von vier Drallrädern auf dem Satelliten aus, ohne das sich das Teleskop nicht mehr dauerhaft auf einen Himmelsausschnitt ausrichten ließ. Allerdings gelang es danach noch, Beobachtungsdaten aus verschiedenen Blickrichtungen zu sammeln. Nun ist diese als »K2« bekannte Missionsphase zu Ende gegangen – der Treibstoff des Satelliten ist schlicht aufgebraucht.

Der Kepler-Nachfolger hat bereits seinen Dienst aufgenommen: Im April 2018 ist der Forschungssatellit TESS ins All gestartet und wird in den kommenden Jahren das Weltall nach Exoplaneten durchforsten. Anders als Kepler wird TESS große Teile des Firmaments nach Exoplaneten absuchen und soll dabei vor allem besonders nahe Welten im Orbit roter Zwergsterne aufspüren.

Sie brennen längst nicht so heiß wie unsere Sonne, weshalb lebenskompatible Planeten hier in kleinerem Abstand von ihrem Stern ihre Bahnen ziehen können und damit leichter nachweisbar sind. Mit Teleskopen wie dem James Webb Teleskop wollen Astrophysiker dann untersuchen, welche Gase etwaige Atmosphären dieser Welten enthalten. Im Idealfall könnten Wissenschaftler so bereits binnen der kommenden fünf Jahre herausfinden, ob noch andere Planeten Leben beherbergen können. ↩

URSPRUNG DER SCHOKOLADE

# Kakao ist viel älter als gedacht

von Lars Fischer

ISTOCK / PAULO VILELA

Archäologische Funde aus dem südwestlichen Ecuador legen nahe, dass eines der bedeutendsten Ereignisse der menschlichen Geschichte mehr als 1500 Jahre früher stattfand als gedacht. Bisher nämlich vermutete man, die Kakaopflanze *Theobroma cacao* sei vor knapp 4000 Jahren in Mesoamerika zur Nutzpflanze geworden. Nun präsentiert eine Arbeitsgruppe um Sonia Zarrillo von der University of Calgary drei Befunde aus der Santa Ana-La Florida-Ausgrabung, einer bis zu 5500 Jahre alten Siedlung im Hochland von Ecuador. Die Archäologin untersuchte die Oberflächen diverser Keramikgefäße und stieß dabei auf Stärkekörner der Gattung *Theobroma*; später dann auf Rückstände des für Kakao typischen Alkaloids Theobromin sowie auf Fragmente von *Theobroma*-DNA. Die Daten deuten darauf hin, dass Kakao bereits vor mindestens 5300 Jahren in Gebrauch war und ursprünglich aus Südamerika stammt.

Darauf weisen auch genetische und botanische Indizien hin. Wie Zarrillo und ihr Team darlegen, liegt der Fundort Santa Ana-La Florida in der Nähe von Regionen mit der größten Vielfalt an Kakao-Verwandten; bis zu elf verschiedene *Theobroma*-Arten leben nebeneinander in einigen Gebieten am Oberlauf des Amazonas. Von hier aus, argumentiert die Arbeitsgruppe, habe sich die begehrte Pflanze als Handelsware ausgebreitet. Einige der in Santa Ana-La Florida gefundenen Artefakte deuten auf Verbindungen zur Pazifikküste und damit ausgedehnte Handelsnetze; auf diesem Weg sei die Bohne schließlich nach Mesoamerika gelangt. Dort war die Pflanze eine der bedeutendsten Feldfrüchte; Kakao war nicht nur als Getränk Bestandteil religiöser Rituale, sondern in Form von Bohnen auch eine Art »Kleingeld« – und wurde deswegen sogar gefälscht. ↩

TITELTHEMA: WALD UND KLIMA

# Der Sommer hat dem Wald zugesetzt: WAS JETZT?

von Gunther Willinger

UNSPLASH / VALERIY ANDRUSHKO

Wie groß sind die Waldschäden dieses Jahr nach Hitze, Dürre und Borkenkäfer? Forscher fragen sich, was dem Wald jetzt hilft und wie ein langfristig robustes Ökosystem aussehen kann.

Der Wald steht still und leidet. Wenn er denn noch steht. Denn die heftigen Herbst- und Winterstürme 2017/18 haben mancherorts hektarweise Bäume wie Streichhölzer umknicken lassen oder entwurzelt. Und seit April 2018 verwandelt die warme und trockene Witterung die deutschen Wälder in ein Schlaraffenland für Borkenkäfer. Dass der Klimawandel kein fernes Zukunftsszenario ist, sondern sich längst auf die Wälder auswirkt, ist den meisten Forstleuten klar. Andreas Bolte leitet das Thünen-Institut für Waldökosysteme im brandenburgischen Eberswalde und lehrt Waldökologie an der Universität Göttingen. Er beschäftigt sich schon seit 20 Jahren mit den Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Wald. »Das Thema ist seit dem Jahrhundertsommer 2003 richtig präsent, und 2018 hat sich das jetzt nochmal extrem verstärkt«, sagt er.

Der »verheerende Cocktail aus Sturm- und Trockenschäden« betreffe vor allem die Fichte, den mit Abstand wirtschaftlich wichtigsten Baum in deutschen Wäldern. Im Harz beispielsweise drohen ganze Fichtenbestände flächendeckend abzusterben. Als Art des borealen Nadelwalds ist die Fichte an strenge Winter und ganzjährig verfügbare Feuchtigkeit angepasst. Lange trockene Sommer und milde, nasse Winter – wie wir sie laut Prognosen in Zukunft immer häufiger erleben werden – stellen sie vor große Probleme.

Als Flachwurzler sind Fichten zudem besonders anfällig bei Sturm. »Die meisten Fichten vertrocknen zwar nicht direkt, aber ohne ausreichend Wasser verlieren sie ihre Fähigkeit, Harz zu bilden, und sind dann Schädlingen wie dem Borkenkäfer ausgeliefert«, erläutert Bolte (siehe auch Infokasten »Borkenkäfer«). In Deutschland wäre die Fichte natürlicherweise nur mit wenigen Prozentanteilen an der Waldvegetation beteiligt, etwa in den höheren Lagen der Mittelgebirge, in den Alpen und an Sonderstandorten, wie am Rand von Hochmooren.

Aus historischen und wirtschaftlichen Gründen hat man Fichten ab dem 19. Jahrhundert großflächig auch außerhalb ihres eigentlichen Areals angebaut. Heute wächst sie in Deutschland noch auf einem Viertel der Waldfläche. Was die Fichte im Westen und Süden ist, das ist die Kiefer im Norden und Osten. Die Kiefer käme von Natur aus ebenfalls nur auf weniger als fünf Prozent der Waldfläche vor, liegt aber momentan bei 23 Prozent. Buchen und Eichen, die von Natur aus einen Großteil des Waldes ausmachen würden, kommen lediglich auf 16 beziehungsweise 10 Prozent Waldanteil.

## Zwei Baumarten dominieren den deutschen Wald

Die Hälfte des Waldes in Deutschland wird also von zwei Baumarten dominiert, die

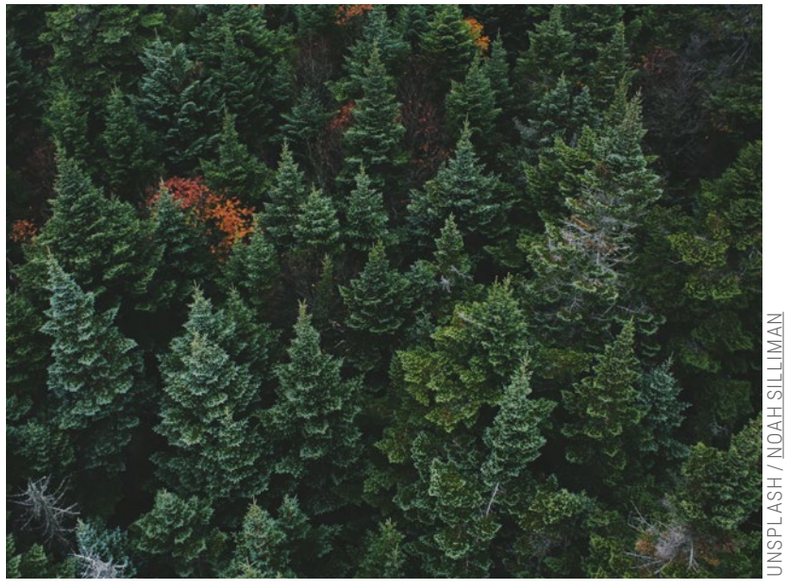
größtenteils außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets wachsen. Das macht den Wald anfällig, und das wissen auch die Forstleute, die seit einiger Zeit versuchen gegenzusteuern. Zwischen den beiden letzten Bundeswaldinventuren 2002 und 2012 ist der Anteil der Laubbäume um sieben Prozent gestiegen und der Anteil der Nadelbäume um vier Prozent gefallen (die Fichte verringerte sich um acht Prozent). Der Waldumbau läuft also, braucht aber naturgemäß viel Zeit. Der Klimawandel könnte den Umbau weiter beschleunigen, indem er die Waldbauern immer öfter zu »Noternten« bei Fichten zwingt.

»Die Schäden im Wald betreffen aber nicht nur die Fichte«, betont Wolf Ebeling, Geschäftsführer des Deutschen Forstwirtschaftsrats (DFWR). Viele Bäume seien geschwächt, und bei allen Baumarten gebe es starke Einbußen beim Holzzuwachs. Das ganze Ausmaß der Schäden werde sich erst in den nächsten ein bis zwei Jahren zeigen. Ebeling schätzt zudem, dass etwa ein Drittel aller in den letzten drei Jahren gepflanzten Setzlinge vertrocknet sind; das seien Hunderte Millionen Pflanzen, die nun nachgesetzt werden müssten. Viele Waldbesitzer seien in einer Notlage.

Bundeslandwirtschaftsministerin Julia Klöckner verständigte sich bei der Agrarministerkonferenz Ende September 2018 mit den Ländern auf finanzielle Hilfen für Waldeigentümer. Durch die aktuellen Waldschäden sei viel zu viel Holz auf dem Markt, sagte Klöckner. So gibt es in vielen Regionen schon Einschlagstopps für Fichten, um die Marktpreise nicht weiter zu belasten. Genutzt wird nur noch das so genannte Käferholz, also vom Borkenkäfer befallenen Bäume – auch um eine weitere Ausbreitung zu verhindern. Der Wald müsse verstärkt an den Klimawandel angepasst werden, so Klöckner. Aber was heißt das?

### Buchen sollst du suchen

»Ich würde beim Waldumbau immer mit auf die Buche setzen«, sagt Bolte. Die Buche bleibt für viele der Hoffnungsträger im Wald, denn sie ist nicht nur in weiten Teilen Deutschlands die natürliche Baumart, sie ist auch sehr anpassungsfähig. Buchen aus südlichen oder kontinentalen Gefilden sind evolutionär an trockenere Sommer und feuchtere Winter angepasst, und die Art hat dazu eine große individuelle Bandbreite. Die Buche sei unempfindlicher gegen Schädlinge als die Fichte und ein Meis-



UNSPLASH / NOAH SILLIMAN

»Die Tanne reagiert besonders empfindlich auf Luftverschmutzung und war innerhalb der Forstwirtschaft praktisch schon abgeschrieben«

[Jürgen Bauhus]

SONJANOVAK / STOCK.ADOBE.COM

ter der Naturverjüngung, also der natürlichen Vermehrung durch Samen, so Forstwissenschaftler Bolte.

Die Buche vereint demnach viele Vorzüge in sich; leider gibt es auch einen gravierenden Haken: Sie ist wirtschaftlich vergleichsweise uninteressant. Denn Holz- und Bauwirtschaft sind voll auf Nadelhölzer ausgerichtet, unter anderem, weil Nadelbäume gerade und im unteren Stammbereich mit wenig Ästen wachsen und durch ihren Harzanteil auch witterungsbeständiger sind. Hinzu kommt, dass die jährliche Holzzuwachsrate einer Fichte höher ist als die einer Buche oder anderer Laubbäume. Im Ergebnis landen rund 80 Prozent des in Deutschland geernteten Buchenholzes direkt als Brennholz im Ofen. Gelänge es, mehr Buchenholz in langlebigen Holzprodukten zu verwenden, würde das nicht nur Kohlenstoff in den Produkten fixieren, sondern auch dazu führen, dass der Anbau der widerstandsfähigen Buchen für deutsche Waldbauern attraktiver würde.

Viel versprechende Ansätze dazu gibt es bereits, wie etwa das aus heimischer Buche gefertigte Furnierschichtholz »BauBuche« der Firma Pollmeier aus dem thüringischen Creuzburg. Träger und Platten aus BauBuche bestehen aus schichtweise verleimten Buchenfurnieren und können laut Hersteller bei Festigkeit und Preis mit Nadelholz konkurrieren. Mit den BauBuche-Trägern lassen sich zudem große Bauwerke wie Hochhäuser, Hallen und Schulen bauen. Laut Jan Hassan, Pressesprecher bei Pollmeier, könnte man in Creuzburg die vierfache Menge an BauBuche produzieren, wenn der Markt das wolle.

## Noch sind Nadelbäume die besseren Klimaschützer

BauBuche ist seit 2014 auf dem Markt, aber Bauprojekte haben lange Vorlaufzeiten, und Planungsbüros sind erst einmal zurückhaltend bei der Verwendung neuer Materialien. Eine verstärkte generelle Förderung von Holz in der Baubranche und technische Neuerungen wie die BauBuche könnten das »Buchendilemma« der deutschen Forstwirtschaft in Zukunft zumindest abmildern. Momentan sind Nadelbäume allerdings noch die besseren Klimaschützer. Denn sie wachsen nicht nur schneller (und binden so mehr $CO_2$), ihr Holz wird meist auch noch anderweitig verwendet, bevor es verbrannt wird (»Kaskadennutzung«), und verbessert so die Klimabilanz. Deshalb empfiehlt der Wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft den Erhalt eines substanziellen Anteils von Nadelhölzern an der Waldfläche als besonders wirksame forstliche Klimaschutzmaßnahme.

Jetzt also doch wieder Nadelbäume, nachdem man in den letzten Jahrzehnten versucht hat, die Wälder naturnäher zu gestalten und den Laubwaldanteil zu erhöhen? Es kommt wohl eher auf eine gesunde Mischung an. Etwa ein Mix aus Buche und Tanne. Inwieweit die heimische Weißtanne in bestimmten Regionen Deutschlands vom Verbund mit der Buche profitieren könnte, haben Jürgen Bauhus und sein Team an der Professur für Waldbau der Universität Freiburg mit mehreren Partnerinstitutionen im Buche-Tanne-Klimaprojekt (BuTaKli) untersucht.

Die Tanne war wohl die Baumart, die am stärksten unter dem sauren Regen der 1970er und 1980er Jahren gelitten hat. »Sie reagiert besonders empfindlich auf Luftverschmutzung und war innerhalb der Forstwirtschaft praktisch schon abgeschrieben«, erinnert sich Bauhus. Nach den Erfolgen bei der Luftreinhaltung erlebt die

# Große Angst vor kleinen Käfern: Borkenkäfer profitieren vom Klimawandel

HENRIK_L / GETTY IMAGES / ISTOCK

**Borkenkäfer sind wenige Millimeter große Käfer aus der Familie der Rüsselkäfer** und kommen in mehr als 120 Arten in Mitteleuropa vor. Sie befallen bevorzugt geschwächte Nadelbäume, bohren sich durch die Borke in die saftige Rindenschicht und legen dort ihre Brutgänge mit artspezifischem Muster an. Die bekanntesten Arten in Deutschland sind Buchdrucker und Kupferstecher, die an Fichten nagen. Aber auch Lärchen- oder Tannenborkenkäfer können für beträchtliche Schäden im Forst sorgen.

Wenn die Sonne im zeitigen Frühjahr den Waldboden wärmt, krabbeln die Männchen von Buchdrucker, Kupferstecher und Co. aus ihrem Winterlager in der Laub- und Nadelstreu und machen sich auf die Suche nach geeigneten Opfern. Die Borkenkäfer suchen im Umkreis von ein paar hundert Metern kranke, geschwächte Bäume oder auch herumliegende, frisch gefallene Stämme und bohren sich durch die Borke bis in die weiche Bastschicht. Dort nagen sie eine kleine Höhlung ins Gewebe – von Förstern auch Rammelkammer genannt.

Mit dem Duft ihrer Pheromone locken sie die Käferweibchen in die Kammer. Und diese knabbern nach der Paarung zwei bis drei so genannte Muttergänge, um darin ihre Eier abzulegen. Die Käferlarven fressen sich später von dort aus weiter durch den weichen Bast und führen zu dem typischen Schadbild unter der Borke, das dem Buchdrucker seinen Namen eingebracht hat. Die Fraßschäden in der Rinde und im Kambium, der Wachstumsschicht des Baums, unterbrechen den Transport von Zuckerverbindungen von der Krone in die Wurzeln und lassen den Baum bei starkem Befall schließlich absterben.

Je nach Wetter dauert die Entwicklung vom Ei zum fertigen Käfer sechs bis zehn Wochen. In warmen, trockenen Jahren schaffen die Borkenkäfer bis zu drei Generationen. Hinzu kommen Geschwisterbruten, die die Käfereltern an anderer Stelle begründen, während sich die Eier und Larven voriger Generationen entwickeln. Theoretisch kann ein einziger der nur wenige Millimeter großen Borkenkäfer innerhalb eines Jahres über 100 000 Nachkommen erzeugen. Ist ein Baum befallen, werden durch die Duftstoffe immer mehr Käfer angelockt, bis er abstirbt. Auch wenn ein einzelnes Weibchen meist nur 50 bis 100 Eier legt, kann ein stark befallener Baum tausenden Borkenkäfern eine Kinderstube bieten.

Um dem Käferbefall vorzubeugen, wird von den Forstleuten im Frühjahr akribische Detektivarbeit verlangt. Beim Buchdrucker finden sich dann am Fuß heimgesuchter Bäume verräterische kleine Häufchen aus Holzmehl: Spuren der bohrenden Käfermännchen. Ziel ist es, befallene Bäume zu finden, zu fällen und aus dem Wald zu schaffen, bevor die erste Käfergeneration ausgeflogen ist. Die Förster nennen das »saubere Waldwirtschaft«; sie ist die wirksamste Waffe gegen den Schädling. Unterstützend kommen auch Pheromonfallen zum Einsatz.

Die Situation wird zurzeit dadurch verschärft, dass der Holzmarkt nach dem Ausforsten der Sturmschäden gesättigt ist und Waldbesitzer Probleme haben, ihr Holz zu annehmbaren Preisen zu verkaufen. Wenn das Holz in Poltern, also gestapelten Stämmen, am Wegrand ungeschützt im Wald bleibt, kann es den Käfern als Brutstätte dienen. Das kann durch das rechtzeitige Entrinden der Fichtenstämme verhindert werden, weil so dem Käfer der Brutraum genommen wird. Vorübergehende Lösungen sind Nass- oder Folienlager, die einen Borkenkäferbefall durch Berieselung beziehungsweise Abdeckung verhindern, oder als letzte Möglichkeit auch die so genannte »Polterspritzung«, also der Einsatz von Insektiziden.

Zunehmende Wärme und Trockenheit schaffen gute Lebensbedingungen für etliche Holzschädlinge, die durch natürliche Ausbreitung oder durch den Menschen aus anderen Regionen zu uns kommen. Beispiele sind das Eschentriebsterben, eine aus Ostasien eingeschleppte Pilzerkrankung, die Ulmenwelke, verursacht ebenfalls durch einen Pilz, der seit den 1970er Jahren in Europa auftritt und durch Ulmenborkenkäfer verbreitet wird, oder die Erlen-Wurzelfäule, die durch den pilzähnlichen Schaderreger *Phytophtora* verursacht wird und vermutlich über Fischimporte aus Nordamerika zu uns kam. Weitere unerwünschte Neubürger sind der Asiatische Laubholzbockkäfer oder der Nordische Fichtenborkenkäfer, der sich seit einiger Zeit in Osteuropa verbreitet und durch Holzimporte eingeschleppt werden könnte. <<

SMILEUS / STOCK.ADOBE.COM

**BUCHE**

**Die Buche bleibt für viele der Hoffnungsträger im Wald, denn sie ist sehr anpassungsfähig.**

Weißtanne nun seit einiger Zeit ein Comeback und gilt gerade in mittleren und höheren Lagen der Mittelgebirge als interessante Partnerin der Buche. Im Projekt zeigte sich, dass die Tanne auch bei heißtrockenem Wetter tatsächlich von der Nachbarschaft der Buche profitieren konnte, während es der Buche relativ »egal« war, ob da noch Tannen um sie waren oder nicht. Die Tanne ist wärmeliebender und trockenresistenter als die Fichte, wurzelt tiefer und profitiert im Schnitt eher von milderen Wintern und Frühjahren. In tieferen Lagen könne es allerdings schnell Probleme mit dem Tannenborkenkäfer geben, dämpft Bauhus die Erwartungen; die Tanne sei also auch kein Allheilmittel.

Überhaupt scheint der beste Schutz gegen Schädlinge, Stürme und Klimawandel ein vielfältiger Wald zu sein. Doch wie genau soll der aussehen? Welche Baumarten müssen wir jetzt pflanzen und fördern, damit der Wald auch noch in 100 Jahren all seine wichtigen Funktionen erfüllen kann? Nehmen wir heimische Rotbuchen, Stieleichen, Weißtannen und Fichten oder doch lieber nichtheimische Roteichen, Küstentannen und Douglasien? Andreas Bolte plädiert für Pragmatismus und meint: »Je nach Standort und Rahmenbedingungen wird die Antwort unterschiedlich ausfallen, aber wir sollten nichtheimische Baumarten nicht grundsätzlich ausschließen.« Vielfältige, strukturreiche und vor allem gut vernetzte Wälder sind für die Erhaltung der heimischen Artenvielfalt wohl wichtiger als die Ächtung nichtheimischer Baumarten.

## Waldumbau 2.0

Die Unterscheidung von nützlichen und invasiven, also sich aggressiv ausbreitenden Fremdarten ist allerdings umstritten. Je nach Kriterienkatalog komme man da zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen, sagt Bauhus. Er mache sich aber etwa bei der Douglasie keine Sorgen, dass sie sich unkontrolliert in deutschen Wäldern verbreiten könnte. Im Gegenteil, die meisten Förster hätten gern deutlich mehr Naturverjüngung bei der Douglasie, sie setze sich aber ohne forstliche Hilfe nur schlecht gegen die heimische Buche durch. Bislang wächst sie auf etwa zwei Prozent der Waldfläche.

Im Übrigen ist die Douglasie der Musterschüler in der forstlichen Baumschule: Sie erzielt noch höhere Zuwachsraten als die Fichte und hat in ihrer Heimat an der Westküste der USA gelernt, mit langen, trockenen Sommern und feuchten Wintern klarzukommen. Gegen sie spricht, dass heimische Tiere und Pflanzen sich schwertun könnten, in einem von Douglasien dominierten Wald zu überleben. Zudem sind Douglasien zwar unempfindlich, aber nicht unverwundbar. In ihrer Heimat kennt man über 140 Douglasienschädlinge, von Schmetterlingsraupen über Borkenkäfer bis hin zu Pilzen. Würde man Fichtenmonokulturen durch reine Douglasienbestände ersetzen, könnten hier ebenfalls bald Schädlingsprobleme auftreten. Besser wäre aus Sicht vieler Experten der Anbau zusammen mit der Buche.

»Die Klimaanpassung der Wälder muss nicht unbedingt über neue Baumarten bewerkstelligt werden, denn auch innerhalb einer Baumart gibt es große genetische Unterschiede zwischen lokalen Varietäten und sogar zwischen Individuen«, sagt Bruno Fady, Direktor am französischen Forschungsinstitut für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten INRA. Bäume, die mit veränderten Umweltbedingungen besser zurechtkommen, werden sich eher durchsetzen. Forstgenetiker erforschen diese intraspezifische Bandbreite und versuchen sie forstwirtschaftlich nutzbar zu machen. Im von INRA koordinierten GenTree-Projekt sammeln sie genetische Proben, also Samen, Blätter beziehungsweise Zapfen und Nadeln von Bäumen zwölf wichtiger Baumarten in ganz Europa. Um an das Pflanzenmaterial zu gelangen, unternehmen sie teils waghalsige Klettertouren in die Baumwipfel. Das Projekt, das in Deutschland je nach Baumart von verschiedenen Institutionen betreut wird, hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2020 das Management und die nachhaltige Nutzung der forstgenetischen Vielfalt in Europa zu optimieren. Beteiligt sind 22 Organisationen und Institutionen aus 14 Ländern.

## Verbindung zwischen Klimamodellierung und waldbaulichem Knowhow

Was also soll ein Waldbesitzer mit einem Wirtschaftswald aus Fichten tun, um ihn fit für die Zukunft zu machen? »Zunächst muss er wissen, welche Baumarten und welches genetische Material für seinen Standort überhaupt in Frage kommen, welche klimatischen Verhältnisse in den nächsten 100 Jahren zu erwarten sind und schließlich, wie er an geeignetes Pflanzmaterial herankommt«, erläutert Andreas Bolte.

Diese Verbindung zwischen Klimamodellierung und waldbaulichem Knowhow will das EU-Projekt SusTree herstellen. Das Projekt, an dem acht forstliche Institutionen in sechs zentraleuropäischen Ländern beteiligt sind, wird am österreichischen Bundesforschungszentrum für Wald in Wien koordiniert. Das Wissen um die Herkunft und die Qualität von Pflanzenmaterial soll in der Praxis zu einem grenzüberschreitenden Austausch von Saat- und Pflanzgut führen. Eine international ver-

einheitlichte Saatgutdatenbank ist geplant, und eine App soll Waldmanagern nicht nur Vorschläge für die optimale Baumartenzusammensetzung machen, sondern gleich auch Quellen mitliefern, wo Baumschulen und Forstgärten mit geeigneten Varietäten zu finden sind.

GenTree und SusTree sind europaweite Projekte, die zeigen, wie öffentliche Mittel die Verbindung von Forschungsergebnissen und Forstpraxis fördern können. Seit 2013 gibt es in Deutschland den von der Bundesregierung aufgelegten Waldklimafonds, der ebenfalls Forschungsprojekte zur Klimaanpassung der Wälder fördert, etwa das erwähnte Buche-Tanne-Klimaprojekt. Und Ende September 2018 ging das Deutsche Klimavorsorgeportal (KliVO) an den Start, das auch Hilfestellungen für Waldbesitzer bietet. Es passiert also durchaus schon einiges zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel. Weitere Unterstützung aus Politik und Verwaltung ist aber nötig. Etwa durch die Förderung der Pflanzung »neuer« Baumarten, die In-Wert-Setzung heimischen Buchenholzes, eine fundierte Beratung der Waldbesitzer, die Forschungsförderung oder den Schutz und die Renaturierung von Wäldern. ↩

»QUANTENFLAGGSCHIFF« GESTARTET

# Europas Antwort auf den **Quantencomputer-Hype**

von Robert Gast

GIROSCIENCE / STOCK.ADOBE.COM

Kommt bald die zweite Quantenrevolution? Europa will jedenfalls dabei sein – und startet ein milliardenschweres Forschungsprojekt.

Mit einem Festakt in der Wiener Hofburg haben 500 europäische Wissenschaftler ein milliardenschweres Forschungsprogramm zur Entwicklung von Quantentechnologien gestartet. Ziel des so genannten Quantenflaggschiffs ist, bizarre Phänomene aus dem Mikrokosmos technisch nutzbar zu machen. Das könnte langfristig zu ultraempfindlichen Sensoren, abhörsicheren Kommunikationsnetzwerken und kommerziell einsetzbaren Quantencomputern führen.

Die Europäische Union lässt sich diese Vision 500 Millionen Euro kosten, weitere 500 Millionen sollen die Mitgliedsstaaten aufbringen. Das Geld wird allerdings auf zehn Jahre und Dutzende Forschergruppen verteilt werden. Nach einem ähnlichen Muster fördert Brüssel bereits die Erforschung des Wundermaterials Graphen sowie im Rahmen des Human Brain Project die Entwicklung von Technologien für die Neurowissenschaft. Die beiden älteren Forschungsflaggschiffe sind bereits 2013 losgesegelt.

## Konkurrenz in Übersee

Mit dem nun gestarteten Quantenflaggschiff reagiert die Europäische Union einerseits auf Entwicklungen in Übersee: Insbesondere in Nordamerika und Asien investieren Regierungen und Unternehmen seit Jahren hohe Summen in Quantentechnologien, was zu Fortschritten bei der Entwicklung von Quantencomputern und Quantensatelliten geführt hat. Andererseits will die EU physikalische Grundlagenforschung und Industrie stärker vernetzen: Bisher gibt es in Europa nur wenige Firmen, die Produkte auf Basis der Quantenphysik entwickeln.

Die Handhabe einzelner Quantenobjekte soll bald jedoch entscheidend für die Weiterentwicklung von Digitaltechnologien werden, prognostizieren Experten: Wer beispielsweise einzelne Lichtteilchen zielgenau steuert und verändert, kann abhörsichere Netzwerke konstruieren – denn jede Messung an solch einem Quantenobjekt hinterlässt Spuren.

Wer hingegen einzelne Atome einsperrt und kontrolliert, kann Computer bauen, die bestimmte Probleme schneller lösen als herkömmliche Rechner, denn mehrere Quantenobjekte lassen sich geschickt »verschränken«. Das bringt Vorteile bei ausgewählten Rechenaufgaben, beispielsweise der Primfaktorzerlegung, auf der heutige Verschlüsselungen basieren.

## Anschub für die angewandte Quantenphysik

Das Quantenflaggschiff der EU soll in allen Bereichen der Quantenphysik Impulse setzen. Die Bekanntgabe der ersten 20 Forschungscluster, die binnen der nächsten drei Jahre insgesamt 132 Millionen Euro er-

halten sollen, unterstreicht das: An ihnen sind jeweils mehrere europäische Universitäten und auch Partner aus der Industrie beteiligt, quer durch alle Bereiche der Quantenphysik. Insgesamt hatten Wissenschaftler aus ganz Europa 141 Clusterkonzepte eingereicht.

Die Fördersummen für einzelne Forschergruppen sind dabei eher überschaubar. Sie dürften auch symbolischen Charakter haben und sollen staatliche Förderer und Industriepartner zu weiteren Investitionen bewegen. Am Ende soll in jedem Fall etwas herauskommen, was international mithalten kann und in Richtung Anwendung führt.

So bauen die geförderten Projekte oft auf der Arbeit von bereits namhaften Instituten auf. Beispielsweise koordiniert der Garchinger Max-Planck-Forscher Immanuel Bloch im Rahmen des Flaggschiffs einen Verbund zur Quantensimulator-Forschung. Bloch zählt weltweit zu den führenden Experten auf diesem Gebiet. Die Universität Innsbruck leitet hingegen den Cluster, der eine Förderung für die Entwicklung von Ionenfallen erhält, mit denen sich Quantencomputer bauen ließen. Die Innsbrucker genießen auf diesem Gebiet bereits großes Renommee und sollen ihre Stellung im Rahmen des Flaggschiffs wohl ausbauen.

Quantenflaggschiff

EU2016 NL, FOTO: MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN/MARTIJN BEEKMAN / QUANTUM EUROPE / CC BY 2.0 (CC BY)

Quantencomputer und Quantensimulatoren spielen insgesamt jedoch eher eine Nebenrolle im Quantenflaggschiff, zumindest in den ersten drei Jahren: Der Schwerpunkt liegt klar auf der Grundlagenforschung, sieben Cluster werden diesem Schlagwort zugeordnet. Vier Verbundprojekte widmen sich derweil dem Bereich der Quantenkommunikation, vier der Quantenmesstechnik. Sie gilt vielen Beobachtern als greifbarste Quantenanwendung, die am ehesten von der Industrie aufgegriffen werden könnte.

## Gießkanne statt »Moonshot«

Nur zwei Cluster zielen auf die Entwicklung von Quantencomputern. Neben den

Innsbruckern hat ein Projekt namens OpenSuperQ, das von der Universität des Saarlandes koordiniert wird, den Zuschlag erhalten. Hier soll es um supraleitende Schaltkreise statt um Ionenfallen gehen – sie gelten als zweite viel versprechende Technik auf dem Weg zu einem vollwertigen Quantencomputer. Eine Forschungsgruppe von Google hat mit diesem Ansatz in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht.

Dass es nicht noch mehr Projekte zum Thema Quantencomputer gibt, ist für manchen Forscher eine verpasste Chance. Man hätte lieber alle Mittel des Flaggschiffs in diese Forschungsrichtung stecken sollen, sagte etwa Lieven Vandersypen von der Technischen Universität Delft dem Wissenschaftsmagazin »Nature«. Statt solch einen »Moonshot« zu probieren, verteile die EU ihre Fördergelder nun nach dem Gießkannenprinzip.

Für Verteidiger des Flaggschiff-Konzepts wäre aber gerade der Fokus auf eine weit entfernte Anwendung ein unverantwortliches Risiko: Die Quantencomputer-Forschung steht seit Jahren unter Hype-Verdacht. Aus Sicht von Experten ist keinesfalls ausgemacht, dass die Geräte irgendwann auch wirklich Marktreife erlangen – am Ende könnte es zu aufwändig sein, große Quantenensembles von der Umwelt zu isolieren und die Rechenfehler auszubügeln.

Auch so dürfte das Quantenflaggschiff bereits mit Risiken einhergehen: Selbst mit der auf mehrere Anwendungsfelder geteilten Förderstruktur ist es laut Aussage der Organisatoren ein »high risk, high gain«-Projekt. Fest steht, dass es Europa mittlerweile ernst meint mit der Vision, nach Laser, Halbleiter und Co eine weitere Quantenrevolution anzustoßen oder zumindest mit der internationalen Konkurrenz gleichzuziehen: So hat die deutsche Regierung im Mai 2018 bekannt gegeben, die Quantentechnologien bis zum Ende dieser Legislaturperiode mit 650 Millionen Euro zu fördern. Wie viel davon dazu dienen wird, das nun gestartete Flaggschiff zu unterstützen, ist bisher nicht bekannt. ↩


Spektrum der Wissenschaft
KOMPAKT

WELT DER QUBITS
Auf dem Weg zum Quantencomputer

**Quantencomputer** | Weniger störanfällig dank Vernetzung
**Informationstechnologie** | Mit Quantenmechanik zum schnelleren Rechner
**Quanteneffekte** | EU-Großprojekt zur Erforschung

FÜR NUR € 4,99

HIER DOWNLOADEN

HINTERGRUND: SPAINTER_VFX / GETTY IMAGES / ISTOCK; KUGEL: PITJU / STOCK.ADOBE.COM

MEDIZINISCHE BEHANDLUNG

# Alles zu **seiner Zeit**

von Ulrike Gebhardt

Wie die Chronomedizin versucht, mit Hilfe der »richtigen« Uhrzeit die Effektivität von Behandlungen zu steigern und die Nebenwirkungen zu verringern.

D-KEINE / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die Tablette, die die 50-Jährige kurz vor dem Schlafengehen einnimmt, wirkt nicht sofort. Erst im Lauf der Nacht – mit einem Anstieg gegen Morgen – verteilt sich das Medikament in ihrem Körper. Die Arznei, ein Immunsuppressivum, hemmt die Ausschüttung von Entzündungsstoffen, die die Immunzellen sonst vermehrt gegen Ende der Nacht produzieren. So lindert sie dann die Gelenkschmerzen, die der Rheumapatientin schon mit dem Aufwachen zu schaffen machen. Die zeitlich abgestimmte »Chrono«-Therapie des Rheumas ist erfolgreich, weil sie die tagesrhythmischen Schwankungen berücksichtigt, mit denen der Körper Entzündungsstoffe ausschüttet.

Ein derartiges optimales Timing könnte die Wirksamkeit vieler Medikamente bei einer Behandlung verbessern und womöglich die Nebenwirkungen verringern. Hoffnung macht gerade eine Untersuchung von Chronobiologen am Cincinnati Children‹s Hospital Medical Center: Die Forscher entdeckten fast 1000 von inneren Uhren gesteuerte, tagesrhythmisch schwankende Gene im menschlichen Körper, deren Proteinprodukte direkt oder indirekt das Ziel von Arzneistoffen sind.

Björn Lemmer, Pharmakologe vom Management Board der Europäischen Arzneimittelbehörde (EMA), wundert das zunächst einmal gar nicht. »Der Mensch ist extrem rhythmisch angelegt, und natürlich haben diese Rhythmen eine wesentliche Bedeutung für die Medizin«, erklärt der emeritierte Ordinarius für Pharmakologie und Toxikologie der Universität Heidelberg. Die kleinteilige Genanalyse der amerikanischen Wissenschaftler liefere nun wichtige molekulare Grundlagen.

Es sei schon länger bekannt, dass manche Medikamente je nach Tageszeit unterschiedlich wirken, sagt auch Achim Kramer, Leiter der Arbeitsgruppe »Chronobiologie« an der Berliner Charité. »Es ist aber die Frage, warum dies in den meisten Fällen keine Beachtung findet – außer zum Beispiel bei der Behandlung der rheumatoiden Arthritis und des Bluthochdrucks.« Die molekularen Details zu kennen, sei entscheidend, damit sich die Chronotherapie in der Praxis weiter durchsetze, so Kramer – und die aktuelle Arbeit des Teams aus Cincinnati sei ein wichtiger Schritt in diese Richtung.

»Die Vorgänge beim Menschen sind viel komplizierter«

[Björn Lemmer]

## Die Hälfte der Gene ist rhythmisch aktiv

Seit 2014 war durch Untersuchungen an Mäusen bekannt, dass etwa die Hälfte aller Gene bei Säugetieren im Tagesverlauf unterschiedlich aktiv ist; 44 Prozent sind es beim Menschen, wie die aktuelle Studie zeigt. In einer aufwändigen Computeranalyse werteten die Wissenschaftler tausende RNA-Proben von mehr als 600 Spendern aus. Die RNA stammte aus ganz unterschiedlichen Organen, unter anderem aus der Leber, der Lunge, dem Herzen, Blutgefäßen, Schilddrüse, Darm, dem Fettgewebe. Von den zyklisch aktiven Genen codieren zwölf Prozent für Proteine, die auf die eine oder andere Art Ziel eines bereits entwickelten Arzneistoffs sind. Das bedeutet, dass Wirkung und Nebenwirkung tausender Medikamente von solchen zeitlich variabel produzierten Molekülen beeinflusst werden.

»Wir haben Rhythmen in der Genexpression über den ganzen Körper hinweg in einer großen, sehr gemischten Gruppe von Menschen festgestellt«, sagt John Hogenesch, der die Studie leitete. In den meisten Geweben liegt der Höhepunkt der rhythmischen Genaktivitäten rund um das Ende der Ruhephase. Welche Gene dann jeweils aktiv sind, ist von Organ zu Organ sehr unterschiedlich. Unabhängig von Alter, Geschlecht oder der ethnischen Gruppe sei es also vielmehr die innere Uhr, die die Hälfte des Genoms reguliere, so der Molekularbiologe weiter – und damit auch beeinflusst, wie gut ein Medikament wirkt.

## Wie die inneren Uhren ticken

Die präzise getimte Regulierung des Genoms hat Taktgeber: die inneren Uhren, die in den Zellen aller Lebewesen ticken, um den Organismus, seinen Stoffwechsel und sein Verhalten optimal auf den Wechsel zwischen Licht und Dunkelheit einzustellen. Die Uhren der Zellen sind die Basis der »zirkadianen« Rhythmen der Körperprozesse, die sich ungefähr alle 24 Stunden wiederholen. Immer wieder justiert werden die Zeitgeber durch äußere Einflüsse: Der tatsächliche Tagesablauf aus Schlafen und Wachen, Aktivität und Ruhe, Essen und Fasten stellt die genetisch festgelegten, autonom laufenden inneren Uhren immer wieder nach. Dies sorgt dafür, dass die im Lauf des Tages schwankenden Hoch- und Tiefzeiten aller Körperfunktionen sinnvoll an die Umweltbedingungen angepasst sind.

## Chronotherapie des Bluthochdrucks

So arbeiten etwa die Verdauungsorgane je nach Tageszeit unterschiedlich effizient – was mitbestimmt, wie schnell ein Medikament vom Magen ins Blut gelangt, verstoffwechselt und schließlich wieder ausgeschieden wird. Auch Herz und Blutgefäße funktionieren nicht den ganzen Tag über gleich, der Blutdruck hat einen ausgeprägten Tag-Nacht-Rhythmus. Morgens nach dem Aufstehen steigen die Werte an, mittags sinken sie leicht ab, am Nachmittag zwischen 16 und 18 Uhr gibt es meist einen zweiten Anstieg, nachts fallen die Werte erneut um etwa zehn Prozent. Manche Krankheitsereignisse, die das System betreffen, treten ebenfalls bevorzugt in bestimmten Zeiträumen auf: Angina-Pectoris-Anfälle besonders zwischen vier und sechs Uhr morgens, Herzinfarkte und Schlaganfälle gehäuft zwischen acht und zwölf Uhr mittags, Hirninfarkte bevorzugt um drei Uhr nachts.

Die Therapie des Bluthochdrucks könne inzwischen gut auf die biologischen Rhythmen des betroffenen Patienten abgestimmt werden, sagt Martin Middeke vom Hypertoniezentrum München. Dank der Möglichkeiten zur 24-Stunden-Blutdruck-

messung können sich Patient und Arzt ein Bild davon machen, ob der Blutdruck nur in der Arztpraxis zu hoch ist oder auch im Alltag von den Normwerten abweicht. Es stehen Substanzen mit kurz- und langfristiger Wirkung zur Verfügung, die jedoch individuell sowie zeitlich vernünftig dosiert werden müssten, so Middeke. »Das wird in der Praxis leider häufig nicht beachtet und kann etwa dann gefährlich werden, wenn ein Mensch abends noch ein blutdrucksenkendes Medikament bekommt, obwohl sein Blutdruck nachts ohnehin stark absinkt«, sagt der Münchner Arzt.

Die aktuelle Genanalyse der Wissenschaftler aus Cincinnati liefert wichtiges Detailwissen zur Bluthochdrucktherapie. Inwieweit dies in die aktuelle Praxis vordringen kann, ist ungewiss. Laut der Studie sind auch einige Gene mit der Bauanleitung für Kalziumkanäle in den Muskel- und Blutgefäßzellen des Herzens tagesrhythmisch aktiv. Manche Arzneistoffe, die zur Absenkung des Blutdrucks auf genau diese Kanalproteine abzielen, halten sich nur sehr kurz im Körper stabil, sie haben eine geringe Halbwertszeit. Wann ein solches Medikament eingenommen wird, kann also für die Wirkung entscheidend sein. Ein Beispiel aus der Praxis beschreiben die Forscher aus Cincinnati: Harmonisiert man die Gabe von Kalziumkanal-Blockern wie Nifedipin und Verapamil mit dem Höhepunkt des Auftretens des Zielmoleküls – hier eben eines Kalziumkanal-Proteins –, so »kann das die Effektivität stark verbessern«.

Björn Lemmer, der sich seit Jahrzehnten mit der Chronopharmakologie beschäftigt, ist skeptisch. An der Regulierung des Blutdrucks sei schließlich nicht nur ein Gen beteiligt, sondern es wirkten 30 bis 40 unterschiedliche Prozesse mit. »Wenn man versucht, therapeutisch an einem einzelnen rhythmischen Molekül anzugreifen, ist das zu simpel. Die Vorgänge beim Menschen sind viel komplizierter«, sagt der Pharmakologe.

## Weniger Nebenwirkungen durch den richtigen Zeitpunkt

Zu welcher Tageszeit ein Gen besonders aktiv ist, kann von Gewebe zu Gewebe unterschiedlich sein. Kennt man die Differenzen, könnte möglicherweise eine optimale Uhrzeit für die Einnahme des Medikaments gefunden werden, zu der der Wirkstoff weniger Nebenwirkungen auslöst. Beispiel Theophyllin. Dieser Arzneistoff erweitert bei Asthma die verengten Atemwege – er hemmt dabei aber auch Rezeptoren und Enzyme, die nicht nur in den Bronchien, sondern ebenso im Herzgewebe vorkommen. Der Arzneistoff kann daher bei manchen Personen Herzbeschwerden auslösen. Gelänge es, Theophyllin im Tagesverlauf dann zu geben, wenn die Zielmoleküle, die die Arznei hemmt, in den Herzzellen (nicht aber in den Atemwegen) auf dem tageszeitlichen Tiefpunkt sind, ließen sich die Nebenwirkungen laut John Hogenesch und seinen Mitstreitern möglicherweise verringern.

Aus Studien weiß man schon länger, dass Mensch und Tier Medikamente zu manchen Tageszeiten besser vertragen als zu anderen. Wie gut der Organismus den Wirkstoff toleriert, kann in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Arzneigabe um den Faktor 5 schwanken, die Effektivität des Wirkstoffs – wählt man den »richtigen« Zeitpunkt aus – sich immerhin verdoppeln. »Nicht nur die richtige Menge der richtigen Substanz muss an das richtige Zielorgan gelangen, dies muss auch zur richtigen Zeit geschehen«, fasst Björn Lem-

mer das Leitmotiv der Chronotherapie zusammen.

Doch was ist der richtige Zeitpunkt? Leider liefern die Studien kein einheitliches Bild. Das verwundert nicht: Jeder Mensch ist anders, und mit ihm seine innere Uhr. »Die richtige Uhrzeit für eine Medikamentengabe gibt es nicht, weil die inneren Uhren von uns Menschen einfach unterschiedlich laufen«, sagt Achim Kramer. Während bei dem einen »morgens« auch wirklich innerlich »morgens« sei, treffe den anderen die »morgendliche« Tablette innerlich noch am Übergang zwischen Nacht und Tag an, so der Charité-Forscher weiter. Solche individuellen Chronotypen kennt wohl jeder auch aus seinem Alltag: »Eulen«, die erst abends richtig munter werden, und »Lerchen«, die sehr früh gut aus den Federn kommen. »Es gibt Frühtypen, Spättypen, Extremfälle und alles dazwischen«, sagt Achim Kramer. Und diese Verschiedenartigkeit dürfte eine hohe Hürde für Chronotherapeutika in der medizinischen Praxis werden.

Immerhin: Kramers Team hat kürzlich einen Bluttest entwickelt, mit dem die tatsächliche Innenzeit eines Menschen auf eine halbe Stunde genau gemessen werden kann. Nur wenn diese individuelle Innenzeit bekannt ist (die nicht mit der Wanduhr übereinstimmen muss), macht die Chronotherapie Sinn. »Jeder getimte therapeutische Eingriff sollte personalisiert sein«, sagt Kramer. Es sei also nicht nur wichtig zu wissen, wie die Rhythmen der durch Arzneistoffe anvisierten Moleküle im Körper abliefen. Für den Erfolg einer Behandlung muss zudem bekannt sein, in welcher persönlichen Zeitzone der Patient gerade steckt.

Und so werden jetzt weitere Methoden von Bluttests entwickelt, um die Innenzeit von Patienten zu messen – und immer weitere Anwendungsmöglichkeiten entdeckt. Zum Beispiel in der Krebsmedizin: Die Wirkung von Chemotherapeutika variiert im Tagesverlauf, wie eine Studie mit Frauen zeigt, die an Eierstockkrebs erkrankt waren. Gab man den Patientinnen die Medikamente Doxorubicin und Cisplatin nicht irgendwann, sondern immer um 6 Uhr oder um 18 Uhr, so waren sie besser verträglich und wirksamer. Womöglich ließen sich durch das Wissen um die tatsächliche Innenzeit die Heilungschancen noch steigern.

Wissenschaftliche Hinweise, die Uhrzeit als wichtigen Einflussfaktor einzubeziehen, gibt es unter anderem für die Behandlung von Allergien, für die Durchführung von Impfungen oder auch bei der Planung von Herz-OPs. »Möglicherweise wird eines Tages routinemäßig bei jeder Blutprobe die Innenzeit, der Chronotyp eines Menschen, mitbestimmt werden«, sagt Achim Kramer. Ein wichtiger Schritt wäre getan, wenn es bis dahin gelänge, wenigstens bei klinischen Studien auch dem »Wann« einer Maßnahme den gebührenden Platz einzuräumen. Noch hakt es hier: Trotz des ständig wachsenden Wissens um die Bedeutung der Tageszeit für den Erfolg einer Therapie werden chronobiologische Daten bisher selbst bei Studien kaum erfasst und beachtet. ↩

CARACTERDESIGN / GETTY IMAGES / ISTOCK (SYMBOLBILD MIT FOTOMODELL)

FORSCHUNGSSKANDALE IN DEUTSCHLAND

# **Macht und Machtmissbrauch** in der Wissenschaft

von Marc Scheloske

Manche Professoren sind exzellente Forscher, aber schwierige Chefs. Für die Führungsqualitäten ihrer Spitzenkräfte hat sich die Wissenschaft bislang nur wenig interessiert. Das rächt sich jetzt.

In diesem Frühjahr und Sommer sorgten gleich zwei Max-Planck-Institute für ähnliche Schlagzeilen. Allerdings ging es nicht um spannende Forschung, sondern um Mobbingvorwürfe. Mehrere Institutsmitarbeiter hatten sich an Journalisten gewandt und sich über eine desolate Arbeitsatmosphäre in ihrer Forschungsgruppe beklagt. Wie Berichte in »Science« und »Buzzfeed« dokumentieren, sollen die Wissenschaftler von Vorgesetzten unter Druck gesetzt und über Jahre hinweg schikaniert worden sein.

Vorwürfe gegen Spitzenforscher gab es in den vergangenen Jahren immer wieder. Oft ging es dabei um sexuelle Belästigung, und meist waren angelsächsische Forscher die Beschuldigten, etwa der New Yorker Paläoanthropologe Brian Richmond oder der Bostoner Antarktisgeologe David Marchant. Die diesjährigen Machtmissbrauchsvorwürfe sind anders gelagert: Sie richten sich gegen zwei wissenschaftliche Direktorinnen deutscher Max-Planck-Institute.

## Mobbing an Max-Planck-Instituten?

Die eine ist Guinevere Kauffmann vom Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA) in Garching. Ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter berichten unter anderem von diskriminierenden E-Mails und Demütigungen sowie von Drohungen, Arbeitsverträge nicht zu verlängern. Kauffmann selbst zeigt sich auf Anfrage von »Spektrum.de« wenig einsichtig und geht nicht im Detail auf die gegen sie erhobenen Vorwürfe ein. Stattdessen teilt sie mit, dass eine »journalistische Hexenjagd« auf wissenschaftlich begabte Frauen in Deutschland stattfinde. Eine Sichtweise, die man bizarr finden kann – schließlich standen bisher überwiegend Männer im Zentrum öffentlich gewordener Wissenschaftsskandale.

Die andere Max-Planck-Direktorin, der Mobbing und Machtmissbrauch vorgeworfen wird, ist Tania Singer vom MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig. Mit ihren Forschungsarbeiten zu den neuronalen und hormonellen Grundlagen von Empathie und Mitgefühl gilt Singer international als Koryphäe ihres Fachs. Doch im Umgang mit ihren Mitarbeitern soll es ihr an Einfühlungsvermögen gemangelt haben, berichteten mehrere Teammitglieder dem Wissenschaftsmagazin »Science«. Von einer Atmosphäre der Angst ist die Rede und davon, dass Mitarbeiter nach Gesprächen mit Singer wiederholt in Tränen ausbrachen.

»Die strukturelle Abhängigkeit ist in der Wissenschaft häufig sehr hoch, zuweilen herrschen fast ›feudalistische‹ Zustände«

[Christof Baitsch, Arbeitspsychologe]

»Oft ist es so, dass Führungskräfte ›moralisch blind‹ sind und gar nicht bewusst oder gezielt despotisch führen«

[Armin Pircher Verdorfer, TU München]

Auf Anfrage von »Spektrum.de« bezeichnet Tania Singer die Mobbingvorwürfe als »falsch und haltlos«. Sie räumt allerdings ein, dass es »in einzelnen Situationen inadäquate emotionale Kommunikation« gegeben habe und verweist auf »subjektive Wahrnehmungen ehemaliger Mitarbeiter«.

Die irritierenden Einblicke in die Welt der Spitzenforschung werfen Fragen auf: Wie konnte fragwürdiges Verhalten von führenden Wissenschaftlern über Jahre hinweg folgenlos bleiben? Wer hat davon wann gewusst, wer hat es wie lange geduldet? Und vor allem: Wie groß und weit reichend ist das Mobbingproblem innerhalb der Wissenschaft jenseits der nun publik gewordenen Einzelfälle?

Wenn man Betroffene anhört und mit Experten diskutiert, die das akademische Arbeitsklima erforschen, dann wird zunehmend klar, dass diese Fragen nur an der Oberfläche kratzen. Darunter liegen zwei andere, viel grundsätzlichere Fragen. Die eine lautet: Wie geht Wissenschaft mit Macht und Autorität um, wo und wie setzt sie Grenzen? Die andere: Wie löst Wissenschaft das Dilemma, dass wissenschaftliche Exzellenz nicht notwendigerweise mit menschlichen Qualitäten korreliert – und dass der enorme Konkurrenzdruck, unter dem die Forscher stehen, dieses Problem noch verschärft?

## Teufelskreis aus Angst, Wegschauen und Schweigen

Aber der Reihe nach. Wer mit Mitarbeitern der beiden Max-Planck-Institute spricht, der hört immer wieder drei Dinge: Erstens sei das Arbeitsklima in den meisten anderen Abteilungen der Institute in Ordnung. Zweitens sei das Verhalten von Kauffmann und Singer auch außerhalb der jeweiligen Arbeitsgruppe bekannt gewesen. Und drittens habe die Max-Planck-Gesellschaft zu spät und dann auch nur halbherzig reagiert.

Weitgehend unstrittig ist: Wenn die Max-Planck-Gesellschaft es hätte wissen wollen, so hätte sie es auch früher wissen können. Entsprechende Hinweise hat es immer wieder gegeben, allerdings fanden diese offenbar nicht den Weg bis nach München zur Max-Planck-Zentrale. Inzwischen räumt MPG-Chef Martin Stratmann ein, dass das Beschwerdesystem nicht optimal funktioniert hat; hier hat die Wissenschaftsorganisation bereits nachgebessert.

Damit sich solche Fälle nicht wiederholen, wurde außerdem eine Task-Force gegründet, an der auch Promovierende betei-

ligt sind. Jana Lasser ist Sprecherin des MPG-Doktoranden-Netzwerks PhDnet. Sie glaubt, dass ein langer Atem notwendig sei, um wirkliche Veränderungen zu erreichen. Dennoch gibt sie sich vorsichtig optimistisch. Vor allem seien die Promovierenden »froh, dass das Thema endlich angesprochen und breiter diskutiert wird«. Lösungsvorschläge hat das Doktorandennetzwerk vor wenigen Wochen in einem Positionspapier veröffentlicht.

Zur Aufklärung der aktuellen Fälle hat die Max-Planck-Gesellschaft eine externe Anwaltskanzlei eingeschaltet. Wenn es nach der Max-Planck-Spitze geht, soll künftig sogar ein Whistleblower-System eingerichtet werden. Das dürften Betroffene zweifellos begrüßen, denn die vorhandenen Anlaufstellen wie etwa Ombudspersonen oder Gleichstellungsbeauftragte werden nur selten eingeschaltet: Binnen der vergangenen sechs Jahre seien lediglich zwei Fälle auf diesem Weg gemeldet worden, heißt es in einem internen Schreiben aus dem April 2018, das »Spektrum.de« vorliegt. Ob dahinter schlichte Unkenntnis dieser Möglichkeit steckt oder ob von Mobbing betroffene Forscher Zweifel an der Vertraulichkeit haben, ist schwer zu beurteilen. Fest steht, dass sich die Betroffenen in den meisten Fällen eben nicht beschweren.

Der Hannoveraner Organisationspsychologe Jan Schilling ist darüber nicht sonderlich verwundert: »Im akademischen Kontext sind Machthierarchien oft besonders ausgeprägt, da die vorgesetzte Person für die eigene wissenschaftliche Karriere maßgeblich ist«, sagt er. Das führe dazu, dass Mitarbeitende das aus ihrer Sicht destruktive Verhalten akzeptierten und nicht dagegen vorgingen, um ihre Karriere nicht zu riskieren.

»Die fehlende Konfrontation begünstigt dann wiederum eine Ausweitung des problematischen Verhaltens der Führungsperson«, sagt Schilling. Es ist ein Teufelskreis: Die direkt Betroffenen sind aus Angst um die eigene Karriere wie gelähmt, erdulden die Demütigungen oder kündigen frustriert ihre Stelle. Und der Rest hält es mit den sprichwörtlichen drei Affen – nichts sehen, nichts hören, nichts sagen.

## Scharfe Sanktionen könnten Signalwirkung haben

Im Fall der Garchinger Astrophysikerin Guinevere Kauffmann reagierte die Max-Planck-Leitung bereits Ende 2016. Der renommierten Wissenschaftlerin wurde ein persönliches Coachingprogramm verordnet, gleichzeitig wurde die Größe ihrer Arbeitsgruppe stark reduziert. Die verfahrene Situation in Leipzig sollte hingegen 2017 ein Mediationsprozess bereinigen. Nachdem es nicht gelang, das angeknackste Verhältnis zwischen Tania Singer und ihren Mitarbeitern zu kitten, einigte man sich darauf, dass die Direktorin das Jahr 2018 als Sabbatical nutzt, um Abstand zu gewinnen. Im Januar 2019 soll die Wissenschaftlerin an ihr Institut zurückkehren. Allerdings sieht der Plan vor, dass sie zunächst von Berlin aus eine neue, ebenfalls deutlich verkleinerte Arbeitsgruppe aufbaut.

Ehemalige Mitarbeiter aus Leipzig nehmen das als Mogelpackung wahr. Singer werde »mit Samthandschuhen« angefasst, beschwert sich ein früheres Mitglied ihrer Arbeitsgruppe im Gespräch mit »Spektrum.de«. Die Max-Planck-Gesellschaft teilt auf Nachfrage mit, dass die »Maßnahmen absolut adäquat« seien. Pressesprecherin Christina Beck fügt jedoch hinzu: »Ob Machtmissbrauch aber in bestimmten Fällen gegebenenfalls stärker zu sanktionieren wäre, ist Gegenstand interner Diskussionen.«

GHOST WRITOR / MPI FÜR ASTROPHYSIK / CC BY 4.0 (CC BY)

**Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching**

Dass prinzipiell auch deutlich schärfere Sanktionen denkbar sind, zeigen Beispiele aus Übersee. Da ist zum Beispiel der Fall des berühmten US-Kosmologen Lawrence Krauss, dem im Frühjahr 2018 mehrere Frauen sexuelle Belästigung vorgeworfen haben. Nach einer Untersuchung empfahl der Dekan von Krauss‹ Universität, den Physiker zu entlassen. Vergangene Woche hat Krauss nun den Rückzug von seiner Professur angekündigt. Er bestreitet die Vorwürfe bis heute.

Auch der Fall der hochdekorierten britischen Genetikerin Nazneen Rahman ist ein Beispiel für konsequenteres Vorgehen. Gegen die Professorin am Krebsforschungszentrum der University of London waren Ende 2017 Mobbingvorwürfe laut geworden. Nachdem sich der Verdacht erhärtete, zog der britische Wellcome Trust vor wenigen Wochen eine Förderzusage in Höhe von 3,5 Millionen Britischen Pfund zurück. Der Wellcome Trust, der jährlich mehr als 1,1 Milliarden Euro vornehmlich für die biomedizinische Grundlagenforschung ausschüttet, hatte erst im Mai 2018 seine Förderrichtlinien um eine Null-Toleranz-Passage im Hinblick auf Mobbing und Machtmissbrauch ergänzt.

Solch eine klare Haltung wünscht sich mancher betroffene Wissenschaftler auch hier zu Lande, etwa das ehemalige Arbeitsgruppenmitglied des Leipziger Max-Planck-Instituts, das »Spektrum.de« von seinem Fall erzählt hat. Es sei ein wichtiges Signal, wenn jene Professoren, die Untergebene ausbeuten und schikanieren, die Streichung von Fördergeldern

oder handfeste disziplinarische Maßnahmen befürchten müssten.

## Die Rahmenbedingungen begünstigen Mobbing und Machtmissbrauch

Das Problem des Machtmissbrauchs wird man durch die Androhung von Strafen jedoch wohl nicht lösen. »Die strukturelle Abhängigkeit ist in der Wissenschaft häufig sehr hoch, zuweilen herrschen fast ›feudalistische‹ Zustände«, sagt der Arbeitspsychologe Christof Baitsch, der auf jahrzehntelange Erfahrung als Berater von Firmen und Forschungseinrichtungen zurückblickt. Er macht außerdem prekäre Arbeitsverhältnisse für die Probleme verantwortlich sowie die Tatsache, »dass Entscheidungszuständigkeit über die Fortsetzung von Verträgen häufig beim unmittelbaren Vorgesetzten liegt«.

So sieht es auch Jana Lasser, die derzeit am MPI in Göttingen promoviert. »Schuld ist die Art und Weise, wie wir in Deutschland und vielfach auch global Wissenschaft organisieren. Die Wurzel des Problems sind steile Hierarchien und Mehrfachabhängigkeiten von Nachwuchswissenschaftler_innen von einzelnen Professor_innen.« Tatsächlich sind in kaum einem anderen Bereich der Arbeitswelt die Machtverhältnisse so asymmetrisch wie in der Wissenschaft: Auf der einen Seite stehen befristet beschäftigte Doktoranden, deren Status oft durch und durch prekär ist. Auf der anderen Seite Professoren, denen das Wissenschaftssystem maximale Freiheiten und Macht garantiert und von deren Wohlwollen ihre Mitarbeiter fachlich und ökonomisch abhängig sind.

Insofern ist es nicht weiter verwunderlich, dass zahlreiche Studien der Wissenschaft ein Mobbingproblem bescheinigen. In Großbritannien berichten – die Werte variieren von Studie zu Studie – zwischen 10 und 20 Prozent der Arbeitnehmer in der freien Wirtschaft über Mobbingerfahrungen. Im akademischen Bereich sind es doppelt so viele, die Werte schwanken zwischen 18 und 42 Prozent. Die Zahlen für Deutschland dürften – so die Meinung von Experten – ähnlich sein.

Armin Pircher Verdorfer vom Lehrstuhl für Forschungs- und Wissenschaftsmanagement an der TU München stellt fest: »Die Krux ist: Destruktives Führungsverhalten kann kurzfristig mitunter ›Erfolge‹ verbuchen, gerade auch in der Wissenschaft.« Wenn man motivierte Nachwuchswissenschaftler bei Projekten gegeneinander ausspiele, sie unter Druck setze oder mit falschen Versprechungen locke, könne das kurzfristig zu noch mehr Arbeitsleistung und Output führen. »Langfristig hat das für die Betroffenen aber oft verheerende Folgen. Umso problematischer ist es dann, wenn Verantwortliche mit so einem Mindset auf immer neue Leute zurückgreifen können, die sie sprichwörtlich ›verheizen‹.«

## Alarmierende Studien zur psychischen Belastung

Besonders davon betroffen sind Doktorandinnen und Doktoranden. Wenn während der ohnehin schwierigen Promotionsphase auch noch Konflikte mit dem Betreuer dazukommen, kann aus dem Traum von der Arbeit in der Wissenschaft leicht ein Albtraum werden. Eine aktuelle Befragung an Instituten der Helmholtz-Gemeinschaft ergab, dass ein Drittel der Promovierenden überlegt, die Doktorarbeit abzubrechen. Für 43 Prozent sind Konflikte mit dem Betreuer der Hauptgrund für diese Überlegungen.

Wie gravierend die psychische Belastung während der Promotion ist, haben bereits mehrere Untersuchungen gezeigt.

DIRK GOLDHAHN / MPI KOGNITIONS UND NEUROWISSENSCHAFTEN, LEIPZIG / CC BY-SA 3.0 (CC BY-SA)

**Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig**

Von knapp 2300 Teilnehmern einer internationalen Befragung aus dem Jahr 2017 klagten fast die Hälfte über Angststörungen oder Depressionen. Daran sind freilich nicht immer Doktorväter und -mütter schuld. Das Betreuungsverhältnis ist nur ein Faktor neben anderen.

Tatsächlich weisen weitere Untersuchen darauf hin, dass es am Führungsstil der meisten Professoren wenig auszusetzen gibt. Entsprechende Studien sind zwar recht selten, aber es gibt sie. Und aus ihnen lässt sich eine Tendenz ablesen: Rund 70 Prozent der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind den Erhebungen zufolge insgesamt zufrieden und attestieren ihren Chefs einen »kooperativen« Umgang.

Doch was ist mit dem unzufriedenen verbleibenden Drittel? Die Forscherinnen und Forscher lamentieren aus ganz unterschiedlichen Gründen, legen die Studien nahe. Die einen beschweren sich über zu wenig, die anderen über zu viel Führung. Im einen Fall sind es Vorgesetzte, die von ihren Mitarbeitern meistens passiv, manchmal fast desinteressiert erlebt werden. Experten bezeichnen das Phänomen als Laissez-faire-Führung. Im anderen Fall sind es hochgradig autoritäre Chefs, die ihren Mitarbeitern das Leben schwermachen. Unter diesen leiden insgesamt 15 Prozent des akademischen Personals.

Erfreulich ist, dass immerhin 70 Prozent der Professorinnen und Professoren auch in Sachen Mitarbeiterführung offenbar einen guten Job machen. Und selbst die 15 Prozent, die – ganz egal ob aus Überzeugung oder Hilflosigkeit – den Dingen ihren Lauf und ihren Lehrstuhl den Kräften der Selbstorganisation überlassen, können viele akademische Mitarbeiter sicherlich gut verkraften. Dass aber 15 Prozent aller wissenschaftlichen Führungskräfte hochgradig autoritär agieren, manche davon ihre Mitarbeiter manipulieren und schikanieren, dürfte nicht nur aus Sicht von Betroffenen ein Problem sein.

## Wissenschaftler werden nicht auf ihre Führungsaufgaben vorbereitet

»Negative Führung ist sicher nicht die Regel, gleichwohl ist es eine Art ›low-incidence/high-severity‹-Phänomen. Da, wo es vorkommt, kann der Schaden für die Be-

troffenen, aber auch für die Organisation enorm sein«, bestätigt der Psychologe Armin Pircher Verdorfer, der selbst zu Fragen der Führungsethik forscht. »Oft ist es so, dass Führungskräfte ›moralisch blind‹ sind und gar nicht bewusst oder gezielt despotisch führen. Man ist selbst ›hart‹ sozialisiert worden, steht zudem selbst unter hohem Druck, Ergebnisse zu produzieren, und hat wenig Zeit, sich mit sich selbst und den Mitarbeitern vernünftig auseinanderzusetzen.«

Da ist es also wieder, das Dilemma der akademischen Rekrutierungspraxis. »Die Auswahlkriterien sind am wissenschaftlichen Erfolg ausgerichtet, und der wird nachgewiesen über Indikatoren, die mit Personalführung nichts zu tun haben«, bringt es der Arbeitspsychologe Christof Baitsch auf den Punkt. So trivial diese Erkenntnis ist, so ernüchternd ist es, dass daraus bis heute nur sehr zögerlich Konsequenzen folgen.

Denn an den Defiziten in Sachen Führungskompetenz ließe sich, daran haben Experten keinen Zweifel, durchaus etwas ändern. Nämlich mit Schulungen und Coachings. »Mittlerweile gibt es zahlreiche Studien, die die Wirksamkeit solcher Maßnahmen für den Erfolg von Arbeitsgruppen belegen«, sagt Armin Pircher Verdorfer, der seit Jahren auch als Weiterbildungsdozent an der TU München tätig ist.

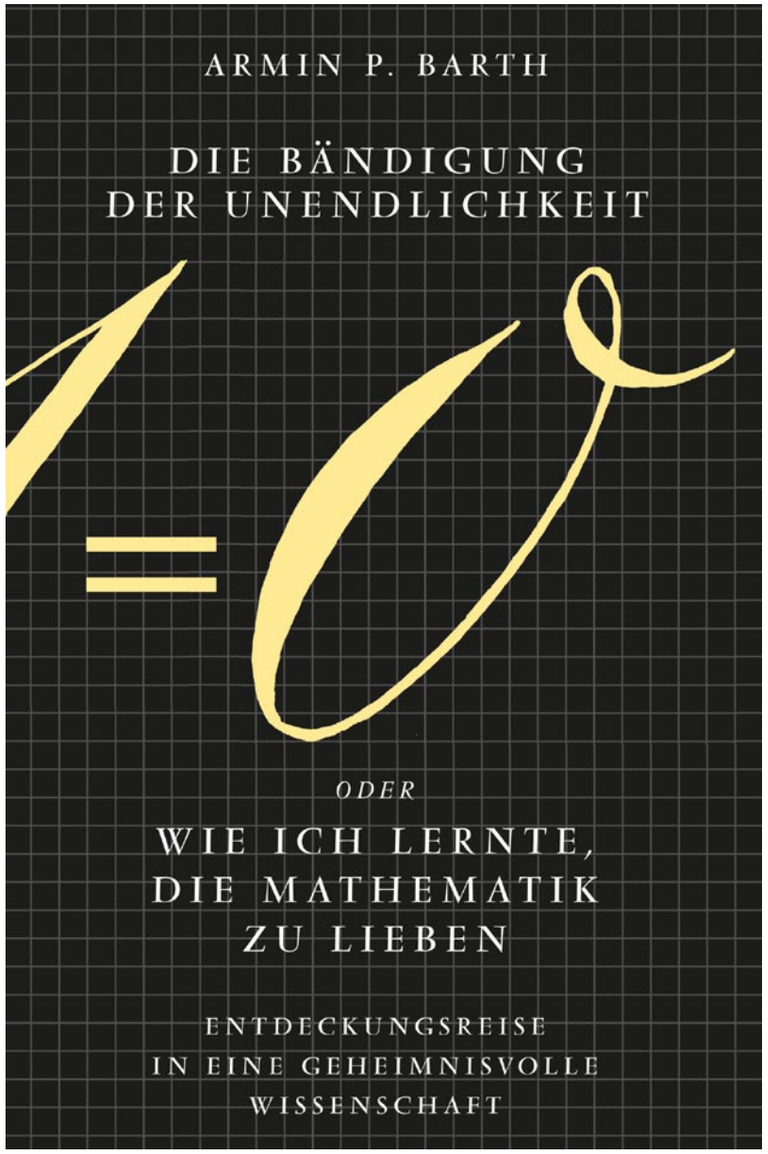
Was Coachings mit Blick auf genuin destruktives Führen angehe: Die könnten sehr sinnvoll sein, meint Pircher Verdorfer. »Weil es dort genau darum geht, innezuhalten, sich seine eigenen Werte und sein eigenes Verhalten und dessen Konsequenzen bewusst zu machen.« Das sieht auch die in der Kritik stehende Tania Singer so und teilt mit: »Ich denke, Führungskräfte können von Coaching nur profitieren.«

Bis solche Angebote in der deutschen Wissenschaft flächendeckend etabliert sind, wird es allem Anschein nach aber noch einige Zeit dauern. An manchen Unis sind entsprechende Schulungsangebote schon seit einigen Jahren obligatorisch, an anderen hat man noch nicht einmal den Bedarf erkannt. Die Max-Planck-Gesellschaft teilt mit, man sei momentan dabei, das Thema »Führungs-Knowhow weiter auszubauen und systematisch in den Onboarding-Prozess für neue Direktoren zu integrieren«.

Das klingt gut und wirkt so, als habe ein Lerneffekt eingesetzt. Anders zum Beispiel bei der Leibniz-Gemeinschaft: Hier gibt es derzeit überhaupt keine dezidierten Angebote zur Schulung von Führungskompetenz. Zwar bietet die Forschungsorganisation so genannte »Führungskollegs« an, hier geht es aber laut einer Sprecherin vor allem um den Erfahrungsaustausch von Professorinnen und Professoren – was einen guten Gruppenleiter ausmacht, bekommen die Wissenschaftler dort nicht vermittelt.

So liefert der Versuch einer Auseinandersetzung mit Macht, Machtmissbrauch und Mobbing in der (deutschen) Wissenschaft ein einigermaßen disparates Bild. Ja, der Großteil der akademischen Mitarbeiter hat wenig Grund zur Klage, denn die meisten Professoren sind in der Regel auch gute Chefs.

Dennoch gibt es Ausnahmen von dieser Regel: hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, denen soziale Kompetenz nicht in die Wiege gelegt wurde. Unter den strukturellen Rahmenbedingungen der akademischen Arbeitswelt, geprägt von Publikationsdruck, steilen Hierarchien und enormer Machtfülle von Professoren, wird das zwangsläufig zum Problem. Die Wissenschaft täte gut daran, ihm zu begegnen. ↩




Armin Barth
**Die Bändigung der Unendlichkeit**

Verlag: Edition Zeitblende,
München 2018
ISBN: 9783038000242
42,00 €
bei Amazon.de kaufen

REZENSION

# Nüchternheit und Ästhetik

von Heinz Klaus Strick

Der Autor unterrichtet seit mehr als 30 Jahren Mathematik an einem Schweizer Gymnasium und ist seit längerer Zeit als Fachdidaktik-Dozent für Mathematik an der ETH Zürich tätig. Zehn Jahre lang versuchte er zudem, mit monatlichen Beiträgen in verschiedenen Schweizer Zeitungen sein Publikum für Mathematik zu interessieren; eine Sammlung jener Artikel lässt sich auf seiner Homepage einsehen. Diese Expertise und dieses Anliegen des Autors spürt man in dem Buch, dessen 13 Kapitel einige Themen aufgreifen, mit denen sich Barth bereits in seinen Zeitungsbeiträgen beschäftigt hat.

Dem Ziel der Reihe »Edition Zeitblende«, »schön gestaltete, gut gedruckte Bücher« zu veröffentlichen, wird das Werk durchaus gerecht. Ungewöhnlich ist das Format mit zirka 18 mal 29 Zentimetern, aber auch die grafische Gestaltung. Die zahlreichen handschriftlichen Zahlenreihen, etwa die ersten 700 Ziffern der Wurzel aus zwei zeigend, die übergroß notierten Gleichungen und die Grafiken sind interessante »Hingucker«. Zeichnungen, die professionell vom Grafikdesigner Helmut Brade angefertigt wurden, vermitteln beim ersten Hinschauen den Eindruck, als habe jemand Skizzen zu den behandelten Themen angefertigt, so wie es die Leser vielleicht auch selbst gemacht hätte. Man erfährt nicht, ob dies die Absicht der Herausgeber war – es gibt weder ein Vor- noch ein Nachwort. An der Professionalität der grafischen Gestaltung besteht kein Zweifel, nur manches Mal hätten zusätzliche schlichtere Darstellungen, die nicht wie bloße Skizzen wirken, das Verständnis besser unterstützt.

## Aha-Moment mit Gödel

Auf den jeweils letzten Seiten eines Kapitels finden sich Aufgaben, die der Autor zur weiteren Beschäftigung gestellt hat. Erfreulicherweise kann man in einem beigefügten Heftchen deren Lösungen nachlesen. Die leeren Seiten mit Rechenkästchen zwischen den Kapiteln werden wahrscheinlich nur wenige für eigene Notizen nutzen. Am Ende

des Buchs steht leider nur ein Namensregister (tatsächlich nennt der Autor ziemlich viele Personen) –, Stichwortverzeichnis und Literaturhinweise sucht man vergebens. Es empfiehlt sich, bei der Lektüre die Reihenfolge der Kapitel beizubehalten, denn immer wieder greift Barth auf Darstellungen aus vorangehenden Abschnitten zurück.

Zunächst widmet sich der Autor der Frage, was Mathematik eigentlich ist, wie sie entstanden ist, was sie ausmacht, ob sie nützlich ist und schön. Einen Aspekt dieser Ästhetik führt er auf, indem er auf seinen persönlich größten Aha-Moment verweist, in dem er zum ersten Mal den Beweis der gödelschen Unvollständigkeitssätze verstanden hatte. Für Barth war das ein »Erlebnis reinster und unübertrefflicher Schönheit«. Auf die gödelschen Sätze, an denen die Grenzen der mathematischen Erkenntnisgewinnung deutlich werden, geht er später noch überzeugend ein.

In mehreren Abschnitten greift Barth ausgewählte Themen der Mathematikgeschichte auf, etwa die Frage, wie der Übergang von natürlichen Zahlen und Brüchen zu den irrationalen Zahlen gelang und was Abzählbarkeit von unendlichen Mengen bedeutet (mit einem Exkurs in die cantorschen Verfahren). Das siebte Kapitel trägt den witzig gemeinten Titel »Matratzen-Mathematik«, was auf die kleinsche Vierergruppe der Bewegungen verweist, durch die man eine Matratze in ihre vier möglichen Lagen bringen kann. Der Autor erzählt hier spannend von der Suche danach, wie sich Gleichungen dritten Grades lösen lassen. Er geht auch auf die Geschichte des tragischen Tods von Evariste Galois ein. Dieser hatte als Erster erkannt, dass es gruppentheoretischer Überlegungen bedarf, um die Frage nach der Lösbarkeit von Gleichungen höheren als vierten Grades zu beantworten.

Anhand alltäglicher Situationen verdeutlicht Barth, auf welch vielfältige Weise technisch-wissenschaftliche Verfahren, die auf mathematischen Methoden beruhen, unseren Alltag prägen. Hierzu zählen das Einscannen von Produkten mit GTIN-Code; Bezahlvorgänge mit EC-Karten; Wetter-Apps; GPS-Navigation und vieles mehr – bis hin zur Computertomografie. Auch die Bedeutung der Graphentheorie für die heutige Logistik greift der Autor auf, wobei er sie nur andeuten kann. Die beiden Probleme, die er hier aufführt, lassen sich wohl eher der Unterhaltungsmathematik zurechnen: das klassische Alkuin-Problem eines Fährmanns, der Ziege, Wolf und Kohlkopf über einen Fluss bringen soll; sowie die Lösung des Spiels »Instant Insanity«. Mathematische Probleme in Kinofilmen, vom »da Vinci-Code« bis »A Beautiful Mind«, sind ebenfalls Thema.

Die Frage, was einen Beweis ausmacht und was man unter der »axiomatischen Methode« versteht, behandelt der Autor ziemlich am Ende seines Werks. Dort hat er auch acht mathematische Probleme zusammengetragen, deren Lösungen er auf sehr verschiedene Weise ausführt, wobei er diverse Strategien überzeugend vorstellt und dabei beantwortet, was mathematische Argumentation und Beweisführung ausmacht.

Insgesamt ein lesenswertes Buch, das sich für alle an Mathematik interessierten Leserinnen und Leser eignet. Man merkt dem gut lesbaren Stil an, dass der Autor jahrzehntelange Erfahrung im Vermitteln mathematischer Inhalte hat. Vermutlich konnte er nur einen Teil seines Erfahrungsschatzes auf den rund 200 Seiten unterbringen. Auf eine Fortsetzung darf man gespannt sein. ↩

Der Rezensent ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

# Die Wurst-katastrophe der Mathematik

Wer ihr entgehen will, muss in mehrdimensionale Räume flüchten. Oder? Das ist noch nicht ganz klar, solange die Wurstvermutung unbewiesen bleibt.

FREISTETTERS **FORMELWELT**

FRANZISKA SCHÄDEL / FLORIAN FREISTETTER / CC BY-SA 4.0

Wenn in der Mathematik von »Würsten« gesprochen wird, redet man im Allgemeinen nicht von Nahrungsmitteln, sondern beschäftigt sich mit der Theorie endlicher Kugelpackungen. Es geht dabei um die Frage, wie man eine endliche Anzahl gleich großer Kugeln möglichst platzsparend verpacken kann. Das Problem lässt sich leicht veranschaulichen. Dazu kann man sich etwa ein paar Tennisbälle vorstellen: Wie muss man diese anordnen, damit das Volumen der Hülle, in die sie verpackt werden, möglichst gering wird?

Echte Tennisbälle werden normalerweise hintereinander in einer Reihe positioniert und in röhrenförmigen Dosen verpackt. Diese Anordnung ist eine Annäherung an das, was in der Mathematik als »Wurstpackung« bezeichnet wird. Sie erhält man, wenn die Mittelpunkte aller Kugeln auf einer geraden Linie liegen. Die minimale Hülle um sie herum ähnelt dann einer Wurst, weswegen der ungarische Mathematiker László Fejes Tóth dafür den entsprechenden Ausdruck geprägt hat. Von Tóth stammt auch die »Wurstvermutung«:

$$V^d\left(S_k + B^d\right) \leq V^d\left(C_k + B^d\right) \text{ für } d \geq 5$$

Diese Formel beschreibt Bälle (B) nicht nur in drei, sondern auch in mehr Dimensionen (d). Das Konzept bleibt dabei gleich: Eine d-dimensionale Kugel ist die Menge aller Punkte in einem d-dimensionalen Raum, die den gleichen Abstand von einem Mittelpunkt haben. Tóths Vermutung beschäftigt sich nun mit dem Volumen $V^d$ der Packung und besagt, dass in Räumen mit mehr als vier Dimensionen die Wurstpackung immer die beste ist, gleich wie viele Kugeln man betrachtet.

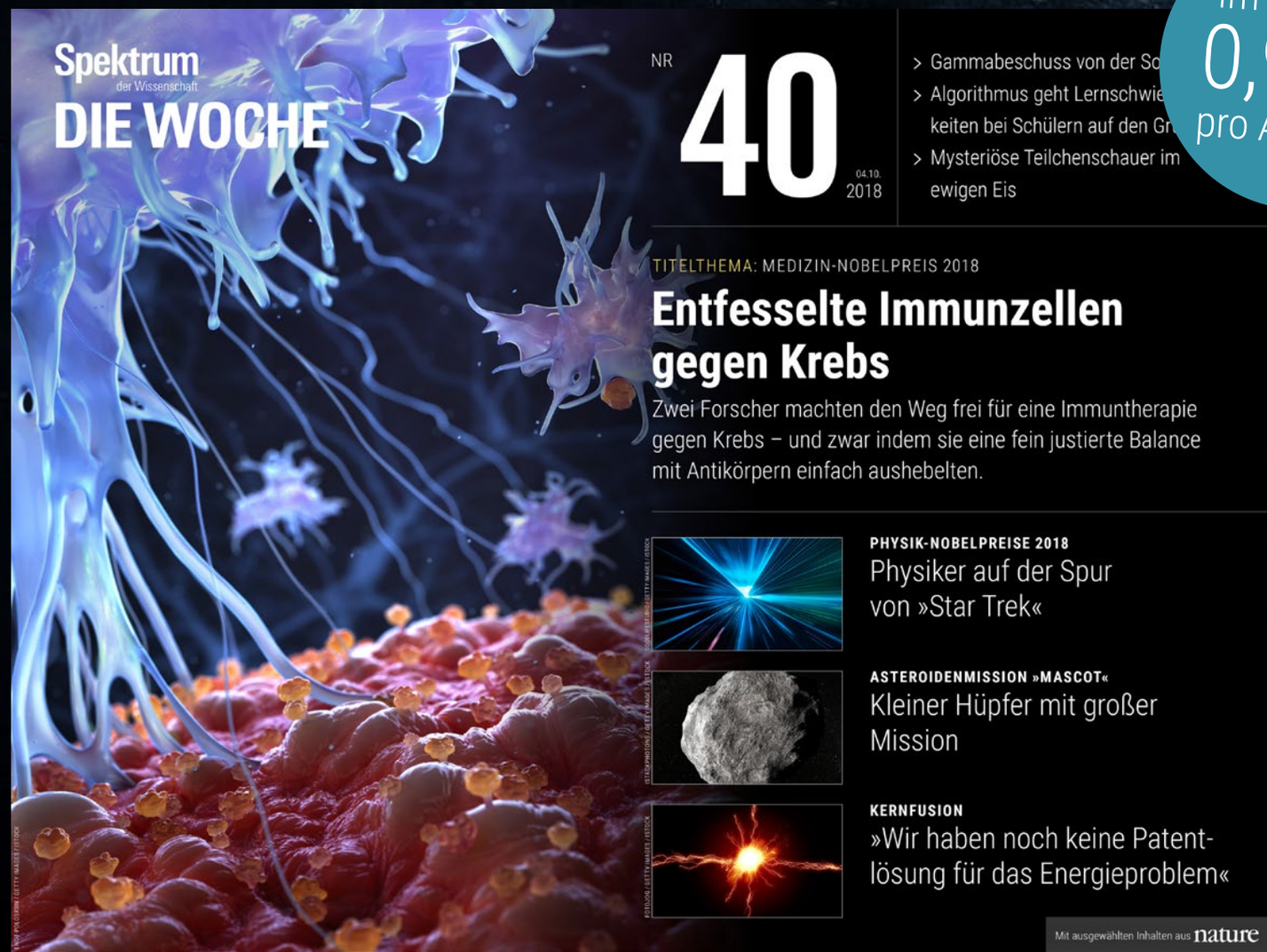
In drei Dimensionen ist das nicht so. Hier wissen wir, dass für drei und vier Kugeln die Wurstpackung tatsächlich optimal ist. Auch für mehr Kugeln sollte das so sein, doch das ist noch nicht einwandfrei bewiesen. Bei 56 Kugeln dagegen ist eine Cluster-Packung definitiv besser, also eine Anordnung, bei der die Kugeln nicht in einer Linie und auch nicht alle in einer Ebene liegen (wie diese Packung im Detail aussieht, ist allerdings unbekannt). Die Überlegenheit der Cluster-Packung konnte für andere einzelne Werte der Kugelanzahl ebenso bewiesen werden, aber eine allgemeine Regel kennt man nicht.

Auf jeden Fall kann man in drei Dimensionen ein seltsames Verhalten erkennen. Die Packungsform ändert sich schlagartig von der relativ geordneten Wurstpackung zur ungeordneten Clusterpackung, ohne dass man bis jetzt weiß, warum das so ist. In vierdimensionalen Räumen tritt der Wechsel von der Wurst zum Cluster spätestens bei 375 370 Kugeln ein. Dieses unerwartete und unverstandene Verhalten wird als »Wurstkatastrophe« bezeichnet.

Sollte Tóth mit seiner 1975 aufgestellten Vermutung Recht haben, dann wäre bewiesen, dass diese Katastrophe in Räumen mit mehr als vier Dimensionen nicht auftreten kann, da dort die Wurstpackung immer optimal ist. Ulrich Betke und Martin Henk konnten 1998 immerhin beweisen, dass die Wurstvermutung für alle Dimensionen größer als 41 korrekt ist. In einem 42-dimensionalen Raum ist man also auf jeden Fall sicher vor der Wurstkatastrophe. Neben Wurst- und Clusterpackungen haben

die Mathematiker übrigens eine weitere gastronomische Metapher auf Lager: Ordnet man die Kugeln so an, dass ihre Mittelpunkte nicht auf einer geraden Linie, sondern – vergleichbar mit Pralinen in einer Schachtel – alle in einer Ebene liegen, dann spricht man von einer »Pizzapackung«. Mit der Wurst kann die Pizza allerdings nicht mithalten: Zumindest in allen Dimensionen kleiner als 11 ist die optimale Packung immer eine Wurst oder ein Cluster, aber niemals eine Pizza. ↩

LENAWURM / GETTY IMAGES / ISTOCK




Im Abo nur 0,92 € pro Ausgabe

Jetzt bestellen!

**Das wöchentliche Wissenschaftsmagazin**

als Kombipaket im Abo:
Als App und PDF

HIER ABONNIEREN!

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 €.

UNSPLASH / GRAFIXART_PHOTO (HTTPS://UNSPLASH.COM/PHOTOS/57CHNZGJWK0); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT