

Spektrum

der Wissenschaft

Neuer Blick auf die Quantenwelt

Was spielt sich im Mikrokosmos wirklich ab?



8,90 € (D/A/L) - 14,- sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

VERHALTENSFORSCHUNG Die geheimen Gesetze der Tierkämpfe

PLASTIKMÜLL Wie lässt er sich wiederverwerten?

REPRODUZIERBARKEIT Revolution in der biomedizinischen Forschung



Unsere Neuerscheinungen!



Entwicklung: Wie Kinder das Sprechen lernen • Medizin: Scurrile Ausfälle durch Hirnschäden • Technik: Stimmen aus dem Computer • € 8,90



Zeitkristalle: Seltsame Ordnung in einer anderen Dimension • Supraleitung: Vorstoß zur Raumtemperatur • Quantengravitation: Widersprüche am Rand Schwarzer Löcher • € 8,90



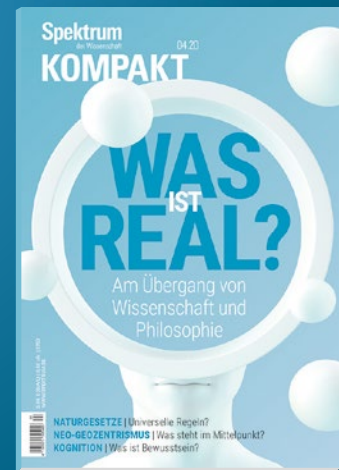
Ersatzteile für den Körper • So funktioniert ein Hirnscanner • Wie Tiere die Welt sehen • Die Kartierung des Gehirns • Sieben übermenschliche Sinne • Der Energiehunger des Gehirns • € 8,90



Psychiatrie: Kritik an den Diagnosekategorien • Erfüllung: Worin wir Sinn finden • Sex im Alter: Von wegen Ruhestand • € 5,90



Erste Pandemie: Als vor 5000 Jahren Europas Bevölkerung schwand • Kumpelmumie: Wie ein toter Bergmann die deutschen Romantiker verückte • El Argar: Archäologen graben das iberische Troja aus • € 5,90



Naturgesetze: Universelle Regeln? • Neo-Geozentrismus: Was steht im Mittelpunkt? • Kognition: Was ist Bewusstsein? • € 5,90

Hier bestellen:

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/shop



EDITORIAL EIN LOB DER SKEPSIS

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

► Meine eigene wissenschaftliche Laufbahn als Biochemiker war sehr kurz. Im Verlauf der Promotion wurde mir zunehmend klar, dass die aktive Forschung nichts für mich ist, auch wenn mich die Inhalte sehr interessierten. Daher orientierte ich mich danach um und begann meine Tätigkeit als Redakteur, die mir bis heute viel Freude bereitet.

Aber warum bekam ich damals eigentlich das Gefühl, im Labor fehl am Platz zu sein? Unter anderem schiebe ich es auf meinen Eindruck, aus den Beobachtungen nicht die gleichen Schlüsse zu ziehen wie der Leiter oder andere Doktoranden der Arbeitsgruppe. Generell tendierte ich zu einer skeptischen Einstellung und war nicht leicht davon zu überzeugen, dass es sich bei den Ergebnissen tatsächlich um belastbare Daten handelt. So glaubten die Kollegen in meinen genetisch veränderten Zellkulturen »ganz offensichtliche« Veränderungen zu erkennen, die sich für mich noch im Rahmen der normalen Variation befanden. Einmal sagte mein Betreuer halb verzweifelt, halb amüsiert, er habe den Eindruck, ich wolle überhaupt kein (positives) Ergebnis haben, da ich immer wieder mit Gegenargumenten käme.

Ulrich Dirnagl würde vielleicht eher von angemessener Vorsicht sprechen. Der Autor unseres Beitrags ab S. 38 ist Direktor des 2017 gegründeten Berliner QUEST Centers. Dieses hat sich dem Ziel verschrieben, die Qualität biomedizinischer Forschung zu verbessern. Ein wichtiger Punkt ist dabei, den auf Forschern lastenden Druck zu verringern, für ihre Karriere möglichst viele Publikationen in angesehenen Fachjournals unterzubringen. Das bringt nämlich die Versuchung mit sich, nur positive Ergebnisse zu berücksichtigen und unpassende Daten gelegentlich mal unter den Tisch fallen zu lassen, weil damit die Chancen der Veröffentlichung steigen. Diese »verborgene analytische Flexibilität«, wie Dirnagl das nennt, führt mit dazu, dass sehr viele Studien sich nicht reproduzieren lassen, also letztlich wertlose Ergebnisse liefern.

Das ist ein drängendes Problem, gerade heute im Zeitalter »alternativer Fakten«, in dem der empirische Zugang der Wissenschaft zu entscheidenden Herausforderungen, etwa zur Covid-19-Pandemie oder zum Klimawandel, zunehmend in Frage gestellt wird. Mehr denn je braucht es seriöse, sich selbst hinterfragende – eben skeptische – Forscher, die als allgemein akzeptierte Instanz solide Leitlinien für persönliches wie politisches Handeln in schwierigen Bereichen liefern können.

Herzlich Ihr



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum SPEZIAL** Physik – Mathematik – Technik 3.20 nimmt Sie mit auf einen Spaziergang zu den Grenzen der bekannten Physik – und darüber hinaus.

IN DIESER AUSGABE



KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE

AXEL LOEWE

Der Informationstechniker entwickelt Computermodelle, die Organe simulieren – um etwa Wirkstoffe virtuell zu testen und Patienten so zu entlasten (S. 44).



JEHS LEHRKÜCHER, UNIVERSITÄT
BRUNNEN WISSENSCHAFTLICHE

HENRY C. WU

Wie Korallen Daten über die Umweltbedingungen liefern, denen sie über viele Jahrhunderte ausgesetzt waren, erklärt der Paläoklimaforscher im Interview ab S. 56.



LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY



LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY

WILLIAM CHARLES LOUIS, RICHARD G. VAN DE WATER

Seit 25 Jahren suchen die beiden US-Physiker nach einer hypothetischen vierten Variante des Neutrinos. Ab S. 70 beschreiben sie, wie sie die Frage nach der Existenz der flüchtigen Partikel ein für alle Mal beantworten wollen.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

22 FORSCHUNG AKTUELL

Harte Fakten für weiche Eier

Hatten manche Dinosaurier weichschalige Gelege?

Fortschritte bei Folgen

Ein Rätsel über arithmetische Muster ist zum Teil geknackt.

Wie Stadtgase zu Feinstaub kondensieren

Eine mögliche Erklärung, warum es im Winter mehr Schwebstoffteilchen gibt.

Pauli-Kristalle

Quantenprinzipien erzeugen eine exotische Atomstruktur.

31 SPRINGERS EINWÜRFE

Selbstkontrolle mit kleinen Fehlern

Was, wenn Gutachtern einer Facharbeit etwas entgeht?

69 FREISTETTERS FORMELWELT

Warum die Erde keinen Ring hat

Monde sollten ihren Planeten nicht zu nahe kommen.

78 SCHLICHTING!

Dünen halten Abstand

Sandhügel beschleunigen einander durch Strömungen.

80 ZEITREISE

88 REZENSIONEN

95 LESERBRIEFE

95 IMPRESSUM

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

12 TITELTHEMA **EINE KLASSISCHE QUANTENWELT**

Die alternative De-Broglie-Bohm-Theorie liefert die gleichen Vorhersagen wie die Quantenmechanik, könnte aber spannende neue Erkenntnisse bringen.

Von Ward Struyve

32 VERHALTENSFORSCHUNG **TIERISCHER WETTSTREIT**

Bei Revierkämpfen schätzen Tiere die Kraft ihres Gegners ein – so glaubten Wissenschaftler lange. Aber oft läuft das ganz anders ab.

Von Gareth Arnott und Robert W. Elwood

38 METAFORSCHUNG **KULTURWANDEL IN DER BIOMEDIZIN**

Biomedizinische Studien haben sich oft als methodisch unzuverlässig herausgestellt, was ihre Ergebnisse anfechtbar macht. Viele Forscher sehen das Fach in der Krise.

Von Ulrich Dirnagl

44 MEDIZIN **EIN DIGITALES HERZ**

Simulierte menschliche Organe sollen Tests von Wirkstoffen und Therapien gestatten, bevor diese bei Patienten zum Einsatz kommen.

Von Axel Loewe

50 PALÄOKLIMA **CHRONISTEN DER ERDGESCHICHTE**

Serie: Klimawandel (Teil 2) Das Klima der Vergangenheit hat in zahlreichen natürlichen Archiven Spuren hinterlassen.

Von Tim Kalvelage

56 INTERVIEW **KORALLEN ALS KLIMATAGEBUCH**

Der Geologe Henry C. Wu erklärt, wie Korallen Informationen zu den Umweltbedingungen liefern, unter denen sie über Jahrhunderte gewachsen sind.

58 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
ÖLFILME BESEITIGEN MIT GRAPHEN

Mit Hilfe eines Graphenschwamms kann man zuverlässig Öl von einer Wasseroberfläche absaugen.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

62 PLASTIKMÜLL **ZURÜCK IN DEN KREISLAUF**

Serie: Kunststoffe heute und morgen (Teil 2) Chemische Verfahren sollen aus Abfällen wieder Rohstoffe erzeugen.

Von Tamara Worzewski

70 PHYSIK **DAS FLÜCHTIGSTE ALLER TEILCHEN**

Gibt es eine vierte »sterile« Variante der Neutrinos? Neue Experimente könnten die Frage bald beantworten.

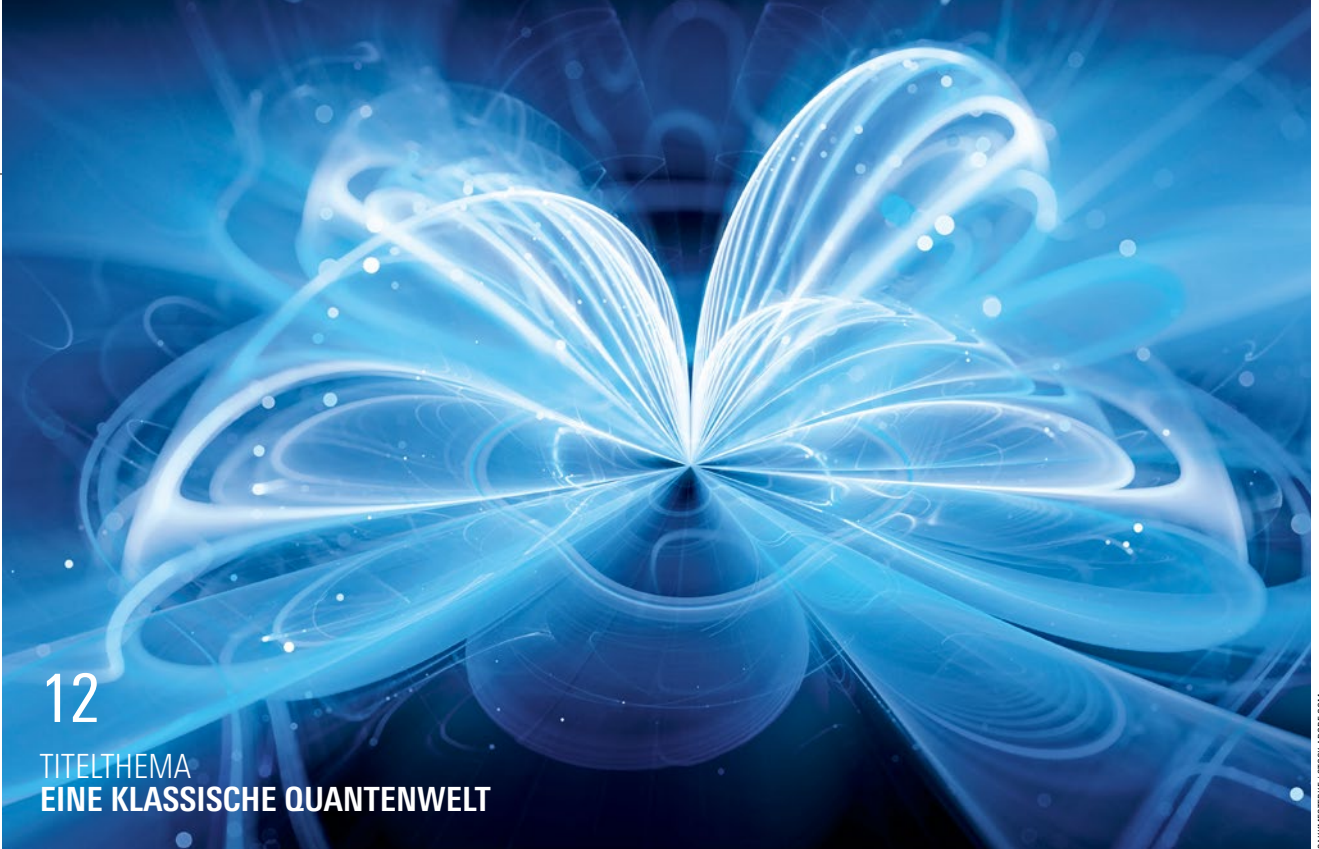
Von William Charles Louis und Richard G. Van de Water

82 KÜNSTLICHE INTELLIGENZ **3-D-BRILLE FÜR DEN COMPUTER**

Algorithmen lernen, Muster in mehr als zwei Dimensionen zu erfassen.

Von John Pavlus

TITELBILD:
ANDREUSK / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA
EINE KLASSISCHE QUANTENWELT

SKAMMSTERKE / STOCK.ADBE.COM

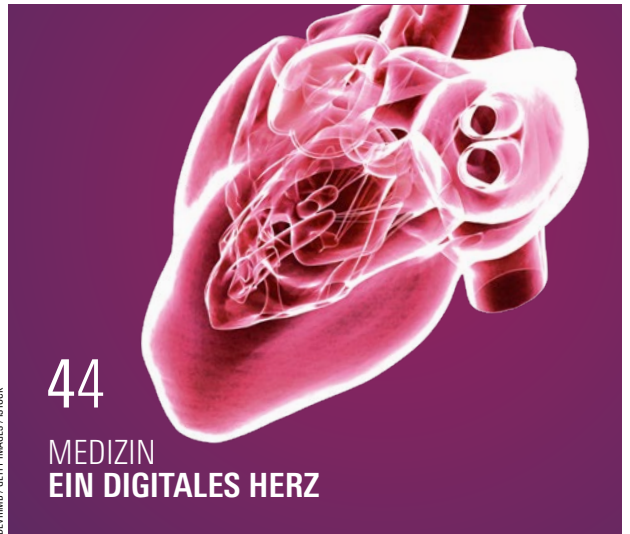


32

VERHALTEN
TIERISCHER
WETTSTREIT

ALAMY / VINCE BURTON

DEVRAMB / GETTY IMAGES / ISTOCK



44

MEDIZIN
EIN DIGITALES HERZ



DWIGES / GETTY IMAGES / ISTOCK

62

PLASTIKMÜLL
ZURÜCK IN DEN KREISLAUF



LOCALAMIS NATIONAL LABORATORY

70

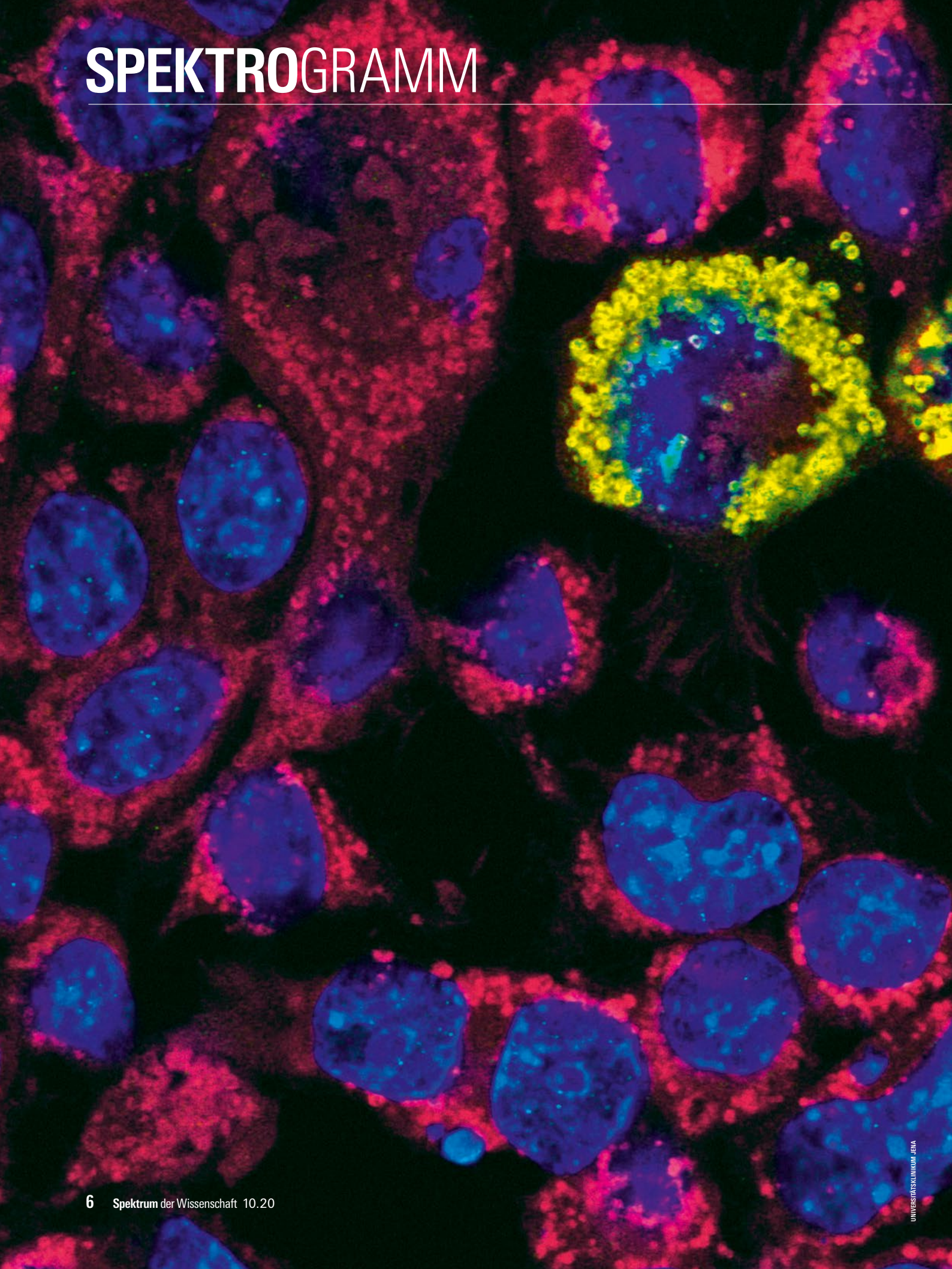
PHYSIK
DAS FLÜCHTIGSTE
ALLER TEILCHEN



Alle Artikel auch digital
auf **Spektrum.de**

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

SPEKTROGRAMM





TÜCKISCHER GENDEFEKT

► Spastische Bewegungsstörungen gehen mit einer krankhaft erhöhten Muskelspannung einher, verursacht von einer Schädigung des Gehirns oder Rückenmarks. Sie können als Folge eines Schlaganfalls auftreten oder auch als Begleiterscheinung von neurologischen Erkrankungen, die auf angeborene Stoffwechselstörungen zurückgehen. Vielfach liegen die molekularen Mechanismen dafür jedoch noch im Dunkeln.

Ein internationales Forscherteam um Tobias Haack vom Universitätsklinikum Tübingen hat nun bei einer bestimmten spastischen Bewegungsstörung die genetische Ursache aufgeklärt: Verantwortlich scheinen Veränderungen in einem Gen namens *HPDL* zu sein, die zu einem Mangel an *HDPL*-Proteinen führen. In den hier abgebildeten kultivierten Nervenzellen (blau) erscheint das angefärbte Protein grün; durch Farbüberlagerung in den rot angefärbten Mitochondrien zeigt es sich im Bild gelb. Das Eiweiß scheint am Stoffwechsel der Mitochondrien mitzuwirken – Zellorganellen, mit deren Hilfe die Nervenzellen den universellen Energieträger Adenosintriphosphat gewinnen.

Auf die Spur des bisher unauffälligen Gens *HPDL* brachten die Forscher Patienten aus zwei Familien, bei denen ungewöhnliche neurologische Beschwerden mit einer Lähmung der Beine einhergingen. Ein Vergleich sämtlicher proteincodierender DNA-Sequenzen half dann dabei, den verantwortlichen Erbgutabschnitt zu finden. Durch einen Abgleich von klinischen Daten und genomischen Datensätzen stießen die Forscher letztlich auf 17 Betroffene aus 13 Familien. Vielleicht lasse sich für sie eine Therapie entwickeln, wenn man in künftigen Experimenten mehr über das *HPDL*-Gen herausfinde, schreiben die Mediziner.

American Journal of Human Genetics 10.1016/j.ajhg.2020.06.015, 2020

So stellen sich Astrophysiker das Sternsystem SS 433 und sein Umfeld vor: Ein Schwarzes Loch feuert umherschlingende Jets ins All (links), deren Teilchen auch eine 110 Lichtjahre entfernte Gaswolke zum Leuchten anregen (rechts).

ASTROPHYSIK IM TAKT DES SCHWARZEN LOCHS

► SS 433 ist ein Sternsystem der Extreme: 15000 Lichtjahre von der Erde entfernt, umkreisen sich hier ein Schwarzes Loch und ein deutlich schwererer Riesenstern. Letzterer verliert dabei laufend Materie, die sich in einer Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch sammelt. Senkrecht dazu schießen Partikel in zwei gegenläufigen, eng fokussierten Bündeln ins All, so genannte Jets.

Die energiereichen Auswürfe des besonderen Systems (Experten sprechen von einem Mikro-Quasar) könnten noch eine 110 Lichtjahre entfernte Gaswolke zum Leuchten anregen, berichtet nun ein Team um Jian Li vom

Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY. Auf den ersten Blick scheint die Wolke zwar zu weit entfernt zu sein. Doch rätselhafterweise gibt sie immer wieder Gammastrahlung ab, wie die Forscher mit Hilfe des Fermi-Weltraumteleskops herausgefunden haben.

Die Astrophysiker vermuten daher einen indirekten Zusammenhang: Anscheinend erhalten manche Protonen im Jet oder durch seitliche Auswürfe der Akkretionsscheibe so viel Schwung, dass sie im Lauf der Zeit bis zur Gaswolke diffundieren können. Wenn sie dort mit Atomen zusammenstoßen, entweicht intensive Strahlung ins All.

Für dieses Szenario spricht unter anderem die Frequenz des Signals, das Fermi aufgespürt hat: Das Leuchten aus Richtung der Gaswolke schwankt mit einer Periode von 162 Tagen. Im gleichen Takt verändert sich auch das Schwarze Loch in SS 433: Akkretionsscheibe samt Jet torkeln wie ein strauchelnder Kreisel umher und kommen dabei alle 162 Tage wieder am Ausgangspunkt an. Berechnungen zufolge müsste das System dabei Materie großflächig im Weltall versprühen, die früher oder später auch die ferne Gaswolke erreichen sollte.

Nature Astronomy 10.1038/s41550-020-1164-6, 2020

TECHNIK UNSCHNEIDBARES MATERIAL

Wissenschaftler um Stefan Szyniszewski von der Durham University haben ein Material entwickelt, das sich weder mit einem Bohrer noch mit einem Winkelschleifer durchtrennen lässt. Es enthält Kugeln aus Keramik mit knapp anderthalb Zentimeter Durchmesser, die in einen relativ flexiblen Aluminiumschaum eingebettet sind. Die Kombination aus harten und weichen Komponenten führt bei einem Schneideversuch zu Vibrationen, die auf das jeweilige Werkzeug zurückwirken und es nach kurzer Zeit stumpf machen. Gleichzeitig reibt die Maschine pulverförmiges Material von den Keramikugeln ab. Es setzt ebenfalls den Schneidkanten zu und kann die Werkzeuge blockieren.

Bei der Herstellung des Materials haben die Forscher zunächst die Keramikugeln sowie Stäbchen aus gepresstem Aluminiumpulver und dem Schaumbildner Titandihydrid hergestellt. Die Zutaten gaben sie in eine Form, wobei sich Reihen aus Kugeln mit den Stäben abwechselten. Bei 760 Grad Celsius schäumte das Aluminium anschließend zu der weichen, porösen Matrix auf, welche die Kugeln vollständig umschließt.

Den Proben aus dem Material – die Wissenschaftler haben es wegen seiner Wandelbarkeit nach dem griechischen Gott »Proteus« benannt – kam selbst ein Wasserstrahlschneider nicht bei: Die Keramikugeln lenkten den Strahl immer wieder ab, weiteten

ihn auf und machten ihn dadurch wirkungslos, schreibt das Team, an dem auch Experten des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Chemnitz beteiligt waren.

Dank seiner vielen Hohlräume ist das Material vergleichsweise leicht, aber trotzdem stabil gegenüber Druck. Je nach Anwendungsgebiet könne man die Größe der Kugeln, die Porosität des Schaums sowie zahlreiche weitere Parameter feinjustieren. Denkbar sei etwa ein Einsatz in Safetüren oder der Schutzkleidung von Industriearbeitern.

Scientific Reports 10.1038/s41598-020-65976-0, 2020

PALÄONTOLOGIE DIE AUGEN DER TRILOBITEN

Schon vor 429 Millionen Jahren besaßen Gliederfüßer offenbar ähnliche Sehorgane wie heutige Insekten oder tagaktive Krebse. Die typischen Merkmale dieser Facettenaugen haben zwei Forscher nun jedenfalls an einem gut erhaltenen Fossil eines Trilobiten der Art *Aulacopleura koninckii* entdeckt. Demnach hat sich der aus etlichen Einzelaugen zusammengesetzte Augentyp offenbar schon sehr früh entwickelt, spätestens zu Beginn des Erdaltertums (Paläozoikum) vor 541 Millionen Jahren.

Für ihre Studie haben Brigitte Schoenemann von der Universität Köln und Euan Clarkson von der University of Edinburgh einen Trilobiten untersucht, der bereits 1846 bei Lodenitz im heutigen Tschechien entdeckt wurde. Bei dem zwei Millimeter hohen und gut einen Zentimeter langen Fossil ist nur eines der beiden Augen erhalten geblieben. In diesem haben Schoenemann und Clarkson nun mit einem Digitalmikroskop die Untereinheiten eines Facettenauges untersucht, die



BRIGITTE SCHOENEMANN, UNIVERSITÄT KÖLN



Bei einem versteinerten Trilobiten (oben) ist ein etwa ein Millimeter großes Facettenauge erhalten geblieben (links).

so genannten Ommatidien. Jedes davon wies acht Sinneszellen auf, die um das Licht leitende Rhabdom gruppiert waren, schreiben die beiden Wissenschaftler. Zudem grenzten sich die Einzelaugen durch Pigmentzellen voneinander ab. Die Folge müsste ein durch viele Einzelbilder zusammengesetzter Seheindruck gewesen sein – ähnlich dem heutiger Insektenaugen.

Über den Sehzellen meinen die Forscher noch den typischen Kristallkegel sowie eine Chitinlinse lokalisieren zu können, die das Licht wohl ins Innere des Sehorgans führte. Die

Größe der Linse spricht dafür, dass der Trilobit bei guten Lichtverhältnissen aktiv war; vermutlich agierte das Lebewesen tagsüber in flachen Gewässern. Auch wenn die einzelnen Seheinheiten nicht so eng nebeneinanderlagen wie bei heutigen Gliederfüßern, sehen die Forscher mehr Übereinstimmungen als Unterschiede. Demnach wären die Grundlagen des Sehens vieler heutiger Tiere rund eine halbe Milliarde Jahre alt.

Scientific Reports 10.1038/s41598-020-69219-0, 2020

BIOLOGIE

KÄFER ENTKOMMT DURCH VERDAUUNGSTRAKT

► Manche Insektenarten haben sich darauf spezialisiert, den widrigen Bedingungen im Verdauungstrakt ihrer amphibischen Jäger zu widerstehen. Das Kalkül dahinter: Wird die unzerkaut verschluckte Beute später wieder ausgeschieden, kann sie ihr Dasein wie gewohnt fortsetzen.

Wenige Millimeter große Wasserkäfer der Art *Regimbartia attenuata* scheinen diese Strategie perfektioniert zu haben, berichtet nun der Biologe Shinji Sugiura von der Universität Köbe. In seinen Tests bewegten sich die Tiere aktiv durch den Darm von Fröschen der Art *Pelophylax nigromaculatus* und wurden von den Reptilien bereits nach einigen Stunden wieder ins Freie befördert. Dabei könnten die Käfer die Frösche sogar dazu stimulieren, ihr Analdrüse zu entleeren, spekuliert Sugiura.

Neun von zehn Käfern überlebten in den Versuchen des Japaners die Reise durch den Verdauungsapparat. Jedoch nur so lange, wie sie sich bewegen konnten: Fixierte der Forscher die Beine der Käfer mit Wachs, verendeten diese im Magen der

Frösche und wurden erst nach einem Tag wieder ausgeschieden. Offenbar arbeiten sich die Beutetiere mit ihren Beinen zielgerichtet in Richtung Freiheit vor.

Vermutlich sichert sich der widerstandsfähige Käfer mit der Strategie

auch in freier Wildbahn sein Überleben: Beide Arten kommen auf japanischen Reisfeldern vor und begegnen sich dort regelmäßig.

Current Biology 10.1016/j.cub.2020.06.026, 2020

Werden Käfer der Art *Geimbartia attenuata* (links) von Fröschen der Art *Pelophylax nigromaculatus* (rechts) gefressen, bewegen sie sich zielstrebig in Richtung Darmausgang.



KOBE UNIVERSITY / SUGIURA, S. ACTIVE ESCAPE OF PREY FROM PREDATOR VENT VIA THE DIGESTIVE TRACT. CURRENT BIOLOGY 30, 2020, FIG. 1A-B

RAUMFAHRT VERBESSERTES RADAR FÜR WELTRAUMSCHROTT

► Unmengen von Weltraumschrott umkreisen die Erde, darunter ausgemusterte Satelliten, die Oberstufen von Raketen und Trümmerteile von Kollisionen im Orbit. Experten gehen von mehr als 34000 Objekten mit einer Größe von mindestens zehn Zentimetern aus. Nur rund 3000 davon sind aktive Satelliten.

Um diese vor Zusammenstößen zu bewahren, wollen Wissenschaftler die genaue Position und Umlaufbahn möglichst vieler Trümmer- und Schrottteile orten. Eine Möglichkeit ist

das so genannte Laser-Ranging. Dabei ermitteln Forscher zunächst mit Hilfe eines Teleskops die Position eines Objekts am Himmel. Anschließend strahlen sie das Ziel mit einem speziellen Laser an und berechnen seine Entfernung auf Basis der Zeit, die das reflektierte Licht zurück zu einem Detektor auf der Erde benötigt.

Das Verfahren hat allerdings einen Haken: Es funktioniert nur während der Dämmerung, wenn die Messstationen auf der Erde im Dunkeln liegen und der Weltraummüll von der Sonne beleuchtet wird. Diese Schwachstelle will nun ein Team um Michael A. Stein-dorfer vom Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Graz behoben haben: Es verfeinerte die Einstellungen von Teleskop, Detektor

und Filter, um den Kontrast der Objekte auch vor taghellem Himmel zu erhöhen. Außerdem entwickelten die Forscher eine verbesserte Echtzeit-Zielerkennungssoftware.

Bei einem Test an der Satellite Laser Ranging Station in Graz ließ sich die Position von vier Raketenteilen auch tagsüber zuverlässig erfassen, berichtet die Gruppe. Das vergrößere das Zeitfenster, in dem man Weltraumschrottteile künftig orten könne, von 6 auf 22 Stunden täglich. Mittelfristig könnte sich mit der Technik ein verbessertes Netz von Überwachungsstationen aufbauen lassen, das früher als bisher vor drohenden Kollisionen im Erdorbit warnt.

Nature Communications 10.1038/s41467-020-17332-z, 2020

ARCHÄOLOGIE DIE ÄLTESTE MATRATZE DER WELT

► Schon lange bevor *Homo sapiens* die Wahl zwischen Boxspring-, Federkern- und Kaltschaummatratzen hatte, schlief er gerne auf weichem Untergrund. Das zeigen Gesteinsablagerungen in Höhlen, die auf aus Pflanzenfasern geflochtene Unterlagen hindeuten. In der südafrikanischen Sibudu-Höhle gab es beispielsweise schon vor 77 000 Jahren gepolsterte Schlafplätze, berichteten Archäologen um Lyn Wadley von University of the Witwatersrand im Jahr 2011.

Nun will Wadley in der rund 350 Kilometer weiter nördlich gelegenen Border Cave Spuren eines noch viel älteren Nachtlagers aufgespürt haben: Bereits vor mehr als 200 000 Jahren hätten sich unsere fernen Vorfahren dort abends auf zusammengerollten Grasbündeln niedergelassen, berichtet die Archäologin gemeinsam mit Kollegen aus aller Welt.

Die Wissenschaftler machen dies an einer derart alten Schicht in einem geschützten Teil der Höhle fest. Gras ist dort zwar nicht erhalten geblieben. Aber unter dem Rasterelektronen-



Die Border Cave in Südafrika (oben) war schon vor 200 000 Jahren bewohnt. Grasbüschel haben dort Spuren im Fels hinterlassen (rechts).



HÖHLE: A. KRÜGER; FOSSILIEN: LYN WADLEY / WITS UNIVERSITY

mikroskop ließen sich strichförmige Fossilien erkennen, die höchstwahrscheinlich auf Gräser aus der Familie der Panicoideae zurückgehen.

Die Ablagerungen sprechen dafür, dass die Pflanzen auf Asche gebettet waren. Diese habe vermutlich der Abwehr von Insekten gedient, die das extrem feinkörnige Material meiden, vermuten die Forscher. Den Analysen zufolge gewannen die Höhlenbewohner die Asche, indem sie alte Bettenlager verbrannten – womöglich, um etwaige Schädlinge zu entfernen. Für einen bewussten Insektenschutz sprechen auch Spuren einer Pflanze, die ähnliche Blätter wie der afrika-

nische Strauch *Tarchonanthus camphoratus* entwickelt. Sein Aroma dient manchen Gemeinschaften bis heute dazu, kleine Tiere fernzuhalten.

Sollten unsere Vorfahren tatsächlich vor 200 000 Jahren auf Gras-Matratzen genächtigt und ihre Schlafplätze systematisch gereinigt haben, wäre das ein ungeahnt früher Einsatz von technischem und medizinischem Knowhow: Bisher gingen Experten davon aus, dass *Homo sapiens* solche Fähigkeiten erst vor rund 100 000 Jahren entwickelte.

Science 10.1126/science.abc7239, 2020

KLIMAWANDEL DOPPELTE DÜRREJAHRE IM 21. JAHRHUNDERT

► Zwei extreme Dürresommer nacheinander, wie in den Jahren 2018 und 2019, die jeweils auch noch zu den wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen zählten? Das habe es in 250 Jahren europäischer Klimageschichte nicht gegeben, berichten Forscher um Rohini Kumar vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig. Doch laut ihren Modellrechnungen könnten verheerende Trockenperioden bis Ende des Jahrhunderts deutlich häufiger werden. Wie häufig, hänge davon ab, wie stark die Menschheit ihren CO₂-Ausstoß verringere.

Das Team betrachtete dazu drei standardisierte Zukunftsszenarien. Im pessimistischsten – das einem prak-

tisch ungebremsten Treibhausgasausstoß entspricht – würde sich die Zahl der doppelten Dürrejahre versiebenfachen. Die Anzahl solcher Zweijahresdürren beziffern die Forscher in ihrer Studie für den Zeitraum 2051 bis 2100 auf ungefähr 14 – mithin also drei pro Jahrzehnt. Gleichzeitig vergrößert sich die Fläche, die durch die Dürren betroffen ist: Sie beläuft sich in den pessimistischsten Schätzungen auf 60 Prozent der mitteleuropäischen landwirtschaftlich genutzten Böden.

Sollte die Menschheit ihren Treibhausgasausstoß reduzieren, sinkt die Zahl der Zweijahresdürren laut den Rechnungen merklich ab. Bei moderaten Klimaschutzbemühungen sei nur

noch mit halb so vielen Doppelereignissen zu rechnen. Bei verschärften Anstrengungen im Klimaschutz, dem dritten Szenario, bleiben die lang anhaltenden Trockenphasen weiterhin eine Seltenheit. Welches der drei Szenarien den derzeit plausibelsten Blick in die Zukunft erlaubt, ist umstritten. Das extremste, das unter dem Kürzel RCP 8.5 bekannt ist, gilt Kritikern als unrealistisch, weil es keinerlei Anstrengungen zum Klimaschutz voraussetzt. Andererseits beschreibt es die Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte mitunter treffender als die optimistischeren Szenarien.

Scientific Reports 10.1038/s41598-020-68872-9, 2020

QUANTENPHYSIK EINE KLASSISCHE QUANTENWELT

Seit mehr als 100 Jahren rätseln Physiker, was sich auf mikroskopischer Ebene abspielt. Das Verhalten kleinster Teilchen widerspricht unserer Intuition. Eine alternative Beschreibung der Quantenmechanik könnte einige Probleme lösen und möglicherweise einen Weg zu einer Theorie der Quantengravitation weisen.



Ward Struyve ist Physiker an der Katholischen Universität Leuven in Belgien.

» spektrum.de/artikel/1760428

Die Abläufe im Mikrokosmos lassen Physiker seit Jahrzehnten um eine Interpretation ringen.

AUF EINEN BLICK THEORIE DER FÜHRUNGSWELLEN

- 1** Die Quantenmechanik sagt experimentelle Ausgänge erfolgreich voraus. Bisher ist jedoch nicht klar, was dabei wirklich auf mikroskopischer Skala geschieht.
- 2** Die De-Broglie-Bohm-Theorie liefert ein verständliches Bild der Quantenwelt. Demnach werden Teilchen von einer Welle geführt, die der Schrödingergleichung gehorcht.
- 3** Dieses alternative Konzept liefert die gleichen Vorhersagen wie die Quantenmechanik. Es könnte aber spannende neue Erkenntnisse bringen, wenn man es mit der Relativitätstheorie verbindet.

Die Quantenmechanik ist eine der größten Errungenschaften der modernen Physik. Sie hat es ermöglicht, zahlreiche Phänomene zu erklären und extrem genau vorherzusagen. Und doch debattieren Wissenschaftler seit mehr als 100 Jahren noch immer darüber, wie die Theorie zu interpretieren ist. Denn sie sagt nichts darüber aus, was sich auf mikroskopischer Ebene wirklich abspielt.

Einige Forscher geben sich damit zufrieden; ihnen zufolge besteht die einzige Aufgabe einer Theorie darin, experimentelle Ergebnisse vorauszusagen. Demnach sei es sinnlos, einem Modell mehr abzuverlangen. Allerdings teilen nicht alle diese Meinung. Wie Johann Wolfgang von Goethe schon in »Faust« vermerkte, streben Wissenschaftler danach, zu »erkennen, was die Welt im Innersten zusammenhält.« Deshalb sollten Experimente vorgeschlagene Theorien testen – und nicht bloß ihr Dasein berechtigen.

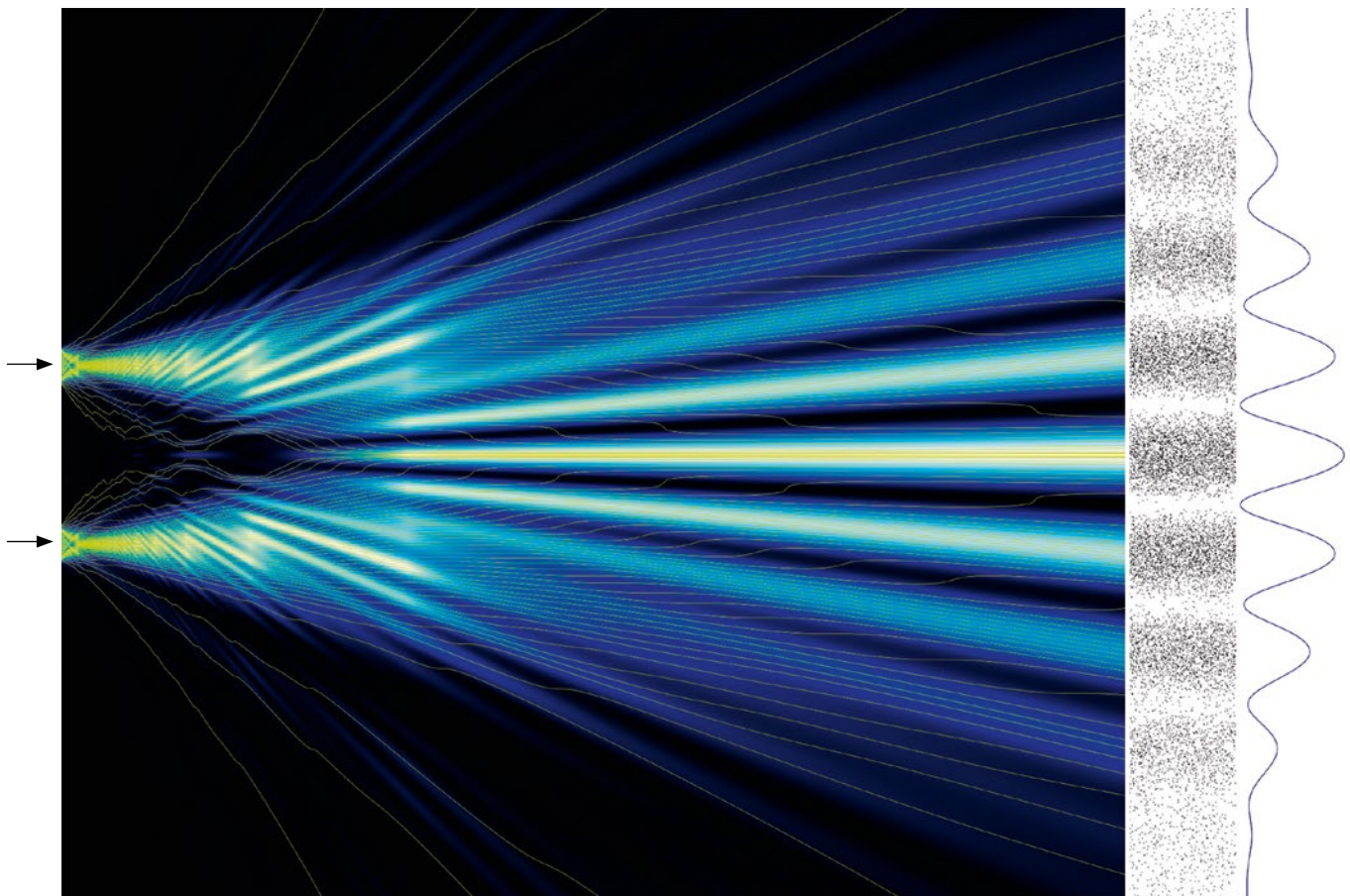
Wenn man versucht, die Quantenwelt zu verstehen, stößt man schnell auf Schwierigkeiten. Daher haben Forscher etliche verschiedene Interpretationsmöglichkeiten

Elektronen bewegen sich von links nach rechts durch eine Blende mit zwei Spalten (ganz links im Bild, Pfeile). Im rechten Teil der Abbildung entspricht jeder Punkt dem Aufprall eines Teilchens auf dem Detektionsschirm; die Kurve zeigt die Dichte der Einschläge an. Die von der bohmischen Mechanik vorhergesagten Bahnen einiger Elektronen sind gelb eingezeichnet.

entwickelt, um die Probleme zu überwinden. Die nach dem französischen Physiker Louis de Broglie (1892–1987) und seinem US-amerikanischen Kollegen David Bohm (1917–1992) benannte De-Broglie-Bohm-Theorie (kurz: dBB) stellt einen der vielversprechendsten und wahrscheinlich einfachsten Ansätze dafür dar. De Broglie formulierte seine ersten Ideen in den 1920er Jahren, die Bohm 30 Jahre später weiter verfeinerte. Dank neuer Erkenntnisse ist die dBB-Theorie, auch als Theorie der Führungswelle oder bohmische Mechanik bekannt, nun wieder Gegenstand aktiver Forschung. Einige Physiker hoffen sogar, der jahrzehntealte Ansatz könnte dabei helfen, die Gesetze der Quantenwelt mit denen der allgemeinen Relativitätstheorie zu vereinen.

Die Quantenmechanik warf schon sehr früh Fragen auf. Ein Beispiel dafür liefert das berühmte Doppelspaltexperiment, bei dem man einzelne Teilchen, etwa Elektronen, auf eine undurchlässige Blende schießt, die von zwei parallelen, schmalen Spalten durchzogen ist. Ein dahinter befindlicher Schirm detektiert anschließend die auftreffenden Partikel.

Würde man statt Elektronen makroskopische Objekte wie Kugeln durch einen identischen, aber vergrößerten Aufbau schicken, wäre klar, wie das Experiment ausgeht: Diejenigen Kugeln, die einer geradlinigen Verbindung zwischen Ursprungsort und einem der beiden Spalten folgen, hinterlassen jeweils einen Punkt auf dem Detektionsschirm. Bei Elektronen und anderen mikroskopischen Teilchen ergibt sich dagegen ein völlig anderes Bild. Auf dem Detektions-



ALEXANDRE GOURDAN COMMUNSWIKIMEDIA.ORG/WIKYFILE:100_TRAJECTORIES_GUIDED_BY_THE_WAVE_FUNCTION.PNG / CC BY-SA 4.0 (https://commons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode)

schirm entstehen zahlreiche Streifen: Er ist abwechselnd von Bereichen mit hoher und niedriger Auftreffdichte durchsetzt.

Ein solches Muster ist eigentlich ein typisches Merkmal von Wellenphänomenen. Wenn man etwa eine Wand mit zwei Spalten in ein Wasserbecken einsetzt und Wellen erzeugt, entsteht hinter dem Hindernis ein so genanntes Interferenzmuster. Dieses ist durch abwechselnde niedrige und hohe Erhebungen gekennzeichnet, ähnlich wie beim Doppelspaltexperiment.

Um das quantenmechanische Phänomen zu erklären, beschreiben Physiker mikroskopische Teilchen als Wellen, die sich mathematisch durch eine so genannte Wellenfunktion darstellen lassen. Wie beim klassischen Analogon dringt die Elektronenwelle beim Doppelspaltexperiment gleichzeitig in beide Spalten ein, wo dann jeweils eine Sekundärwelle entsteht. Anschließend wechselwirken die zwei Wellen hinter der Blende miteinander.

Die Rolle der Messung und des Beobachters in der Quantenmechanik

Damit enden allerdings die Gemeinsamkeiten von quantenmechanischen Systemen und Fluiden. Denn anders als in der klassischen Welt, wo sich eine Welle stets über eine große Fläche ausbreitet, hinterlässt das Elektron auf dem Detektionsschirm nur eine punktförmige Spur; dort besitzt es keine Ausdehnung mehr und hat schlagartig wieder die Eigenschaften eines Teilchens. In der herkömmlichen Deutung der Quantenmechanik geht man davon aus, dass die Wellenfunktion plötzlich kollabiert. Die Amplitude der Welle an einem Ort bestimmt die Wahrscheinlichkeit, das Elektron an jener Stelle auf dem Bildschirm zu detektieren.

Damit sagt die Quantenmechanik erfolgreich das Interferenzmuster voraus, das sich nach und nach während des Auftreffens der Teilchen auf dem Schirm aufbaut. Allerdings ergeben sich dadurch weitere Fragen: Warum kollabiert die Wellenfunktion, sobald sie den Detektionsschirm erreicht? Könnte es sein, dass die Welle erst später zusammenbricht, etwa wenn jemand auf den Schirm schaut?

Auf der Suche nach Antworten entwickelten Physiker bereits in den 1920er Jahren verschiedene Deutungen der Quantenmechanik. Die bis heute geläufigste ist die so genannte orthodoxe Interpretation, der zufolge eine Messung die Wellenfunktion kollabieren lässt. Allerdings ist dabei nicht geklärt, was die genauen physikalischen Prozesse sind, die eine Messung ausmachen. Genauso wenig ist klar, ob ein Beobachter beteiligt sein muss. Solange solche Fragen unbeantwortet bleiben, lässt sich nicht sagen, wann der Kollaps eintritt. Die orthodoxe Quantenmechanik sagt nicht, was sich genau auf mikroskopischer Ebene abspielt.

Um das Problem zu verdeutlichen, entwickelte der österreichische Physiker Erwin Schrödinger 1935 ein inzwischen berühmtes Gedankenexperiment. Dabei befindet sich eine lebende Katze zusammen mit einem radioaktiven Atomkern in einer Kiste. Sobald dieser zerfällt, löst er einen Mechanismus aus, das ein für das Tier tödliches Gift freisetzt. Weil es sich bei dem Atomkern um ein quantenmechanisches Objekt handelt, kann man – solange die Wellenfunktion nicht kollabiert ist – nicht genau sagen, ob er

Nichtlokalität

Vereint man die Quantenmechanik mit der speziellen Relativitätstheorie, erhält man eine so genannte Quantenfeldtheorie. In dieser nimmt unter anderem jeder Beobachter die Lichtgeschwindigkeit gleich wahr, und die physikalischen Gesetze sind in allen Bezugssystemen unverändert. Eine Folge der speziellen Relativitätstheorie ist jedoch, dass es keine Gleichzeitigkeit mehr gibt: zwei Ereignisse, die für eine Person zeitgleich stattfinden, nimmt eine andere zeitlich versetzt wahr.

Die Quantenmechanik besitzt dagegen eine Eigenschaft, die einer solchen Relativität auf den ersten Blick widerspricht: Sie ist nichtlokal. Das heißt, manche Ereignisse können sich augenblicklich auf andere auswirken. Das geschieht beispielsweise mit verschränkten Quantenteilchen. Zwei Partikel können so gekoppelt sein, dass der Zustand des einen den des anderen direkt und ohne Zeitverzögerung beeinflusst. Gemäß der speziellen Relativitätstheorie würde der Effekt bloß in einem bestimmten Bezugssystem augenblicklich vonstattengehen. Ein anderer Beobachter wäre hingegen in der Lage, einen Zeitunterschied zwischen beiden Ereignissen zu messen.

Physiker haben sich schon häufig den Kopf über das Thema zerbrochen. Bisher konnten sie aber noch keine zufrieden stellende Lösung finden. Nichtlokalität und die spezielle Relativitätstheorie lassen sich nur schwer miteinander in Einklang bringen. Das Problem taucht in jeder Version einer Quantenfeldtheorie auf, sei es die orthodoxe Variante oder eine andere, etwa die bohmsche Mechanik.

Der nordirische Physiker John Bell war ein starker Befürworter der dBB-Theorie. Doch die Tatsache einer eindeutig nichtlokalen Theorie störte ihn. Er versuchte daher erfolglos, den Ansatz zu modifizieren, um daraus eine lokale Version zu schaffen. Allerdings bewies er am Ende das Gegenteil: Im Jahr 1964 konnte er zeigen, dass es unmöglich ist, eine lokale Theorie zu erhalten, wenn bestimmte Vorhersagen der gewöhnlichen Quantenmechanik richtig sind. In der Natur können entfernte Systeme daher auf eine Weise gekoppelt sein, die keine lokale Theorie erklären kann. Demnach sind sowohl die orthodoxe Quantenmechanik als auch die bohmsche Mechanik nichtlokal. Und tatsächlich ist jedes Modell, das die Natur erfolgreich beschreiben soll, dazu verdammt, nichtlokal zu sein.

zerfallen ist oder nicht. Er befindet sich gleichzeitig in beiden Zuständen, so wie das Elektron im Doppelspaltexperiment beide Spalten gleichzeitig passieren kann.

Das Leben der Katze hängt jedoch unmittelbar vom Zustand des Kerns ab. Damit ist sie ebenfalls in einem überlagerten Zustand: tot und zugleich lebendig. Die Quantenmechanik kann nicht erklären, wann die Wellenfunktion zusammenbricht. Womöglich ist das Tier erst dann eindeutig tot oder lebendig, wenn ein Beobachter die Kiste öffnet und hineinsieht.

Der ungeklärte Kollaps der Wellenfunktion ist nicht das einzige Problem, das es so schwer macht, die Quantenwelt zu verstehen. Ein weiterer Grund ist, dass quantenmechanische Wellenfunktionen nichts mit den Wellen zu

haben, die sonst in der Physik vorkommen, beispielsweise in Fluiden oder beim Elektromagnetismus. Dieser seltsame Aspekt ist nicht immer allen Physikern bewusst: Während sich klassische Wellen im gewöhnlichen dreidimensionalen Raum ausbreiten, ist das bei den quantenmechanischen Varianten anders.

Zum Beispiel lassen sich zwei mikroskopische Teilchen nicht durch zwei gesonderte Wellenfunktionen beschreiben, die sich im dreidimensionalen Raum bewegen. Stattdessen gibt es in so einem Fall nur eine einzige Wellenfunktion, die sich in einem Raum mit drei mal zwei, also sechs Dimensionen entwickelt. Dementsprechend benötigt man für ein System aus N Teilchen ebenfalls bloß eine Wellenfunktion, die sich in einem abstrakten, $3N$ -dimensionalen Raum ausbreitet, dem so genannten Konfigurationsraum.

Der orthodoxen Interpretation zufolge unterscheidet sich der Mikrokosmos daher stark von der uns vertrauten dreidimensionalen Welt. Der eigentliche Schauplatz physikalischer Phänomene wäre demnach ein hochdimensionaler Konfigurationsraum. Solche Schlussfolgerungen bestärkten viele Physiker darin, nach neuen Interpretationsmöglichkeiten zu suchen (siehe »Wie interpretiert man die Quantenmechanik?«, S. 19).

Gibt es auf kleinster Skala Punktteilchen?

Unter anderem schlug de Broglie kurz nach der Entstehung der Quantenphysik den nach ihm benannten Formalismus vor, der einige der bestehenden Probleme beseitigen sollte. Anders als die Quantenmechanik basiert sein Ansatz nicht nur auf der Wellenfunktion, sondern er führt darüber hinaus wie in der klassischen Mechanik auch Punktteilchen ein, die sich im dreidimensionalen Raum bewegen. Im Mikrokosmos folgen die Teilchen einer anderen Dynamik als im klassischen Fall: Die Wellenfunktion bestimmt ihre genaue Richtung und Geschwindigkeit.

Makroskopische Objekte wie Tische, Stühle oder Katzen bestehen in der dBB-Theorie also aus realen, punktförmigen Partikeln. Die dazugehörigen Wellenfunktionen bleiben dabei verborgen. Sie offenbaren sich nur durch ihre Wirkung auf die Teilchen – ähnlich wie Kräfte in der klassischen Mechanik nicht direkt sichtbar sind, sondern sich nur durch ihren Effekt auf Objekte bemerkbar machen.

Beim Doppelspaltexperiment ist die dBB-Wellenfunktion für alle einfallenden Teilchen gleich. Weil sich jedoch deren Anfangspositionen und -geschwindigkeiten unterscheiden, ergeben sich verschiedene Auftrefforte. Die Wellenfunktion entwickelt sich dabei wie im orthodoxen Bild gemäß der Schrödingergleichung, allerdings ohne zu kollabieren. Das macht die Bohmsche Mechanik zu einer deterministischen Theorie. Weil man aber die exakten Anfangsbedingungen der Teilchen – etwa Ort und Geschwindigkeit – nicht kennt, kann man wie in der orthodoxen Quantenmechanik bloß Wahrscheinlichkeiten dafür angeben, diesen oder jenen Ausgang eines Experiments zu beobachten.

Um die Interferenzmuster des Doppelspaltexperiments zu erklären, müssen sich die Teilchen in der dBB-Theorie vor dem Versuch in einem so genannten Gleichgewichtszustand befinden. Ähnlich wie klassische Moleküle in einem

Kurz erklärt: Kanonische Quantisierung

Anders als in der klassischen Physik haben beobachtbare Größen in der Quantenmechanik keine kontinuierlichen Werte, sondern sind »gequantelt«, das heißt sie ändern sich ruckartig. Ein Beispiel dafür ist die Energie oder der Impuls eines Teilchens.

Möchte man eine Theorie wie die klassische Mechanik in die Quantenmechanik überführen, muss man sie »quantisieren«, das heißt so verändern, dass die möglichen Messwerte nicht mehr kontinuierlich sind. Das kann man auf mehrere Weisen erreichen. Die wohl einfachste Methode ist die 1927 von Paul Dirac eingeführte »kanonische Quantisierung«. Dabei behält man die grobe Struktur der klassischen Mechanik bei. Die so genannte Hamiltonfunktion, aus der die zeitliche Entwicklung des Orts und der Geschwindigkeit eines Teilchens folgen, gibt es zum Beispiel auch in der Quantenmechanik.

Allerdings wird die Funktion dort zu einem so genannten Operator. Ebenso bleiben die übrigen Beziehungen zwischen den physikalischen Größen, die man aus der klassischen Mechanik kennt, bestehen. Diese Größen muss man aber ebenso durch Operatoren ersetzen. Eine Folge davon ist, dass der Impuls oder die Energie der Quantensysteme in diesem Fall quantisierte Werte annehmen.

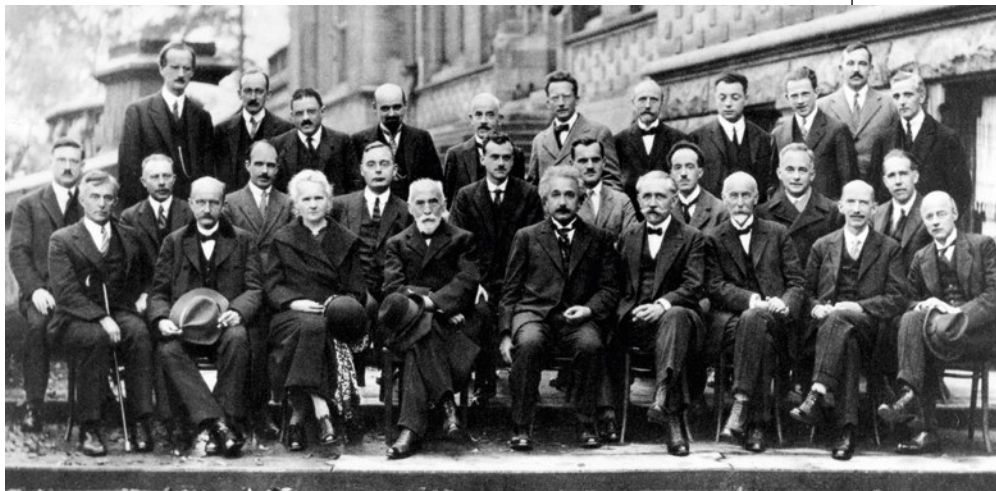
In der kanonischen Quantisierung wird also der mathematische Unterbau der physikalischen Theorie gewechselt, während die physikalischen Zusammenhänge erhalten bleiben: Im klassischen Bild spielen kontinuierliche Variablen und deren Ableitungen eine Rolle, während in der Quantenmechanik Operatoren und komplexe Zahlen, die Wurzeln aus negativen Zahlen enthalten, aufeinandertreffen.

Eine lange verunglimpft Theorie

Inspiziert von Einsteins Vorschlag, dass man Licht nicht nur durch Wellen, sondern auch durch Teilchen beschreiben sollte, postulierte der französische Physiker Louis de Broglie Mitte der 1920er Jahre, Materie besitze ebenfalls eine teilchenartige und eine wellenartige Natur. Zudem sei die Geschwindigkeit eines Teilchens mit einer Wellenfunktion durch die so genannte bohmsche Bewegungsgleichung verbunden. De Broglie war allerdings nicht in der Lage, eine Gleichung für die zeitliche Entwicklung der Welle aufzustellen.

Schrödinger gelang das 1925, allerdings im Rahmen einer reinen Wellentheorie. Das warf die Frage auf, wie man mit Phänomenen umgehen sollte, bei denen Materie teilchenartige Eigenschaften hat, wie sie sich beispielsweise beim Doppelspaltexperiment zeigen. Um das zu erklären, führten der deutsche Physiker Max Born und andere Kollegen den Begriff des Kollapses der Wellenfunktion ein.

De Broglie gab hingegen das Teilchenbild nicht auf. Kurz nachdem Schrödinger seine Wellengleichung vorgestellt hatte, sah der französische Forscher darin das fehlende Puzzleteil: Damit könnte er sein Ziel erreichen und Materie durch Punktteilchen und Wellen beschreiben. De Broglie stellte die Theorie 1927 auf der berühmten Solvay-Konferenz in Brüssel vor, wo die Teilnehmer sie ausführlich diskutierten. Auf die vielen skepti-



Louis de Broglie (mittlere Reihe, 3. v. r.), Wolfgang Pauli (oberste Reihe, 4. v. r.), Erwin Schrödinger (oberste Reihe, 6. v. r.) und andere nahmen 1927 an der berühmten Solvay-Konferenz teil.

schen Bemerkungen seiner Kollegen, insbesondere von Wolfgang Pauli, konnte de Broglie allerdings nicht überzeugend reagieren.

Das brachte ihn dazu, sein Programm aufzugeben – zumindest bis Anfang der 1950er Jahre. Denn dann entdeckte David Bohm de Broglies Theorie wieder und entwickelte sie weiter. Bohm konnte zeigen, dass der Ansatz in den meisten Fällen äquivalent zur orthodoxen Formulierung der Quantenmechanik ist und die gleichen Vorhersagen liefert.

Dennoch zeigte sich ein großer Teil der Physiker gleichgültig oder sogar feindselig gegenüber der De-Broglie-Bohm-Theorie (dBB). Die

Aussagen von Robert Oppenheimer, Bohms ehemaligem Doktorvater, verdeutlichen das: »Wir halten dies für jugendlichen Deviationismus« und »wenn wir Bohm nicht widerlegen können, dann müssen wir zustimmen, ihn zu ignorieren«.

Die ablehnende Haltung gegenüber Bohms Werk war bis vor Kurzem in der Physik vorherrschend. Obwohl de Broglie das Programm mit einigen Studenten wieder aufnahm, hat Bohm die Theorie nach den frühen 1950er Jahren nicht wieder aufgegriffen. Erst 30 Jahre später, nachdem Studenten ihn überzeugten, erwachte sein Interesse an der dBB-Theorie erneut.

Gas ohne Wechselwirkungen typischerweise gleichmäßig über das gesamte Volumen verteilt sind, entspricht der reale Anfangszustand in der dBB-Theorie einer solchen Gleichgewichtsverteilung. Die bohmsche Mechanik liefert damit die gleichen Vorhersagen wie die gewöhnliche Quantenmechanik.

Tatsächlich konnten die Physiker Detlef Dürr, Sheldon Goldstein und Nino Zanghi 1993 beweisen, dass die bohmsche Mechanik empirisch mit der orthodoxen Quantenmechanik übereinstimmt. Das nutzten einige Forscher als Kritikpunkt, indem sie behaupteten, die Theorie sei unnützlich,

da sie nichts Neues liefert. Gleichzeitig spricht das Argument allerdings für den Formalismus, denn die Vorhersagen der Quantenmechanik wurden bereits extrem genau verifiziert. Zudem liefert die bohmsche Mechanik ein klares und eindeutiges Bild der Welt, bei der die Messung keine konzeptionellen Probleme aufwirft.

In vielen Situationen ist es nicht entscheidend, auf welche Interpretation man zurückgreift: Möchte man beispielsweise das Doppelspaltexperiment beschreiben, kann man sowohl die dBB-Theorie als auch die orthodoxe Quantenmechanik nutzen – beide liefern schließlich die gleichen

Ergebnisse. Physiker entscheiden sich meistens für das Modell, das ihnen geläufiger ist.

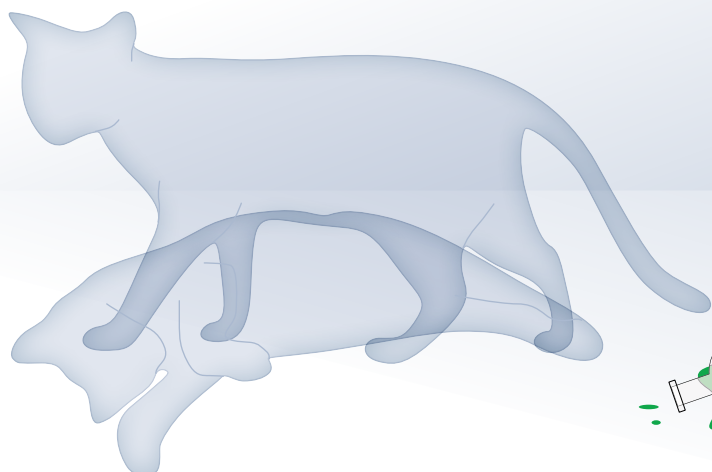
Bei anderen Fragestellungen, bei denen es etwa entscheidend ist, was sich auf mikroskopischer Ebene abspielt, kann die Bohmsche Mechanik wiederum zu interessanten Erkenntnissen führen. Möchte man etwa wissen, wie die Quantenwelt zur klassischen übergeht, liefert die dBB-Theorie ein einfaches Bild: An der Grenze zwischen beiden Bereichen ähneln die Flugbahnen der mikroskopischen Teilchen immer mehr den von der klassischen Mechanik vorhergesagten.

Häufig wenden Physiker verschiedene Versionen einer Theorie auf unterschiedliche Fragestellungen an. Das ist bei der Quantenmechanik ebenfalls der Fall. In den letzten 20 Jahren sind damit konkrete Anwendungen der dBB-Theorie entstanden, bei denen die orthodoxe Deutung keine zufrieden stellenden Antworten liefert.

Möchte man etwa herausfinden, wie lange ein Teilchen braucht, um ein Hindernis zu überwinden, stößt man in der gewöhnlichen Quantenmechanik auf Probleme. Grund dafür ist, dass der theoretische Formalismus auf so genannten Operatoren basiert. Größen wie Geschwindigkeit, Position oder Energie eines Objekts sind keine gewöhnlichen Zahlen mehr, sondern kompliziertere mathematische Strukturen, die sich im einfachsten Fall durch eine Matrix darstellen lassen. Die Zeit stellt dabei eine Ausnahme dar: In der Quantenmechanik gibt es keinen Zeitoperator. Daher führen Fragen, welche die Dauer eines Ereignisses betreffen, zu Schwierigkeiten. In der Bohmschen Mechanik treten solche Komplikationen jedoch nicht auf, wodurch sich derartige Rätsel rasch lösen lassen.

Ein weiteres Beispiel findet sich in der physikalischen Chemie, bei der es häufig um zahlreiche Teilchen geht,

Erwin Schrödinger beschrieb in seinem berühmten Gedankenexperiment eine Katze, die mit einem instabilen Element (lila Kiste) in einer Box gefangen ist. Ein Geigerzähler (gelb) ermittelt, ob der Atomkern zerfällt, und löst in einem solchen Fall einen Mechanismus aus, der ein tödliches Gift (grün) freisetzt.



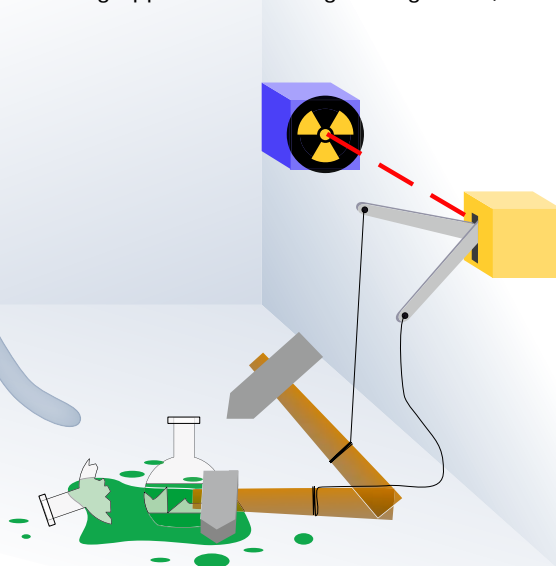
etwa die Elektronen eines Atoms oder Moleküls. Solche Systeme sind meist zu komplex, um sie mathematisch genau zu formulieren. Deshalb muss man in der Regel auf computergestützte Methoden zurückgreifen. Auf dem Gebiet konnte die Bohmsche Mechanik neuartige und effizientere Techniken eröffnen als die orthodoxe Quantenmechanik.

Ein anderes Anwendungsgebiet der dBB-Theorie ergibt sich, wenn man Quantensysteme modelliert, die mit klassischen Systemen wechselwirken, etwa ein Teilchen, das an der Oberfläche eines Festkörpers streut. Theoretisch könnte man den Festkörper quantenmechanisch beschreiben, aber das lässt sich in der Praxis nicht umsetzen. Denn solche Materialien bestehen aus unzähligen Teilchen, die auf unvorhersehbare Weise miteinander wechselwirken. Daher begnügt man sich damit, die Oberfläche klassisch darzustellen. Anfang der 2000er Jahre konnten verschiedene Wissenschaftler zeigen, dass ein solches durch die dBB-Theorie formuliertes Modell genauere Ergebnisse liefert als ähnliche Versionen, die auf der orthodoxen Quantenmechanik basieren.

Auftauchende und verschwindende Teilchen

Nach diesen Erfolgen wollten Physiker einen Schritt weiter gehen. Vor einigen Jahrzehnten wurde die gewöhnliche Quantenmechanik weiterentwickelt, damit sie Einsteins Gesetze der speziellen Relativitätstheorie berücksichtigt. So entstand die Quantenfeldtheorie, mit der man inzwischen erfolgreich subatomare Teilchen und ihre Wechselwirkungen untereinander erklärt. Einer der Hauptunterschiede zur Quantenmechanik besteht darin, dass die Anzahl der Teilchen dabei nicht festgelegt ist: Es können Partikel entstehen und sich wieder vernichten. Wie der Name schon sagt, basiert die relativistische Quantentheorie auf Feldern, welche die Raumzeit durchdringen, ähnlich wie ein elektromagnetisches Feld. Anregungen eines Felds entsprechen in diesem Bild unserer Wahrnehmung eines Teilchens.

Zu Beginn des neuen Jahrtausends nahmen sich einige Forschergruppen der schwierigen Aufgabe an, einen ent-



DIATFIELD (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILES/SCHRÖDINGERS_CAT.svg / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/S.A.G.3.0.LEGALCODE))
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Wie interpretiert man die Quantenmechanik?

Die Quantenphysik besteht aus vielen Gesetzen und Regeln, mit denen man die Wahrscheinlichkeiten dafür berechnen kann, wie ein Experiment ausgeht. Der mathematische Formalismus sagt allerdings nichts über die zu Grunde liegende Realität aus. Welche Bedeutung die Wellenfunktion hat oder was in der Quantenwelt genau passiert, ist ungewiss. Inzwischen gibt es Dutzende von Interpretationen der Quantenphysik, die sich den Schwierigkeiten stellen.

Kopenhagener Deutung

Die Kopenhagener Deutung entwickelte der dänische Physiker Niels Bohr mit seinen Kollegen in den Anfängen der Quantenmechanik. Tatsächlich existieren verschiedene Varianten dieser Interpretation, die der Wellenfunktion jeweils einen anderen Stellenwert zuschreiben. In heutigen Lehrbüchern findet man meist die so genannte orthodoxe Deutung, die teilweise von Bohrs damaligen Vorstellungen abweicht. In ihr ist die Frage nach der Bedeutung der Wellenfunktion irrelevant, da sie als metaphysisch betrachtet wird.

Inspiziert von der positivistischen Philosophie geht der orthodoxe Ansatz davon aus, dass sich eine physikalische Theorie auf die Vorhersage experimenteller Ergebnisse beschränken sollte, wobei jede weitere Diskussion bestenfalls überflüssig ist. Der US-amerikanische Physiker David Mermin, ein Kritiker dieser Philosophie, fasste die Kopenhagener Deutung 1989 in einem Slogan zusammen: »Shut up and calculate« (Halt die Klappe und rechne).

Begeistert vom Erfolg ihres minimalistischen Ansatzes, machten einige Gründer der Quantenphysik den Fehler, ihn für unvermeidlich zu halten. Zum Beispiel schrieb der deutsche Physiker Werner Heisenberg 1958: »Die Vorstellung einer objektiven, realen Welt, deren kleinste Teile in der gleichen Weise objektiv existieren wie Steine und Bäume, gleichgültig, ob wir sie beobachten oder nicht, ist unmöglich.« Glücklicherweise haben Physiker

das nie bewiesen. Die Frage nach der Realität der Quantenmechanik ist heute noch genauso offen wie damals.

Viele-Welten-Theorie

Laut der Viele-Welten-Theorie (siehe »Spektrum« April 2008, S. 24), die der US-Amerikaner Hugh Everett 1956 entwickelte, sind überlagerte Zustände real und existieren gleichzeitig: So trennt sich beispielsweise bei jeder Messung von Schrödingers Katze ein Universum, in dem sie lebt, von einem anderen, in dem sie tot ist. Der deutsche Physiker Dieter Zeh fand 1970 heraus, dass dieser Ansatz mit unserem Eindruck vereinbar ist, in bloß einem einzigen Universum zu leben. Denn sobald sich zwei Universen ausreichend unterscheiden, würden sie nicht mehr miteinander wechselwirken.

Bohmsche Mechanik

Die 1952 vom US-amerikanischen Physiker David Bohm eingeführte bohmsche Mechanik, dessen Idee vom Franzosen Louis de Broglie 1927 stammt, beschreibt eine Welt aus Punktteilchen, die deterministisch von ihrer Wellenfunktion geleitet werden. 1993 stellten die Physiker Detlef Dürr, Sheldon Goldstein und Nino Zanghi fest, dass die empirischen Vorhersagen der bohmschen Mechanik mit denen des orthodoxen Kopenhagener Ansatzes übereinstimmen.

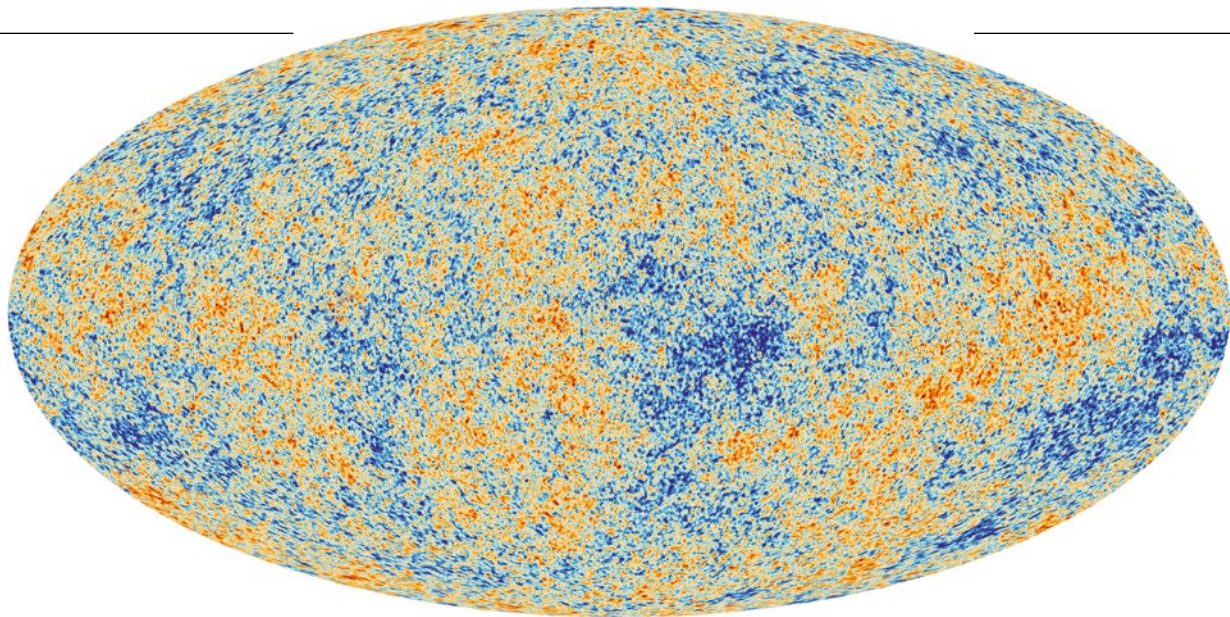
Spontane Lokalisierung

Spontane Lokalisierungsmodelle modifizieren die Gesetze der Quantenmechanik leicht, um

makroskopische Überlagerungen unmöglich zu machen. Der Preis dafür ist eine winzige Änderung der quantenphysikalischen Vorhersagen, die noch nicht beobachtet wurde. Im Modell von Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber von 1986 ist diese Änderung eine kollabierende Wellenfunktion. Ein solches Ereignis soll extrem selten, zufällig an einem Punkt im Raum, stattfinden. Der Kollaps der Wellenfunktion, der in der Kopenhagener Deutung bloß durch eine Messung hervorgerufen wird, erfolgt hier auf natürliche Weise.

QBismus

2001 entwickelten Carlton Caves, Christopher Fuchs und Rüdiger Schack die Theorie des »QBismus« (siehe »Spektrum« November 2013, S. 46): Die Wellenfunktion ist dabei bloß ein mathematisches Werkzeug, das die Erwartungen eines Beobachters an das untersuchte Quantensystem enthält. Eine solche rein statistische Betrachtung ist zwar attraktiv, ist aber nicht mit den Ergebnissen der bellschen Ungleichungen vereinbar, wonach die Quantenphysik nichtlokal ist. Um solche Widersprüche zu vermeiden, muss man auf den Begriff der objektiven Realität verzichten. Dadurch sind experimentelle Ergebnisse subjektiv – sie hängen vom Beobachter ab. Für Fuchs ist die Wirklichkeit partizipativ: geschaffen von dem und für den Betrachter. Im QBismus muss man akzeptieren, wie es David Mermin ausdrückt, »dass der Mond nachweislich nicht da ist, wenn man nicht hinsieht«.



ESA AND THE PLANCK COLLABORATION (WWW.ESA.INT/ESA_IMAGES/2013/PLANCK_CMB)

Neuer Blick auf altes Licht

Die kosmische Mikrowellenstrahlung ist das älteste Licht, das aus dem Universum zu uns dringt. Sie entstand etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall, als das Gemisch aus Teilchen durch die Ausdehnung des Kosmos an Dichte verlor und die Strahlung entweichen konnte. Die Wellen haben alle eine Tempe-

ratur von etwa 2,7 Kelvin – was zirka -270 Grad Celsius entspricht. Daher vermuten Forscher, das Universum habe schon sehr früh eine homogene Struktur besessen.

Allerdings gibt es im Temperaturprofil auch Schwankungen von etwa einem 1000stel Prozent. Im obigen Bild sind wärmere Strahlen

aus dem entsprechenden Teil des Universums rötlich und kältere bläulich gekennzeichnet.

Physiker rätseln seit Jahrzehnten, was diese Schwankungen verursacht hat. Einige von ihnen hoffen, dass eine relativistische Version der De-Broglie-Bohm-Theorie eine mögliche Erklärung liefern könnte.

sprechenden relativistischen Formalismus für die bohmische Mechanik zu entwickeln. Dabei sollte das Teilchenbild wie in der quantenmechanischen Version der dBB-Theorie weiterhin bestehen bleiben. Damit der Ansatz Erzeugungs- und Vernichtungsprozesse von Partikeln enthält, muss man die bohmische Mechanik verändern. 2004 fand ein Team um den Mathematiker Detlef Dürr von der LMU München eine Methode, um eine bestimmte Teilchenklasse, so genannte Fermionen, entsprechend einzubinden. Drei Jahre später gelang das Kollegen und mir unabhängig davon auf andere Weise. Um jedoch eine vollständige relativistische Theorie zu entwickeln, muss man auch die zweite Teilchenklasse integrieren, die so genannten Bosonen. Denn alle bekannten Partikel teilen sich in zwei Kategorien auf: Fermionen, die Bausteine der Materie wie Elektronen oder Quarks; und Bosonen, die für die Grundkräfte verantwortlich sind, etwa Photonen oder Gluonen.

Bosonen bereiten im dBB-Formalismus allerdings große Probleme: Bislang konnten Physiker keinen Weg finden, sie in der relativistischen Theorie als Punktteilchen einzuführen. Bohm hatte bereits geahnt, dass sich die Teilchenklasse grundsätzlich nicht auf diese Weise beschreiben lässt. Stattdessen scheint es geeigneter, Felder zu verwenden, die durch Fermionen wechselwirken und so Bosonen erzeugen und vernichten.

Eine relativistische Quantentheorie reicht allerdings nicht aus, um alle bekannten physikalischen Phänomene zu erklären. Denn sie enthält nicht die Gesetze von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie, welche die Gravitation beschreibt. Die beiden Gebiete miteinander zu vereinen, stellt seit mehr als einem Jahrhundert eines der wichtigsten offenen Probleme der modernen Physik dar. In der allgemeinen Relativitätstheorie krümmt Energie – und damit Materie – die Raumzeit. Die von uns wahrgenommene Schwerkraft entsteht also durch einen gekrümmten Raum. Darin taucht Materie allerdings nur in klassischer Form auf. Das wirft zahlreiche Fragen auf, die sich bis heute nicht beantworten lassen: Wie ändert sich die allgemeine Relativitätstheorie, wenn man quantenmechanische Materie einführt? Gehorcht die Raumzeit den Gesetzen der Quantenmechanik?

Bisher weiß man leider nicht viel über eine mögliche Quantengravitationstheorie. Sie könnte aber ein ganz neues Bild der Realität schaffen. Einer der Anwärter, die Stringtheorie, kommt beispielsweise ohne Teilchen oder Felder aus, sondern enthält bloß winzige eindimensionale Fäden, so genannte Strings. Ihre Schwingungen würden dann die Elementarteilchen und Wechselwirkungen liefern, die wir beobachten. Allerdings ist die Stringtheorie sehr spekulativ und extrem kompliziert.

Darüber hinaus gibt es noch andere Ansätze für eine Quantengravitationstheorie. Die dBB-Theorie könnte solche Modelle in ein neues Licht rücken. Derzeit untersuche ich mit meinen Mitarbeitern, inwiefern die bohmsche Mechanik einige der Ansätze verändert und welche Folgen das für die Kosmologie hat.

Zu den bekanntesten Vorschlägen für eine Quantentheorie der Gravitation gehören neben der Stringtheorie die so genannte kanonische Quantengravitation und die Schleifen-Quantengravitation. Erstere stellt den konservativsten Ansatz dar: Physiker wenden dabei die gleichen Techniken auf die allgemeine Relativitätstheorie an, mit denen sie zuvor klassische Theorien, etwa den Elektromagnetismus, in eine Quantenversion überführt hatten (siehe »Kurz erklärt: Kanonische Quantisierung«, S. 16). Daraus erhält man die so genannte Wheeler-DeWitt-Gleichung, eine Art Schrödingergleichung für die Raumzeit, die allerdings unüberwindbar erscheinende mathematische Mängel aufweist. Deshalb haben sich Physiker zunächst einfacheren Systemen zugewandt, indem sie Modelle entwickelten, die über weniger Symmetrien verfügen als die allgemeine Relativitätstheorie. Sie hoffen auf diese Weise einige Eigenschaften der vollständigen Theorie besser zu verstehen.

Ein Schritt in Richtung einer Quantengravitationstheorie

Bei der Schleifen-Quantengravitation geht man ähnlich vor wie bei der kanonischen Variante. Man quantisiert ebenfalls die einsteinschen Gleichungen, allerdings modifiziert man dabei einige der Variablen. Der Ansatz liefert eine abgewandelte Form der Wheeler-DeWitt-Gleichung – mit einem entscheidenden Unterschied zur kanonischen Quantengravitation: Die Raumzeit erscheint in dem Fall diskretisiert, also nicht kontinuierlich. Das heißt, Raum und Zeit treten nur häppchenweise auf und besitzen damit eine körnige Struktur.

Bis heute gibt es keine experimentellen Hinweise darauf, welcher der Vorschläge richtig liegen könnte. Die einzelnen Ansätze sind so kompliziert, dass sich kaum sagen lässt, was sie überhaupt vorhersagen. Außerdem haben alle Quantengravitationstheorien das Messproblem, das bereits in der nichtrelativistischen Quantenmechanik auftaucht. Das stört in der Kosmologie besonders. Denn in einem solchen Fall betrachtet man das Universum als Ganzes; es existieren also keine externen Beobachter, die Messungen vornehmen. Zudem gibt es nur einen Kosmos und nicht eine Reihe von Universen, für welche die Wahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Versuchsausgänge relevant sein könnten. Darüber hinaus hängen die Wheeler-DeWitt-Gleichung aus der kanonischen Quantengravitation und ihre modifizierte Form aus der Schleifen-Quantengravitation nicht von der Zeit ab. Demnach wäre die Wellenfunktion des Universums immer gleich. Das lässt Physiker an der Gleichung zweifeln, denn damit kann man nicht erklären, wie sich das Universum entwickelt oder warum es sich ausdehnt.

Einige Physiker haben daher begonnen, einen dBB-Formalismus der Quantengravitationstheorien zu entwickeln. Unter anderem haben Jeroen Vink in den Niederlanden,

Nelson Pinto-Neto in Brasilien und mehrere andere Forscher in den 1990er Jahren eine bohmsche Version der kanonischen Quantengravitation hergeleitet. Und 2017 gelang es meinen Kollegen und mir, eine dBB-Variante der Schleifen-Quantengravitation zu formulieren. In dem Modell erhielten wir auch eine zeitunabhängige Version der Wheeler-DeWitt-Gleichung. Obwohl die darin enthaltene Wellenfunktion statisch ist, kann sich die dadurch beschriebene Raumzeit dennoch im Lauf der Zeit verformen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/quantenphysik



PETER JURIK / STOCK.ADOBE.COM

Im Allgemeinen unterscheiden sich die bohmschen Varianten der Raumzeit von denen in der allgemeinen Relativitätstheorie. Beispielsweise lassen sich Singularitäten wie die zu Beginn des Urknalls in der dBB-Theorie vermeiden.

Zudem mehren sich Hinweise darauf, dass man dank der bohmschen Mechanik auf die so genannte Dunkle Energie verzichten könnte. Astrophysiker haben die mysteriöse Größe vor Jahrzehnten eingeführt, um die beschleunigte Ausdehnung des Universums zu erklären. Allerdings ist bis heute völlig unklar, wie sie entsteht oder woraus sie aufgebaut ist. Wie sich kürzlich herausgestellt hat, könnte die bohmsche Variante der Wheeler-DeWitt-Gleichung ohne Dunkle Energie einen expandierenden Kosmos enthalten. Thibaut Demaerel und Christian Maes von der Katholischen Universität Leuven haben gemeinsam mit mir gezeigt, dass ein vereinfachtes Modell der kanonischen Quantengravitation im dBB-Formalismus zu einer beschleunigten Ausdehnung des Alls führen kann, ohne dafür eine Dunkle Energie zu benötigen.

Solche Ansätze sind sowohl für Kosmologen als auch für Quantenphysiker interessant. Während die übliche Formulierung der Quantenmechanik keine eindeutigen Hinweise auf kosmologische Ereignisse liefert, könnte eine bohmsche Version der Quantengravitation zu neuen Vorhersagen führen. Der Formalismus würde somit nicht nur Verständnisprobleme aus dem Weg räumen, sondern ebenfalls erklären, wie sich das Universum entwickelt. ◀

QUELLEN

Bricmont, J.: Quantum sense and nonsense. Springer, 2017

Dürr, D., Teufel, S.: Bohmian mechanics. Springer, 2009

Norsen, T.: Foundations of quantum mechanics : An exploration of the physical meaning of quantum theory. Springer, 2017

Oriols, X. et al.: Applied bohmian mechanics. The European Physical Journal D volume 68, 2014

Struyve, W.: Pilot-wave approaches to quantum field theory. Journal of Physics: Conference Series 306, 2011

PALÄONTOLOGIE HARTE FAKTEN FÜR WEICHE EIER

Bislang waren sich Wissenschaftler einig: Dinosaurier legten hartschalige Eier, während einige ihrer Verwandten im Meer lebende Junge zur Welt brachten. Funde fossiler Eier, die einst in einer weichen Hülle steckten, erschüttern diese Ansichten.

Als Schlüsselereignis in der Evolutionsgeschichte der Wirbeltiere gilt das Auftreten des so genannten amniotischen Eis. Sein entscheidender Anpassungsvorteil liegt im namensgebenden Amnion: der innersten Embryonalhülle, die das Austrocknen des Nachwuchses verhindert. Der nächste Entwicklungsschritt ereignete sich, als eine widerstandsfähige Außenhülle Schutz und mechanische Stabilität bot. Erst dadurch konnten vor mehr als 300 Millionen Jahren die ersten Reptilien das Festland erobern und den Weg für den Aufstieg der Vögel und Säugetiere ebnen.

Gehärtet durch kristallines Kalziumkarbonat, bleiben hartschalige Eier etwa von Vögeln als Fossilien gut erhalten. Im Gegensatz dazu zerfallen die ledrigen Außenhüllen der Exemplare, wie sie die meisten Eidechsen und Schlangen legen, meist sehr schnell. Da heutige Krokodile und Vögel hart-

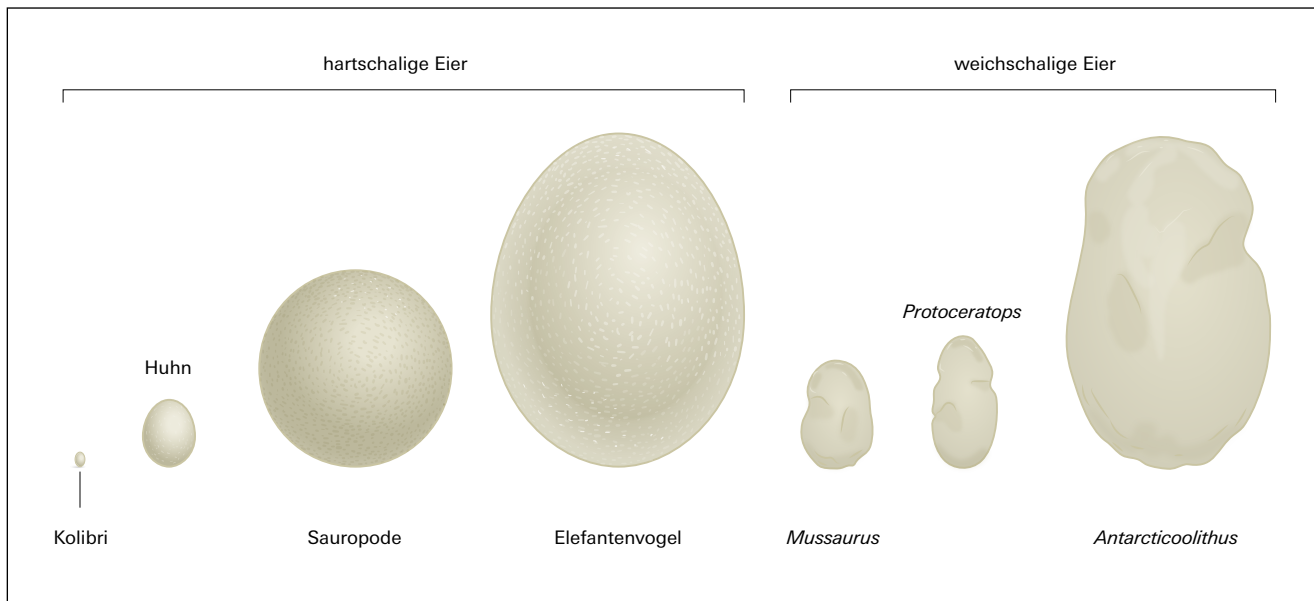
schalige Eier hervorbringen, galt bislang als sicher, dass ihre nahen Verwandten, die Dinosaurier, ebenfalls solche Schalen produziert haben. Millionen Jahre alte Fossilien weichschaliger Eier fordern nun diese vorherrschende Ansicht über die Fortpflanzung von Dinosauriern sowie von Meeresreptilien heraus.

Dinosauriereier und deren Schalen tauchten seit dem ersten dokumentierten Fund 1859 weltweit auf; mitunter enthielten sie sogar Überreste von Embryonen. Manche offenbarten bei den Tieren ein Nist- und Brutverhalten, wie wir es heute nur von Vögeln kennen. Allerdings beschränkt sich unser Wissen über Dinosauriereier lediglich auf wenige Gruppen: die riesigen Sauropoden, die Fleisch fressenden Theropoden sowie die Entenschnabel- oder Hadrosaurier. Darüber hinaus sind die meisten gefundenen Dinosauriereier geolo-

gisch gesehen recht jung und stammen aus Gesteinen der letzten und längsten Periode des Erdmittelalters: der von etwa vor 145 Millionen bis vor 66 Millionen Jahren andauernden Kreidezeit.

Wissenschaftler um Mark Norell vom American Museum of Natural History in New York haben nun die Mikrostruktur von Eiern zweier Saurier untersucht: von *Mussaurus*, einem Pflanzen fressenden, langhalsigen Wesen, das im heutigen Südamerika während des Noriums der Obertrias (227 bis 209 Millionen Jahre vor heute) lebte, sowie vom gehörnten *Protoceratops* aus dem Campanium der Oberkreide (84 bis 72 Millionen Jahre vor heute). Die zum Teil noch gut erhaltenen Embryonen waren von einer kalkfreien und somit weichen Schicht umhüllt (siehe Foto rechts).

Wie die Forscher auf Grund von Computermodellen vermuten, entwickelten sich kalkhaltige Eier bei Dinosauriern mindestens dreimal unabhängig voneinander aus solchen mit weicher Schale. Das erkläre auch die auffällige Vielfalt in den Schalenmikrostrukturen, die zwischen den verschiedenen Dinosauriergruppen zu beobachten ist. Die Tatsache, dass man bislang kaum Dinosauriereier kennt, die älter als 145 Millionen Jahre sind, beruht nach Ansicht der Wissenschaftler auf dem geringen Erhaltungs-



NATURE. UNDREHN, J., KEAR, B.P.: HARD EVIDENCE FROM SOFT FOSSIL EGGS. NATURE 583, 2020, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Das in der Wüste Gobi gefundene, versteinerte Gelege eines Dinosauriers der Gattung *Protoceratops* birgt sechs gut erhaltene Embryonen. Sie sind jeweils umhüllt von einer dünnen Schicht, die als ledrige, kalkfreie Eierschale interpretiert wird.

grad der pergamentartigen Schalen. Da weichschalige Eier schnell austrocknen und empfindlich sind, vergruben die Saurier sie vermutlich in feuchter Erde oder Sand. Hier brauchten sie nicht durch ein Elterntier bebrütet zu werden, da sich zersetzendes Pflanzenmaterial wohl genügend Wärme freigab.

Anders als bei Dinosauriern gehen Paläontologen bei meeresbewohnen-

den Reptilien des Erdmittelalters wie den lang gestreckten Mosasauriern, den delfinartigen Ichthyosauriern oder den langhalsigen Plesiosauriern davon aus, dass sie lebende Junge zur Welt brachten – eine Fortpflanzungsstrategie, die als Viviparie bezeichnet wird. Doch Lucas Legendre von der University of Texas in Austin und seine Kollegen präsentieren jetzt die Analyse eines etwa 68 Millionen Jahre alten,

fußballgroßen Eis aus der oberen Kreide, das ein chilenisches Forscherteam 2011 auf der Seymour-Insel in der Antarktis entdeckt hatte. Die Wissenschaftler taufte ihr Fossil nach dem Fundort sowie den griechischen Worten für Ei und Stein auf den Namen *Antarcticoolithus*. Mit einer Länge von fast 30 Zentimetern gehört es zu den größten bislang bekannten Eiern – nur einige Dinosaurier oder der ausgestorbene Elefantenvogel *Aepyornis maximus* aus Madagaskar legten noch voluminösere Gebilde. Diese besaßen jedoch dicke, kalkhaltige Schalen, während die Hülle bei *Antarcticoolithus* dünn und vermutlich weich war (siehe »Evolution des Eis«, links).

Das fossile Ei barg keine embryonalen Überreste mehr. Auf Grund struktureller Ähnlichkeiten mit den ledrigen Eiern von Schuppenechsen (Lepidosauria) – zu denen alle heutigen Echsen, Schlangen, Doppelschleichen sowie die Brückenechse *Sphenodon punctatus*, aber auch die Mosasaurier gehören – spekulieren Legendre und seine Kollegen, *Antarcticoolithus* könnte von einem derartigen Meeresreptil stammen, das mehr als sechs Meter lang gewesen sei. Da Mosasau-

Evolution des Eis

Hartschalige Eier variieren in ihrer Größe vom Winzling beim Kolibri über ein Hühnerei bis hin zum riesigen Gebilde des ausgestorbenen madagassischen Elefantenvogels *Aepyornis maximus*. Einige Dinosauriergruppen wie die Sauropoden legten ebenfalls Eier mit einer harten Kalkschale. Forscher um Mark Norell präsentieren nun weichschalige Dinosauriereier von *Mussaurus* (vor 227 Millionen bis 209 Millionen Jahren) beziehungsweise *Protoceratops* (vor 84 Millionen bis 72 Millionen Jahren). Diese Funde stellen die bislang geltende Annahme in Frage, wonach Dinosauriereier stets hartschalig waren.

Das Team um Lucas Legendre beschreibt wiederum ein riesiges, etwa 68 Millionen Jahre altes und ursprünglich weichschaliges Ei aus der Antarktis, das sie *Antarcticoolithus* nennen. Laut seiner Vermutung hat es ein Meeresreptil gelegt. Auf Grund der Entdeckung von Norell und seinen Kollegen könnte es jedoch von einem Dinosaurier stammen.

rier mit ihrem stromlinienförmigen Körper kaum an Land gehen konnten, gehen die Forscher außerdem davon aus, dass die Eiablage wohl in einer gewissen Wassertiefe stattfand. Allerdings sind die Jungen heutiger lebend gebärender Echsen voll entwickelt und nur von dünnen extra-embryonalen Membranen umgeben; bei den wenigen bekannten Fossilien trächtiger Mosasaurier und ihren Vorfahren fand man nie Eierschalenreste. Außerdem dürfte das Legen von weichschaligen Eiern unter Wasser für die Luft atmenden Neugeborenen nicht ganz ungefährlich gewesen sein.

Mit der Beschreibung weichschaliger Dinosauriereier von Norell und seinen Kollegen erscheint *Antarcticoolithus* in einem anderen Licht. Tatsächlich entspricht dessen Umfang dem der größten Eier von Dinosauriern und Vögeln, und beide Gruppen blicken auf eine lange Evolutionsgeschichte in der Antarktis zurück. *Antarcticoolithus* könnte also durchaus statt von einem Meeresreptil von einem Dinosaurier stammen und somit an Land gelegt worden sein. Die Schalenreste wurden dann wohl ins Meer gespült und schwammen durch eingeschlossene Luftblasen noch einige Zeit im Wasser, bevor sie auf den Meeresboden hinabsanken, wo sie schließlich im Sediment versteinerten. Um zu klären, ob dem wirklich so war, sind in Zukunft weitere spektakuläre Funde nötig: von fossilen Eiern mit intakten Embryonen. ◀

Johan Lindgren ist promovierter Paläontologe an der schwedischen Universität Lund. Sein Kollege **Benjamin P. Kear** ist Kurator für Wirbeltierpaläontologie am Museum für Evolution der Universität Uppsala.

QUELLEN

Legendre, L. J. et al.: A giant soft-shelled egg from the Late Cretaceous of Antarctica. *Nature* 583, 2020

Norell, M. A. et al.: The first dinosaur egg was soft. *Nature* 583, 2020

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 583, S. 365–366, 2020

ZAHLENTHEORIE FORTSCHRITT BEI FOLGEN

Sechs Jahrzehnte lang blieb ein Rätsel über arithmetische Muster ungelöst. Nun haben zwei Mathematiker immerhin einen Teil davon geknackt.

▶ Vor mehr als 60 Jahren äußerte der ungarische Mathematiker Paul Erdős (1913–1996) eine Vermutung, wann eine unendliche Liste natürlicher Zahlen mindestens drei gleich weit voneinander entfernte (wie 26, 29 und 32) enthält. Erdős hat im Lauf seiner Karriere tausende Fragen aufgeworfen, an denen sich viele Forscher bis heute die Zähne ausbeißen. Das Problem der äquidistanten Zahlen (auch arithmetische Folge genannt) zählt zu seinen Favoriten – und nach Einschätzung des Fields-Medaillen-Preisträgers Timothy Gowers von der University of Cambridge auch zu einem Lieblingsproblem vieler seiner Kollegen.

Je dichter eine Liste von Zahlen ist, desto wahrscheinlicher enthält sie arithmetische Folgen. Daher schlug Erdős ein einfaches Kriterium für die Lösung vor: Man addiere die Kehrwerte aller Zahlen auf der Liste. Ist die Summe unendlich, so vermutete er, gibt es unendlich viele arithmetische Folgen beliebiger Länge – Tripel, Quadrupel und so weiter. Belegen konnte er die Idee jedoch nicht.

Im Juli 2020 haben Thomas Bloom von der University of Cambridge und Olof Sisask von der Universität Stockholm eine noch nicht begutachtete Arbeit veröffentlicht, in der sie die Vermutung für äquidistante Tripel beweisen. Eine Liste, deren Summe der Kehrwerte unendlich groß ist, enthält demnach unendlich viele Tripel gleich weit entfernter Zahlen. Ein Beweis für Quadrupel oder höhere Tupel steht allerdings noch aus.

Die Veröffentlichung von Bloom und Sisask ist 77 Seiten lang, daher wird es sicherlich dauern, bis Mathematiker sie geprüft haben. Aber viele zeigen sich optimistisch: »Ihr Beweis sieht so aus, wie man ihn sich vorstellt«, kommentiert Nets Katz vom California Institute of Technology.

Es ist leicht, eine unendliche Liste zu finden, die keine arithmetische Folge enthält. Dazu muss sie bloß spärlich genug sein. Ein Beispiel ist: 1, 10, 100, 1000, 10000, ... , deren Kehrwerte sich zu 1,1111... summieren. Weil der Abstand der Zahlen voneinander so schnell wächst, gibt es kein Tripel gleich weit entfernter Zahlen.

Wie sieht es dagegen mit dichten Listen aus? Ist es möglich, eine ohne arithmetische Folge zu erzeugen? Man könnte beispielsweise den Zahlenstrahl durchgehen und jede Zahl notieren, die keine arithmetische Folge abschließt: 1, 2, 4, 5, 10, 11, 13, 14, ... Auf den ersten Blick sieht die Liste ziemlich dicht aus. Allerdings wird sie extrem spärlich, wenn man zu höheren Zahlen übergeht – bei 20 Stellen enthält die Liste zum Beispiel nur noch etwa 0,000009 Prozent der positiven ganzen Zahlen. 1946 schlug der Mathematiker Felix Behrend (1911–1962) weitere Listen vor, doch auch diese werden schnell spärlich. Eine Behrend-Liste, die bis zu 20-stelligen Zahlen geht, enthält etwa 0,001 Prozent der natürlichen Zahlen.

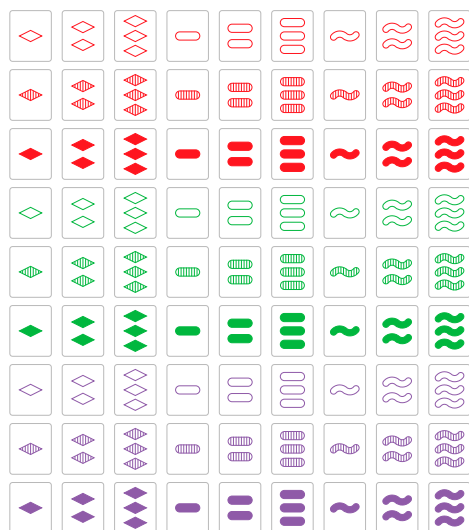
Betrachtet man das Gegenteil, also eine Liste, die fast alle positiven Zahlen enthält, finden sich darin zwangsläufig arithmetische Folgen. Zwischen den beiden Extremen gibt es allerdings eine riesige Bandbreite an Listen, die weitgehend unerforscht sind. Mathematiker fragten sich, wie spärlich eine Liste höchstens sein darf, um trotzdem arithmetische Folgen zu enthalten.

Erdős lieferte darauf eine mögliche Antwort. Seine Bedingung an die Summe der Kehrwerte hängt mit der Dichte einer Liste zusammen: Bis zu einer beliebigen Zahl N mit n Ziffern muss die Liste eine Dichte von mindestens $1/n$ haben. Die Liste darf also spärlicher werden, aber nur sehr langsam. Ist das Kriterium erfüllt, so

Knifflige Symbolsuche

Das Ziel des Kartenspiels »Set« ist es, bestimmte Tripel in einem Deck aus 81 Karten zu finden. Jede Karte hat ein unterschiedliches Design mit vier verschiedenen Eigenschaften: Farbe (rot, grün, lila), Form (Raute, Oval, Welle), Füllung (leer, gestreift, voll) und Anzahl (eine, zwei, drei Kopien der Form). Man deckt zwölf Karten aus dem Stapel auf, und die Spieler müssen drei finden, bei denen jede Eigenschaft entweder gleich oder unterschiedlich ist. Manchmal gibt es kein solches Tripel, dann muss man weitere Karten ansehen.

Das gesamte Deck



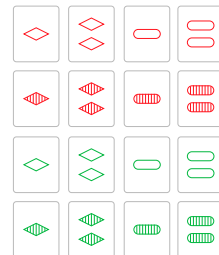
Set oder kein Set

Einige Beispiele

Sind alle Eigenschaften gleich oder unterschiedlich?				
Farbe	x	x	alle unterschiedlich	alle gleich
Form	alle unterschiedlich	alle unterschiedlich	alle unterschiedlich	alle gleich
Füllung	alle unterschiedlich	alle unterschiedlich	alle unterschiedlich	alle gleich
Anzahl	x	alle unterschiedlich	alle unterschiedlich	alle unterschiedlich
	kein Set	kein Set	Set	Set

Tripelfreie Karten

Es gibt einen einfachen Weg, um eine große Sammlung von Karten zusammenzustellen, die kein Set enthalten: Man verwendet nur Karten, die zwei von drei Eigenschaften aufweisen. Die Sammlung ist dann $(\frac{2}{3})^n$ -mal so groß wie das gesamte Deck, wobei n der Anzahl der gewählten Eigenschaften entspricht.



LUCY READING-INKANDA UND SAMUEL VELASCO / QUANTA MAGAZINE

vermutete Erdős, sollte die Liste immer noch unendlich viele arithmetische Folgen beliebiger Länge enthalten.

1953 widmete sich der Mathematiker Klaus Roth (1925–2015) dem Problem. In einer Arbeit, die ihm fünf Jahre später die Fields-Medaille einbrachte, leitete er eine Dichte her, die äquidistante Tripel garantiert – die Dichte ist zwar größer als Erdős', dennoch nähert sie sich für große Zahlen gegen null.

Roth nutzte die Tatsache, dass die meisten Listen mit der von ihm gewählten Dichte zu arithmetischen Folgen tendieren: Sie enthalten etliche Zahlenpaare, wodurch \neq einige von ihnen mit großer Wahrscheinlichkeit einen Mittelpunkt besitzen, der zur Liste gehört. Der knifflige Teil seiner Arbeit bestand darin, die Erkenntnis auf alle Zahlenlisten mit entsprechender Dichte zu verallgemeinern.

Um komplizierte Fälle anzugehen, nutzte er eine Art Sieb, so dass er sich auf die wichtigste Struktur der Liste konzentrieren konnte. Das gelang ihm mit Hilfe der Fourier-Transformation,

die periodische Muster offenbart. Physiker verwenden die Technik unter anderem in der Röntgenkristallografie.

Wendet man Fourier-Transformation auf eine Liste von Zahlen an, treten einige Muster hervor – wenn sie etwa mehr ungerade als gerade Einträge enthält. In diesem Fall kann man sich auf ungerade Zahlen konzentrieren und mit einer dichteren Menge (gemessen an allen ungeraden Zahlen) arbeiten als der Ausgangsliste (relativ zu allen Zahlen). Nach einer endlichen Anzahl solcher Aussiebungen bleibt gemäß Roths Beweis stets eine Liste übrig, die so dicht ist, dass sie zwangsläufig arithmetische Folgen besitzt.

Roths Argument funktioniert allerdings nur bei Mengen, die von vornherein recht dicht sind – sonst bleiben nach den Aussiebungen kaum noch Zahlen übrig. Andere Mathematiker fanden allmählich Wege, Roths Methode zu erweitern, aber sie gelangten damit nicht zu Listen mit der spärlichen Dichte von Erdős' Vermutung. Ein weiterer Durchbruch erfolgte 2011,

als Katz und Michael Bateman untersuchten, wie das Erdős-Problem mit dem Kartenspiel »Set« zusammenhängt. Dort sucht man nach passenden Dreierkombinationen gemusterter Karten (siehe »Knifflige Symbolsuche«, oben). Die darin auftauchenden Karten-Tripel lassen sich den Forschern zufolge als arithmetische Folgen ansehen. Ähnlich wie bei Listen natürlicher Zahlen ergibt sich auch bei »Set« die Frage, wie viele Karten man aufdecken muss, um mit Sicherheit mindestens ein passendes Tripel zu finden.

Wegen des anwendungsbezogenen Beispiels erstellte Gowers ein Polymath-Projekt. Dabei handelt es sich um eine riesige Online-Kooperation, bei der sich Experten und Laien einer mathematischen Aufgabe widmen und sich darüber austauschen. Doch es wurde schnell viel zu technisch und kam daher zum Erliegen.

Kurze darauf begannen Bloom und Sisask zuerst unabhängig voneinander, über Erdős' Vermutung nachzudenken. Beide waren fasziniert von der Schön-

heit der verwendeten Methoden. »Das war eines meiner ersten Forschungsprobleme«, erinnert sich Sisask, der wie Bloom erst Mitte 30 ist.

Sie schlossen sich 2014 zusammen, und bis 2016 glaubten sie, eine Lösung gefunden zu haben. Bloom verkündete das Ergebnis sogar in einem Vortrag, nur um danach festzustellen, dass einige ihrer Methoden falsch waren. Sie machten weiter, tauchten in die Arbeit von Bateman und Katz ein und fanden schließlich heraus, welche neuen Ideen es ermöglichen, die darin genutzten Techniken von der Spielwelt von »Set« auf die ganzen Zahlen zu übertragen. Ihre Ergebnis wird von Experten als großer Erfolg gefeiert.

Was die vollständige Vermutung von Erdős betrifft, bleibt viel zu tun. Bloom und Sisask haben den Verdacht nur für äquidistante Tripel bewiesen, nicht für längere arithmetische Folgen – die Lösung scheint derzeit außer Reichweite.

Zu den Tripeln ist das letzte Wort vielleicht noch nicht gesprochen. Es war zwar extrem schwierig, Erdős' Verdacht für äquidistante Tripel zu beweisen, dennoch vermuten Mathematiker, arithmetische Folgen könnten auch bei niedrigeren Dichten auftauchen. »Wir haben das Problem keinesfalls vollständig gelöst«, meint Bloom. »Aber wir haben ein wenig mehr Licht in die Sache gebracht.« ◀

Erica Klarreich ist Wissenschaftsjournalistin in Berkeley.

QUELLEN

Bateman, M., Katz, N.H.: New bounds on cap sets. ArXiv 1101.5851, 2011

Bloom, T. F., Sisask, O.: Breaking the logarithmic barrier in Roth's theorem on arithmetic progressions. ArXiv 2007.03528, 2020

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Landmark Math Proof Clears Hurdle in Top Erdős Conjecture« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

 **Quanta** magazine

LUFTVERSCHMUTZUNG WIE STADTGASE ZU FEINSTAUB KONDENSIEREN

In vielen Metropolen entstehen nanometergroße Schwebstoffteilchen. Doch bisherige Beobachtungen zu deren Wachstum widersprechen dem gängigen Verständnis davon, wie sich die Partikel bilden. Jetzt liefern Experimente eine mögliche Erklärung.

► Eine Forschungsgruppe um Mingyi Wang von der Carnegie Mellon University in Pittsburgh (USA) hat herausgefunden, dass Partikel in der Luft durch die Kondensation von Ammoniumnitrat rascher anwachsen als gedacht – und zwar unter Bedingungen, die in vielen Städten typischerweise im Winter herrschen. Zwar machten die Autorinnen und Autoren der Studie ihre Beobachtungen in einem Labor, doch sie argumentieren, dass ganz ähnliche Gegebenheiten vorübergehend in Großstädten herrschen können.

Feinstaub ist für die Luftqualität in vielen Großstädten weltweit ein bedeutender Faktor, da Mediziner ihn mit zahlreichen Krankheiten in Verbindung bringen. Darüber hinaus wechselwirkt er mit Sonnenstrahlung und Wolken und beeinflusst so das regionale Klima. Die kleinen Teilchen tragen nicht nur zur Gesamtzahl an Partikeln in der Luft bei, sie können auch als Keime für Wolken dienen (siehe Spektrum Februar 2020, S. 64). Um vorherzusagen, wie Feinstaub die Gesundheit und das Umgebungsklima beeinflusst, ist es daher wichtig zu wissen, auf welche Weise die Partikel entstehen und wachsen.

In den letzten Jahren haben Forscherinnen und Forscher mehr und mehr darüber herausgefunden. Trotzdem können sie mit ihrem bisherigen Verständnis der frühen Stadien des Partikelwachstums – der entscheidenden Phase, in der eine anfängliche Ansammlung von Molekülen so groß wird, dass tatsächlich ein Schwebeteilchen entsteht – nicht erklären, warum sich in Großstädten neue Feinstaubteilchen bilden. Über welchen Zeitraum neu entstandene Ansamm-

gen von Molekülen bestehen bleiben, hängt von zwei Faktoren ab: zum einen davon, wie schnell bereits existierende Partikel sie anlagern (die so genannte Kondensationssenke), und zum anderen davon, wie rasch die Ansammlungen selbst größer werden (die Wachstumsrate der Cluster). Das Verhältnis beider Größen zueinander entscheidet darüber, wie lange die Zusammenballungen bestehen, und beide Werte hängen von der Verteilung der Partikelgröße ab.

Die Kondensationssenke lässt sich direkt aus den Durchmessern ableiten. Die Wachstumsrate hingegen bestimmen Fachleute für gewöhnlich, indem sie beobachten, wie Cluster in der typischen Größenordnung von einem bis zehn Nanometern mit der Zeit anwachsen. Diese Methode setzt voraus, dass die Umweltfaktoren, die das Clusterwachstum beeinflussen, innerhalb eines bestimmten Bereichs konstant sind. Damit lässt sich das Verhalten von Partikeln in ländlichen Gegenden gut beschreiben, jedoch nicht das in Städten.

Dort kann ein Kubikmeter Luft mit mehr als 500 Mikrogramm Feinstaub belastet sein, während im ländlichen Raum im gleichen Volumen normalerweise weniger als ein Hundertstel dessen anzutreffen ist. Das bedeutet: Neu gebildete Konglomerate von Molekülen lagern in Städten sehr schnell Wasserdampf an oder verbinden sich mit anderen Molekülanansammlungen. Sonst würden sie nicht rasch genug wachsen, um zu neuen Feinstaubteilchen zu werden, sondern würden von bereits bestehenden Teilchen »verschluckt«. Die Wachstumsraten sind in Städten aber lediglich ein paar Mal größer als in abgele-

genen ländlichen Gebieten. Es ist also schwierig zu verstehen, wie neu gebildete Partikel im urbanen Raum Durchmesser von zehn oder mehr Nanometern erreichen sollen. Doch gerade das passiert dort, vor allem in der kalten Jahreszeit.

Um den Sachverhalt zu untersuchen, stellten Wang und seine Kollegen die für eine Großstadt typischen atmosphärischen Bedingungen im Labor nach. Dabei konzentrierten sie sich auf den Stoff Ammoniumnitrat (NH_4NO_3). Er ist im Frühling sowie im Winter zwar ein wichtiger Bestandteil städtischen Feinstaubs, aber bislang schrieben Fachleute ihm keine tragende Rolle bei dessen Entstehung zu.

Das Molekül liegt nicht ausschließlich als solches vor, sondern befindet sich mit den Gasen Ammoniak (NH_3) und Salpetersäure (HNO_3) im Gleichgewicht. Dieses ist temperaturabhängig: Je wärmer es ist, desto mehr liegt es auf Seiten der Gase.

Den Experimenten der Autoren zufolge kondensieren Ammoniak und Salpetersäure bei Temperaturen unter fünf Grad Celsius allerdings schnell zu Ammoniumnitrat, welches dann neue Molekülcluster bildet (siehe B in Grafik unten). Bei diesen Temperaturen

können die atmosphärischen Konzentrationen von gasförmigem Ammoniak und Salpetersäure ihre Gleichgewichtskonzentrationen überschreiten.

Entscheidend ist: Die beobachtete schnelle Kondensation beschleunigt das Wachstum der Keime. So wurden die Partikel bei minus zehn Grad Celsius 200-mal schneller größer als bei plus fünf Grad Celsius – bei denselben Gaskonzentrationen von Ammoniak und Salpetersäure. Die hier beobachteten Wachstumsraten bei niedrigen Temperaturen liegen viel höher als diejenigen, die Forscher bislang aus Feldexperimenten in städtischen Gebieten abgeleitet haben.

Mit Hilfe ausgeklügelter massenspektrometrischer Messungen ermittelte das Team um Wang die Zusammensetzung von Dämpfen und Partikeln und zeigte so, dass Ammoniumnitrat bei Temperaturen höher als minus 15 Grad Celsius nicht an der eigentlichen Entstehung von Feinstaub beteiligt ist. Stattdessen bildet sich dieser über einen wohlbekanntem Weg, bei dem Ammoniak und Schwefelsäure (H_2SO_4) eine Rolle spielen. Erst wenn eine Ansammlung von Molekülen eine gewisse Größe erreicht, beginnt sie durch die Kondensation rasch zu

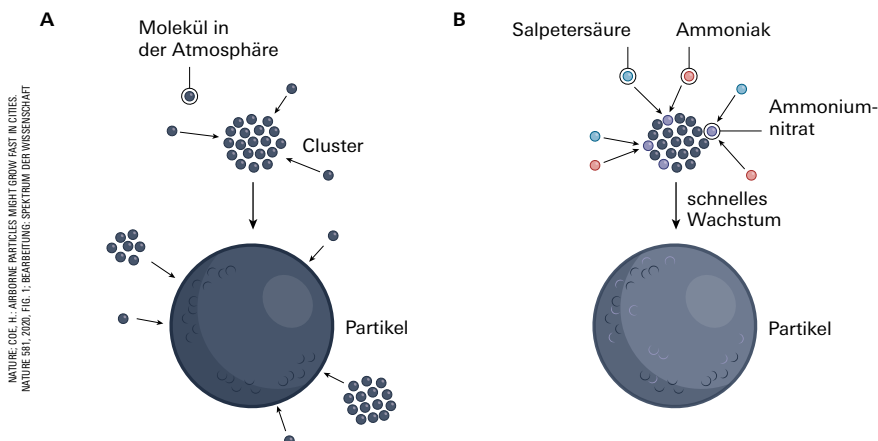
wachsen. Jedoch können unter minus 15 Grad neue Partikel direkt aus Ammoniumnitrat entstehen. Die Forscher vermuten solch einen Prozess in konvektiven tropischen Wolken.

Die kritische Größe, ab der Cluster der Substanz zu einem schnellen Wachstum führen, hängt laut den Autoren vom Sättigungsverhältnis des Systems von Ammoniak und Salpetersäure ab. Das ist das Verhältnis der tatsächlichen Konzentration der beiden Gase zu ihrer Gleichgewichtskonzentration. Wird der Wert größer als eins, kondensieren sie rasch. Sobald ein Feinstaubteilchen einen gewissen Durchmesser erreicht hat, wächst es schnell weiter, denn die Gleichgewichtskonzentration von Ammoniak und Salpetersäure gegenüber dem Kondensationsprodukt ist für große Partikel viel geringer. Das heißt, die Gase reagieren dann schneller zu Ammoniumnitrat. Ganz ähnlich verhält es sich, wenn sich eine Flüssigkeitswolke um einen Kondensationskern bildet: Solche Wolken wachsen ebenfalls schnell, sobald die Sättigungsrate von Wasser höher als eins liegt.

Doch wie gut spiegeln die Laborbeobachtungen reale Bedingungen wider, und was sagen sie über tatsächliche Großstadträume aus? Die Mischungsverhältnisse der Gase Ammoniak und Salpetersäure in den Experimenten sind typisch für diejenigen in vielen städtischen Umgebungen, in manchen Megacities werden sie häufig sogar weit überschritten. Darüber hinaus herrscht in vielen Städten wie Peking oder Delhi oft eine starke Luftverschmutzung, bei der beide Gase in hohen Konzentrationen vorliegen. Und zwar meist im Winter bei Tagestemperaturen unter fünf Grad.

Trotzdem muss die Luft zunächst an Ammoniak und Salpetersäure übersättigt sein, bevor sich die entsprechenden Cluster bilden können. In einer heterogenen Umgebung, wie sie in vielen Städten herrscht, treten solche Übersättigungen den Autoren zufolge stellenweise mit hoher Wahrscheinlichkeit auf. Denn eine Fülle unterschiedlicher Abgase aus zahlreichen Quellen strömt um Gebäude und durch Straßenschluchten. Auch

Kleine Molekülansammlungen in der Atmosphäre wachsen zu echten Schwebeteilchen heran, indem sie weitere Materie anlagern. Sie können aber auch ihrerseits von bestehenden Partikeln »verschluckt« werden (A). Wenn es kalt ist, kondensieren Salpetersäure und Ammoniak in der Luft von Großstädten leicht zu Ammoniumnitrat. Dadurch wachsen Feinstaubpartikel schneller (B). Die Ergebnisse könnten erklären, warum in Megacities im Winter besonders viel Feinstaub entsteht.



NATURE COE. H. AIRBORNE PARTICLES MIGHT GROW FAST IN CITIES. NATURE 581, 2020. FIG. 1. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

der Verkehr trägt zu erheblichen Konzentrationsgradienten bei. Außerdem variiert die Temperatur in Städten häufig innerhalb weniger bis einiger zehn Meter, da Gebäude die Luft direkt kühlen oder aufheizen und verschiedene Oberflächen die Hitze unterschiedlich stark aufnehmen oder abstrahlen. Die Temperaturschwankungen können das Sättigungsverhältnis von Ammoniak und Salpetersäure so weit ändern, dass die Gase schnell kondensieren.

Im Labor von Wang und seinen Kollegen läuft der Prozess innerhalb einiger Minuten ab. Während ganz ähnlicher Zeiträume bestehen die Temperaturunterschiede in Städten über diverse Entfernungen. Demnach wäre es dort für Molekülcluster durchaus möglich zu wachsen, weitere Materie anzusammeln und Partikel zu

bilden. Die Erkenntnisse könnten also erklären, warum die ersten Stadien der Feinstaubentstehung in Städten manchmal so rapide verlaufen. Zuvor berechnete Wachstumsraten waren über Zeit und Raum gemittelt und berücksichtigten daher die uneinheitlichen Verhältnisse nicht.

Es wird äußerst schwierig sein, die schnelle Kondensation von Ammoniumnitrat tatsächlich in der Atmosphäre nachzuweisen, aber das Konzept ist sehr überzeugend. Zahlreiche halbflüchtige organische Verbindungen könnten dort beim Wachstum von Feinstaub eine ähnliche Rolle spielen. Im weiteren Sinn liefern die Forscher zentrale Erkenntnisse, die in Konzepte für eine bessere Qualität der Stadtluft einfließen werden, wenn sich deren chemische Zusammensetzung künftig

ändert. Vor allem die Schwefeldioxidemissionen gehen vielerorts zurück. Daher werden in den nächsten zehn Jahren oder darüber hinaus Stickoxide aus dem Straßenverkehr (Vorläufer für Salpetersäure) und Ammoniak aus der Landwirtschaft wohl die Hauptbestandteile urbaner Luftverschmutzung darstellen. ◀

Hugh Coe ist Atmosphärenforscher an der University of Manchester.

QUELLE

Wang, M. et al.: Rapid growth of new atmospheric particles by nitric acid and ammonia condensation. *Nature* 581, 2020

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 581, S. 145–146, 2020

QUANTENPHYSIK PAULI-KRISTALLE

Physiker haben erstmals einen Kristall aus Atomen erzeugt, die sich weder anziehen noch abstoßen. Die regelmäßige Struktur entsteht stattdessen durch ein grundlegendes quantenmechanisches Prinzip.

▶ Richtet man zwei Photodetektoren im Abstand von einigen Metern auf einen weit entfernten Stern und registriert die einzelnen ausgesandten Photonen, macht man eine überraschende Beobachtung: Die Teilchen treffen nicht unabhängig voneinander ein, sondern tendieren dazu, gleichzeitig in beiden Detektoren anzukommen. Allerdings stammen die Lichtquanten von unterschiedlichen Punkten auf der Oberfläche eines Sterns, der einen Durchmesser von mehreren Millionen Kilometern besitzt – die Photonen können daher nicht miteinander wechselwirken.

Der britische Astronom Robert Hanbury-Brown (1916–2002) und sein Kollege Richard Quintin Twiss (1920–2005) fanden bereits 1956 eine Erklärung für das seltsame Phänomen, die auf einem der wichtigsten Prinzipien der Quantenmechanik basiert: der Ununterscheidbarkeit identischer Teilchen.

In der alltäglichen Welt begegnen uns immer wieder Objekte, die wir als ununterscheidbar bezeichnen, etwa Kleidungsstücke, Pflanzen oder die Hütchen eines Hütchenspielers. Letzterer vertauscht die Objekte so schnell, dass es fast unmöglich erscheint, herauszufinden, unter welchem Hütchen am Ende die Erbse liegt. Theoretisch wäre es aber möglich, die Hütchen zu nummerieren und die Position der Erbse nachzuverfolgen. Das unterscheidet unsere gewohnte, makroskopische Welt vom Mikrokosmos.

Denn ununterscheidbare Teilchen lassen sich in der Quantenmechanik niemals differenzieren – nicht einmal theoretisch. Das liegt unter anderem daran, dass man die Position eines Objekts nicht exakt bestimmen kann. Es lässt sich lediglich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung dafür angeben, die durch die Wellenfunktion des Teilchens bestimmt wird. Sobald sich die Wellenfunktionen identischer

Teilchen überlappen, ist es unmöglich, sie auseinanderzuhalten. Damit kann man sie nicht mehr als individuelle Teilchen beschreiben.

Die Ununterscheidbarkeit ist keine reine mathematische Kuriosität, sondern ein fundamentaler Bestandteil der Gesetzmäßigkeiten der mikroskopischen Welt, die das Verhalten von Elementarteilchen und zusammengesetzter Materie beeinflussen. Tauscht man in einem Experiment beispielsweise ein beliebiges Paar identischer Teilchen aus, ändern sich die Ergebnisse nicht. Weil Messwerte immer nur vom Betrag der Wellenfunktion abhängen, darf diese beim Tauschvorgang höchstens ihr Vorzeichen ändern. Damit kann man alle Teilchen in zwei Klassen einordnen: Fermionen (Quarks, Elektronen, Neutrinos, Protonen und so weiter), deren Wellenfunktion ihr Vorzeichen ändert, wenn man sie vertauscht, und Bosonen (Photonen, Gluonen, Higgs-Teilchen und so

weiter), für welche die Wellenfunktion immer gleich bleibt.

Das hat handfeste Auswirkungen. Möchte man etwa mehrere Teilchen am gleichen Ort beschreiben, stellt das für Bosonen kein Problem dar. Bei Fermionen führt das jedoch für die Wellenfunktion ψ zur Bedingung $\psi = -\psi$, die nur durch $\psi = 0$ gelöst werden kann, das bedeutet, die Wahrscheinlichkeit für den Zustand ist null. Während Bosonen also dazu neigen, sich am gleichen Ort zu befinden, ist das für Fermionen unmöglich. Letzteres bezeichnen Wissenschaftler als Pauli-Prinzip.

Im anfangs beschriebenen Experiment mit den Photodetektoren erkennt man schnell das charakteristische Verhalten von Bosonen. Bei Fermionen führt das Pauli-Prinzip beispielsweise zum Schalenmodell der Atomphysik: Elektronen können nicht alle dieselbe Schale eines Atoms füllen, sondern müssen nach und nach auf weitere Schalen ausweichen.

In gewöhnlichen Isolatoren sind bei Raumtemperatur alle Zustände von Elektronen besetzt, wodurch kein Strom fließt, wenn man von außen eine Spannung anlegt. Experimente, bei denen man beispielsweise mit Elektronen auf einen Detektor schießt, zeigen ebenfalls derartige Vermeidungseffekte. Im Gegensatz dazu hat es sich bisher aber als extrem schwierig herausgestellt, das Pauli-Prinzip in statischen Systemen zu beobachten.

Das liegt an der kleinen Skala, in der solche Phänomene auftreten. Die Wellenlänge von Atomen bei Raumtemperatur beträgt weitaus weniger als einen Nanometer. Um die Folgen ihrer Ununterscheidbarkeit direkt zu messen, müsste man die Teilchen also sehr dicht zusammenbringen. Allerdings lassen sich einzelne Atome dann nicht mehr auflösen, denn selbst moderne Mikroskope versagen bei derartig geringen Abständen. Zudem wechselwirken die meisten quantenmechanischen Systeme, die für einen

Versuch in Frage kämen (etwa Elektronen), wegen ihrer elektrischen Ladung so stark miteinander, dass sie die Wirkung des Pauli-Prinzips überdecken.

Doch 2016 haben Physiker ein Experiment vorgeschlagen, mit dem sich die Ununterscheidbarkeit fermionischer Teilchen auf besonders beeindruckende Weise visualisieren ließe. Nun ist es unserer Arbeitsgruppe unter der Leitung von Selim Jochim an der Universität Heidelberg gelungen, den Versuch durchzuführen.

Die Idee beruht auf der Laserkühlung, die sich in den letzten Jahrzehnten zu einem der Standardwerkzeuge in der Experimentalphysik entwickelt hat. Dabei kühlt man Atome, in unserem Fall gasförmiges Lithium, durch Laser auf bis zu 50 Nanokelvin – also 50 milliardstel Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt von etwa minus 273 Grad Celsius. Das Lithiumgas verringert dabei seine mittlere Geschwindigkeit von zirka 1500 Metern pro Sekunde bei Raumtemperatur

Spektrum LIVE

Veranstaltungen des Verlags
Spektrum der Wissenschaft

30. Januar 2021
Zürich

WELTRAUMSIMULATOR UND VORTRAG

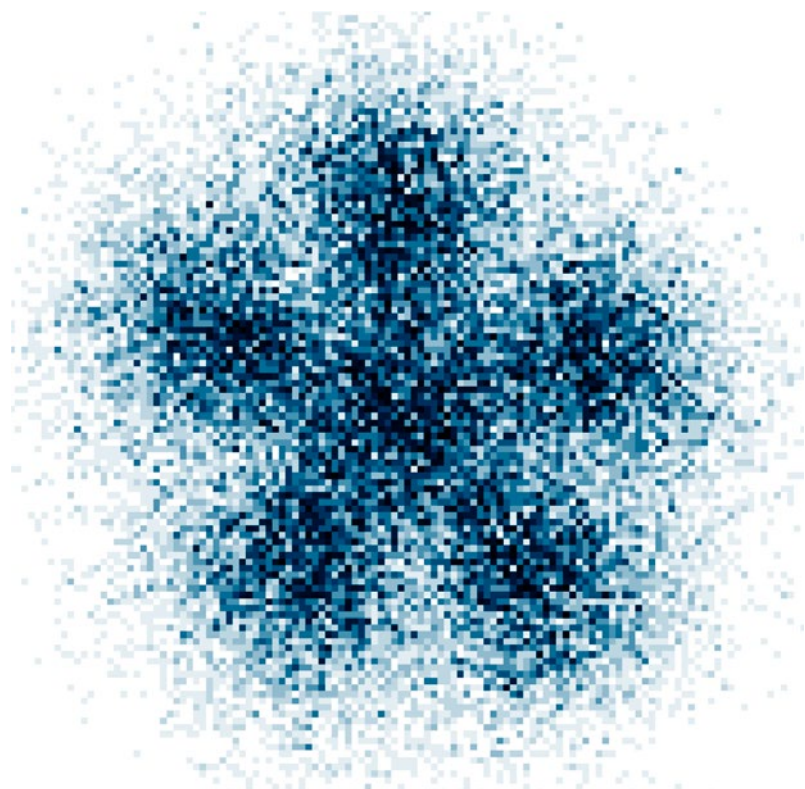
B777-Flug- und Space-Simulator und Vortrag

Seien Sie einmal selbst Pilot und Astronaut und fliegen Sie im B777-Flugsimulator, und/oder erforschen Sie im Space-Simulator Galaxien, Sternennebel und Planeten. Genießen Sie einen spannenden Vortrag zum Thema »Risk Management im Cockpit« sowie ein Apéro Catering, nehmen Sie an einem Wettbewerb teil und tauschen Sie sich mit einem aktiven B777-Kapitän in fachkundigen Gesprächen aus.

Spektrum-Live-Veranstaltung in Kooperation mit
Fly & Race Simulations GmbH

Infos und Anmeldung:

Spektrum.de/live



Wenn man den Versuch mit sechs ultrakalten Atomen mehrere tausend Mal wiederholt, bilden die Positionen der Teilchen ein regelmäßiges Muster.

auf bloß einen Zentimeter pro Sekunde. Die Wellenlänge der Teilchen vergrößert sich dadurch auf mehrere Mikrometer, wodurch sich ihre entsprechenden Wellenfunktionen schon bei deutlich geringeren Dichten überlappen. Quanteneffekte zeigen sich daher bereits bei 10000-mal größeren Abständen als bei Raumtemperatur.

Zudem lassen sich ultrakalte Quantengase extrem gut steuern und kontrollieren. So kann man beispielsweise die Wechselwirkungen zwischen den Atomen beliebig einstellen – von null bis hin zu einer Stärke, die vergleichbar ist mit der von Materie im Inneren eines Neutronensterns. Darüber hinaus ist es möglich, die Atome durch geschickt platzierte Laserstrahlen in beliebigen Geometrien anzuordnen. Je nach verwendetem Isotop eines Atoms kann man Bosonen (etwa Lithium-7) oder Fermionen (etwa Lithium-6) analysieren.

In unserem Versuchsaufbau haben wir Lithium-6-Atome heruntergekühlt und in einer Falle eingefangen. Indem

wir die Form der Falle passend einstellen, konnten wir jede Bewegung in die dritte Raumrichtung unterbinden. Das ermöglichte es uns, Quanteneffekte in einer zweidimensionalen Ebene zu untersuchen.

Wir begannen unser Experiment mit zirka einer Million Lithiumatomen. Anschließend haben wir nach und nach Teilchen aus der Falle entfernt, bis nur noch eine Hand voll nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt darin verblieben. Um herauszufinden, wo sich die Atome befinden, haben wir sie durch einen weiteren Laser angestrahlt, der sie zum Fluoreszieren brachte.

Als wir die Messung viele tausend Mal wiederholten, erkannten wir, dass die Positionen der einzelnen Atome voneinander abhängen: Bestimmte Konfigurationen traten deutlich häufiger auf als andere. Dabei ergibt sich eine kristallartige Struktur, die zeigt, in welcher Konfiguration sich die einzelnen Atome besonders oft in unserer zweidimensionalen Falle anordnen.

Das regelmäßige Muster entsteht, weil sich die Atome wegen des Pauli-Prinzips meiden, während die Falle sie gleichzeitig zusammenhält. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Kristallgittern in Festkörpern, die sich durch die elektrische Wechselwirkung der Teilchen ergeben, treten im so genannten Pauli-Kristall keine derartigen Kräfte auf. Anders als in echten Kristallen sind die Strukturen nur bei sehr kurzen Abständen und extrem niedrigen Teilchenenergien sichtbar und verschwinden unter anderen Bedingungen schnell. Die komplizierten Anforderungen erklären, warum ein solches Experiment erst jetzt geglückt ist.

Das Pauli-Prinzip gehört seit vielen Jahrzehnten zu einer der am besten überprüften Vorhersagen der Quantenmechanik. Das Ergebnis unseres Experiments ist daher nicht überraschend, aber es visualisiert eindrucksvoll die Folgen der Ununterscheidbarkeit von Teilchen.

Wir hoffen künftig die gleichen Methoden auf wechselwirkende Systeme anwenden zu können, die exotische Quanten-Eigenschaften wie Supraleitung oder Suprafluidität besitzen. Insbesondere in zwei Dimensionen sind Zustände extrem interessant, die Ströme ohne jeden Widerstand leiten. Einige Wissenschaftler vermuten sogar, die bisher unverstandene Hochtemperatursupraleitung in Cupraten hänge mit Elektronen zusammen, die in einer Ebene eingesperrt sind.

Auf lange Sicht sollen solche Experimenten dabei helfen, mehr über wechselwirkende Fermionensysteme herauszufinden. Damit könnte man künftig einige hartnäckige Rätsel der Physik lösen. ◀

Luca Bayha und **Marvin Holten** sind Physiker an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.

QUELLEN

Brown, R. H., Twiss, R. Q.: The question of correlation between photons in coherent light rays. *Nature* 178, 1956

Gajda, M. et al.: Single-shot imaging of trapped Fermi gas. *Europhysics Letters* 115, 2016

Holten, M. et al.: Observation of Pauli crystals. *ArXiv* 2005.03929, 2020



SPRINGER'S EINWÜRFE SELBSTKONTROLLE MIT KLEINEN FEHLERN

In aller Regel bestätigen renommierte Kollegen die Zuverlässigkeit einer eingereichten Forschungsarbeit. Doch manchmal entgeht ihnen etwas.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

» spektrum.de/artikel/1760444

Der Peer-Review-Prozess gilt als der Goldstandard fürs Publizieren. Wer innerhalb der Wissenschaftsgemeinde wüsste besser Bescheid als die engsten Kollegen (englisch: peers), um methodische Irrtümer, schlampigen Umgang mit Daten oder gar bewusste Täuschung auszuschließen? Wer könnte einen Artikel zuverlässiger einem Review unterziehen, das heißt fachkundig bewerten?

Erstaunlicherweise ist es noch gar nicht so lange her, dass Facharbeiten ganz ohne interne Vorprüfung das Licht der Öffentlichkeit erblickten. Erst in den 1970er Jahren bürgerte sich die Teilnahme von Experten am Veröffentlichungsprozess ein. Aber wenn es heute heißt »Eine neue Studie hat gezeigt ...«, darf man getrost annehmen: Die Arbeit wurde einem Peer-Review unterzogen.

Wie funktioniert das? Typischerweise legen die Redakteure der jeweiligen Fachzeitschrift den Artikelentwurf zwei bis drei Prüfern vor, die ihn binnen einer vorgegebenen Zeit begutachten sollen, oft inklusive mehrfacher Rückkopplung mit den Autoren. Die Gutachter tun das anonym und ehrenamtlich, das heißt unbezahlt. Allerdings gehen manche Zeitschriften allmählich dazu über, den Reviewern, ihre Zustimmung vorausgesetzt, wenigstens namentlich zu danken – denn deren Belastung steigt mit der wachsenden Publikationsflut. Den Redakteuren fällt es immer schwerer, geeignete und willige Experten zu finden (*Nature Astronomy 4, S. 633, 2020*).

Angenommen, die Gutachter haben den Artikel mit ein paar Änderungen freundlich durchgewinkt, doch bald finden andere Forscher mehr als ein Haar in der veröffentlichten Suppe. Sie entdecken beispielsweise verdächtig »schöne« – statistisch zu wenig streuende – Daten, identische Abbildungen in unterschiedlichen Zusammenhängen oder Plagiate aus anderen Artikeln. Das ist nicht nur höchst peinlich für die ursprünglichen Gutachter. Der Artikel muss dann außerdem in aller

Form zurückgezogen werden. Eine solche »Retraction« scheint zu besagen: Bitte vergesst komplett, dass wir das je veröffentlicht haben.

Weniger Vorwürfe müssen sich die Reviewer machen, wenn andere Teams die publizierten Resultate später trotz wiederholter Versuche nicht zu replizieren vermögen. Oft ist ein monate- oder gar jahrelanger Streit die Folge, in dem die einen den anderen vorwerfen, deren Befunde beruhten auf unsachgemäß angewandten Methoden. Wenn die Replikationsversuche hartnäckig scheitern, obsiegen die Zweifler, und letztlich wird der Widerruf unvermeidlich.

Mit der rapide wachsenden Flut an Fachartikeln steigt auch die Häufigkeit von Zurücknahmen – und damit lohnt es sich, die Retractions, statt sie schamhaft dem Vergessen zu überantworten, systematisch auszuwerten, um aus Fehlern zu lernen. Vor allem sollte jeder Fall mit einer Information über die Gründe versehen werden, meint Quan-Hoang Vuong von der Phenikaa University in Hanoi.

Der vietnamesische Wissenschaftssoziologe hat mehr als 2000 Retractions daraufhin untersucht, ob sie Auskunft über ihre Vorgeschichte gaben. In jedem zweiten Fall wurde nicht erwähnt, wer den Artikel zurückgezogen hatte – alle Autoren? Ein Koautor? Die Redaktion? Zehn Prozent lieferten gar keine Begründung (*Nature 582, S. 149, 2020*).

Vuong schlägt vor, jeder Retraction vier Daten beizugeben: Wer hat sie veranlasst? Was war der Grund (methodischer Fehler, Plagiat, absichtlicher Betrug)? Waren sich Redakteure und Autoren darin einig? Stellte sich erst nachträglich die Nichtreproduzierbarkeit heraus?

Denn, so Vuong mit Recht, Retractions sind an sich nichts Schlechtes. Sie korrigieren menschliches Fehlverhalten und stärken den Wissenschaftsprozess. Auch aus Schaden wird man klug.

VERHALTENSFORSCHUNG TIERISCHER WETTSTREIT

Im Tierreich treten mitunter heftige Auseinandersetzungen um Ressourcen wie Territorien, Nahrung oder Fortpflanzungspartner auf. Wie entscheiden die Individuen, ob sich der Kampf lohnt? Indem sie die Kraft des Gegners einschätzen – so glaubten Verhaltensforscher lange. Doch in vielen Fällen trifft das nicht zu.



CLAIRE O'NEILL



Gareth Arnott (links) ist promovierter Biologe und lehrt an der Queen's University Belfast in Nordirland die Fachgebiete Verhaltensforschung und Tierschutz. **Robert W. Elwood** ist an derselben Universität emeritierter Professor für Verhaltensforschung.

» spektrum.de/artikel/1760430

Zwei Rothirsche (*Cervus elaphus*) fechten untereinander aus, wer von beiden der Stärkere ist.

Die 2013 ausgestrahlte BBC-Dokuserie »Unbekanntes Afrika« zeigt in einer Szene, wie sich eine Giraffe aus der Ferne nähert und dabei durch den goldenen Sand der Kalahari schreitet. »Ein junges Männchen«, konstatiert David Attenborough als Sprecher. Man sieht, wie sich der Neankömmling einer anderen Giraffe gegenüberstellt, Musik wie beim Showdown eines Western erklingt. »Der alte Bulle wird einen Rivalen nicht tolerieren wollen«, warnt Attenborough, als die beiden Giraffen mit ihrem Schlagabtausch beginnen. »Durch Bedrängen und Schubsen tasten sie sich gegenseitig ab. Der junge Rivale scheint zu denken, er habe eine Chance und greift an.« Wenige Augenblicke später schlägt er seinen kraftvollen Hals in den des alten Männchens, und es wird bitterer Ernst – eine blutige Schlacht um das Territorium beginnt. »Der Einsatz ist hoch«, erläutert Attenborough. »Verlieren heißt Exil in der Wüste.«

Dokumentationen über das Leben in freier Wildbahn präsentieren gern Szenen von Tieren im kämpferischen Wettstreit. Angesichts deren Dramatik überrascht das kaum. Aber haben Sie sich nicht schon einmal gefragt, welche Entscheidungsprozesse solchen Aufeinandertreffen zu Grunde liegen? Wir hatten das Glück, einen Großteil unserer wissenschaftlichen Laufbahn diesem faszinierenden Forschungsfeld widmen zu dürfen. Und unsere Arbeit hat uns zu einigen überraschenden Einblicken in das strate-

AUF EINEN BLICK AUF IN DEN KAMPF!

- 1** Verhaltensforscher gingen lange davon aus, dass alle Tiere beim Wettstreit um Ressourcen die Kampfkraft ihres Gegners in Bezug auf die eigenen Fähigkeiten abschätzen (mutual assessment).
- 2** Wie man heute weiß, nutzen Tiere unterschiedliche Strategien, um zu entscheiden, ob sie kämpfen oder sich zurückziehen. Die meisten Spezies scheinen dabei nur sich selbst, aber nicht den Rivalen zu beurteilen (self-assessment).
- 3** Beide Verhaltensweisen können zudem kombiniert auftreten. Da gegenseitiges Beurteilen eine kognitive Herausforderung darstellt, dürfte diese Strategie eher bei höher entwickelten Arten auftreten.

gische Handeln von Tieren verholfen, wenn sie von einem Artgenossen herausgefordert werden.

Tiere wetteifern um Ressourcen wie Territorien, Nahrung oder Fortpflanzungspartner. Manchmal verläuft der Wettstreit eher sanft und ohne körperliche Verletzung. Die Auseinandersetzungen können jedoch auch gewalttätig sein und mit schwerer Verwundung oder gar dem Tod enden. Das Ergebnis ist letztlich eine ungleiche Verteilung von



Ressourcen, welche die reproduktive Fitness beeinflusst und so die Evolution antreibt. Ein Lebewesen kann daher profitieren, wenn es potenziell tödliche Kämpfe mit größeren und stärkeren Gegnern vermeidet.

Wir Menschen vermögen tatsächlich bemerkenswert gut, die Wehrhaftigkeit anderer einzuschätzen und lernen schnell, Kampfhandlungen mit größeren Individuen nicht zu provozieren. Im Labor können Versuchspersonen sehr genau die Kraft von Männern beurteilen, nachdem sie einen kurzen Blick auf ein Foto von Statur oder Gesicht geworfen oder die Stimme der Dargestellten angehört haben. Das Urteil erfolgt spontan – Frauen wie Männer fällen es in weniger als 50 Millisekunden. Diese Fähigkeit spiegelt die Bedeutung wider, die das genaue Einschätzen eines Gegners für die menschliche Evolution hat.

Aber können Tiere ebenso gut wie Menschen einen Rivalen bewerten? Dokumentationsfilme wie der oben genannte beschreiben die Motivation der Tiere oft mit solchen vermenschlichten Begriffen. Allerdings hat man diese Art des Beurteilens bislang nur bei relativ wenigen Tierarten nachgewiesen. Unsere eigenen Untersuchungen lassen vielmehr vermuten, dass Tiere unterschiedliche Informationen nutzen, wenn sie sich für oder gegen einen Wettkampf entscheiden.

Bevor Individuen sich in einen Kampf stürzen, stellen sie sich in der Regel auf ritualisierte Weise zur Schau. Junge Hirsche beispielsweise, die um Weibchen buhlen, veranstalten einen ausgefeilten Wettstreit im Röhren und schreiten dabei parallel Seite an Seite auf und ab. Biologen interpretierten solche Verhaltensweisen als Mittel, mit dem jeder der beiden Rivalen dem anderen möglichst viel Information über sich und damit über die Erfolgsaussichten eines Kampfs übermittelt. Falls sich damit die Sache schon erledigt, gibt es keine Notwendigkeit mehr, tatsächlich zu attackieren und Verletzungen oder gar ihr Leben zu riskieren. Für kurze Zeit ein gewisses Maß an Energie zu investieren, damit sich einer der beiden Kontrahenten als der Schwächere erkennt und sich zurückzieht, sei die vorteilhaftere Strategie – so glaubte man bislang. Das Phänomen, die Stärke des Rivalen im Vergleich zu der eigenen einzuschätzen, nennen wir beidseitiges Beurteilen (mutual assessment). Es steht im Zentrum eines Modells der Spieltheorie für das Kämpfen, dem so genannten sequenziellen Assessment.

Kritisch wird's bei Gleichstarken

Die Spieltheorie entwickelten ursprünglich Wirtschaftswissenschaftler als Zweig der angewandten Mathematik, um strategische Entscheidungsfindungen zu modellieren. Evolutionsbiologen erkannten schnell ihre Nützlichkeit. John Maynard Smith (1920–2004) und George Price (1922–1975) studierten damit als Erste den Wettkampf unter Tieren. Dem Modell des sequenziellen Assessments zufolge sollten sich Auseinandersetzungen erübrigen, wenn erkennbar wird, dass die Kräfte der Gegner stark voneinander abweichen; folglich dürfte ein Kampf nur unter annähernd gleichwertigen Kontrahenten ausgetragen werden. Sobald die Begegnung eskaliert, steigen die Kosten. Sie liefert allerdings auch in ihrem Verlauf zunehmend genauere Informa-



Männchen der Siamesischen Kampffische (*Betta splendens*) agieren untereinander sehr aggressiv. Dabei präsentieren sie dem Gegner ihre farbenprächtigen Flossen.

ALAMY / PONGPHAN RUEANGHAI

tion über die Wehrfähigkeiten, so dass während der gesamten Auseinandersetzung das beidseitige Beurteilen anhält. Dem Modell zufolge wird die Fehde umso rascher enden, je mehr sich die Streitenden in ihrem Kampfvermögen unterscheiden. Und tatsächlich stießen Biologen jahrelang bei fast jeder von ihnen untersuchten Tierart genau auf eine solche negative Beziehung, wobei sie das Kampfvermögen in der Regel über Körpergröße oder Gewicht abschätzten. Folglich galt das beidseitige Beurteilen als fundamentale Fähigkeit von Tieren.

In der Euphorie dieser Erkenntnis blieben jedoch einige andere Interpretationen zu Tierkämpfen weitgehend unbeachtet. Angesichts des gegenseitigen Beurteilens können wir erwarten, dass große Verlierer länger als kleine im Wettstreit verbleiben, denn die Entscheidung zum Rückzug basiert zum Teil auf der eigenen Größe oder Kampfkraft. Andererseits sollte der potenziell Unterlegene schneller aufgeben, falls sein Gegner von großer Statur ist. Auch wenn nur wenige Studien diese Zusammenhänge überprüften, ließ sich in einigen Fällen die vorausgesagte positive Beziehung zwischen Körpergröße und Ausdauer auf Seiten des Verlierers bestätigen.

Aber zwischen der Körpergröße des Siegers und der Kampfdauer ließ sich keine Korrelation herstellen. Folglich dürfte der Unterlegene nur Informationen über sich selbst verwendet haben, allerdings nicht solche über seinen siegreichen Gegner. Solche Tiere waren entweder unfähig, das Gegenüber einzuschätzen, oder der Aufwand hierfür erschien zu groß, oder sie entschieden sich dafür, Informationen nicht zu nutzen, die sie jedoch höchstwahrscheinlich in die Lage versetzt hätten, optimale Kampfentscheidungen zu treffen. So oder so bauten sie eher auf die Strategie der



ALAMY / PONGPHAN BUEENCHAI

Selbsteinschätzung, Self-Assessment genannt, als auf die des beidseitigen Beurteilens.

Einige Beispiele für Self-Assessment stammen aus dem Labor von einem von uns (Elwood). 1990 dokumentierten wir die Taktik bei Flohkrebse (Amphipoda). Ihre Männchen bestreiten eine Art Tauziehen um das andere Geschlecht, wobei ein Männchen buchstäblich ein Weibchen aus den Klauen eines Nebenbuhlers reißt. Erwartungsgemäß stellen wir fest, dass größere Tiere dabei erfolgreicher agierten als kleinere. Es schien jedoch nicht so, als ob sich die Konkurrenten dabei untereinander beurteilten: Während beim Verlierer eine starke positive Beziehung zwischen Körpergewicht und Kampfdauer bestand, ließ sich für beide Parameter beim Sieger überhaupt keine Beziehung nachweisen.

Die meisten Biologen haben diese Befunde einfach als anormal abgetan. Es gibt allerdings weitere Beispiele wie der Fall der Herbstspinne *Metellina megei*: Während ihres Wettstreits um die Weibchen hören die Männchen auf zu rangeln und strecken ihre äußerst langen Vorderbeine aus, offenbar um sie zu vergleichen. Es sieht tatsächlich so aus, als tauschen sie dabei Informationen aus. Aber hier hat die Körpergröße des Siegers ebenfalls keinen Einfluss auf die Dauer des Wettstreits. Folglich wirkt sich die Zurschaustellung nicht auf die Entscheidung des Spinnenmännchens aus. Die Tiere sind also unfähig, sich gegenseitig zu beurteilen; sie machen sich nur ein Bild von sich selbst.

Die Entdeckung, dass bei Herbstspinnen eher die Selbsteinschätzung als das beidseitige Beurteilen an der Tagesordnung steht, veranlasste den Zoologen Phil Taylor, derzeit an der Macquarie University in Sydney, mit uns Kontakt aufzunehmen. Taylor verfasste gerade einen Artikel über Kämpfe bei Springspinnen und war überrascht, auch bei diesen vorzugsweise Self-Assessment anzutreffen. Wir beschlossen daher gemeinsam zu untersuchen, warum die meisten bekannten Modelle beidseitiges Beurteilen vorher sagten, wenn die Tiere tatsächlich das Modell der Selbsteinschätzung nutzen.

Mittels einer Computersimulation modellierten wir eine Population, die ihre Kämpfe nach den Regeln des Self-Assessment austrägt. Wieder zeigte sich eine negative Korrelation. Je stärker sich die beiden Kontrahenten in ihrer Körpergröße unterschieden, umso kürzer dauerte die Auseinandersetzung – also exakt dieselbe Beziehung, wie sie das Modell des beidseitigen Beurteilens voraussagt. Das hat folgenden Grund: Bei einer großen Differenz in der Körpergröße dürfte der Verlierer zwangsläufig von ziemlich kleiner Statur sein, während er bei einem geringen Größenunterschied wohl eher weniger mickrig ausfällt. Wenn das Ergebnis also ausschließlich über den Verlierer definiert wird, die Analyse sich jedoch auf die Größendifferenz bezieht, dann bestätigt das die Strategie des beidseitigen Beurteilens nur scheinbar. Mit anderen Worten: Das Werkzeug, mit dem Biologen seit Jahren das Verhalten von Rivalen untersuchten, liefert womöglich einen falschen Eindruck von deren Urteilsfähigkeit.

Untersuchungen an Stielaugenfliegen machen das Problem deutlich. Bei den bizarr aussehenden Insekten, deren Augen auf den Spitzen geweihartiger Stiele sitzen, konkurrieren die Männchen um Nahrung und Weibchen. Eine frühere Studie kam zu dem Schluss, diese Tiere würden bei einer Auseinandersetzung ihre Augenstiele vergleichen. Dann analysierten Wissenschaftler die Originaldaten erneut, indem sie jeweils die Größe des Siegers sowie die des Verlierers in Beziehung zur Wettstreitlänge setzten. Der Ansatz offenbarte eindeutig, dass der Unterlegene auf Grund seiner eigenen Körpergröße entscheidet, ob er den Kampf fortsetzt, aber keine Information über den Gegner verwertet, denn dessen Erscheinung wirkt sich überhaupt nicht auf die Dauer der Begegnung aus.

Kostenpunkt Verletzung

Eine nicht signifikante oder sogar positive Beziehung zwischen der Körpergröße des Siegers und der Dauer des Wettstreits, gepaart mit einer positiven Beziehung zwischen der Körpergröße des Verlierers und der Dauer des Wettstreits zeigt das an, was wir reines Self-Assessment nennen: Die Teilnehmer entscheiden allein auf der Basis der Informationen, die sie über sich selbst besitzen, ob sie kämpfen oder sich zurückziehen. Stoßen wir jedoch auf eine *negative* Beziehung zwischen Siegergröße und Kampfdauer, heißt das nicht zwangsläufig, dass der Verlierer Informationen über den Gewinner sammelt. Stattdessen könnte ein anderer Entscheidungsprozess, die synchronisierte kumulative Abschätzung (dubbed cumulative assessment) im Spiel sein. Dabei beziehen die Tiere ihre Kosten, etwa durch Verletzungen, auf den jeweiligen Gegner: Je

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/sozialverhalten



MONKEY BUSINESS / STOCKADobe.COM

ausgeprägter der Größenunterschied, umso stärker wachsen die Kosten für den kleineren Konkurrenten, der seinerseits aufgeben wird, sobald hier eine bestimmte Schwelle erreicht ist. Das mag wie Haarspalterei klingen, aber es gibt einen wichtigen Unterschied zwischen der kumulativen und der beidseitigen Assessment-Strategie. Erstere kommt ohne direkte Einschätzung des Gegners aus; die Auseinandersetzung erledigt sich erst dann, wenn die Kosten auf eine bestimmte Höhe angestiegen sind. Bei der zweiten Strategie spielt dagegen eine solche Schwelle keine Rolle; allein die Information, die über den Gegner sowie das Selbst gesammelt wird, bildet die Grundlage für die Entscheidung, den Kampf fortzusetzen oder das Handtuch zu werfen.

Auch wenn kumulatives und sequenzielles Assessment dieselbe negative Korrelation zwischen der Körpergröße des Siegers und der Dauer des Wettstreits erzeugen, gibt es einige Verfahren, um festzustellen, welchen der beiden Entscheidungsprozesse Tiere nutzen, wenn sie miteinander ringen. Zunächst einmal können wir Wettkämpfe im Labor beobachten, bei denen die Teilnehmer bei jeder Runde größenmäßig aufeinander abgestimmt werden, die mittlere Größe aber von Wettkampf zu Wettkampf variiert. Nutzen beide Gegner die Strategie des kumulativen Assessment, dann kennt der Verlierer nur seinen eigenen Zustand. Das bedeutet, große Verlierer sollten länger widerstehen. In dem Fall erwarten wir eine positive Korrelation zwischen mittlerer Größe und Kampfdauer. Im Gegensatz dazu basiert die Entscheidung beim sequenziellen Assessment auf der relativen Größendifferenz. Wir sollten deshalb bei dieser Strategie keine Verknüpfung zwischen mittlerer Paargröße und der Dauer des Wettstreits erwarten.

Wir können auch die Art der Eskalation der Kämpfe heranziehen, um zwischen den beiden Strategien zu unterscheiden: Tiere, die sich gemäß der kumulativen Abschätzung verhalten, sollten Phasen deutlicher Eskalation zeigen, unterbrochen von weniger kostenintensiven Zeitintervallen. Diejenigen, die auf gegenseitiges Beurteilen setzen, sollten dagegen ihre Kampfintensität kontinuierlich steigern.

Kombinationstaktik

Auf Grund der Entdeckung, dass rivalisierende Tiere unterschiedliche Beurteilungsstrategien für den Erfolg im Wettkampf nutzen, sowie der Entwicklung von Experimenten zum Aufdecken der eingesetzten Strategie interessieren sich Verhaltensforscher jetzt wieder verstärkt für Tierkämpfe. In den letzten Jahren sind deshalb verschiedenste Spezies untersucht worden, die sich gemäß der einen oder der anderen dieser drei Strategien verhalten. Die meisten von ihnen setzen dabei auf Selbsteinschätzung.

Wie manche Studien allerdings ergaben, kombinieren einige Tierarten ihre Entscheidungsprozesse. Beim Brackwasserfisch *Kryptolebias marmoratus* beispielsweise konkurrieren Individuen um Territorien. Eine Forschergruppe um Yuying Hsu von der National Taiwan Normal University fand heraus, dass die Gegner anhand eines Vorspiels entscheiden, ob der Kampf aufgenommen wird. In dieser Phase gilt: Je größer der Gegner, umso eher zieht sich der kleinere noch vor der eigentlichen Auseinandersetzung zurück. Hat der Kampf jedoch bei ähnlich großen Rivalen



ALAMY / MAMMILIAN WENIGER



ISP-PHOTOGRAPHY / GETTY IMAGES / ISTOCK



SLOWMOTIONGL / GETTY IMAGES / ISTOCK

Tiere setzen unterschiedliche Strategien ein, um über Dauer und Intensität ihrer Kampfhandlungen zu entscheiden. Heimchen (*Acheta domestica*, oben) verwenden die Strategie der kumulativen Abschätzung. Seeanemonen wie die Pferdeaktinie (*Actinia equina*, Mitte) bedienen sich dagegen des Self-Assessment. Wenn Einsiedlerkrebse (*Pagurus bernhardus*, unten) miteinander um Schneckenhäuser ringen, baut der Angreifer auf Selbsteinschätzung, während der Verteidiger die Taktik des beidseitigen Beurteilens anwendet.

erst einmal begonnen, dann verwerten sie offenbar keine weiteren Informationen über ihren jeweiligen Gegner. Eine solche Wechselstrategie (switching assessment) nutzt also sowohl beidseitiges Beurteilen als auch anschließende Selbsteinschätzung.

Unsere Untersuchungen an Einsiedlerkrebse (*Pagurus bernhardus*) förderten eine weitere Form der Entscheidungsfindung zu Tage. Die Tiere verwenden leere Schneckenhäuser, um ihren empfindlichen Hinterleib zu schützen. Die Krebse versuchen ebenfalls Gehäuse zu erobern, in denen bereits ein Artgenosse wohnt. Wie wir feststellten, nutzen beide Individuen beim Versuch der feindlichen Übernahme unterschiedliche Informationen, je nachdem welche Rolle der einzelne in dem Geschehen spielt: Der Angreifer schien wenig oder gar nichts über den Verteidiger zu wissen, während dieser durch die Art und Weise, wie der Gegner attackiert, beeinflusst wird. In ein und demselben Kampf folgt also ein Kontrahent dem Self-Assessment, der andere setzt dagegen auf die Strategie des beidseitigen Beurteilens.

Doch was bestimmt darüber, welche Strategie zum Tragen kommt? Ein möglicher Faktor stellt die kognitive Fähigkeit dar. Manche Experten argumentieren, seinen eigenen Zustand zu kennen, sei einfach, aber ihn mit dem Zustand eines Gegners zu vergleichen, stelle eine größere kognitive Herausforderung dar. Diese Hypothese harrt noch der systematischen Überprüfung, bei einer oberflächlichen Durchsicht der Taxa, die sich in ihrem kognitiven Leistungsvermögen unterscheiden, spricht allerdings einiges dafür. So lassen Analysen der Auseinandersetzungen von Seeanemonen mit ihrem einfachen neuronalen Netzwerk auf Self-Assessment als Entscheidungsstrategie schließen. Das andere Extrem bilden höher entwickelte Tiere mit ausgefeilten Wahrnehmungssystemen wie Tintenfische, welche die Strategie der beiderseitigen Beurteilung einsetzen.

Nach diesem Muster erwarten wir, dass Säugetiere mit ihren großen, hoch entwickelten Gehirnen Informationen über beide Seiten sammeln. Es gibt hierzu allerdings kaum Studien – mit einer Ausnahme: dem Hausschwein (*Sus scrofa*). Dessen Aggressionsverhalten untersuchte einer von uns (Arnott) zusammen mit Irene Camerlink, inzwischen an der Polnischen Akademie der Wissenschaften, sowie Simon Turner vom Scotland's Rural College, um dadurch den Tierschutz in der Schweinezucht zu verbessern. Denn Schweine sind bekannt für ihre Dominanzhierarchien. Nun werden sie von Züchtern in den verschiedenen Stadien des Fortpflanzungszyklus routinemäßig umgruppiert. Dann fechten die Tiere jedes Mal eine neue Hierarchie aus. Unter diesen wiederholten Gewaltausbrüchen leidet ihre Gesundheit.

Wie eine genauere Beobachtung des Aggressionsverhaltens offenbarte, nutzen Schweine zwar die Strategie des beidseitigen Bewertens, sie brauchen aber ein gewisse Kampferfahrung, um sich die nötige Erfahrung auch ohne kostspielige Auseinandersetzungen vermitteln lässt. Wir veränderten daraufhin die Aufzuchtbedingungen der Ferkel: Durften sie vor ihrer Entwöhnung zusammen mit einem anderen Wurf aufwachsen, entwickelten sie nach und nach

soziale Fähigkeiten, mit dem Ergebnis, dass in ihrem späteren Leben Auseinandersetzungen mit unbekanntem Individuen kürzer verliefen. Demnach stellt eine einfache Sozialisierung in einer frühen Lebensphase eine effektive und leicht durchführbare Maßnahme für Schweinezüchter dar, um Aggressionen unter ausgewachsenen Tieren nach einer Umgruppierung zu minimieren.

Obwohl kognitive Kapazität vermutlich wesentlich beeinflusst, welche Entscheidungsstrategie ein Tier bei Kämpfen nutzt, ist das nicht der einzige Faktor. Der Wert der Ressource, die gewonnen oder verloren wird, kann ebenfalls eine Rolle spielen. Die von Einsiedlerkrebse bewohnten Schneckenhäuser sind hierfür ein gutes Beispiel. Während des Streits um die Schale nähert sich der Angreifer (für gewöhnlich der größere Krebs) und schnappt nach der Behausung des Verteidigers. Dieser zieht sich daraufhin in sein Schneckenhaus zurück. Der potenzielle Eroberer schlägt nun seine eigene Schale immer wieder mit aller Kraft gegen die des Attackierten. Das Schalenklopfen endet entweder mit einem dramatischen Sieg des Angreifers, oder er zieht mit leeren Scheren von dannen.

Das vom Konkurrenten begehrte Heim wird genau begutachtet

Wie wir feststellten, berücksichtigen die Einsiedlerkrebse eine ganze Reihe von Eigenschaften der Schneckenhäuser, um zu beurteilen, wie hart sie hierfür kämpfen werden. Eine Schlüsselvariable stellt die Gehäusegröße relativ zur Körpergröße des Krebses dar: Idealerweise ist das Schneckenhaus klein genug, um mit minimalem Energieaufwand herumgetragen zu werden, aber groß genug, um ein gewisses Maß an Wachstum des Hinterleibs zu erlauben. Die Einsiedlerkrebse modifizieren ihr Verhalten in Abhängigkeit vom Wert ihrer eigenen Schale und der ihres Gegners. Besitzt der Angreifer ein ziemlich mickriges Gehäuse und der Verteidiger ein komfortables, zeigt sich Ersterer eher bereit, die Auseinandersetzung eskalieren zu lassen, um in den Besitz der gegnerischen Behausung zu gelangen. Hat der Verteidiger dagegen eine Schale von minderer Qualität, wird seine Abwehr weniger heftig ausfallen.

Wenn Sie sich also das nächste Mal eine Dokumentation über kämpfende Tiere in freier Wildbahn anschauen, wissen Sie, dass an dieser Interaktion vielerlei Entscheidungsprozesse beteiligt sein können. Ganz gleich, was der Kommentator ihnen dabei erzählen mag: In vielen Fällen – wie bei Giraffen – bleibt erst noch zu klären, ob die Rivalen tatsächlich ihre Kampffähigkeit gegenseitig abschätzen. ◀

QUELLEN

Arnott, G., Elwood, R.W.: Assessment of fighting ability in animal contests. *Animal Behaviour* 77, 2009

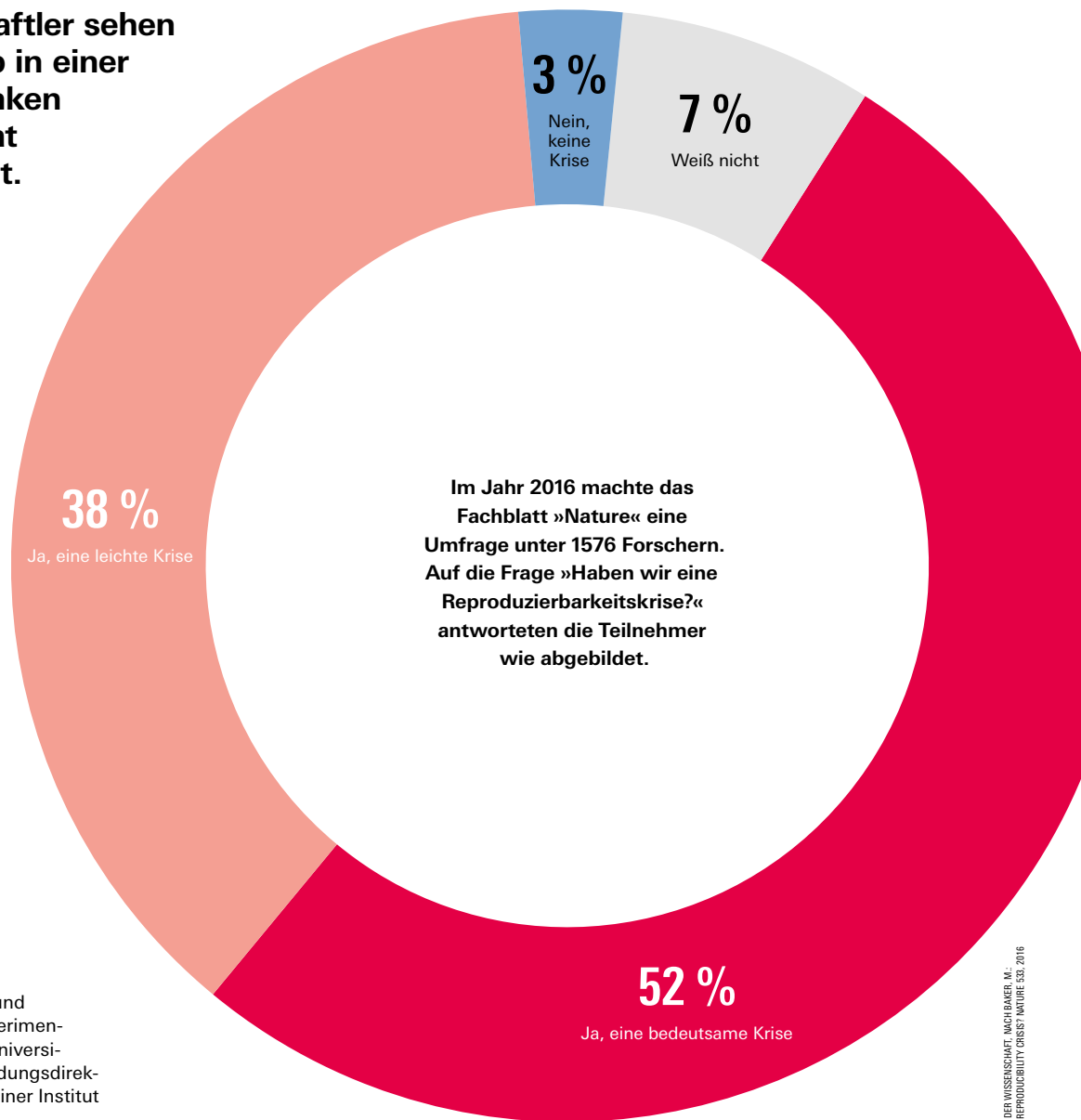
Camerlink, I. et al.: Advantages of social skills for contest resolution. *Royal Society Open Science* 6, 181456, 2019

Hardy, I.C.W., Briffa, M. (Hg.): *Animal contests*. Cambridge University Press, 2013

Pinto, N.S. et al.: All by myself? Meta-analysis of animal contests shows stronger support for self than for mutual assessment models. *Biological Reviews* 94, 2019

METAFORSCHUNG KULTURWANDEL IN DER BIOMEDIZIN

Biomedizinische Studien haben sich oft als methodisch unzuverlässig herausgestellt, was ihre Ergebnisse in Zweifel zieht. Viele Wissenschaftler sehen das Fach deshalb in einer Krise. Ein Umdenken ist nötig – und hat bereits eingesetzt.



THOMAS BIFALZIK

Ulrich Dirnagl ist Neurologe und Direktor an der Abteilung Experimentelle Neurologie der Charité-Universitätsmedizin Berlin. Er ist Gründungsdirektor des QUEST Center am Berliner Institut für Gesundheitsforschung.

» spektrum.de/artikel/1760432

Sind tatsächlich die meisten publizierten Forschungsergebnisse falsch, wie der weithin bekannte Epidemiologe John Ioannidis 2005 in der Fachzeitschrift »PLOS Medicine« schrieb? Warum verkünden Forscher so häufig Durchbrüche in der Behandlung wichtiger Krankheiten, von denen man später nichts mehr hört? Wo sind die versprochenen Heilungen durch Stammzelltherapien, Nanopartikel oder molekulargenetische »Designerdrogen« geblieben?

In der Tat mehren sich die Hinweise, dass die biomedizinische Forschung ein Problem hat. Es fing vor etwa zehn Jahren mit Beschwerden aus der Pharmaindustrie an: Man könne viele Ergebnisse der universitären Forschung, die in renommierten Journalen erschienen sind, in eigenen Studien nicht reproduzieren, also bestätigen (siehe »Spektrum« Mai 2014, S. 32). Und Ioannidis' Artikel zur mangelnden Korrektheit publizierter Arbeiten gehört seit Jahren zu den meistzitierten in der Biomedizin. Die Argumente des Epidemiologen sind bis heute nicht ernsthaft widerlegt worden. Im Gegenteil: Die weltweit wohl angesehenste und älteste Fachzeitschrift der Medizin, »The Lancet«, äußerte 2014 die Ansicht, dass wohl 85 Prozent der biomedizinischen Forschung Müll seien.

Mehrere systematische Untersuchungen der zurückliegenden Jahre haben belegt, dass es um die Robustheit und Verlässlichkeit biomedizinischer Forschungsergebnisse nicht zum Besten steht. Dies verunsichert Wissenschaftler mittlerweile deutlich. Bei einer Umfrage der Fachzeitschrift »Nature« im Jahr 2016 unter beinahe 1600 Forscherinnen und Forschern gab mehr als jede(r) Zweite an, die Versuchsergebnisse von Kollegen – sowie sogar die eigenen Resultate! – in Folgeexperimenten nicht reproduzieren zu können. Etliche Wissenschaftler sehen die biomedizinische Forschung derzeit in einer Reproduzierbarkeitskrise.

Aber wie passt das alles damit zusammen, dass die biomedizinische Forschung durchaus fantastische Erfolge feiert? Ihr verdanken wir Antibiotika, Insulinpräparate, Impfungen, Organtransplantationen, Antiepileptika, Antiparkinsonmittel, Blutdrucksenker, Blutreinigungsverfahren bei Nierenversagen, Arzneistoffe zur gezielten Beeinflussung der Immunfunktion, bildgebende Diagnoseverfahren wie Computertomografie und MRT und vieles mehr. Zudem Cholesterinsenker, magenschützende Protonenpumpenblocker, HIV-Therapie, Antikörper und maßgeschneiderte Immunzellen für die Krebsbehandlung ... Die Liste ließe sich noch lange fortsetzen. Auf die biomedizinische Forschung setzen wir weiterhin berechtigte Hoffnungen, wenn es um die Lösung akuter globaler Gesundheitsprobleme wie der aktuellen Covid-19-Pandemie geht.

Die Resultate biomedizinischer Forschung haben es nicht nur ermöglicht, die Lebenserwartung drastisch zu erhöhen, sondern auch unsere Lebensqualität im Alter zu

Es mehren sich die Hinweise, dass die biomedizinische Forschung ein Problem hat

AUF EINEN BLICK RUF NACH REFORMEN

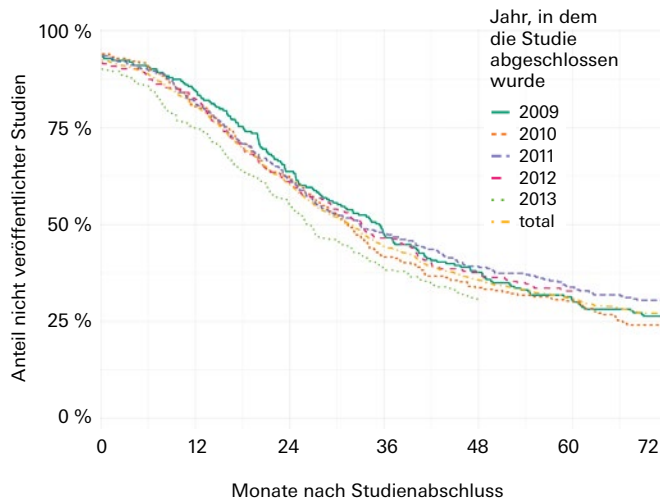
- 1 Ein großer Anteil der biomedizinischen Studien hat methodische Mängel. Viele Forscher sehen das Fach daher in einer Krise.
- 2 Die häufigsten Defizite sind: schlechtes Versuchsdesign, unsaubere Statistik, selektive Wiedergabe von Daten und das einseitige Publizieren von positiven Ergebnissen.
- 3 Weltweit arbeiten Forschungsförderer, Verlage und Forschungsinstitutionen auf einen Kulturwandel in der Biomedizin hin, um diese Defizite abzustellen.

verbessern. Allen Warnungen zum Trotz, dass wir wegen des demografischen Wandels mit einer massiven Zunahme altersbedingter Erkrankungen rechnen müssten, ist diese Prognose bisher nicht eingetreten. Im Gegenteil, die Krankheitslast und Sterblichkeit vieler Volkskrankheiten, etwa Schlaganfall und Herzinfarkt, hat aufs Lebensalter bezogen sogar deutlich abgenommen. Diese Erfolge beruhen ganz wesentlich auf einem vertieften Verständnis von Krankheitsmechanismen, aus dem sich effektive Maßnahmen zur Vorbeugung und Behandlung entwickeln ließen. Und nun schicken sich Big Data, personalisierte Medizin sowie künstliche Intelligenz an, uns noch älter werden und dabei gesünder bleiben zu lassen.

Die gefürchtete Hürde zwischen dem Labor und der Klinik

Warum steckt die Biomedizin dennoch in der Krise? Zunächst ist es ein generelles Problem vieler medizinischer Fächer, dass ihre Grundlagenforschung ständig neue, auf den ersten Blick viel versprechende und teils spektakuläre Ansätze für Diagnose- und Therapieverfahren findet, die aber scheitern, sobald sie in klinischen Studien an Menschen erprobt werden. Fachleute bezeichnen das als translationalen Block, weil die Umsetzung (Translation) der Ergebnisse aus den vorklinischen Experimenten in den klinischen Alltag häufig nicht funktioniert. Mediziner, die etwa in der Alzheimer- oder der Stammzellforschung arbeiten, kennen das zur Genüge: Grundlagenexperimente führen zu aufregenden Ergebnissen und tollen Publikationen, doch bei den Patienten kommt davon sehr wenig an.

Das liegt mitunter ganz einfach daran, dass die Mechanismen vieler Krankheiten immens komplex sind und unser Verständnis von ihnen nur sehr lückenhaft. Im vorklinischen Stadium arbeiten Forscher oft mit vergleichsweise einfachen Versuchsobjekten wie Zellen, im klinischen Alltag dagegen haben sie es mit dem ungleich komplizierteren menschlichen Organismus zu tun, der bei vielschichtigen Krankheitsprozessen ganz anders reagiert. Bildhaft ausgedrückt, sind viele bisherige Erfolge der biomedizinischen Forschung niedrig hängende Früchte gewesen, die wir vom



Viele klinische Studien, die an deutschen Universitätskliniken laufen, bleiben unveröffentlicht (in die Auswertung oben flossen rund 1500 Untersuchungen ein).

Baum der Erkenntnis gepflückt haben. Nun, da wir uns immer komplexeren Erkrankungen zuwenden, müssen wir uns höher strecken; das ist schwieriger und gelingt seltener. Einen pathologischen Prozess zu verstehen und erfolgreich zu beeinflussen, ist bei Bluthochdruck oder Diabetes einfacher als bei einer Alzheimer-Demenz, von der wir nicht einmal wissen, was sie auslöst und auf welche Weise sie zum Verlust von Hirnfunktionen führt. Komplexität ist somit ein Grund dafür, warum wir bei vielen Krankheiten trotz weltweit massiver Anstrengungen immer noch auf den Durchbruch warten. Intensive weitere Forschung wird hier – hoffentlich – langfristig doch zum Erfolg führen. Aber gibt es noch andere Ursachen für den translationalen Block, die wir möglicherweise schon jetzt abstellen können?

Der bereits erwähnte Begriff »Reproduzierbarkeitskrise« gibt uns hier einen Hinweis. Versuchsergebnisse in Folgeexperimenten nicht bestätigen zu können, ist ein Problem, das neben der Biomedizin noch zahlreiche weitere Disziplinen betrifft (siehe auch »Spektrum« Februar 2013, S. 58). Als Reaktion darauf schließen sich Wissenschaftler weltweit zusammen, um die systematische Wiederholung von Schlüsselexperimenten zu fördern. Bei solchen systematischen Überprüfungen gelingt die Reproduktion häufig entweder gar nicht, oder die gefundenen Effekte sind viel kleiner als in der Originalpublikation. Das klingt zunächst beunruhigend, kann aber zahlreiche und oft banale Gründe haben. Die Wiederholungsstudie könnte ein falsch negatives Ergebnis gehabt haben. Oder der Wiederholungsversuch ist unter minimal anderen Bedingungen abgelaufen als das originale Experiment, ohne dass den Forschern das bewusst war.

Es ist nicht ganz klar, wie viele Studien unter idealen Bedingungen reproduzierbar sein müssten (siehe auch »Spektrum« März 2017, S. 36). Denn wenn Forschung hochgradig innovativ sein und keine Effekte übersehen will – etwa die Wirkung eines Arzneistoffkandidaten auf Krebszellen –,

muss sie riskieren, zunächst viele falsch positive Ergebnisse zu erzeugen. In nachfolgenden Untersuchungen zu prüfen, inwieweit sich diese bestätigen lassen oder nicht, entspräche dem normalen Gang guter Wissenschaft. Leider hat es in der Vergangenheit zu wenige solcher konfirmatorischen Studien in frühen Forschungsphasen gegeben, weshalb die Wirkungslosigkeit eines Therapieansatzes häufig erst sehr spät zu Tage trat, sprich in klinischen Studien an Patienten.

Forscher, Forschungsförderer und Fachgesellschaften führen seit einiger Zeit eine intensive Debatte darüber, wie sich die Qualität der Wissenschaft sichern lässt. Das hat zur Entwicklung einer eigenen Wissenschaftsdisziplin beigetragen, der Metaforschung. Diese Wissenschaft über die Wissenschaft hat eine weitere Ursache der momentanen Forschungskrise offengelegt: Vielen Grundlagenuntersuchungen mangelt es an interner Validität, das heißt sie wenden zu wenige oder gar keine Methoden an, welche die Robustheit der Befunde sicherstellen. So laufen viele Studien ohne Verblindung ab – die Forscher wissen also schon während der Untersuchung, zu welcher Behandlungsgruppe die jeweilige Zellkulturschale oder das Versuchstier gehören. Solche Kenntnis beeinflusst ihre Auswertung und kann die Ergebnisse verfälschen. Mitunter legen Wissenschaftler auch die Kriterien, nach denen sie beispielsweise Versuchstiere in ihre Studie ein- oder ausschließen, nicht sorgsam genug fest. Nur durch Vorkehrungen wie Verblindung und adäquate Einschlusskriterien lässt sich verhindern, dass Experimentatoren willkürlich Daten auswählen, um erwünschte Ergebnisse zu erzeugen. In klinischen Studien sind solche Maßnahmen Standard; in der präklinischen Forschung jedoch, der Grundlage für Studien am Menschen, leider nicht.

Fallstricke der Statistik: Sogar gestandene Professoren stolpern darüber

Ein großes Problemfeld stellt ferner die Statistik dar. In der präklinischen Forschung, egal welcher Fachrichtung, umfassen die Stichproben oft weniger als zehn Elemente. Die Folge davon ist ein sehr hoher Anteil an falsch positiven wie falsch negativen Befunden: Die Daten gaukeln eine Wirkung vor, die nicht existiert, beziehungsweise sie zeigen keine an, obwohl es sie tatsächlich gibt. Zudem führt die geringe Stichprobengröße häufig zu einem starken Überschätzen des Effekts.

Immer wieder interpretieren Forscher die statistische Auswertung ihrer Daten falsch. Sie glauben, das so genannte Signifikanzniveau zeige an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ihr Versuchsergebnis falsch sei. Unterschreitet das Ergebnis des statistischen Tests (meist eines t-Tests) das weithin übliche Signifikanzniveau von 5 Prozent, meinen viele Experimentatoren, das Ergebnis sei nun mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 5 Prozent falsch – sie könnten also im Umkehrschluss mit mindestens 95 Prozent Sicherheit davon ausgehen, mit ihrem Ergebnis richtig zu liegen. Eine »Fehlerrate« von 5 Prozent scheint ihnen durchaus akzeptabel, totale Sicherheit könne es ja ohnehin nicht geben. Die Forscher sitzen mit der Annahme aber einem Irrtum auf. Denn die 5 Prozent beziehen sich nur auf die Wahrscheinlichkeit eines falsch positiven Ergebnisses.

Um einzuschätzen, ob man möglicherweise einem *falsch negativen* Ergebnis aufsitzt, muss man auch dafür die Wahrscheinlichkeit kennen. Diese so genannte Power eines Experiments hängt ganz wesentlich von der Stichprobengröße ab. Und die ist, wie oben bereits erwähnt, häufig sehr klein – somit das Risiko eines falsch negativen Ergebnisses entsprechend hoch. Insbesondere in der präklinischen Forschung ignorieren viele Wissenschaftler die Power ihrer Experimente und fallen infolgedessen auf falsch negative Ergebnisse herein.

Es kommt noch etwas dazu, das es uns eigentlich unmöglich macht, mit entsprechenden Statistiken die Irrtumswahrscheinlichkeit zu bestimmen, wenn ein Experiment ein »statistisch signifikantes« Ergebnis liefert. Wir müssten nämlich zusätzlich wissen, wie wahrscheinlich die untersuchte Hypothese ist. Das wissen wir aber fast nie. Befragungen von Studenten, jungen Wissenschaftlern und sogar gestandenen Professoren haben gezeigt, dass den meisten Forschern die Bedeutung dieses Umstands gar nicht bewusst ist.

Wie wahrscheinlich eine Hypothese ist, hängt von vielen Faktoren ab. Unter anderem davon, wie viel schon vorher bekannt war über die Fragestellung oder ob der Forscher bereits relevante Vorbefunde erhoben hat. Sehr wahrscheinlich richtige Hypothesen sind in der Regel wenig interessant. Spannende Hypothesen, die auf wissenschaftliches Neuland ausgreifen (und damit eher unwahrscheinlich sind), werden dagegen oft nicht zutreffen – vielleicht sogar in 90 oder mehr Prozent der Fälle, wie manche Fachleute vermuten. Das ist natürlich nur eine grobe Schätzung.

Um sich der Wahrscheinlichkeit zu nähern, mit der man beim Unterschreiten des 5-Prozent-Signifikanzniveaus ein richtiges Ergebnis vor sich hat, müsste man also zusätzlich die Power des Experiments und die Wahrscheinlichkeit der untersuchten Hypothese kennen. In der Praxis ist das fast nie der Fall. Untersucht man das aber in Modellrechnungen mit realistischen Werten für die Hypothesenwahrscheinlich-

Grund zur Skepsis: Fast alle publizierten Studien bestätigen die untersuchte These

keit und die experimentelle Power, führt es zu einem beunruhigenden Resultat – dass nämlich in der vorklinischen biomedizinischen Forschung eher 50 als nur 5 Prozent der Ergebnisse falsch positiv sind. Unter anderem dieser Befund brachte den bereits zitierten John Ioannidis zu der drastischen Schlussfolgerung, es seien wohl die meisten publizierten Ergebnisse der biomedizinischen Forschung unzutreffend.

Erwähnen sollten wir in dem Zusammenhang noch ein weiteres Problem, das wir verborgene analytische Flexibilität nennen. Gemeint ist die Freiheit, die sich Forscher beim Auswählen von Datenpunkten, statistischen Methoden oder beim Interpretieren von Ergebnissen nehmen, ohne das offenzulegen. Dazu gehört etwa, Datenpunkte kurzerhand auszuschließen, die das erhoffte Ergebnis stören; so lange verschiedene statistische Tests durchzuführen, bis einer davon das gewünschte Resultat bringt; oder Hypothesen erst nach Auswertung der Ergebnisse zu formulieren, so dass diese als deren Bestätigung erscheinen.

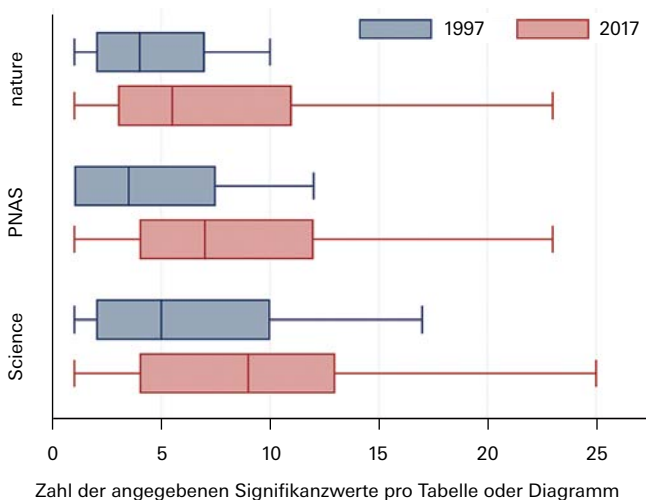
Die seltsame Treffsicherheit der Hypothesen

Von Bedeutung ist allerdings nicht nur, wie man mit Hypothesen, Daten und Statistik umgeht, sondern auch, was man überhaupt publiziert. Hier regt sich ebenfalls Kritik, denn mehr als 95 Prozent aller Studien bestätigen die untersuchte Hypothese. Das hört sich im ersten Moment gut an, zeigt tatsächlich aber, dass hier etwas nicht stimmt: Wie kann es sein, dass Biomediziner fast immer richtig liegen mit ihren Hypothesen? Sollte das wirklich zutreffen, wäre es geradezu unverantwortlich, überhaupt noch Experimente und Studien durchzuführen. Das würde nur unnötig Ressourcen verschleudern und das Risiko bergen, falsch negative Ergebnisse zu erhalten!

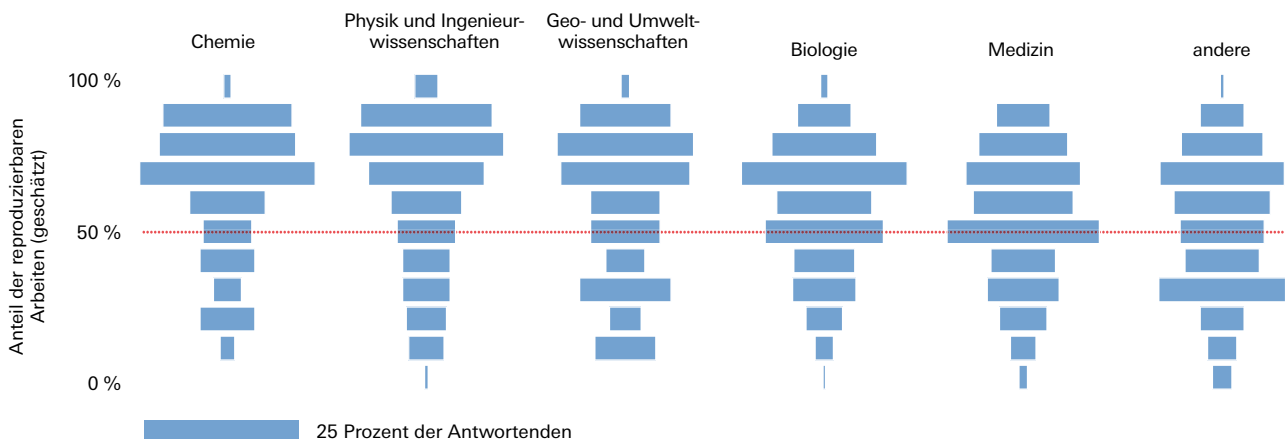
Natürlich steckt etwas ganz anderes hinter dem absurd hohen Anteil an positiven Studien. Die »Negativ-Studien«, die also die untersuchte These nicht bestätigt haben, werden meist schlicht nicht veröffentlicht. Das Lesen von Fachliteratur kommt somit einem Blick durch die rosa Brille gleich. Diese Verzerrung (»Publikationsbias«), die unter anderem dazu führt, die Wirksamkeit von Arzneistoffen zu überschätzen, betrifft leider nicht nur präklinische Untersuchungen. Auch klinische Studien, die »negativ« ausfallen, werden in vielen Fällen stark verzögert oder gar nicht publiziert. Meine Kollegen und ich haben gemeinsam mit Forschern aus Freiburg und Hannover festgestellt, dass von einem Drittel aller klinischen Studien, die an deutschen Universitätskliniken laufen, selbst fünf Jahre nach dem Abschluss noch kein Ergebnis veröffentlicht worden ist. Das gilt ebenso für Tierversuche.

Die Gesamtzahl der jährlich publizierten wissenschaftlichen Fachartikel allerdings nimmt nach wie vor weiter stark

Artikel in Fachjournalen stützen sich heute viel häufiger auf statistische Tests als noch vor 20 Jahren. Allerdings interpretieren sie die Ergebnisse dieser Tests oft falsch.



CERSTEVA, L.A., IOANNIDIS, J.O.A., P-VALUES IN DISPLAY TERMS ARE EMBROIDERED AND ALMOST INVARIABLY SIGNIFICANT: A SURVEY OF TOP SCIENCE JOURNALS PLUS ONE (13, 2018; FIG. 1 (DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0197440)). BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/4.0/LEGALCODE)



»Welcher Anteil publizierter Arbeiten auf Ihrem Gebiet ist reproduzierbar?« Diese Frage stellte »Nature« im Jahr 2016 fast 1600 Forschern. Physiker und Chemiker vertrauten ihrer Fachliteratur dabei am meisten.

zu und ist mittlerweile selbst für Experten kaum noch überschaubar. Woran liegt das? Vermutlich steckt hinter all den geschilderten Phänomenen ein ebenso einfacher wie wirkmächtiger Grund: das akademische Karriere- und Belohnungssystem. Wissenschaftler stehen unter immensen Druck, denn Erfolg haben sie vor allem mit spektakulären Befunden und Publikationen. An ein oder zwei Veröffentlichungen in hochrangigen Magazinen kann sich entscheiden, ob man in der Wissenschaft eine Zukunft und ein Auskommen hat, sogar ob man Professor wird. Arbeitsverträge, insbesondere beim wissenschaftlichen Nachwuchs, haben häufig Laufzeiten von nur einem Jahr; verlängert werden sie bei Erfolg, das heißt bei Publikation oder dem Einwerben externer Fördermittel. 85 Prozent aller Wissenschaftler in Deutschland arbeiten auf befristeten Verträgen. Klappt es nicht mit hochrangigen Publikationen, müssen es eben viele sein: Quantität statt Qualität.

Publikationen sind die Meilensteine wissenschaftlicher Karrieren. Graduiierende müssen eine bestimmte Anzahl davon vorlegen, um den Titel zu erhalten. Dass sie auf qualitativ hochwertiger Forschung beruhen, wird unterstellt, aber kaum geprüft oder gar belohnt. In der Medizin fällt der Druck besonders hoch aus, denn Ärzte an Universitätskliniken müssen sowohl forschen als auch Patienten behandeln als auch Studierende unterrichten – all das natürlich auf höchstem Niveau. Ein gängiges Bonmot unter Kollegen lautet: Der Tag hat 24 Stunden, und dann bleibt ja noch die Nacht. Viele Publikationen sind das Ergebnis von Feierabendforschung.

Was kann man tun, um diesen Missständen entgegenzuwirken? Biomedizinische Forschung hat uns die fantastischen präventiven, diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten der modernen Medizin beschert, und sie verheißt nach wie vor spektakuläre neue Ansätze, etwa hochpräzise Gen- oder Immuntherapien gegen Tumorerkrankungen. Gerade die hier zusammengestellten Probleme in der biomedizinischen Forschung lassen erahnen, dass deren immenses Potenzial noch lang nicht ausge-

schöpft ist. Denn gelänge es, die Forschung effektiver zu machen, würden Ressourcen besser genutzt und der medizinische Fortschritt beschleunigt.

Die gute Nachricht ist: Weltweit arbeiten Wissenschaftler intensiv daran, die Vertrauenswürdigkeit, Nützlichkeit und Ethik biomedizinischer Forschung zu verbessern. Eine wichtige Rolle, besonders in Deutschland, spielen hier Forschungsförderer wie das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) oder die Volkswagen-Stiftung. Sie möchten sicherstellen, dass die von ihnen bereitgestellten Mittel möglichst effektiv eingesetzt werden. Darum verändern sie derzeit die Kriterien, die Antragsteller erfüllen müssen, um Fördermittel zu erhalten. Den Zuschlag werden künftig nur noch Wissenschaftler erhalten, die Methoden zur Qualitätssicherung einsetzen wie Verblindung und Randomisierung, mit hinreichend großen Stichproben arbeiten, detaillierte Analysepläne vorlegen, die Originaldaten nach Studienabschluss öffentlich machen und ihre Ergebnisse unabhängig davon publizieren, ob die Arbeitshypothese bestätigt wurde oder nicht.

Begutachten, schon bevor die Studie startet

Verlagshäuser und deren Journale haben ebenfalls bedeutenden Einfluss. Viele von ihnen verlangen mittlerweile eine genauere Beschreibung der Studiendetails. Sie legen bei der Auswahl der zu veröffentlichenden Artikel einen größeren Wert auf die Relevanz der Fragestellung und die Qualität der Arbeit als auf die Ergebnisse. Auch experimentieren sie mit neuen Artikelformaten. Der Begutachtungsprozess (»Peer-Review«) von Fachartikeln, wie ihn die Redaktionen seit vielen Jahrzehnten praktizieren, ist langsam, verhindert häufig die Publikation ungewöhnlicher Ansätze und Ergebnisse und wird zudem nicht selten von Interessenkonflikten beeinflusst. Eine Antwort hierauf, die gerade in der momentanen Covid-19-Pandemie große Bekanntheit und Bedeutung erlangt hat, sind die »Preprints«: Manuskripte,

Fachliteratur zu lesen, kommt einem Blick durch die rosa Brille gleich

die ohne formale Begutachtung an die Öffentlichkeit gehen. Wissenschaftler erfahren so ohne Zeitverzögerung von neuen Erkenntnissen, müssen die Relevanz und Qualität der entsprechenden Arbeiten aber selbst bewerten. Häufig reagieren Fachkollegen auf einen Preprint mit Online-Kommentaren, E-Mails oder Posts in sozialen Medien, was Diskussionen und die Überarbeitung des Manuskripts nach sich zieht. Der dabei entstehende Artikel durchläuft dann oft noch ein klassisches Peer-Review und erscheint schließlich in einem traditionellen Fachjournal, daher der Name Preprint.

Eine weitere wichtige Neuerung sind die »Registered Reports«. Hier begutachten Experten eine Studie nicht, nachdem sie durchgeführt wurde, sondern bevor sie beginnt. Dadurch können ihre Hinweise schon ins Studiendesign einfließen. Das ist eine Verbesserung gegenüber der bisherigen Praxis, das Peer-Review erst dann durchzuführen, wenn sich nichts Grundsätzliches mehr an der Arbeit ändern lässt. Zudem ist beim Registered Report garantiert, dass die Veröffentlichung unabhängig vom Ergebnis erfolgt.

Eine sehr wichtige Rolle beim Erhöhen der Qualität biomedizinischer Forschung kommt natürlich den Institutionen selbst zu, also etwa den medizinischen Fakultäten an den Universitäten, aber auch den außeruniversitären biomedizinischen Einrichtungen wie Max-Planck-Instituten und Helmholtz-Zentren.

Das Berlin Institute of Health (BIH) hat 2017 das QUEST Center gegründet (für »Quality, Ethics, Open Science, Translation«). QUEST ist eine international viel beachtete und außergewöhnliche institutionelle Antwort auf die oben geschilderten Probleme. Die Initiative arbeitet darauf hin, Qualität, Reproduzierbarkeit, Verallgemeinerbarkeit und Validität der Forschung zu maximieren und so den Nutzen biomedizinischer Forschung zu steigern. QUEST fokussiert sich auf Forschungsarbeiten an der Charité-Universitätsmedizin Berlin und am Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin-Buch, an denen mehr als 7000 Ärzte, Wissenschaftler und Doktoranden mitwirken. Das Center ist zudem in zahlreiche internationale Aktivitäten eingebunden, die zum Ziel haben, die Qualität biomedizinischer Forschung zu verbessern. Ganz grundsätzlich geht es der Initiative darum, Kompetenz und Motivation zu verantwortungsvoller Forschung zu fördern und Gelegenheiten zu schaffen, sie anzuwenden.

Zu diesem Zweck bietet QUEST beispielsweise allen beteiligten Wissenschaftlern die Einführung elektronischer Laborbücher an und übernimmt die dafür anfallenden Lizenzgebühren. Denn obwohl heute fast alle Daten digital anfallen, arbeiten Forscher an Universitäten rund um den Globus immer noch überwiegend mit traditionellen Laborbüchern aus Papier, die aussehen wie zu Zeiten Rudolf Virchows oder Robert Kochs. Mittlerweile haben sich bei dem Center schon 2000 Wissenschaftler für ein elektronisches Laborbuch angemeldet, mit dem sich Forschungsdaten strukturierter und besser reproduzierbar verwalten lassen.

Zu den QUEST-Aktivitäten gehört es ferner, Aus- und Weiterbildungsmodul für Studierende, Forscher, Ärzte

und technisches Personal zu entwickeln und anzubieten. Darin geht es darum, experimentelle und klinische Studien kompetent durchzuführen, Verzerrungen (»Bias«) in der Forschung zu verringern oder neue Publikationsformen wie Preprint und Registered Report vorzustellen.

Derzeit belohnt das Karriere- und Anreizsystem der akademischen Biomedizin hauptsächlich Publikationen mit möglichst spektakulären Resultaten beziehungsweise das Publizieren möglichst vieler Arbeiten. QUEST entwickelt deshalb neue Anreizsysteme, etwa durch Auswählen neuer Indikatoren, um die Leistung von Forschern zu bewerten. So regt die Initiative an, dass die Charité ihre Professoren unter anderem daraufhin auswählt, ob sie Forschungsrohdaten öffentlich gemacht (»Open Data«), negative Studienergebnisse publiziert oder Studien zum Reproduzieren wichtiger Resultate durchgeführt haben. Nur wenige akademische Einrichtungen weltweit tun das derart konsequent. Ein von QUEST entwickelter Algorithmus identifiziert Arbeiten von Wissenschaftlern der Charité und des Max-Delbrück-Centrums, die einen Link auf die Originaldaten enthalten, um sie öffentlich zugänglich zu machen. Die entsprechenden Wissenschaftler erhalten dann automatisch zusätzliche Mittel, die sie für ihre Forschung einsetzen können. Auch gibt es eine Auszeichnung für Forscher, die negative Resultate veröffentlichen.

Eingefahrene Denkmuster überwinden mit Hilfe von Angeboten und Anreizen

Daneben führt QUEST Metaforschung durch, also Forschung über Forschung. Das dient einerseits dazu, kontinuierlich Maßnahmen zu entwickeln, mit denen sich die Forschungspraxis verbessern lässt, soll andererseits aber auch die Wirksamkeit der eigenen Aktivitäten überprüfen. QUEST liefert ein Beispiel dafür, wie akademische Institutionen eingefahrene Denk- und Verhaltensweisen ändern können, indem sie ihre Wissenschaftler mit innovativen Angeboten unterstützen und Anreize für verantwortungsvolle Forschungspraktiken schaffen. Sollte sich dieser Kulturwandel international durchsetzen, werden wir in Zukunft wieder darauf vertrauen können, dass die meisten veröffentlichten Forschungsergebnisse der Biomedizin richtig und wertvoll sind. ◀

QUELLEN

Baker, M.: 1,500 Scientists lift the lid on reproducibility. *Nature* 533, 2016

Ioannidis, J. P.: Why most published research findings are false. In: *PLOS Medicine* 2, 2005

Research: Increasing value, reducing waste. Artikelserie in »The Lancet«, veröffentlicht 2014. www.thelancet.com/series/research

Strech, D. et al.: Improving the trustworthiness, usefulness, and ethics of biomedical research through an innovative and comprehensive institutional initiative. *PLOS Biology* 18, 2020

Wieschowski, S. et al.: Result dissemination from clinical trials conducted at German university medical centers was delayed and incomplete. *Journal of Clinical Epidemiology* 115, 2019

MEDIZIN EIN DIGITALES HERZ

Einige Forschungsgruppen haben bereits erfolgreich menschliche Organe am Computer simuliert. Dadurch lassen sich maßgeschneiderte Therapiemöglichkeiten virtuell testen, bevor man sie an Versuchstieren oder Patienten anwendet.



Axel Loewe ist Elektro- und Informationstechniker am Institut für Biomedizinische Technik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

► [spektrum.de/artikel/1760434](https://www.spektrum.de/artikel/1760434)

Der 45-jährige Rainer Müller nimmt seit Kurzem immer wieder wahr, wie sein Herz kurzzeitig stolpert und stärker klopft als üblich. Obwohl er sich sportlich betätigt, schläft er schlecht und ist tagsüber häufig müde. Auf den Rat seiner Kardiologin hin führt er ein Langzeit-EKG durch. Das kleine Gerät, das die elektrische Aktivität des Herzens durch Elektroden auf der Haut aufzeichnet, trägt er über mehrere Tage am Körper. Die Auswertung ist eindeutig: Herr Müller leidet an Vorhofflimmern, einer Herzrhythmusstörung, die in den Vorhöfen des Herzens entsteht.

Mit dieser Diagnose ist er nicht allein. In Deutschland leiden aktuell etwa 300 000 Menschen an Vorhofflimmern. Zwar ist die Erkrankung nicht unmittelbar lebensbedrohlich,

doch sie geht mit einem deutlich erhöhten Risiko für Schlaganfälle einher und kann zu Herzinsuffizienz führen. Darum sollte man die Störung auf jeden Fall behandeln.

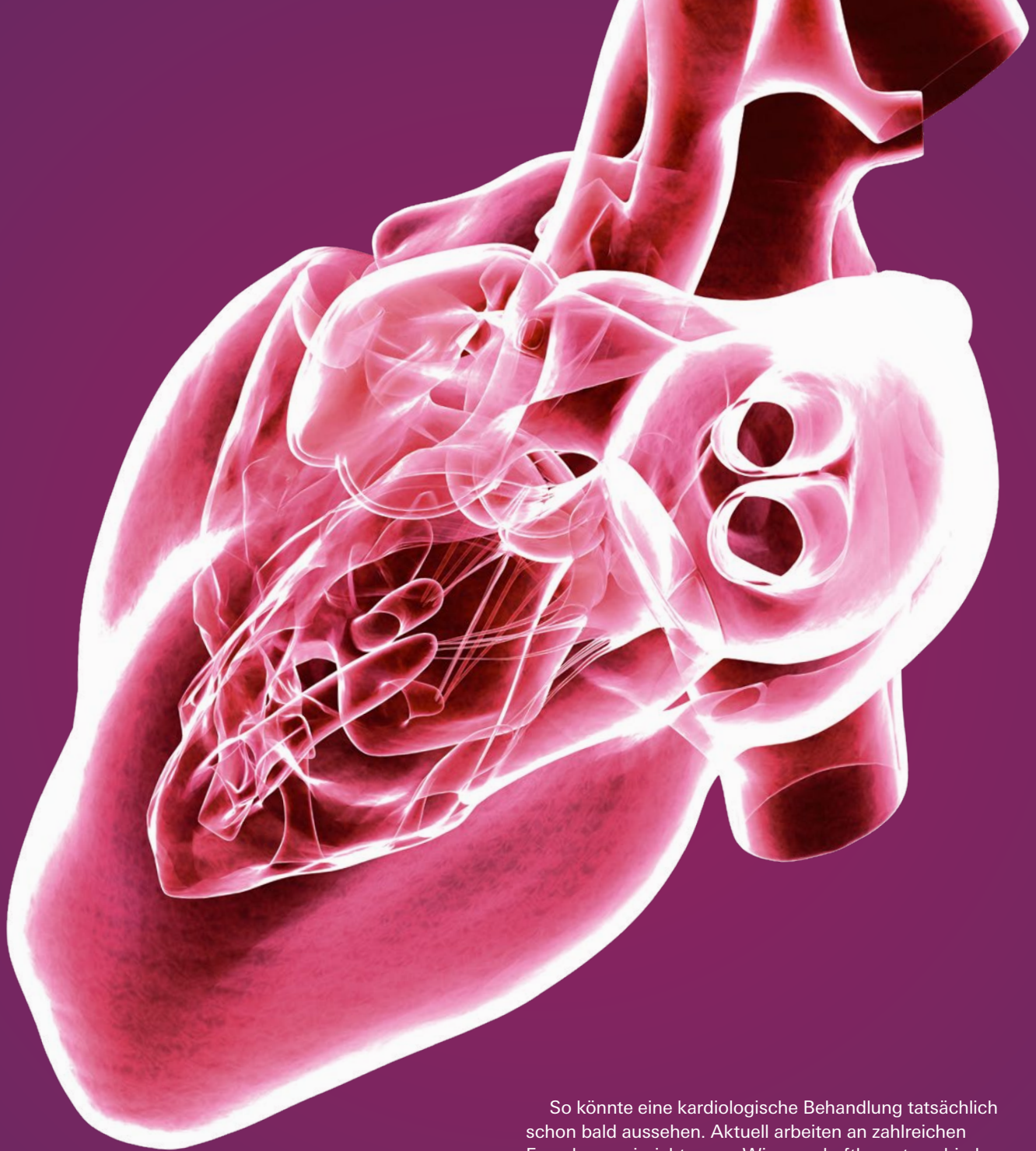
Ursache dafür sind meist elektrische Impulse, die von den Lungenvenen auf das Herz übergehen und es dazu bringen, außerhalb des Rhythmus zu schlagen. Es gibt Medikamente, die solche Herzrhythmusstörungen unterbinden. Möchte man aber nicht dauerhaft Antiarrhythmika einnehmen, kann man Vorhofflimmern durch eine so genannte Katheterablation endgültig heilen. Dabei führt ein Kardiologe einen Katheter in die Leiste des Patienten und schiebt ihn durch die großen Blutgefäße bis ins Herz, um dort das krankheitsauslösende Gewebe gezielt zu vernarben. Weil Narben elektrisch isolierend wirken, ist die Störung bei den meisten derart behandelten Patienten dadurch beseitigt.

Bei anderen Personen tritt das Vorhofflimmern danach allerdings immer noch auf. Dann besteht die Herausforderung darin, die richtigen Ablationsziele zu identifizieren. Üblicherweise regen Ärzte während einer weiteren OP das Herz an mehreren Stellen durch elektrische Signale an, um die Herzrhythmusstörung gezielt auszulösen. So finden sie heraus, wo sie eingreifen müssen. Gleichzeitig müssen sie aber verhindern, dass die eingebrachten Narben das Risiko für andere Erkrankungen erhöhen.

In Zukunft könnten maßgeschneiderte Computersimulationen derartige medizinische Eingriffe für Patienten und Ärzte erleichtern. Beispielsweise ermöglicht eine Magnetresonanztomografie (MRT) es Wissenschaftlern, ein dreidimensionales Modell des Herzens zu erstellen. Durch zusätzliche Langzeit-EKG-Messungen können die Forscher das Computermodell dann an die individuelle Herzfunktion des Patienten anpassen. Mit einem solchen digitalen Zwi-

AUF EINEN BLICK SIMULIERTE ORGANE

- 1 Jeder Körper reagiert unterschiedlich auf medizinische Implantate oder Wirkstoffe. Das macht es so schwer abzusehen, welche Therapie sich am besten für einen bestimmten Patienten eignet.
- 2 In Zukunft könnte man eine Behandlung vorab virtuell durch personalisierte Computermodelle simulieren, was Mediziner und Patienten entlasten würde.
- 3 Es gibt schon mehrere viel versprechende Ansätze, um Modelle individueller menschlicher Organe zu erstellen – von den Ionenkanälen über die Zellstruktur bis hin zum Gewebe.



Künftig könnten Ärzte einen operativen Eingriff vorab an einem Computermodell des Herzens vornehmen.

ling lassen sich vor der OP die richtigen Ablationsziele identifizieren. Die Mediziner können zudem den Eingriff vorab am Computer vornehmen, um zu überprüfen, ob sich das Risiko für neue Herzrhythmusstörungen erhöht. Sollte das der Fall sein, passt man die Ablationsorte so lange an, bis eine optimale Therapie für den Patienten gefunden ist.

So könnte eine kardiologische Behandlung tatsächlich schon bald aussehen. Aktuell arbeiten an zahlreichen Forschungseinrichtungen Wissenschaftler unterschiedlichster Fachbereiche zusammen, um personalisierte Computermodelle menschlicher Organe zu entwickeln. Diese umfassen Mechanismen auf mikroskopischer Skala bis hin zu den Auswirkungen auf das gesamte Gewebe: Der Austausch von Ionen verursacht einen Spannungsunterschied zwischen dem Inneren der Zellen und ihrer Umgebung, wodurch sich das Gewebe zusammenzieht und das Herz zu pumpen beginnt. Indem man die Prozesse modelliert, lassen sich neben einer individuellen Behandlung auch erfolglose Wirkstoffe frühzeitig und kostengünstig ausschließen – noch bevor man mit aufwändigen klinischen Studien startet.

Computermodelle des Herzens haben eine lange Geschichte. Bereits in den 1950er Jahren entwickelten die späteren Medizin-Nobelpreisträger Alan Lloyd Hodg-

kin (1914–1998) und Andrew Fielding Huxley (1917–2012) ein mathematisches Konzept, das beschreibt, wie das Herz auf mikroskopischer Ebene funktioniert. Noch heute basieren die meisten Computersimulationen auf diesen bahnbrechenden Ansätzen.

Das Herz besitzt spezialisierte Zellen, so genannte Schrittmacherzellen, die in regelmäßigen Abständen elektrische Signale in Form von Erregungswellen aussenden. Weil die Membranen der anderen Herzmuskelzellen Poren enthalten, können Ionen von Zelle zu Zelle wandern und dort die elektrische Spannung beeinflussen. Generell ist das Innere der Zelle anders geladen als ihre Umgebung, Biologen sprechen von Transmembranspannung oder Membranpotenzial. Abhängig von dessen Ausprägung können sich die Ionenkanäle einer Zelle öffnen und schließen (siehe A in »Herzmodellierung«, rechts).

Gleichungen des Herzens

Solche Prozesse haben Hodgkin und Huxley durch Differentialgleichungen modelliert. Derartige Formeln nutzt man in der Mathematik, um die Änderung einer Funktion zu beschreiben, etwa ihren zeitlichen Verlauf. Die Gleichungen besitzen zahlreiche freie Parameter, deren genauen Zahlenwert man festlegen muss. Hierfür kann man zum Beispiel in Laborversuchen die Aktivitäten der einzelnen Ionenkanäle einer Zelle bestimmen. Dabei verwenden Wissenschaftler eine extrem schmale, mit einer Flüssigkeit gefüllte Pipette, um einen Teil der Zellmembran anzusaugen, in der sich ein einziger Ionenkanal befindet. Anschließend platziert man eine Elektrode in die Pipettenflüssigkeit, wodurch sich die Ströme durch den Ionenkanal messen lassen. Mit Daten dieser so genannten Patch-Clamp-Technik kann man das mathematische Modell an den jeweiligen Ionenkanal anpassen.

Denn wie Nervenzellen besitzen Herzmuskelzellen einen charakteristischen Verlauf der Transmembranspannung, der als Aktionspotenzial bekannt ist. Das bedeutet, jede Herzmuskelzelle lässt sich durch ihr Aktionspotenzial klar identifizieren. Indem Hodgkin und Huxley einen Natriumionen- und einen Kaliumionenkanal in ihrem mathematischen Modell der Zellmembran miteinander koppelten, konnten sie den Spannungsverlauf einer Herzmuskelzelle fast vollständig erklären (siehe B in »Herzmodellierung«). Das so genannte Hodgkin-Huxley-Modell ist daher bereits ein Multiskalenmodell, das Ionenkanäle mit der nächsthöheren Ebene einer Zelle verbindet.

Seit den ersten Ansätzen vor 70 Jahren haben Wissenschaftler die Modelle immer weiter verfeinert und spezialisiert. So stellt man inzwischen Zellen aus unterschiedlichen Bereichen des Herzens – etwa des Vorhofs oder der Hauptkammer – durch verschiedene Gleichungen dar, die meist zahlreiche Ionenkanäle abbilden. Aktuelle biophysikalische Modelle von Herzmuskelzellen umfassen über

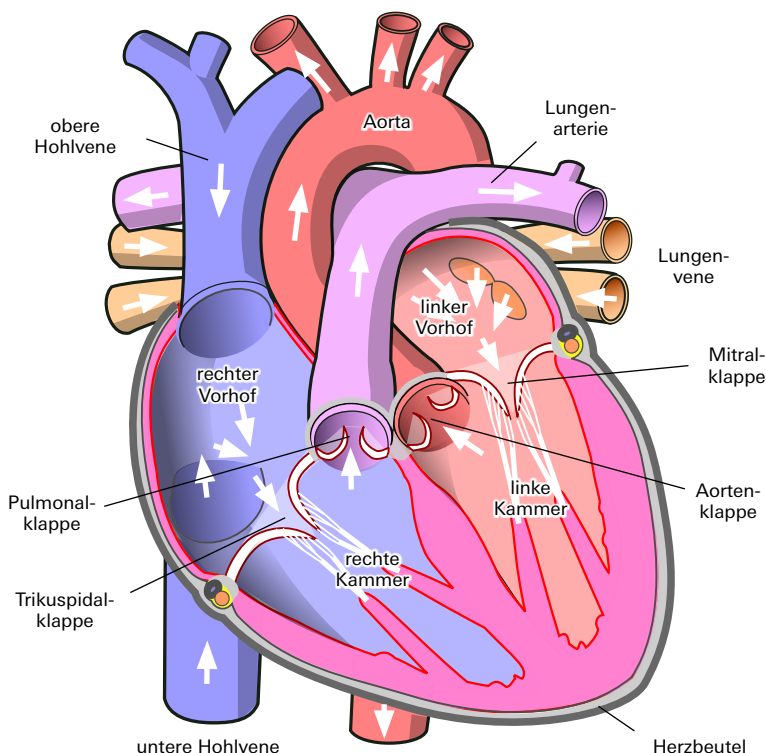
20 verschiedene Ionenströme, allein vier davon repräsentieren unterschiedliche Kaliumkanäle.

Allerdings kann man die Zellen im Herzmuskelgewebe nicht separat betrachten, denn sie sind nicht elektrisch isoliert, sondern beeinflussen sich gegenseitig. Aktivierte Zellen geben Ionen an ihre Nachbarn weiter, die daraufhin selbst ein Aktionspotenzial durchlaufen. So breiten sich elektrische Erregungswellen über das komplette Herz aus. Um den Prozess zu beschreiben, brauchen Forscher so genannte Reaktionsdiffusionsgleichungen, welche die nächste Stufe des Multiskalenmodells darstellen: von der Zelle zum Gewebe.

Reaktionsdiffusionsgleichungen sind partielle Differentialgleichungen, die im Gegensatz zu gewöhnlichen Differentialgleichungen (mit denen man Ionenkanäle modelliert) nicht bloß von einer Variablen (der Zeit) abhängen, sondern zusätzlich den räumlichen Verlauf der Transmembranspannung berücksichtigen. Damit kann man simulieren, wie sich eine Erregungsfront über das Herz ausbreitet und dann bis zur Einleitung des nächsten Schlags im natürlichen Schrittmacher wieder elektrische Ruhe herrscht.

Um die Parameter des Modells an einen bestimmten Patienten anzupassen, nutzen Forscher zum Beispiel ein Elektrokardiogramm (EKG). Indem sie Elektroden auf den Körper des Erkrankten kleben, zeichnen sie den zeitlichen Verlauf der elektrischen Spannung zwischen diesen auf (siehe D in »Herzmodellierung«). Dadurch können sie auf die Ströme rückschließen, die im Herzgewebe von Zelle zu Zelle fließen. Häufig verursachen kreisende elektrische

Schematische Darstellung des Aufbaus des menschlichen Herzens: Die Pfeile symbolisieren die Richtung des Blutflusses.



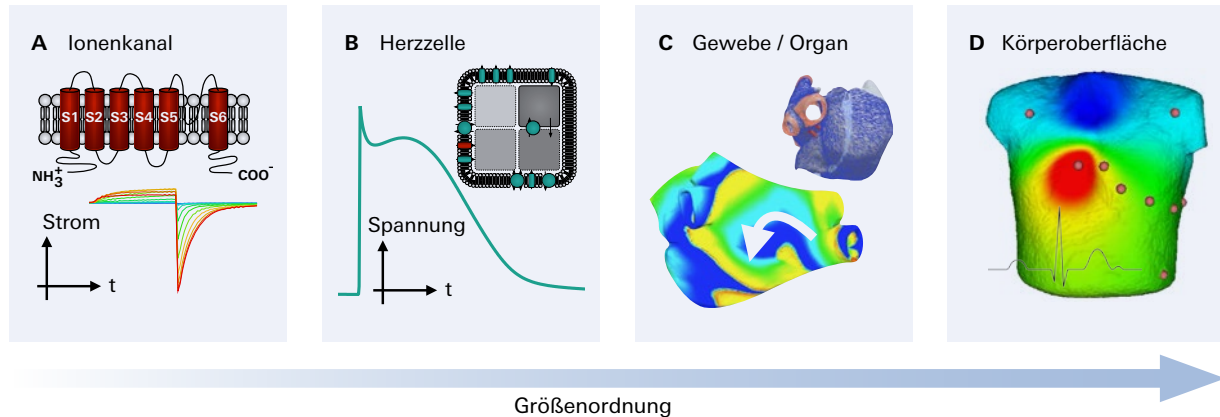
STEMMA (COMMONS) WIKIMEDIA ARCHIVIERTE KOPIE DER THE HUMAN HEART AND LABELS (SVG) CC BY-SA 4.0 (CREATED COMMONS ORIGINALS BY SAUL LOEBEN/ISTOCK) BEARBEITUNG SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Herzmodellierung

Um das menschliche Herz erfolgreich zu simulieren, muss man verstehen, welche Prozesse sich auf kleinster Skala abspielen. Die Membran der Herzmuskelzellen besitzt Ionenkanäle, die sich spannungsabhängig öffnen und schließen, um elektrische Ionenströme zu

leiten (A). Dadurch entsteht ein Spannungsunterschied zwischen dem Inneren einer Zelle und ihrer Umgebung. Der zeitliche Verlauf dieser Transmembranspannung, der durch die unterschiedlichen Ionenströme entsteht, ist für jede Zelle anders (B). Die elektrischen Ströme

breiten sich anschließend im gesamten Gewebe aus. Unter Umständen können im Vorhof kreisförmige Ströme entstehen (weißer Pfeil), die häufig Störungen verursachen (C). Solche Ströme lassen sich bei einem Patienten durch ein Elektrokardiogramm messen (D).



Ströme Vorhofflimmern und andere Herzrhythmusstörungen (siehe C in »Herzmodellierung«). Mediziner können mit Hilfe des Modells herausfinden, unter welchen Umständen derartige Ströme entstehen.

Indem man den Hodgkin-Huxley-Ansatz mit den Reaktionsdiffusionsgleichungen verbindet, kann man untersuchen, wie das Verhalten der Ionen die Zellen bis hin zum gesamten Gewebe beeinflusst. So lässt sich modellieren, wie sich Änderungen auf mikroskopischer Ebene auf die Funktionsweise des Organs auswirken.

Mit einem solchen Multiskalenmodell kann man beispielsweise untersuchen, wie das Herz eines Patienten auf bestimmte Antiarrhythmika reagiert. Die chemische Substanz wirkt auf die einzelnen Ionenkanäle – also auf mikroskopischer Ebene – und soll die chaotischen Erregungen des Vorhofflimmerns beenden, die ihrerseits ein Gewebephänomen darstellen.

Seit über 20 Jahren arbeiten Forscher, darunter auch ich, am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) an derartigen Computermodellen des Herzens. In engem Austausch mit Ärzten entwickelt unser interdisziplinäres Team aus Ingenieuren der Elektro- und Informationstechnik sowie der Mechatronik gemeinsam mit Informatikern, Physikern und angewandten numerischen Mathematikern die Simulationen unentwegt weiter.

Anstatt auf klassische Zellexperimente oder Tierversuche zurückzugreifen, können wir dadurch biochemische und -physikalische Mechanismen identifizieren, die mit einer Erkrankung zusammenhängen. Außerdem arbeiten wir an personalisierten Modellen, mit denen Ärzte künftig

maßgeschneiderte Behandlungen für Patienten entwickeln könnten.

Allerdings ist unser Modell extrem rechenintensiv. Um das gesamte Herz in einem Modell hinreichend fein aufzulösen, stellen wir das Organ durch ein riesiges Gitter mit mehreren Millionen Elementen dar. Wenn wir die Ausbreitung der Erregungswelle simulieren, müssen wir in jedem Berechnungsschritt ein entsprechend großes lineares Gleichungssystem lösen. Pro Herzschlag fallen bis zu 50 000 solcher Schritte an, so dass man Supercomputer braucht, um die Aufgabe zu meistern.

Erste klinische Versuche

Nicht alle Simulationen sind so aufwändig. Möchte man etwa modellieren, was mit dem Aktionspotential einer Herzmuskelzelle passiert, wenn man ein bestimmtes Medikament einnimmt, lässt sich das in Windeseile auf jedem handelsüblichen Computer berechnen. Zusammen mit Forschern aus Bordeaux, Freiburg und Graz haben wir die Software openCARP frei zur Verfügung gestellt, mit der man derartige Simulationen durchführen kann.

Die Forschungsgruppe um die Biomedizintechnikerin Natalia A. Trayanova von der Johns Hopkins Universität in Baltimore ist mit ihren Modellen des menschlichen Herzens besonders weit in klinische Anwendungen vorgedrungen. Die Wissenschaftler haben die so genannte OPTIMA-Methode (englisch: Optimal target identification via modeling of arrhythmogenesis) entwickelt, um eine personalisierte Ablationstherapie gegen Vorhofflimmern zu planen. Sie bilden das Herz eines Patienten mittels Magnetresonanztom-

mografie ab, bei der die Forscher das Kontrastmittel Gadolinium nutzen, das eingelagertes Bindegewebe in den Vorhöfen sichtbar macht. Damit können sie ein personalisiertes Computermodell erstellen, in dem sie versuchen, das Vorhofflimmern auszulösen. Gelingt das, identifizieren die Forscher jene Bereiche des Vorhofs, die das Flimmern verursachen und demnach behandelt werden müssen.

2019 teste die Gruppe um Trayanova ihren simulationsbasierten Ansatz an zehn Patienten, die unter problematischem Vorhofflimmern litten. Neun von ihnen konnten die Ärzte dauerhaft heilen, doch bei einem Patienten trat es während der Nachsorgezeit weiterhin episodenhaft auf. Dieser hatte vor der OPTIMA-Ablation bereits drei weitere, erfolglose klassische Eingriffe gehabt. Die Ergebnisse zeigen, dass die computergestützte Methode gut funktioniert und künftig häufiger eingesetzt werden könnte.

Die Gruppe aus Baltimore arbeitet darüber hinaus an anderen Anwendungen. Sie versuchen mit einem Computermodell herauszufinden, welche Patienten, die einen Herzinfarkt überstanden haben, einen automatischen Defibrillator benötigen. Das Gerät gibt bei Kammerflimmern einen gezielten Elektroschock ab, der das Herz in den Normalzustand zurückversetzt. Ein solcher Eingriff geht allerdings mit Risiken einher, weshalb man nur in den wirklich notwendigen Fällen darauf zurückgreifen möchte.



ISTOCK / HORSCHE

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/kuenstliche-organe-und-prothesen

Aktuell machen Ärzte ihre Entscheidung von der mechanischen Leistungsfähigkeit der linken Herzkammer abhängig. Wenn diese mit jedem Schlag mehr als 35 Prozent des maximal in der Kammer vorhandenen Bluts durch die Hauptschlagader in den Körper pumpt, verzichtet man auf einen Defibrillator. Andernfalls empfehlen Ärzte dem Patienten das Gerät. Weil Kammerflimmern aber ein hauptsächlich elektrophysiologisches Problem ist, liefert die mechanische Auswurfleistung nur ein indirektes Maß für das individuelle Risiko. Daher nutzen Trayanova und ihr Team personalisierte Computermodelle, um zu prüfen, ob das Herz eines Patienten anfällig für Kammerflimmern ist.

Dabei bestimmen die Forscher mit einer Magnetresonanztomografie, wie das Herz geformt und wie groß die Infarktnarbe ist. In einer Studie mit 41 Testpersonen konnten die Wissenschaftler 2016 zeigen, dass ihr VARP-Ansatz (Virtual arrhythmia risk predictor) deutlich aussagekräftiger ist als klassische Methoden.

Die Simulation von menschlichen Organen wirkt sich inzwischen auch auf die Medikamentenentwicklung aus. Die 2013 von verschiedenen Wissenschaftlern gegründete CiPA-Initiative (Comprehensive in vitro proarrhythmia assay)

möchte beispielsweise die Kriterien ändern, anhand derer man neue Medikamente beurteilt. Etwa gilt aktuell die Blockade eines bestimmten Kaliumkanals (I_{Kr}) als K.-o.-Kriterium für potenzielle Wirkstoffe. Zwar musste man dadurch kein Medikament mehr wegen erhöhten Risikos für Herzrhythmusstörungen nachträglich wieder vom Markt nehmen. Andererseits wurden durch die Regel aber höchstwahrscheinlich viele wirkungsvolle und unbedenkliche Substanzen nicht zugelassen. Die CiPA-Initiative schlägt daher vor, neue Wirkstoffe nicht ausschließlich danach zu beurteilen, wie sie einen bestimmten Kaliumkanal beeinflussen, sondern die Effekte unter anderem mit Hilfe von Computermodellen ganzheitlich zu betrachten. Wenn ein Medikament auf andere Ionenkanäle mit gegensätzlicher Rolle wirkt, kann der unerwünschte Effekt ausbleiben, wodurch das Risiko für Herzrhythmusstörungen trotz I_{Kr} -Blockade gleich bleibt oder sogar sinkt.

Vorbilder aus der Industrie

Bei Maschinen wie Flugzeugen testet man jeden neuen Prototyp vorab in Simulationen. Warum sollte man ähnliche Methoden nicht auch bei medizinischen Produkten wie Herzschrittmachern anwenden? Europäische und andere internationale Behörden, allen voran die US-amerikanische FDA (Food and Drug Administration), haben mittlerweile Richtlinien erlassen, um Computermodellierung bei der Zulassung von medizinischen Geräten zu nutzen.

Inzwischen boomt der Bereich der Computersimulation für die Medizin. Zum Beispiel hat sich das Living-Heart-Projekt rund um das Softwareunternehmen Dassault Systèmes zum Ziel gesetzt, kommerzielle Simulationen ähnlich wie in der Automobil- oder Luftfahrtindustrie zu entwickeln. Mit diesem virtuellen Herz lassen sich unterschiedliche Behandlungen und Geräte wie künstliche Herzklappen testen.

In Zukunft könnten solche Ansätze aufwändige Tierversuche und klinische Studien zumindest teilweise ersetzen. Zudem können sie dabei helfen, grundlegende krankheitsauslösende Prozesse besser zu verstehen und personalisierte Therapieansätze zu entwickeln. Ärzte können unterschiedliche Therapieformen im virtuellen Organ des Patienten in Ruhe beliebig intensiv testen und dadurch eine optimale Strategie ausarbeiten, um Erkrankungen dauerhaft zu heilen. ◀

QUELLEN

Boyle, P. M. et al.: Computationally guided personalized targeted ablation of persistent atrial fibrillation. *Nature Biomedical Engineering* 3, 2019

Hodgkin, A. L., Huxley, A. F.: A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *Journal of Physiology* 117, 1952

Loewe, A. et al.: Patient-specific identification of atrial flutter vulnerability – a computational approach to reveal latent reentry pathways. *Frontiers in Physiology* 9, 2019

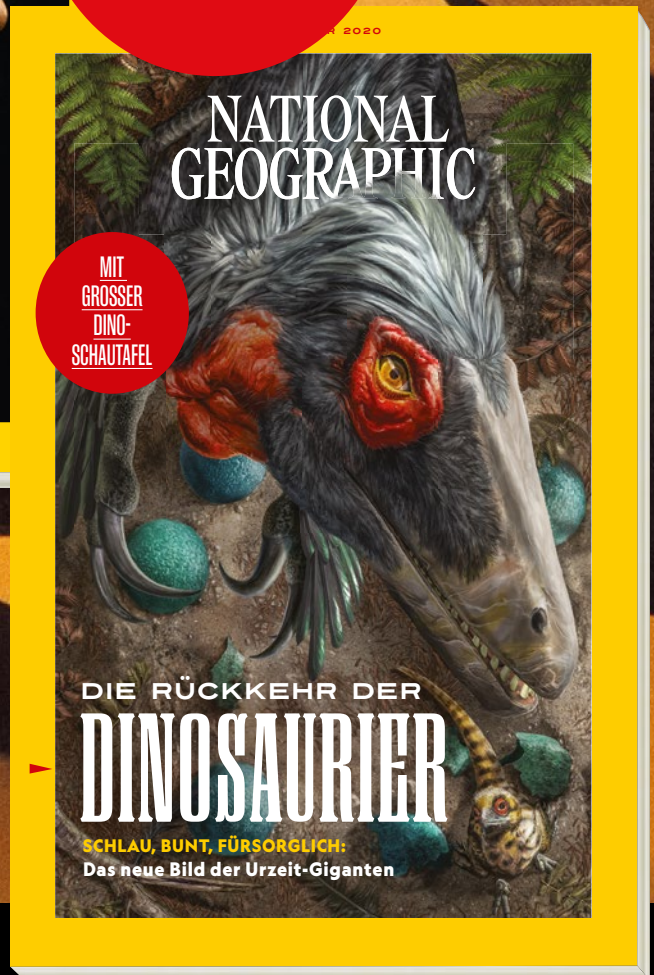
Loewe, A. et al.: Cardiac ischemia-insights from computational models. *Herzschrittmachertherapie und Elektrophysiologie* 29, 2018

Niederer, S. A. et al.: Computational models in cardiology. *Nature Review Cardiology*, 2018

ES GIBT VIEL ZU ENTDECKEN!



IM HANDEL
ODER
VORTEILSABO
SICHERN



WWW.NATIONALGEOGRAPHIC.DE/SPEKTRUM

NATIONAL GEOGRAPHIC

I WEITER VORAN

PALÄOKLIMA CHRONISTEN DER ERDGESCHICHTE

Wie unermüdliche Datenschreiber zeichnen Bäume, kilometerdicke Eispanzer und Millionen Jahre alte Sedimente fortlaufend Informationen über die Umweltbedingungen der Erde auf. Sie zu lesen, ist der Schlüssel, um das Klima der Vergangenheit zu verstehen – und das der Zukunft.



Tim Kalvelage ist promovierter Biogeochemiker und Wissenschaftsjournalist in Bremen.

» spektrum.de/artikel/1757380

»Die heißeste Phase der vergangenen 2000 Jahre erfuhren mehr als 98 Prozent der Erde während des 20. Jahrhunderts.« Das berichteten internationale Forscher 2019 im Fachmagazin »Nature«. Der vom Menschen verursachte Klimawandel sei für diesen Zeitraum nicht nur hinsichtlich der absoluten Temperaturen beispielsweise, sondern auch in seiner geografischen Ausdehnung.

Für die Zeit vor der industriellen Revolution konnten die Wissenschaftler keine Kalt- oder Warmperioden feststellen, die den kompletten Globus erfassten. Stattdessen erreichte die kälteste Phase des vorherigen Jahrtausends, die Kleine Eiszeit, in verschiedenen Erdteilen um einige hundert Jahre versetzt ihren Höhepunkt. Die natürlichen Triebkräfte des Klimas hätten seinerzeit nicht ausgereicht, weltweite und anhaltende Temperaturextreme zu verursachen, schlussfol-

gerte das Team um Raphael Neukom von der Universität Bern (siehe »Spektrum« Februar 2020, S. 30).

Woher aber wissen wir, wie heiß oder kalt es vor Hunderten von Jahren in Mitteleuropa oder Südamerika war? Wie können wir sagen, wie viel Meereis die Arktis bedeckte oder welche Regenmengen der Monsun dem indischen Subkontinent und Ostafrika bescherte?

Systematische Wetteraufzeichnungen mittels geeichter Instrumente reichen lediglich bis Mitte des 19. Jahrhunderts zurück – und das nur für Teile des Festlands. Noch später begannen Wissenschaftler, die physikalischen Prozesse im Ozean umfassend zu erforschen, etwa während der britischen Challenger-Expedition (1872–1876) oder der deutschen Meteor-Expedition (1925–1927). Den genauen Verlauf des CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre wiederum, die so genannte Keeling-Kurve, kennen wir erst, seit der US-Amerikaner Charles D. Keeling im Jahr 1958 ein Messgerät auf dem Vulkan Mauna Loa auf Hawaii installierte, das seither den Kohlenstoffdioxidgehalt in der Luft kontinuierlich aufzeichnet.

Heute überwachen weltumspannende Messnetze das Klima in Echtzeit: Wetterballons, Treibbojen im Ozean oder Satelliten, die den Planeten mehrmals täglich umkreisen. Dank ihnen verfügen wir für die verschiedenen Elemente des Klimasystems der Erde – also die Atmosphäre, die Ozeane, die Landoberfläche sowie die Eismassen – über eine recht gute Datenbasis. Zumindest für die letzten 20 bis 100 Jahre.

Wie warm die Meere in früheren Jahrhunderten waren oder wie weit sich die Polkappen in vergangenen geologi-

SERIE **Klimawandel**

Teil 1: September 2020

Deutschland im Klimawandel

Diana Rechid, Andreas Bolte, Ralf Weisse,
Rita Adrian, Benjamin M. Kraemer

Teil 2: **Oktober 2020**

Chronisten der Erdgeschichte

Tim Kalvelage

Teil 3: November 2020

Wie Klimamodelle entstehen

Armin Iske und Stephan Juricke



Bereits bei der Challenger-Expedition (1872–1876) sammelten Forscher Kalkschalen von Foraminiferen. Die Organismen gehören zu den wichtigsten Klimaarchiven.

schen Epochen in Richtung Äquator ausdehnten, versuchen Paläoklimaforscher zu entschlüsseln, indem sie Temperaturen, Niederschläge sowie Strömungen in der Atmosphäre und im Ozean rekonstruieren. Dafür nutzen sie unterschiedlichste Klimaarchive, die Informationen über ihre Umwelt in Biomolekülen oder in organischen und anorganischen Strukturen speichern und für Jahrtausende oder gar Jahr-millionen konservieren.

In der eingangs erwähnten »Nature«-Studie stützten sich die Wissenschaftler auf Klimarekonstruktionen verschiedener Erdteile anhand von Muscheln, Korallen, Gletschereis, Sedimenten und Bäumen. Weitere wichtige Klimaarchive sind Höhlenminerale, Mikroorganismen und Pollen. Wie sie die physikalische und chemische Beschaffenheit der Erde gewissermaßen aufzeichnen und wie Forscherinnen und Forscher die Daten lesen, dazu später mehr. Zunächst die Frage: Warum sollte uns etwa die Temperatur am Südpol vor 20000 Jahren überhaupt interessieren?

Tatsächlich versucht die Paläoklimatologie nicht bloß, die zeitlichen und räumlichen Schwankungen verschiedener Umweltparameter zu erfassen. Ziel des Forschungszweigs ist es vor allem, die Prozesse besser zu verstehen, die das Klima kontrollieren. Sie haben in der Vergangenheit bisweilen für (in geologischen Maßstäben) abrupte Wechsel gesorgt. Beispielsweise gingen vor 5500 Jahren die Regen-

AUF EINEN BLICK AUS DER VERGANGENHEIT LERNEN

- 1** Daten aus Sedimenten, Korallen, Bäumen und weiteren Hinweisgebern verraten Fachleuten, welche Umstände lange vor unserer Zeit auf der Erde herrschten.
- 2** Anhand solcher Klimaarchive lassen sich globale Phänomene identifizieren, etwa wiederkehrende Zyklen unterschiedlicher Sonneneinstrahlung.
- 3** Dank dieser Rekonstruktionen verstehen Forscher die Faktoren, die das Klima steuern, immer detaillierter. So können sie Aussagen darüber treffen, wie sich unsere Lebensbedingungen in Zukunft verändern werden.

fälle in der Sahelzone plötzlich zurück, so dass die Sahara vorrückte. Warum? Die Antwort: Die höheren Breiten kühlten sich ab, was die tropische Zirkulation veränderte (siehe »Spektrum« Januar 2018, S. 11). In der Jüngeren Dryas am Ende der letzten Eiszeit heizte sich der globale Ozean in nur 700 Jahren um 1,6 Grad auf, während die Nordhalbkugel einen Kälteeinbruch erlebte. Hier ist die Ursache noch unbekannt. »Wir suchen nach Antworten auf solche Fragen, damit wir anhand von Klimamodellen Prognosen für die nächsten Jahrhunderte erstellen können«, sagt Jan Esper, Professor am Geographischen Institut der Universität Mainz. »Um das Klima der Zukunft zu verstehen, müssen wir seine Antriebskräfte kennen.«

Betrachtet man etwa die Entwicklung der Oberflächentemperatur der Erde seit dem Beginn der industriellen Revolution, also in den vergangenen 150 Jahren, ist ein Trend deutlich: Unser Planet heizt sich auf. Die Temperaturkurve zeigt für den relativ kurzen Zeitraum jedoch keine stetige

Zunahme, sondern schlägt immer wieder weiter nach unten oder oben aus. Manche Jahre waren überdurchschnittlich kalt, andere erheblich wärmer als im langjährigen Mittel. Der kontinuierliche Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration sowie weiterer Treibhausgase wie Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) lässt sich folglich nicht einfach in eine bestimmte Gradzahl für die globale Erwärmung übersetzen.

Zusammenspiel wärmender und kühlender Einflüsse

Denn das Klima der Erde resultiert aus einer Reihe natürlicher und menschengemachter Faktoren. Teils wirken sie abkühlend, teils erwärmend. Einige schwanken innerhalb von Jahren bis Jahrtausenden ganz erheblich.

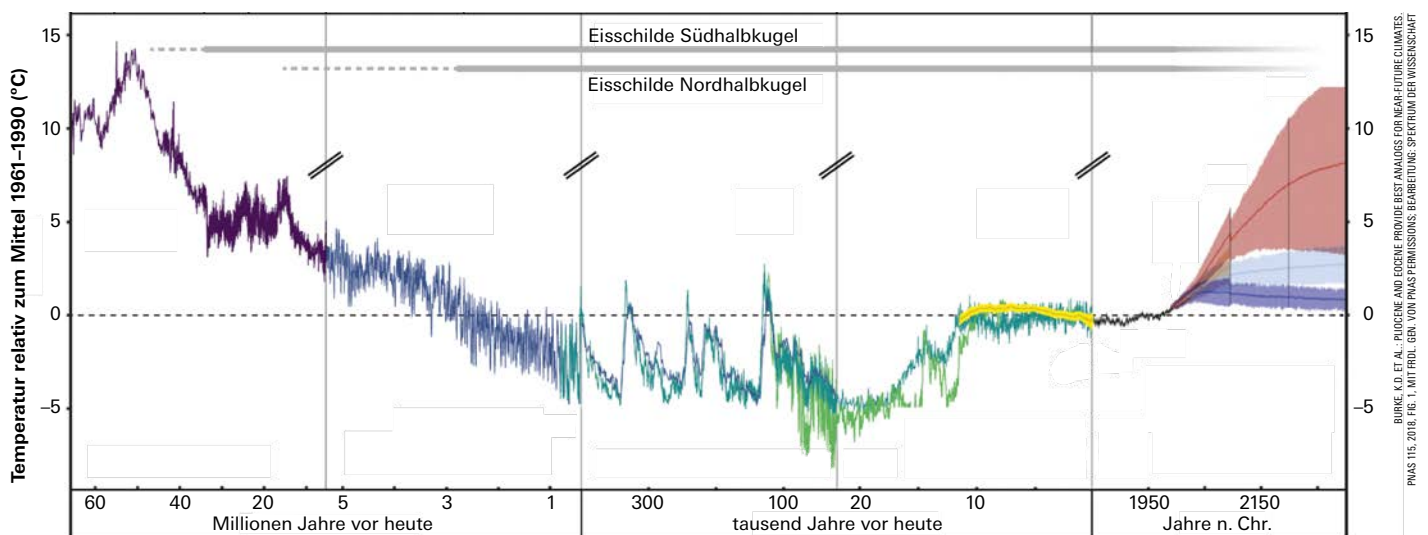
Der Mensch greift in die globalen Prozesse in erster Linie ein, indem er Treibhausgase ausstößt sowie deren Senken zerstört: Er fördert und verfeuert Öl, Gas und Kohle, die Quellen für CO₂ und CH₄ darstellen; er betreibt Landwirtschaft, die wiederum CH₄ und N₂O erzeugt; und er holzt Wälder ab und entwässert Moore, die als CO₂-Speicher dienen. Außerdem beeinflussen Aerosole aus Kraftwerken und Fabriken die Wolkenbildung und sorgen, je nach Typ, für kältere Luftmassen (wie etwa Sulfat-Aerosole) oder wärmere (beispielsweise Rußpartikel).

Zu den natürlichen Klimafaktoren gehören die Sonnenaktivität, die Rotationsachse der Erde und ihre Umlaufbahn um die Sonne sowie Vulkanausbrüche. Beispielsweise können große Eruptionen, wie die des Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991, den Planeten für mehrere Jahre um einige zehntel Grad abkühlen, weil solche Ausbrüche gewaltige Mengen an Sulfat-Aerosolen in die Luft schleudern. Periodische Schwankungen innerhalb des Klimasystems wie ENSO (El Niño / Südliche Oszillation) sorgen ebenfalls für messbare Temperaturschwünge (siehe das Interview »Korallen als Klimatagebuch« auf S. 56/57).

Vor dem gesamten Hintergrund natürlicher Veränderungen spielt sich der vom Menschen angetriebene Wandel ab. Damit Computermodelle eine möglichst genaue Vorschau auf das zukünftige Erdklima liefern können, müssen sie das Zusammenwirken der verschiedenen Kräfte adäquat abbilden. Dafür blicken Paläoforscher zurück in die Zeit vor der industriellen Revolution, als unsere Spezies noch kein entscheidender Klimafaktor war.

Um das Klima längst vergangener Tage zu rekonstruieren, greifen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf so genannte Proxies zurück. Als solche Stellvertreterdaten bezeichnet man Messgrößen, die in Temperaturwerte, Niederschlagsmengen oder Salzgehalte übersetzbar sind. Das kann die Breite von Wachstumsringen, der Anteil schwerer Isotope oder das Verhältnis bestimmter chemischer Elemente zueinander in Klimaarchiven sein. Diese haben einige Bedingungen zu erfüllen, damit die gespeicherten Proxies verlässliche Aussagen über die Vergangenheit erlauben: Sie müssen sich sowohl möglichst genau verorten als auch zeitlich einordnen (datieren) lassen, und sie sollten für ein größeres Gebiet repräsentativ sein. Besonders wertvoll sind außerdem Archive, die eine zeitlich hoch aufgelöste Datierung ermöglichen und Erkenntnisse über jährliche oder sogar saisonale Veränderungen liefern.

Solche zuverlässigen Chronisten sind beispielsweise Bäume. Sie illustrieren anschaulich, wie Geologen aus Klimaarchiven Umweltdaten gewinnen: »Bäume bilden Jahresringe, wenn ihr Wachstum durch niedrigere Temperaturen im Winter unterbrochen wird«, erklärt Jan Esper, dessen Fachgebiet die Rekonstruktion des Klimas anhand von Hölzern ist. »Entnimmt man einem lebenden Baum einen Bohrkern, zählt man zur Altersbestimmung einfach die Jahresringe.« Um historische Hölzer zeitlich einzuordnen, etwa aus einem alten Gebäude oder vom Grund eines



Rekonstruktion der Bedingungen auf der Erde von vor 65 Millionen Jahren bis heute. Als Hinweisgeber dafür dienten diverse Klimaarchive (siehe Legende rechts). Die Projektionen ab 2005 entsprechen verschiedenen Szenarien des Weltklimarats IPCC.

- Foraminiferen
- Foraminiferen
- Eisbohrkerne (Antarktis)
- Eisbohrkerne (Grönland)
- diverse, darunter Foraminiferen, Eisbohrkerne, Pollen, Sedimente, Tropfsteine
- Messdaten



SEDIMENTKERNE LINKS: MARIETTA STRAUB MIT FRDL. GER. VON ALFREDO MARTINEZ-GARCIA. MPIC. BEPROBUNG RECHTS: KADIA MACHILL. GEOMAR (INVURL.COM/19284387/CE/4.1) CREATIVE COMMONS URRECHTSSBYAUFLEHLODEI

Sedimentbohrkerne vom Meeresboden werden in Stücke geschnitten und halbiert (links). In speziellen Labors, hier am GEOMAR in Bremen, analysieren Geochemiker die Proben im Detail (rechts).

Sees, legen die Forscher sie neben bereits datierte und suchen nach Überlappungen im Muster der Jahresringbreite. »Mit Hilfe dieser so genannten Cross-Datierung können wir aus wenigen hundert Jahre alten Bäumen über 10 000 Jahre umfassende Chronologien erstellen«, sagt Esper. Darüber hinaus gibt die Analyse der Dichte der Jahresringe oder der Zerfall des radioaktiven Kohlenstoffisotops ^{14}C Aufschluss über das Alter der Hölzer.

Daneben verraten die Jahresringe etwas über das Klima am jeweiligen Standort. Bäume bilden in warmen, feuchten Jahren typischerweise breitere Jahresringe als in kalten, trockenen. »Zur Klimarekonstruktion eignen sich deshalb vor allem Regionen, in denen einer der beiden Faktoren – die Temperatur oder die Niederschlagsmenge – entscheidend ist«, so Esper. Im Mittelmeerraum etwa ist die Breite der Jahresringe ein guter Anzeiger für Trockenheit, in Skandinavien hingegen für die Temperatur im Sommer.

Bei Dürre speichert Holz mehr schweren Kohlenstoff

Darüber hinaus beeinflussen klimatische Faktoren das Verhältnis der stabilen Kohlenstoff- (^{12}C und ^{13}C) und Sauerstoffisotope (^{16}O und ^{18}O) in Hölzern. Leichte und schwere Isotope eines Elements reagieren unterschiedlich schnell – das gilt für physikalische Prozesse wie Wolkenbildung und Niederschlag genauso wie für biochemische Abläufe in der Zelle. Daher reichern sie sich im Regenwasser oder in der Biomasse nicht ihrer natürlichen Häufigkeit entsprechend an. Bei der Fotosynthese etwa fixieren Pflanzen bevorzugt $^{12}\text{CO}_2$. Wenn ein Baum jedoch bei Trockenheit die Spaltöffnungen an den Blattunterseiten schließt, um Wasserverlust zu vermeiden, gelangt weniger »frisches« CO_2 ins Blattinnere. Nun muss er größere Mengen des innen vorliegenden $^{13}\text{CO}_2$ umsetzen. Dadurch speichert das Holz bei Dürre vermehrt schweren Kohlenstoff.

Sofern das Isotopenverhältnis sowie die Breite oder Dichte der Jahresringe in etwa mit den gemessenen Temperatur- oder Niederschlagswerten am Standort eines Baums korrelieren, können Forscherinnen und Forscher damit das Klima früherer Zeiten rekonstruieren. Dazu kalibrieren sie den jeweiligen Proxy anhand von Klimadaten für die letzten Jahrzehnte. Praktisch berechnen sie eine mathematische

Funktion, die es ermöglicht, weiter in die Vergangenheit zurückreichende Proxydaten in Grad Celsius zu übersetzen.

Auf ähnliche Weise bestimmen Wissenschaftler Klimavariablen wie die Temperatur und den CO_2 -Gehalt mit Hilfe anderer Archive, die Wachstumsringe oder Ablagerungsmuster aufweisen: aus den Kalkskeletten von Hartkorallen (siehe Interview auf S. 56/57), aus Seesedimenten, in denen sich jährlich eine helle und eine dunkle Schicht abwechseln, oder aus Höhlenmineralen wie Stalagmiten, den emporschwachsenden Tropfsteinen. Solche Daten erzählen Paläoforschern etwas über die einstige Höhe des Meeresspiegels, die Vegetation oder den Wasserkreislauf.

Gelegentlich entdecken Forscher sogar neue Klimaarchive. 2013 fanden der Paläoklimatologe Jochen Halfar von der University of Toronto und seine Kollegen am arktischen Meeresboden langlebige Algen, deren Wachstum empfindlich auf Lichtmangel unter Meereis reagiert. Anhand der baumringartig gemusterten Kalkschalen der Algen wiesen sie nach, dass die Meereisbedeckung während der letzten 650 Jahre nie geringer war als im 20. Jahrhundert. Im März 2020 berichtete ein Team um Hong Yan von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften von Riesenmuscheln im Südchinesischen Meer, in deren Schalen Zyklone und Kälteeinbrüche Spuren hinterlassen. Damit ließen sich womöglich sogar vergangene Extremwetter-Ereignisse aufspüren.

Zu den wichtigsten Klimaarchiven zählen marine Sedimente, die sich kontinuierlich am Meeresboden ablagern. Sie können großflächig Informationen für sehr lange Zeiträume liefern. Insbesondere für Klimarekonstruktionen der Südhalbkugel, auf der es relativ wenig Landmasse gibt, sind solche Meeressedimente unverzichtbar. Die Größe und Genauigkeit des Zeitfensters, das Ablagerungen in die Erdgeschichte öffnen, hängt unter anderem davon ab, wie schnell sich die Schichten bilden. »An den Kontinentalhängen kann sich in 1000 Jahren leicht mehr als ein Meter anhäufen, im offenen Ozean ist es typischerweise bloß ein Zentimeter«, erklärt Dirk Nürnberg vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel. Je nach ihrer Länge, die von zehn Metern bis zu einem Kilometer reichen kann, umfassen Sedimentkerne so Zehntausende bis Millionen von Jahren. Küstennahe Ablagerungen erlauben eine hohe

zeitliche Auflösung im Bereich von Jahrzehnten, während solche aus der Tiefsee auf tausende Jahre genau sind.

Aber nicht überall ist der Ozeangrund dazu geeignet, in ihn hineinzubohren. »Wenn Sedimente umgelagert werden, durch Strömungen, Hangrutschungen oder Meerestiere, die im Boden graben, wird ihre Chronologie zerstört«, sagt Nürnberg. Sedimente mit ungestörter Schichtung lassen sich auf verschiedene Weisen datieren: Eine relative zeitliche Einordnung ist zum Beispiel anhand von Farbwechseln und evolutionsbedingten Veränderungen von Mikrofossilien möglich oder durch die Analyse des Magnetismus mineralischer Bestandteile, die bei ihrer Bildung die einstige Ausrichtung und Stärke des wechselnden Erdmagnetfelds abgespeichert haben. Für eine absolute Altersbestimmung messen Forscherinnen und Forscher den Zerfall radioaktiver Elemente, etwa von Kalium zu Argon (^{40}K zu ^{40}Ar).

Teilweise ergeben sich aus Zerfallsmessungen allerdings recht große Fehler hinsichtlich des Alters. Deshalb dient zur Datierung inzwischen vor allem das Sauerstoffisotopenverhältnis in Mikrofossilien, so genannten Foraminiferen (siehe Foto auf S. 51). Die kaum einen halben Millimeter großen Einzeller sind in den Meeren weit verbreitet und bevölkern sowohl das Wasser als auch den Ozeanboden. »Foraminiferen bilden Kalkschalen und zeichnen so zu Lebzeiten das Isotopensignal des Meerwassers auf, das sich nur mit dem Vormarsch und Rückzug der Eisschilde an Land ändert«, erläutert Dirk Nürnberg. Auf langen Zeitskalen wird das Isotopensignal vor allem durch Schwankungen der Sonneneinstrahlung kontrolliert, die sehr genau zu berechnen ist.

Multitalente der Geschichtsschreibung

Nicht nur bei der Datierung setzen Forscher auf Foraminiferen. Denn die Einzeller sind wahre Multitalente, wenn es darum geht, Umweltparameter abzuspeichern. Der Magnesiumgehalt ihrer Kalkschalen gibt gute Hinweise auf die Wassertemperatur. Analysen von Foraminiferen aus Sedimentkernen haben etwa gezeigt, dass die Tiefsee vor 50 Millionen Jahren zwölf Grad wärmer war als heute und sich seither abgekühlt hat. Bestimmt man neben dem Magnesiumgehalt noch das Sauerstoffisotopenverhältnis, lässt sich der Salzgehalt rekonstruieren. Bor wiederum bauen die Organismen in Abhängigkeit vom pH-Wert in ihre Schalen ein, Kadmium erlaubt Rückschlüsse auf die Phosphatmenge im Wasser.

Ein Beispiel dafür, wie Paläoforscher Foraminiferen nutzen, um den Klimawandel zu verstehen, ist eine Studie von 2018 zur Entwicklung der Atlantischen Umwälzzirkulation in den letzten 1650 Jahren. Aus fossilen Foraminiferen, die zu Lebzeiten als Plankton 100 bis 200 Meter unter der Oberfläche schwammen, ermittelten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um David Thornalley vom University College London die Temperatur und den Salzgehalt für die Labradorsee, in der sich das Atlantische Tiefenwasser bildet. Die Daten verglichen sie mit der Stärke der südwärtigen Tiefenströmung, die sie anhand der Größensortierung sedimentierender Partikel rekonstruierten. Ihr Fazit: Seit der Industrialisierung schwächt die Zirkulation im Atlantik. Möglicherweise, weil Schmelzwasser aus der Arktis die Tiefenwasserbildung bremst.



Bohrkerne aus dem kilometerdicken Eis der Antarktis geben Aufschluss über das Klima vor hunderttausenden Jahren.

Wenn wir sehr weit in die Klimageschichte der Erde zurückschauen wollen, gibt es kaum einen besseren Ort dafür als die Antarktis. Auf dem weißen Kontinent lastet ein mächtiger, kilometerdicker Eisschild. Russische und europäische Forschungsexpeditionen haben seit den 1970er Jahren in den Eispanzer gebohrt, bis wenige Meter über das darunterliegende Grundgestein, um mehr über die Antriebskräfte unseres Klimas zu erfahren.

»Eisbohrkerne sind einzigartige Klimaarchive, weil das Eis einen Teil der einstigen Atmosphäre konserviert«, sagt Alfredo Martínez-García vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. Die Schneemassen, die auf die Antarktis fallen, schließen winzige Luftbläschen ein, ehe sie sich langsam in Eis verwandeln. Wissenschaftler haben Methoden entwickelt, mit denen sie das eingesperrte Gas extrahieren und seine Zusammensetzung bestimmen. Dank der Bohrungen in der Antarktis haben Forschungsteams den CO_2 -Gehalt der Atmosphäre in den rund 800 000 Jahren vor der industriellen Revolution rekonstruiert: Er schwankte zwischen 170 ppm und 300 ppm (ppm: Teile pro Million). Inzwischen hat er mehr als 410 ppm erreicht. Ebenso sind die CH_4 - und N_2O -Konzentrationen heute höher als während der langen Zeitspanne davor.

Die antarktischen Eisbohrkerne förderten noch eine weitere Erkenntnis zu Tage. Neben dem CO_2 -Gehalt, den sie direkt aus den eingeschlossenen Gasblasen bestimmten, haben zahlreiche Forschungsgruppen in jahrzehntelanger Arbeit anhand der Sauerstoffisotopenverhältnisse der Wassermoleküle im Eis die Schwankungen der Umgebungstemperatur in jenem Zeitraum ermittelt. Das funktioniert, weil der Anteil an schwerem Sauerstoff ^{18}O gegenüber dem leichten Isotop ^{16}O im Wasser ansteigt, wenn es kälter wird (siehe »Spektrum« März 2020, S. 48). Wie sich zeigte, folgen sowohl CO_2 -Gehalt als auch Temperatur im Gleichschritt einem gewissen Rhythmus. Er beschreibt den Wechsel

zwischen Eiszeiten (Glazialen), in denen die CO₂-Konzentration am niedrigsten war, und Warmzeiten (Interglazialen), in denen der Gehalt des Gases in der Atmosphäre sprunghaft anstieg. Die letzten 800 000 Jahre umfassen insgesamt acht unterschiedlich stark ausgeprägte glaziale Zyklen.

Taktgeber für das Einsetzen von Eis- und Warmzeiten sind Veränderungen der Sonneneinstrahlung auf die Erde. Letztere wird von drei Faktoren kontrolliert, die periodischen Schwankungen unterliegen, bekannt als Milanković-Zyklen: von der Umlaufbahn der Erde um die Sonne (Periode: 100 000 Jahre), der Neigung der Erdachse (41 000 Jahre) sowie der Kreiselbewegung der Erde (23 000 Jahre). In Summe bestimmen die Schwankungen die eintreffende Sonnenenergie und so das Timing der glazialen Zyklen. Deren Verlauf wiederum beeinflussen die CO₂-Konzentration und die Ausdehnung Sonnenlicht reflektierender Eismassen.

In den letzten drei Jahrzehnten haben Forscher nach einer Erklärung für die enormen Unterschiede im Kohlenstoffdioxidgehalt zwischen Eis- und Warmzeiten von mehr als 100 ppm gesucht. Darunter der Mainzer Geochemiker Martínez-García, der die Lösung im Südlichen Ozean vermutet: »Der Ozean speichert Unmengen an Kohlenstoff. Kleine Änderungen in diesem Speicher können die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre deutlich verändern. Wir wissen, dass das Meer um die Antarktis eine Schlüsselregion für den CO₂-Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre ist.«

Steuern Eisen oder Meereis die biologische Pumpe?

Im Südlichen Ozean gelangt Wasser aus der Tiefe, reich an Nährstoffen und Kohlenstoffdioxid, an die Oberfläche (siehe »Spektrum« Juni 2017, S. 40). Die Nährstoffe befördern das Wachstum von Mikroalgen (Phytoplankton), die wiederum CO₂ speichern. Sterben die Algen und sinken ab, wird ein Teil des organisch gebundenen Kohlenstoffdioxids zurück in die Tiefsee verfrachtet. Die Umwälzung, die so genannte biologische Pumpe, läuft derzeit jedoch nicht unter Volllast, weil es dem Phytoplankton an einem anderen wichtigen Nährstoff mangelt: Eisen. Die wichtigste Quelle für Eisen ist Staub, und wie Eisbohrkerne aus der Antarktis zeigen, haben sich während der Eiszeiten bedeutende Mengen davon in der Region abgelagert. »Möglicherweise liegt das an einem schwächeren Wasserkreislauf in den Glazialen«, erklärt Martínez-García. »Große Mengen Wasser waren seinerzeit in den Eisschilden gefangen, die Erde war trockener und staubiger.«

Die durch Staubeintrag angekurbelte CO₂-Aufnahme des Südlichen Ozeans in den Eiszeiten ist als Eisen-Hypothese bekannt. Erstmals hat sie Ende der 1980er Jahre der US-amerikanische Meeresforscher John Martin (1935–1993) formuliert. Auf ihr basiert die Idee, den Ozean mit Eisen zu düngen, um künstliche Algenblüten zu erzeugen und das Gas so aus der Atmosphäre zu entfernen. Es gibt aber eine alternative Erklärung: Meereis oder eine schwächere Westwinddrift könnten den Auftrieb von CO₂-reichem Tiefenwasser gebremst haben, wodurch der Ozean während der Glaziale weniger des Treibhausgases freisetzt.

Alfredo Martínez-García hat zusammen mit Kollegen in Sedimenten nach Hinweisen für eine der beiden Annahmen gefahndet, anhand verschiedener Proxies, die im Meeres-

boden rund um die Antarktis konserviert sind. Die Wissenschaftler haben Lipide aus der Wachsschicht von Landpflanzen als Hinweisgeber für den Staubeintrag untersucht, Lipide aus Mikroalgen als Messgröße für die Produktivität und Proteinreste in den Kalkschalen von Foraminiferen als Anzeiger für die Nährstoffverwertung. Ihre Analysen belegen: Zu Eiszeiten landete auch im Südlichen Ozean mehr Staub. Und wenn es mehr Staub gab, wuchsen mehr Algen, welche die verfügbaren Nährstoffe effizienter nutzten. Laut dem Klimawissenschaftler spricht das sehr für die Eisen-Hypothese.

Um die Meereis-Hypothese zu verwerfen, ist es allerdings zu früh. 2019 simulierten Alice Marzocchi vom National Oceanography Centre in Southampton und Malte F. Jansen von der University of Chicago mit einem Computermodell, wie ausgedehntes Meereis den Auftrieb und die Vermischung von antarktischem Tiefenwasser mit dem übrigen Ozean während der Glaziale drastisch reduzierte. Dadurch sank der CO₂-Gehalt der Atmosphäre in ihrem Modell um immerhin 40 ppm.

Ganz gleich, welche natürlichen Prozesse in der Vergangenheit das Klima der Erde lenkten – sie werden in naher und ferner Zukunft weiterhin eine Rolle spielen. Nicht zuletzt helfen sie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern dabei, die Auswirkungen des menschengemachten Wandels abzuschätzen, etwa auf die Ozeanzirkulation oder den Rückgang von Gletschern und Meereis. Denn unser CO₂-Ausstoß wird das Klima in den kommenden Jahrzehnten und Jahrhunderten entscheidend bestimmen. Auf der geologischen Zeitskala ist die Phase von der industriellen Revolution bis heute kaum ein Wimpernschlag. Doch seit mindestens 66 Millionen Jahren hat unser Planet keinen ausgeprägteren und schnelleren CO₂-Anstieg erlebt.

Laut der Studie eines Teams um den Umweltwissenschaftler Kevin Burke von der University of Wisconsin-Madison entspricht unsere mittelfristige Emissionskurve am ehesten dem Worst-Case-Szenario des Weltklimarats, für welches das Deutsche Klimarechenzentrum bis 2100 eine Erwärmung um 4,8 Grad gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter berechnet hat. Sollte sich der Trend fortsetzen, könnten wir unseren Planeten, klimatisch gesehen, in nur wenigen Jahrhunderten um 50 Millionen Jahre in der Erdgeschichte zurückversetzen: in das frühe Eozän. Damals herrschte in weiten Teilen der Erde ein feuchtheißes Klima, in der Arktis wuchsen Palmen, und selbst die Antarktis war praktisch eisfrei. ◀

QUELLEN

Burke, K. D. et al.: Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. PNAS 115, 2018

Marzocchi, A., Jansen, M. F.: Global cooling linked to increased glacial carbon storage via changes in Antarctic sea ice. Nature Geoscience 12, 2019

Neukom, R. et al.: No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. Nature 571, 2019

Thornalley, D. J. R. et al.: Anomalously weak Labrador Sea convection and Atlantic overturning during the past 150 years. Nature 556, 2018

INTERVIEW

KORALLEN ALS KLIMATAGEBUCH

Henry C. Wu leitet die Arbeitsgruppe Korallen-Klimatologie am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT) in Bremen. Im Gespräch mit »Spektrum« erklärt er, warum Korallenriffe wichtige Archive unserer jüngsten Klimageschichte sind.

► spektrum.de/artikel/1757366

Herr Wu, was erzählen Ihnen Korallen über das Klima der Vergangenheit?

Henry C. Wu: Am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung arbeiten wir mit Hartkorallen, die bis zu fünf Meter große Strukturen bilden. Diese so genannten massiven Korallen können gut 500 Jahre alt werden und wachsen kontinuierlich. Dabei filtern sie Nährstoffe und andere gelöste Substanzen aus dem Meerwasser, dessen Zusammensetzung auf diese Weise in ihrem Skelett gespeichert wird. Somit zeichnen sie etwa die Temperatur und den Salzgehalt des Ozeans auf. Der Vorteil von Korallen ist, dass sie es uns erlauben, saisonale Veränderungen nachzuvollziehen. Manche wachsen 1,5 Zentimeter pro Jahr – was ziemlich schnell ist für diese Tiere. Analysiert man jeden Millimeter des Skeletts, erhält man eine monatlich aufgelöste Klimageschichte.

Wie funktioniert dieses »Korallenthermometer«?

Hartkorallen bestehen aus Kalziumkarbonat (CaCO_3). Während des Wachstums bauen sie gelöstes Kohlenstoffdioxid (CO_2) sowie Wassermoleküle (H_2O) in ihr Kalkskelett ein. Je nach Temperatur und Salzgehalt verändert sich die Zusammensetzung der Sauerstoffisotope. Dadurch reichert sich im Ozean das schwere Sauerstoffisotop ^{18}O an, weil H_2O -Moleküle mit dem leichteren Isotop ^{16}O schneller verdunsteten. Damit spiegelt das Skelett einer Koralle die Umweltbedingungen zu der Zeit wider, in der sie gewachsen ist. Es zeigt also an, ob der Ozean kälter oder wärmer war, mehr oder weniger salzhaltig.

Können Sie uns ein Beispiel aus Ihrer Forschung geben?

Meine Arbeitsgruppe will natürliche Klimaschwankungen wie das System El Niño / Südliche Oszillation (ENSO) besser verstehen und mehr darüber herausfinden, wie der Mensch

sie beeinflusst. An einer Koralle aus Indonesien haben wir Sauerstoffisotope analysiert. Die Daten zeigten einen deutlichen Jahreszyklus, mit kalten, trockenen Wintern und warmen, feuchten Sommern. In El-Niño-Jahren aber, wenn im Westpazifik die Niederschläge ausbleiben, während sich der Ostpazifik stark aufheizt und in Peru teilweise heftiger Regen fällt, verschwinden die für den Sommer charakteristischen Ausschläge im Isotopensignal. Die Probe aus dieser Koralle reicht von 2005 zurück bis ins frühe 18. Jahrhundert. Seit Beginn der industriellen Revolution bleiben die Ausschläge zunehmend aus: Weil sich die Meere erwärmen, werden intensive El Niños häufiger.

Auf welche Weise gelangen Sie an die Proben?

Wo immer möglich, nutzen wir bereits existierende Proben. Beispielsweise haben wir Korallenstücke vom Berliner Museum für Naturkunde bekommen oder von Kollegen aus den USA.

Wir verwenden manchmal auch lebende massive Korallen, aus denen wir mit Hilfe eines Unterwasserbohrers einen Kern entnehmen, ähnlich wie einen Sediment- oder Eisbohrkern. Das erscheint zwar rabiat. Aber Korallen besitzen lediglich außen lebendes Gewebe, darunter befindet sich totes Kalkskelett. Vor Samoa etwa sind wir zu einer Koralle namens »Big Mama« hinabgetaucht, die dort seit 1520 wächst. Nachdem wir unseren Bohrkern herausgeholt hatten, haben wir das Loch mit Unterwasserzement gefüllt und ein Stück lebendes Gewebe an die Stelle verpflanzt. Ein paar Jahre später war das Bohrloch nicht mehr auszumachen, die Koralle gesund und intakt.

Wie bestimmt man das Alter eines solchen Bohrkerns?

Von dem Kern erstellen wir ein Röntgenbild. Darauf kann man ein Muster heller und dunkler Banden erkennen,

Henry C. Wu

untersucht mit seiner Forschungsgruppe am ZMT in Bremen, wie sich das Klima auf der Erde in der Vergangenheit verändert hat. Im Fokus steht dabei zum einen die Frage, wie aussagekräftig Proben aus einzelnen Regionen für das Gesamtklima sind. Zum anderen erforscht er, wie die Versauerung der Meere durch CO₂ das Wachstum von Korallen und dadurch wiederum deren künftige Aussagekraft bezüglich des Erdklimas beeinflusst.



JENS LEHMKÜHLER, UNIVERSITÄT BREMEN RESEARCH ALLIANCE

welche die Wachstumsgeschwindigkeit und damit die Wassertemperatur widerspiegeln: Die dunklen Banden sind dichter als die hellen. Im Sommer, wenn das Meer wärmer ist – aber nicht so warm, dass sie ausbleichen –, wachsen die Korallen schneller. So entstehen hellere Banden. Im kühleren Winter bilden sie hingegen dunklere. Jedes Bandenpaar steht also für ein Jahr, und das Alter lässt sich einfach abzählen, wie bei Baumringen (siehe »Chronisten der Erdgeschichte« ab S. 50).

Woher kennt man das Alter einer bereits toten Koralle?

Um in der Klimageschichte weiter zurückzuschauen, sammeln wir fossile Korallenskelette. Sie können einige hundert oder tausend Jahre alt sein. Die Schwierigkeit dabei ist tatsächlich, dass man nicht genau weiß, wann die Korallen gelebt haben. Daher muss man diese Proben erst datieren. Wir messen dafür den radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium, die im Kalkskelett abgelagert werden. Auf diese Weise können wir das Alter auf wenige Jahre genau bestimmen. Dieselbe Methode nutzen wir, um das anhand von Wachstumsbanden ermittelte Alter von Korallen zu überprüfen.

Sie erwähnten zu Anfang Sauerstoffisotope: Wie bestimmt man daraus die Ozeantemperatur, und wie genau sind die Ergebnisse?

Sauerstoffisotope sind der traditionelle Weg zur Rekonstruktion der Temperatur an der Meeresoberfläche. Inzwischen misst man zusätzlich dazu Strontium. Das Element liegt im Meerwasser als zweifach positiv geladenes Kation (Sr²⁺) vor, ebenso wie Magnesium (Mg²⁺) oder Barium (Ba²⁺). Diese Ionen ersetzen, abhängig von der Wassertemperatur, Kalziumionen (Ca²⁺) im Korallenskelett aus Kalzium-

karbonat. Wir messen zunächst das Verhältnis von Kalzium zu Strontium, um den temperaturbedingten Anteil des Sauerstoffisotopen-Signals vom salzbedingten zu unterscheiden.

Die Temperaturverteilung an der Meeresoberfläche kennen wir für die letzten 50 Jahre dank Satelliten- und Schiffsmessungen recht gut. Damit kalibrieren wir unsere Kerne, das heißt, wir rechnen unsere Daten in Temperaturwerte um, die wir anschließend mit älteren, ungenaueren Temperaturmessungen abgleichen. Dann wenden wir unsere kalibrierten Messwerte auf ältere Abschnitte in den Bohrkernen an, für die keine Temperaturaufzeichnungen existieren. Auf diese Weise können wir die Wassertemperaturen in früheren Jahrhunderten auf etwa 0,5 Grad genau bestimmen.

Gibt es noch andere Parameter, die Korallen konservieren?

Anhand der Kohlenstoffisotope ¹²C und ¹³C können wir beispielsweise bestimmen, mit welcher Rate Korallen CO₂ aufnehmen. Seit einigen Jahren ist es zudem möglich, mittels Borisotopen den pH-Wert des Meerwassers zu rekonstruieren. Das hilft uns zu verstehen, wie die CO₂-bedingte Ozeanversauerung tropische Korallen beeinträchtigt. Sogar darüber, wie stark der Meeresspiegel schwankt, geben sie Auskunft: Ab einer bestimmten Tiefe erhalten die mit ihnen in Symbiose lebenden Algen nicht mehr genügend Sonnenlicht für ihre Fotosynthese. Das schlägt sich – je nach Wassertiefe – im Kohlenstoffisotopen-Signal der Korallen nieder. Daraus lässt sich die relative Distanz zur Oberfläche und so das regionale Meeresniveau ableiten. ◀

Das Gespräch führte der Wissenschaftsjournalist **Tim Kalvelage**.

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN ÖLFILME BESEITIGEN MIT GRAPHEN

Mit Hilfe eines Graphen-Schwamms kann man zuverlässig Öl von einer Wasseroberfläche absaugen. Das Prinzip lässt sich daheim sehr effizient nachstellen.



Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

» [spektrum.de/artikel/1757276](https://www.spektrum.de/artikel/1757276)

Als im April 2010 die Ölplattform »Deepwater Horizon« explodierte, strömten knapp drei Monate lang insgesamt rund 800 Millionen Liter Öl in den Golf von Mexiko. Weder die Tierbestände noch die Küstengebiete haben sich bis heute von diesem Unfall erholt, die Folgen werden weiterhin für Jahrzehnte spürbar sein.

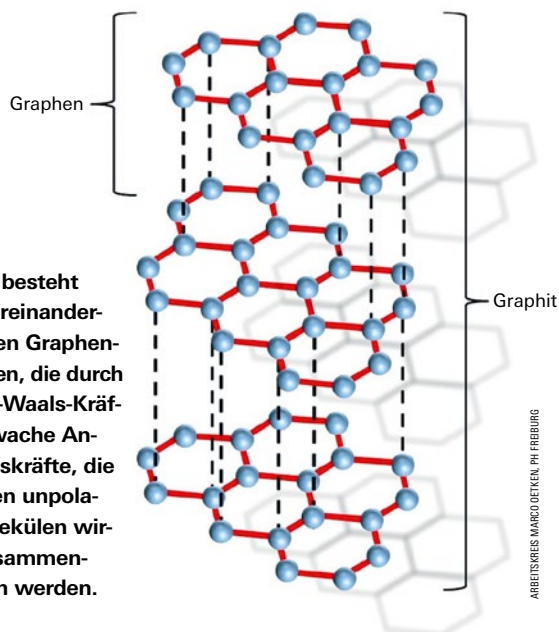
Weltweit leiden Pflanzen und Tiere im Meer sowie an den Küstengebieten unter Verschmutzung durch Rohöl. Daher beschäftigen sich seit Jahrzehnten viele Unternehmen und Organisationen mit der Frage, wie es sich wieder von der Wasseroberfläche beseitigen lässt. Das gelingt

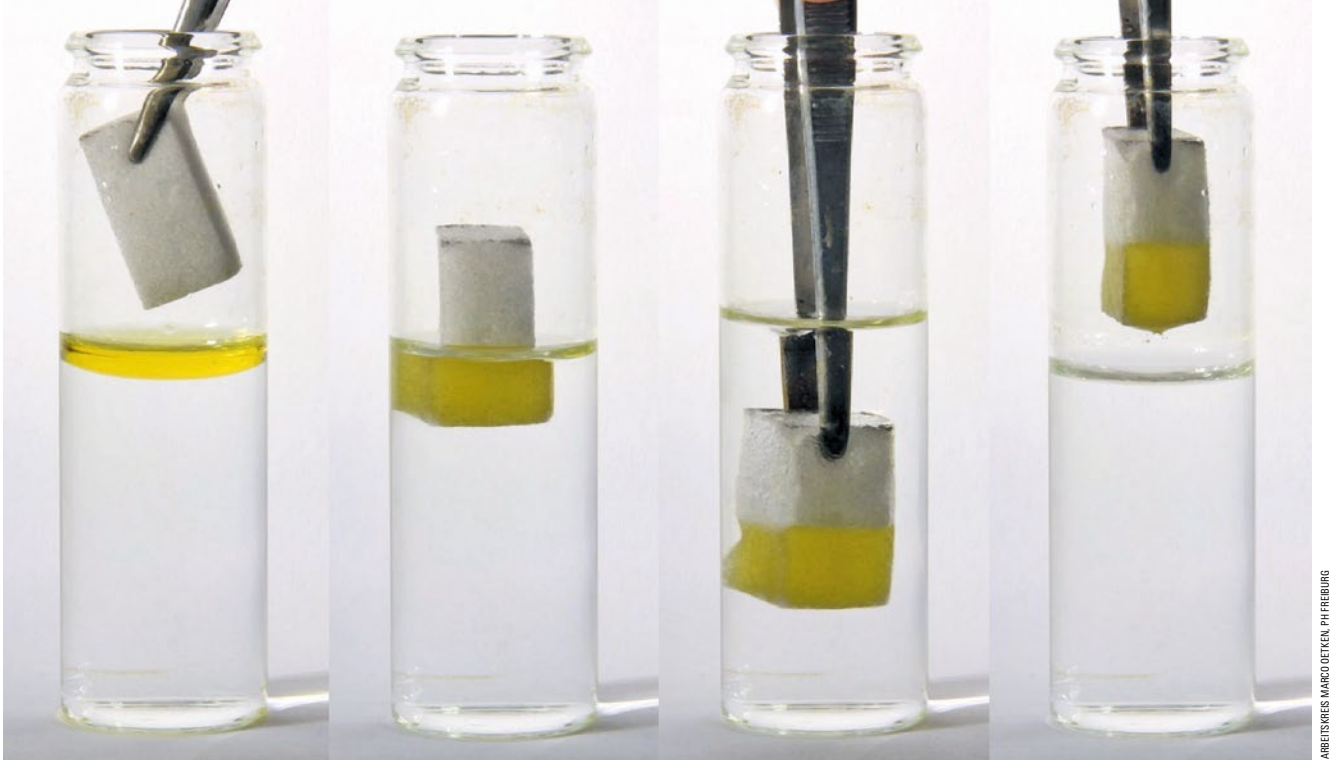
zwar recht schnell, indem man das Öl verbrennt, Bakterien zu dessen Abbau einsetzt oder die zähe Masse mit Hilfe von Dispergatoren in feine Kügelchen zersetzt. All diese Verfahren sind jedoch selbst umweltgefährdend und sorgen außerdem dafür, dass das Öl vernichtet wird.

Abhilfe könnten Adsorptionsverfahren schaffen: Dabei heftet sich das Öl an eine Substanz, das Adsorptionsmittel, und kann so aus dem Wasser entfernt werden. Weil es sich nur um einen physikalischen Vorgang handelt und keine chemische Reaktion abläuft, lässt sich das Öl hinterher leicht wieder zurückgewinnen – angesichts der knapper werdenden Ressourcen ein entscheidender Vorteil. Darüber hinaus ist die Vorgehensweise sowohl umweltgerecht als auch kostengünstig.

Trotzdem werden Adsorptionsmittel bisher nur selten eingesetzt, da die gängigen zum einen neben dem Öl recht viel Wasser aufnehmen und zum anderen insgesamt nur wenig Flüssigkeit adsorbieren können. Abgesehen davon ist es um ein Vielfaches aufwändiger, Rohöl durch Adsorption zu beseitigen als mit Dispergatoren oder durch Verbrennen. Es bedarf also neuer Adsorptionsmittel sowie geeigneter Verfahren.

Auf Grund seiner besonderen Eigenschaften könnte Graphen, die zweidimensionale Modifikation des Kohlenstoffs, helfen (Bild links). Das Material ist chemisch und mechanisch ausgesprochen stabil. Weil es absolut unpolar und Wasser abweisend ist, sollte es viel Öl und dabei fast kein Wasser aufnehmen. Außerdem besitzt der Stoff durch seine Zweidimensionalität eine große aktive Oberfläche, was bedeutet, dass sich auf vergleichsweise wenig Graphen zahlreiche Ölmoleküle anlagern können. So lassen sich Materialien mit einer hohen Adsorptionskapazität schaffen.





ARBEITSREIS MARCO DIETKEN, PH. FREIBURG

Ein Graphen-Melamin-Schwamm adsorbiert Öl, nimmt dabei aber kein Wasser auf. Durch mehrmaliges Eintunken (Dip-in-Verfahren) lässt sich beispielsweise Olivenöl einfach von der Wasseroberfläche entfernen.

Das gelingt etwa, indem man einen offenporigen Schwamm (Melamin-Schwamm, Schmutzradierer) mit Graphen benetzt (wie sich Graphen sowie ein Graphen-Melamin-Schwamm einfach herstellen lassen, ist in der Onlineergänzung zum Artikel nachzulesen). Dadurch nimmt der Schwamm die Wasser abweisenden, »Öl liebenden« Eigenschaften des Graphens an (Bilder unten).

Unpolare Flüssigkeiten wie beispielsweise Rohöl, Sonnenschutzmittel, Salatöle oder langkettige Kohlenwasser-

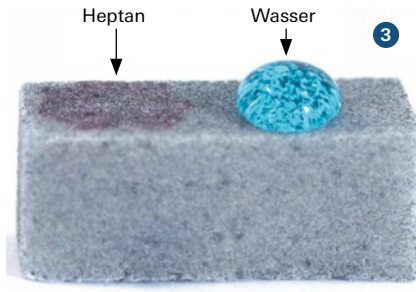
stoffe lassen sich nun schnell adsorbieren und von einer Wasseroberfläche entfernen, indem man den Schwamm mehrmals in das Flüssigkeitsgemisch eintaucht und wieder herausnimmt (Fotos oben).

Rohöl aus dem Ozean durch das wiederholte Dippen und Ausdrücken an Bord eines Schiffs zu beseitigen, erscheint allerdings wenig attraktiv, da zu aufwändig. Des Weiteren würden Wellengang und Wind den Einsatz der sehr leichten Graphen-Schwämme erschweren.

Um in kurzer Zeit und mit möglichst geringem Aufwand viel Öl von der Wasseroberfläche zu entfernen, sind daher neben neuen Adsorptionsmaterialien leistungsfähige Saugsysteme notwendig. In einem eindrucksvollen Experiment lässt sich solch ein Graphen-Öl-Sauger selbst konstruieren und einsetzen. Dabei dient ein Graphen-Melamin-

Wasser abweisende Eigenschaften des Graphen-Melamin-Schwamms

Der Graphen-Melamin-Schwamm (schwarz) schwimmt auf dem Wasser, während ein reiner Melamin-Schwamm (eingefärbt mit Methylenblau) zum Boden des Gefäßes sinkt **1**. Unter Wasser bildet der Graphen-Melamin-Schwamm eine silbrig glänzende Grenzschicht zwischen der anhaftenden Luft und dem Wasser **2**. Ein Wassertropfen (eingefärbt mit Methylenblau) bleibt auf dem Graphen-Melamin-Schwamm liegen, während Heptan (eingefärbt mit Sudan-Rot, Fleck links auf dem Schwamm) in ihn einsinkt **3**. Profil eines Wassertropfens auf einem Graphen-Melamin-Schwamm **4**.



ARBEITSREIS MARCO DIETKEN, PH. FREIBURG

Schwamm als Adsorptionsmittel. Wie in dem realitätsnahen Modell zu sehen ist, saugt das System kein Wasser ein und entfernt damit das Öl hocheffizient von der Wasseroberfläche.

Der Graphen-Öl-Sauger lässt sich wie in der Versuchsskizze unten dargestellt zusammenbauen. Der Graphen-Melamin-Schwamm wird bis an das Ende der Siebhülse (im Baumarkt erhältlich) vorgeschoben. Dabei ist darauf zu achten, den Schwamm nicht zu eng hineinzustopfen, um seine Poren nicht zu verschließen. Anschließend schiebt man einen durchbohrten Stopfen ebenfalls in die Siebhülse. Wichtig ist, dass der Stopfen Kontakt zu dem Graphen-Melamin-Schwamm hat. Ist das nicht der Fall, kommt beim Einsatz des Öl-Saugers kein Unterdruck am Schwamm an, so dass auch kein Öl abgesaugt wird.

Zuletzt steckt man einen Schlauch in den durchbohrten Stopfen und verbindet den Öl-Sauger dadurch mit einer Waschflasche.

Um ein realitätsnahes Modell für eine Rohöl-Katastrophe zu erhalten, füllt man Wasser in das Glasgefäß und gibt vorsichtig eine rund zwei Zentimeter dicke Schicht Heptan darüber. Es bietet sich an, das Heptan vorher einzufärben (beispielsweise mit Iod oder Sudan-Farbstoffen), damit die zwei Phasen leicht voneinander zu unterscheiden sind (siehe Fotos auf S. 61). In einem nächsten Schritt taucht man den Öl-Sauger in das Öl ein. Da es bei Wellengang und Wind auf dem Ozean unrealistisch ist, mit dem Sauger ausschließlich die extrem dünne aufliegende Schicht zu treffen, reicht der Apparat im Modellexperiment etwa drei Zentimeter tief in die wässrige Phase hinein. Um das Experiment zu starten, legt man einen Unterdruck an die Waschflasche an, beispielsweise mit Hilfe einer Vakuum-, Wasserstrahl- oder Aquariumpumpe.

Was passiert? Der Graphen-Melamin-Schwamm absorbiert das auf dem Wasser schwimmende Heptan. Sofort nach Anlegen des Unterdrucks wird es aus dem Schwamm gesogen und sammelt sich in der Waschflasche an. Sobald alles Heptan entfernt ist, stoppt die Saugwirkung, so dass sich in der Flasche ausschließlich Heptan befindet.

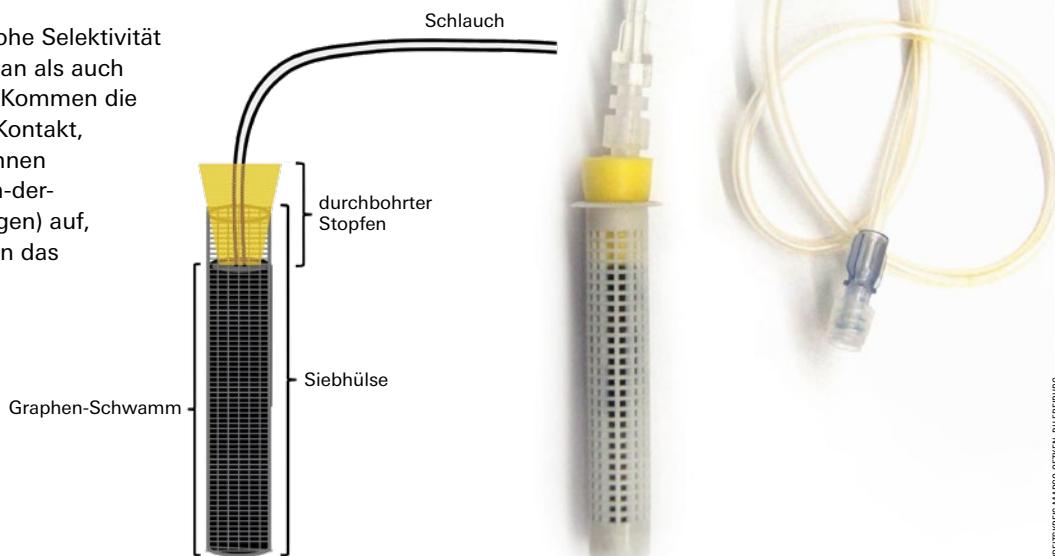
Wie lässt sich die hohe Selektivität erklären? Sowohl Heptan als auch Graphen sind unpolar. Kommen die beiden Substanzen in Kontakt, bauen sich zwischen ihnen anziehende Kräfte (Van-der-Waals-Wechselwirkungen) auf, wodurch das Heptan an das

im Schwamm befindliche Graphen adsorbiert wird. Beim Erzeugen eines Unterdrucks wird es über den Teil des Schwamms, der über der Öl-Phase steht, nach oben geleitet und schließlich abgesaugt. Da Graphen stark Wasser abweisend ist, wird trotz des Unterdrucks kein Wasser eingesaugt, obwohl der Sauger knapp bis zur Hälfte in die wässrige Phase reicht. Ist kein Heptan mehr auf der Wasseroberfläche vorhanden, zieht der obere Teil des Apparats Luft ein. So gelangt weiterhin kein Wasser in den Schwamm.

Durch einen derart konzipierten Sauger lässt sich ein Gewässer in kurzer Zeit von Öl befreien – dank der Wasser abweisenden Eigenschaften des Graphens auf hocheffiziente Weise.

Im Gegensatz zu Heptan ist Rohöl jedoch zäh und dickflüssig. Das macht die großtechnische Umsetzung schwierig, denn durch die hohe Viskosität verändern sich beim Absaugen die Druckunterschiede im Schwamm. Dadurch kann es passieren, dass die Wasser abweisenden Eigenschaften des Graphens überwunden werden, Wasser in den Schwamm gelangt und schließlich mit abgesaugt wird. Dieses Problem könnte man lösen, indem man die Poren des Schwamms größer wählt, so dass sich das Öl in ihm besser bewegen kann. Eine alternative Möglichkeit liegt darin, die Viskosität des Öls durch das Aufbringen weiterer Lösungsmittel zu verringern. ◀

Links: Schematischer Aufbau des Graphen-Öl-Saugers.
Rechts: Graphen-Öl-Sauger mit einer »Heidelberger Verlängerung« als Verbindungsschlauch.



ARBEITSGRUPPE MARCO OETIKER, PH FRIEDBURG

Ein selbst gebauter Graphen-Öl-Sauger entfernt Öl (hier Heptan, rot eingefärbt) von der Wasseroberfläche und befördert es in eine Waschflasche.

QUELLEN

Carmody, O. et al: Adsorption of hydrocarbons on organo-clays – implications for oil spill remediation. *Journal of colloid and interface science* 305, 2007

Incardona, J. P. et al.: Deepwater Horizon crude oil impacts the developing hearts of large predatory pelagic fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111, 2014.

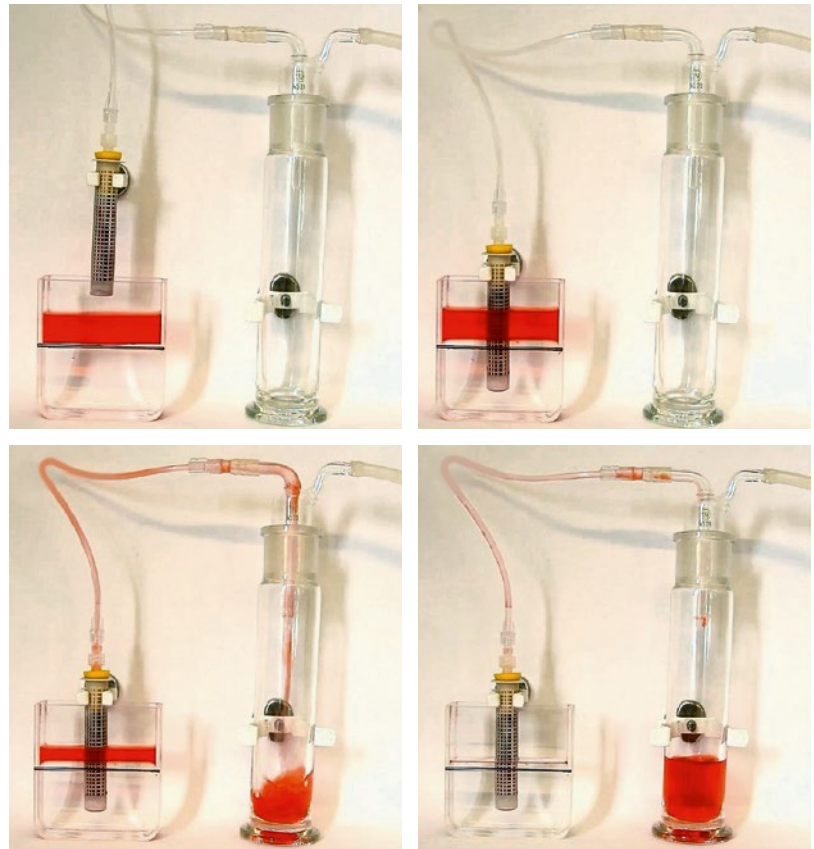
Mullin, J. V., Champ, M. A.: Introduction/overview to in situ burning of oil spills. *Spill Science & Technology Bulletin* 8, 2003

Page, C. A. et al.: Behavior of a chemically dispersed oil in a wetland environment. *Water Research* 36, 2002

Pulster, E. L. et al.: A first comprehensive baseline of hydrocarbon pollution in Gulf of Mexico fishes. *Scientific Reports* 10, 2020

EXPERIMENTIERANLEITUNG

www.spektrum.de/artikel/1757276



ARBEITSREIS: MARCO OETIKEN, FH FREIBURG

ANZEIGE

Raum für noch mehr Wissenschaftsthemen.

Das vereinte Wissen.

Deutschlands Qualitätszeitung Nr. 1* DIE ZEIT denkt und diskutiert in ihrem vereinten Ressort Wissen in der Mitte der Zeitung seit dem 3. September 2020 Themen aus Wissenschaft, Forschung und Bildung noch stärker zusammen – bei unverändert starkem Umfang.

Im neuen Ressort haben noch mehr Wissensthemen Platz: Neben den großen Aufmachertiteln, Interviews und Porträts können Sie eine neue Doppelseite mit einer bunten „Themen-Schatzkiste“ kennenlernen, die zum Mehr-wissen-Wollen anregt.

Erfahren Sie mehr zum neuen ZEIT Wissen Ressort unter www.zeit.de/wissen-vereint



* ma 2020 Pressemedien II



PLASTIKMÜLL ZURÜCK IN DEN KREISLAUF

Viele Kunststoffabfälle lassen sich bislang nicht recyceln. Stattdessen sollen chemische Verfahren aus den Materialien eine Art Rohöl gewinnen – oder gleich neue, hochwertige Stoffe. Ob das wirklich hilft, das Plastikproblem zu lösen, muss sich jedoch erst noch zeigen.



Tamara Worzewski ist Geophysikerin und Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

► [spektrum.de/artikel/1757332](https://www.spektrum.de/artikel/1757332)

► In Deutschland kamen 2017 sechs Millionen Tonnen Plastikmüll zusammen. Jeder Bundesbürger produzierte durchschnittlich gut 38 Kilogramm Kunststoff-Verpackungsmüll – insgesamt drei Millionen Tonnen. Innerhalb der EU warfen nur die Luxemburger, Iren und Esten noch mehr Einwegverpackungen weg. Die andere Hälfte des Plastikabfalls stammt etwa von Gebrauchsgegenständen, aus Elektronikbauteilen, aus dem Bau sowie dem Transport- und Verkehrssektor. Immerhin recycelte Deutschland 2017 knapp die Hälfte davon, der Rest wurde thermisch verwertet, sprich: zur Stromerzeugung verbrannt. Weil seine hochpolymeren organischen Verbindungen hauptsächlich aus fossilen Rohstoffen wie Öl, Gas und Kohle hergestellt werden, hat Plastik je nach Sorte einen beachtlichen Heizwert. Daher sind die klimaschädlichen Emissionen im Lauf seines Lebenszyklus aber auch enorm.

Ließe sich dieser Plastikmüll dann nicht umgekehrt wieder in Rohstoffe umwandeln? Oder könnte man aus Kunststoffabfall gar höherwertige Produkte erschaffen? Wäre der beste Weg nicht eine nachhaltige »Kreislaufwirtschaft«, in der man alle Produkte, Materialien und Ressourcen am Ende der Nutzungsdauer gänzlich in den Kreislauf zurückführt, statt sie zu verbrennen, zu verschiffen oder zu deponieren?

Das sind hoffnungsvolle Ideen, die jetzt intensiver als je verfolgt werden. In den letzten Jahren ist in Industrie und Wissenschaft ein regelrechter Hype um chemische Recyclingmethoden entbrannt. Denn die Plastikmassen, die sich als riesige Strudel in unseren Meeren, auf gigantischen Müllhalden sowie als mikroskopisch kleine Teilchen überall auf der Welt ansammeln, machen Druck auf Politik, Hersteller und Verbraucher.

Bislang erfolgt das gesamte Plastikrecycling in Deutschland auf mechanischem Weg. Pfandflaschen aus Polyethylenterephthalat (PET) etwa werden geschreddert, gereinigt, eingeschmolzen und anschließend zu PET-Granulat verarbeitet, das später beispielsweise zur Herstellung neuer Flaschen dient. Dieser mechanische Vorgang zerstört die Polymerketten des Kunststoffs nicht: Während des gesamten Prozesses bleibt das Material erhalten. Die Wiederverwertung der durchsichtigen Einwegflaschen klappt unter anderem deshalb so gut, da sie getrennt gesammelt werden und daher keine störenden Verunreinigungen in den Abfallstrom fließen. So erhält man nach dem Vorgang ein sortenreines »Rezyklat« – eine transparente Masse aus recyceltem Kunststoff, die ausschließlich das gewünschte Polymer enthält.

Doch nicht jeder Kunststoff lässt sich so gut aufbereiten. Aus einem Teil des PET-Rezyklats entstehen wieder Flaschen, den Rest verwendet man zur Herstellung von Fleece-Pullis und anderen polyesterhaltigen Gegenständen wie Sammelordnern, Mehrwegtaschen oder Industriefolien. Solche Produkte lassen sich werkstofflich nicht mehr recyceln. Der Grund: Die Hersteller fügen ihnen gewöhnlich so genannte Additive hinzu, um sie je nach Anforderung langlebiger, elastischer, steifer oder aber resistent gegen Feuer oder UV-Strahlung zu machen. Die Zusätze erschweren es, ein sortenreines Rezyklat zu gewinnen, das man für höherwertige Kunststoffherzeugnisse benötigt. Prinzipiell ist eine werkstoffliche Verwertung umso schwieriger, je gemischter und verschmutzter der Plastikabfall ist, denn es ist teuer und aufwändig, die verschiedenen Materialien zu sortieren und zu reinigen.

Vom gelben Sack zur Parkbank

Zwar lassen sich bestimmte Abfälle aus dem gelben Sack beziehungsweise der gelben Tonne mechanisch zu einem hochwertigen Rohstoff verwerten. Das beweisen die aus 100 Prozent Polyethylen- oder PET-Rezyklat hergestellten Reinigungsmittel-Verpackungen der Marke Frosch, die hier Pionierarbeit leistet. Bunte Plastikgemische aus dem gelben Sack wandern dagegen häufig in dickwandige Produkte wie Balken, Pfosten, Kunststoffpaletten und gar Parkbänke. Und diese gelangen an ihrem Lebensende in die Müllver-

SERIE

Kunststoffe heute und morgen

Teil 1: September 2020

Dem Mikroplastik auf der Spur
Carolin Völker und Johanna Kramm

Teil 2: Oktober 2020

Zurück in den Kreislauf
Tamara Worzewski

Teil 3: November 2020

Interview: Sind Biokunststoffe sinnvoll?
Hans-Josef Endres und Frederik Wurm

DWY91 / GETTY IMAGES / ISTOCK

Aus Plastik wird Öl: Mit verschiedenen Methoden wollen Chemiker Kunststoffabfälle in einen Rohstoff verwandeln, aus dem sich vielfältige Produkte erzeugen lassen.

AUF EINEN BLICK KLEIN HÄCKSELN MIT CHEMIE

- 1** Nur etwa neun Prozent des weltweiten Plastikmülls werden wiederverwertet. Dabei wird er mechanisch zerkleinert und zu neuen Gegenständen geformt.
- 2** Viele Kunststoffe sind dafür jedoch ungeeignet. Chemische Verfahren zerlegen die Materialien hingegen in eine Art Rohmasse – als Ausgangsstoff für zahlreiche Polymere und andere Chemikalien.
- 3** Eine derartige Kreislaufwirtschaft könnte Kunststoffabfälle reduzieren und Erdöl für die Produktion neuen Plastiks einsparen. Es gibt aber auch Kritik: Der Prozess lohne den Aufwand nicht.

brennung – zusammen mit dem nicht recycelbaren Rest aus der Wertstofftonne.

Spätestens hier kommt das »rohstoffliche« oder »chemische« Recycling ins Spiel: Mit chemischen Verfahren lassen sich selbst aus stark verunreinigten Polymermischungen Ausgangsmaterialien für die Kunst- und Kraftstoffproduktion sowie für die petrochemische Industrie zurückgewinnen. Das gelingt auf verschiedene Arten: Bei der Solvolyse beispielsweise trennt man Verunreinigungen und vermischte Plastiksarten mit Hilfe von Lösungsmitteln voneinander und erhält so reine Kunststoffe. Dabei bleiben, wie beim mechanischen Recycling, die langen Polymerketten erhalten. Die typisch chemischen Verfahren Pyrolyse, Vergasen und Verölen hingegen zerlegen die Ketten durch Einwirkung von Druck, Hitze und Katalysatoren. Bei einfachen Plastiksorten wie Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) ist es so

Vom Experiment zur großtechnischen Umsetzung

In der chemischen Industrie kann die Entwicklung eines neuen Prozesses vom ersten Laborexperiment bis zur fertigen Produktionsanlage über ein Jahrzehnt dauern. Um den technologischen Reifegrad der Entwicklungsphasen einzuschätzen, dient Wissenschaftlern und Ingenieuren als Maßstab der Technology Readiness Level (TRL), der den Fortschritt auf einer einfachen Skala von 1 bis 10 bemisst. TRL 1 bis 3 spiegelt dabei den Weg von der Idee zum funktionierenden Experiment im Labor, TRL 10 den erfolgreich umgesetzten industriellen Produktionsprozess. Erst im letzten Drittel der TRL-Phasen, also nach den Erfahrungen aus Pilotanlagen, lässt sich sagen, ob sich der Prozess wirtschaftlich lohnt.

Das ist vergleichbar mit den Entwicklungs- und Zulassungsphasen eines neuen Medikaments: Pharmazeuten nutzen in der ersten Phase erfolgreiche Substanzen aus Laboruntersuchungen, die jedoch in den nächsten Stufen oft wegen Nebenwirkungen oder mangelnder Wirksamkeit aussortiert werden müssen. Auch in der chemischen Katalysator- und Prozessentwicklung kann jederzeit ein Kriterium auftauchen, das letztlich die Wirtschaftlichkeit unter den aktuellen Gegebenheiten in Frage stellt. »Rahmenbedingungen können sich aber sehr schnell ändern, daher werden Konzepte, die dem wirtschaftlichen Selektionsprozess zum Opfer gefallen sind, immer wieder in Forschungs- und Entwicklungsprojekten aufgegriffen. In der chemischen Industrie sieht man das aktuell bei elektrochemischen Verfahren, die unter der sich abzeichnenden Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie neu bewertet werden«, sagt RWTH-Wissenschaftler Jürgen Klankermayer.

möglich, die Monomere zurückzugewinnen – das sind die Grundbausteine, also die kleinsten, sich wiederholenden Einheiten, aus denen die Polymere aufgebaut sind. In den meisten Fällen entstehen dadurch jedoch Mischungen aus verschiedenen Bruchstücken: Molekülen, wie sie in Erdöl oder Erdgas enthalten sind. Aus diesem künstlichen Rohöl erzeugen die Unternehmen wiederum Kraftstoffe, Plastik sowie weitere Chemikalien.

»Das ist zunächst einmal eine ganz charmante Idee, ist aber nicht so einfach, wie es klingt«, erläutert Thomas Probst, Referent für die mittelständische private Entsorgungswirtschaft im Fachverband Kunststoffrecycling beim Bundesverband für Sekundärrohstoffe und Entsorgung (BVSE). »Kunststoffe haben eine komplexe Matrix.« Und das macht chemische Verfahren sehr energieaufwändig und somit bislang unökonomisch.

Bereits in den 1980er und 1990er Jahren forschte die Industrie intensiv nach Möglichkeiten der rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen. Die Pyrolyse galt damals als das Verfahren der Wahl, um die steigende Plastikflut zu bekämpfen. Doch auf Grund technischer und wirtschaftlicher Probleme kam es nie zu großtechnischen Anwendungen. Viele Anlagen mussten unter enormen Verlusten wieder schließen.

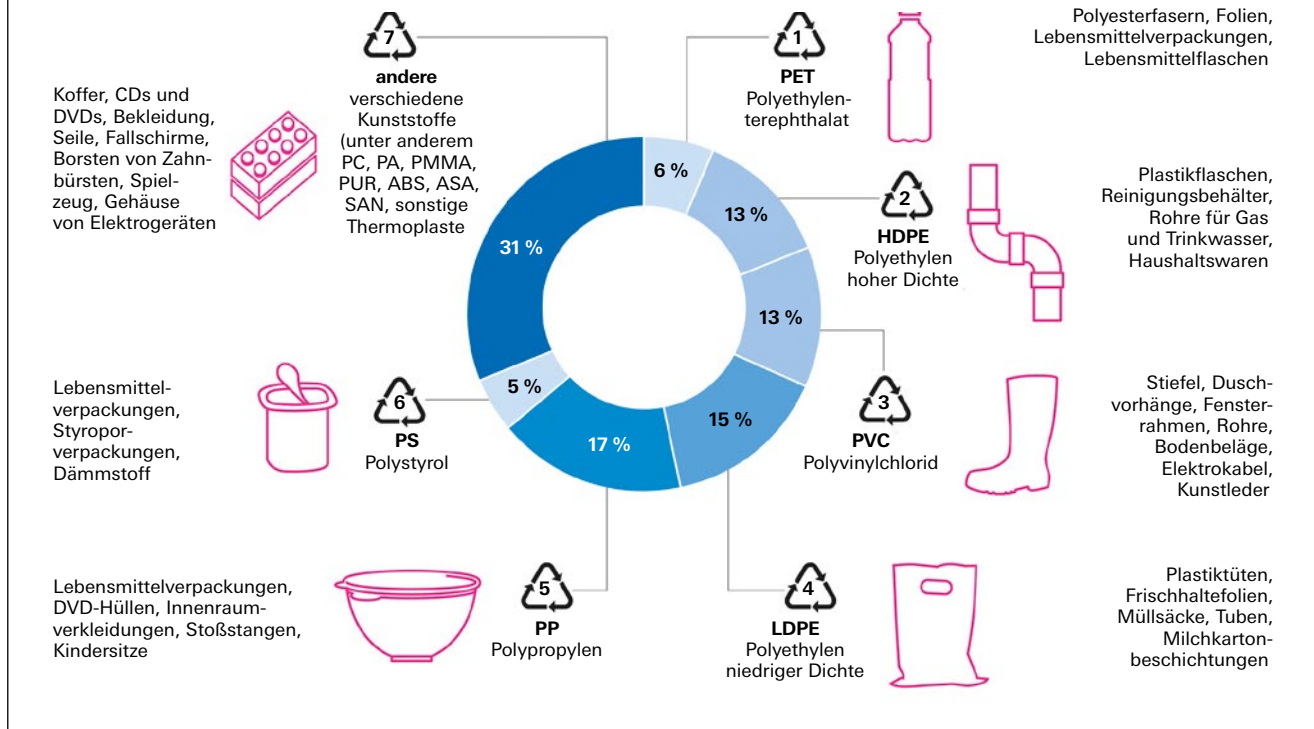
Nach fast 30 Jahren des Stillstands bauen nun weltweit Forschungsgruppen, Start-ups und große Chemiefirmen Pilotanlagen für chemisches Recycling auf. Manche Fachleute sind der Ansicht, dass die Technologie endlich wettbewerbsfähig wird gegenüber der thermischen Verwertung. Denn die Verbrennung des Plastikmülls könnte mit den steigenden Preisen für CO₂ teuer werden.

Derzeit gibt es noch keine funktionierende Großanlage für chemisches Recycling. Probst nennt jedoch ein Beispiel, wo eine solche im Entstehen ist: Der österreichische OMV-Konzern, einer der größeren europäischen Raffineriebetriebe, will ab 2025 etwa 200 000 Tonnen Altplastik pro Jahr verarbeiten. Im »Re-Oil« genannten Verfahren stellt das Unternehmen aus zerkleinerten Mischplastikabfällen Rohöl und verwertbares Gas her, derzeit in einem vergleichsweise kleinen Aufbau, der pro Stunde etwa 100 Kilogramm Plastik umsetzt. Eine größere Demonstrationsanlage mit rund 20 000 Tonnen Umsatz pro Jahr baut die Firma gerade auf. »Davor habe ich richtig Respekt, das sind beachtliche Fortschritte«, lobt Probst. Der habilitierte Chemiker setzt sich für das werkstoffliche Recycling ein. Schließlich hat er miterlebt, wie das chemische Recycling – speziell die Pyrolyse – in Verruf geriet, als in der Vergangenheit nicht funktionierende Scheinanlagen errichtet wurden und sich schwarze Schafe daran bereichern wollten: »Ich habe lange Zeit pro Jahr zwei bis drei Fake-Verfahren auf den Tisch bekommen, in denen die Antragsteller um die Beschaffung von Kunststoffen und Investitionsgeldern baten«, empört sich der BVSE-Sachverständige.

Auch andere sind kritisch: »Das wurde alles schon vor 30 Jahren gemacht, die Verfahren sind an sich nicht neu«, gibt Isabelle Henkel von der Deutschen Gesellschaft für Abfallwirtschaft (DGAW), der größten Experten-NGO in dem Bereich, zu bedenken. »Großindustrielle Anlagen gibt es bisher noch nicht. Am vielversprechendsten ist derzeit

Der Plastik-Kreislauf

Anteile verschiedener Kunststofftypen und deren Kennzeichnung in Deutschland 2017



die Pyrolyse.« Die energieintensive chemische Behandlung von Kunststoffabfall liefert dadurch ein Öl, das anschließend wieder den Raffinierungsprozess durchlaufen muss, bevor sich ein neuer Kunststoff daraus herstellen lässt. »Das würde sich nur lohnen, wenn Rohöl sehr viel teurer oder tatsächlich knapp wäre – ist es aber beides nicht«, erläutert sie.

Folien aus vielen unterschiedlichen Plastiksorten stellen ein Problem dar

Eine Chance sieht die Expertin jedoch für Mischkunststoffe. Im gelben Sack landen beispielsweise sehr viele Verpackungsfolien für Lebensmittel wie Fleisch, Käse oder Gemüse. Diese »Multilayer-Folien« sind besonders knifflig, denn sie bestehen meist aus vielen hauchdünn zusammengeklebten gemischten Kunststofflagen (PET, PE, Polyamid und weitere). Da sie sich mechanisch nicht trennen lassen, landen sie meist als Sortierreste in der thermischen Verwertung. Das Dresdner Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV entwickelt daher gerade einen Solvolyseprozess namens »CreaSolv«, um die Folien so aufzubereiten, dass sie selbst nach mehreren Lebenszyklen ihre Materialeigenschaften nicht verlieren. Ein ähnliches Upcycling-Verfahren ist das »Newcycling« der APK GmbH in Merseburg.

Henkel kommentiert allerdings in ihrer kürzlich erschienenen Veröffentlichung, dass sich mit Hilfe der Solvolyse nur bestimmte Schichten aus dem Verbund lösen lassen und das Verfahren somit auch seine Grenzen habe.

Große Chemiebetriebe wie die BASF setzen wiederum auf typisch chemische Herangehensweisen. Im »Chem-Cycling«-Projekt wandelt eine Partnerfirma Kunststoffabfälle mittels Pyrolyse in ein flüssiges Öl um. Das nutzt der Ludwigshafener Konzern anschließend als Rohstoff, um daraus Basischemikalien herzustellen, aus denen zum Beispiel wieder Kunststoffe werden können. Die BASF-Anlage befindet sich noch am Anfang im Technikumbereich, ähnlich wie bei anderen Firmen, urteilt die DGAW-Referentin. Die Unternehmen erproben also derzeit im kleinen Maßstab, ob der Prozess überhaupt funktioniert. So bleibt für sie vorerst offen, ob 30 Jahre nach dem Scheitern der Pyrolyse und ähnlicher Verfahren die Neuaufgaben jetzt zu einem tragfähigen Geschäftsmodell führen werden.

Jürgen Klankermayer von der RWTH Aachen verfolgt ein anderes Konzept, um aus Kunststoffen neue Produkte zu erhalten: Statt entsorgtes Plastik einfach in seine Bestandteile zu zerlegen, veredelt er es in seiner Forschungsgruppe mit Wasserstoff (H₂), der zukünftig durch Elektrolyse mit Strom aus Windkraft hergestellt werden könnte (siehe »Spektrum« Januar 2020, S. 56). Alte CDs beispielsweise, bestehend aus Polycarbonat, Aluminium und verschiedenen Zusätzen, zerstückeln und behandeln die Wissenschaftler in einem Reaktor mit einem maßgeschneiderten Katalysator und Wasserstoff (siehe Grafik auf S. 67). Die so entstehenden chemischen Verbindungen trennen sie mit etablierten Verfahren ab. Der Vorteil: »Mit dem integrierten Wasserstoff erhöht sich die Wertschöpfung dieser Produkte«, erklärt der Chemiker. Die RWTH-Wissenschaftler



ROSSIA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Altplastik aus Elektronikschrott ist besonders schwer zu recyceln. Gerade für solche kniffligen Kunststoffe könnten chemische Verfahren eine Chance darstellen.

stellten aus den alten CDs etwa Diole her. Das sind Verbindungen, die sich »flexibel und nachhaltig als Bausteine für neue Produkte der chemischen Industrie oder auch als Kraftstoff nutzen lassen«, wie Klankermayer erläutert.

Er sieht das Recyclingthema somit in einem größeren Zusammenhang: »In unserer Vision sprechen wir von einer mehrdimensionalen Kreislaufwirtschaft, weil man zukünftig die Energiewende und die Biomassenutzung in die Kreislaufwirtschaft integrieren könnte.«

Aktuell versucht seine Arbeitsgruppe darüber hinaus, Abfälle aus schwierig zu verwertenden Kunststoffen, die sich sonst nur noch zur thermischen Nutzung eignen, in die Kreislaufwirtschaft zu integrieren. Diese Polymere sind stabile Verbindungen mit besonderen Eigenschaften, entwickelt speziell im Hinblick auf Haltbarkeit und Performance. Dazu zählen Polyurethane, die man in Turnschuhen und Matratzen findet, sowie Polyamide wie Nylon oder Polyvinylchlorid (PVC).

Die Rohstoffproduktion aus dem Polymerabfall unter Nutzung erneuerbarer Energie könnte nach ersten Schätzungen in der Lage sein, mit der Herstellung aus fossilen Quellen zu konkurrieren. Allerdings ist Klankermayer bewusst äußerst zurückhaltend mit einem wirtschaftlichen Blick in die Zukunft, denn im derzeitigen Stadium sei eine Prognose mit großen Unsicherheiten verknüpft. Die Projekte, die der Chemiker mit Industriepartnern und Herstellern vorantreibt, entwachsen gerade dem Laborstadium (TRL-Level 3 bis 4, siehe »Vom Experiment zur großtechnischen Umsetzung«, S. 64). Es ist also noch alles offen.

Und die Konkurrenz schläft nicht: »Als wir vor Jahren angefangen haben, uns intensiv mit dem Thema zu beschäftigen, wurden wir von so manchem Kollegen ein bisschen belächelt, da es doch herausforderndere Themen für Grundlagenforschung gäbe«, erinnert sich Klankermayer. »Aber seit Kurzem erkennen viele Forscher die Wichtigkeit des Plastikrecyclings, und Kollegen aus der organischen Chemie und Katalyseforschung bringen sich

immer stärker ein.« Diese Dynamik in der wissenschaftlichen Themenwahl und Forschungsausrichtung sei nicht ungewöhnlich und werde durch Projektmittel aus öffentlicher Förderung gezielt beschleunigt.

Einen anderen Ansatz verfolgt sein Kollege Lars Blank, der an der RWTH Aachen das Institut für Angewandte Mikrobiologie leitet. Denn gewisse Bakterien können Mischungen von Molekülen aufnehmen und daraus Polyester, so genannte Polyhydroxyalkanoate (PHA), erzeugen – also direkt Bioplastik herstellen. Der Mikrobiologieprofessor greift sich an den Bauch und erläutert: »So, wie wir Fett einlagern, lagern manche Bakterien Polyester als Energie- und Kohlenstoffspeicher ein.«

Mikroben, die aus Müll Polymere erzeugen

In einem zweistufigen Verfahren gewinnt Blanks Forschungsgruppe mit Projektpartnern hochwertige Kunststoffe aus Abfällen, die bislang nicht wiederzuverwerten sind. Im ersten Schritt packen die Biotechnologen dazu ein geschreddertes Plastikgemisch in einen Reaktor. Dort zerlegen spezielle Enzyme aus Hefen, Pilzen und Bakterien bestimmte esterhaltige Polymere in ihre Grundbausteine. Im zweiten Schritt erzeugen Bakterien aus dem erhaltenen Monomergemisch die Biopolyester. Außerdem experimentieren die Forscher mit Mischkulturen: Unterschiedliche Bakterien und Enzyme mit verschiedenen Eigenschaften sollen das Mischplastik verwerten. Mit Hilfe gentechnischer Verfahren können die Biotechnologen die Mikroben darauf programmieren, höherwertige Plastikgrundsteine herzustellen, als im Ausgangsmaterial vorhanden waren.

»Es ist prinzipiell schwierig, aus altem Kunststoff neuen zu machen, weil die Neuproduktion aus Erdöl häufig billiger ist. Daher müssen wir etwas Wertvolleres herstellen und erarbeiten ein Upcycling-Angebot für bestimmte Plastikströme, die man nicht recyceln kann«, sagt Blank.

Ob sich hier zu Lande oder auf dem Weltmarkt ein geschäftsfähiges Modell für das biotechnologische Recycling entwickelt, wird sich zeigen. Nach erfolgreichen Versuchen in kleinem Maßstab will beispielsweise die Firma Carbios 2021 eine Demonstrationsanlage in Frankreich errichten, die PET enzymatisch abbaut. Gleichzeitig arbeitet sie an weiteren Lösungen, um Plastik nach seinem Ge-

brauch zu zerlegen. Aber der Biologe hofft, dass sich unsere Rohstoffbasis ändert und nachhaltiger wird. »Ich finde: Jede Tonne Erdöl, die wir im Boden lassen, ist eine gute Tonne«, sagt der Wissenschaftler und erinnert daran, dass die Atmosphäre bereits jetzt zu viel CO₂ enthält und es darüber hinaus in der Zukunft schwierig werden könnte, Zugang zu Rohöl zu erhalten.

Ähnlich sieht das sein Kollege Klankermayer, der Plastik als Rohstoff auch in puncto Versorgungssicherheit als Perspektive sieht: »Rohstoffe und Zwischenstufen, die zwingend gebraucht werden, damit hier chemische Anlagen planbar funktionieren, kommen oft aus dem Ausland. Wenn fossile Rohstoffe flexibel durch Chemikalien aus Biomasse oder CO₂ ersetzt werden könnten, würde Europa eine nicht unerhebliche Unabhängigkeit zurückerlangen.«

Neben seinen mittelfristigen Zielen, im Rahmen des mehrdimensionalen Recyclings schwierige Altkunststoffe mit erneuerbaren Ressourcen wie H₂ oder Biomasse zu kombinieren, verfolgt der Chemiker ein langfristiges: Statt mit den aktuell genutzten Polymeren umgehen zu müssen, will Klankermayer völlig neue herstellen, die kosteneffizient und nachhaltig zu recyceln sind. »Erst durch eine gute Recyclbarkeit ist der Weg in die Kreislaufwirtschaft und eine nachhaltige Zukunft geöffnet.«

Dem stimmt Philipp Sommer von der Deutschen Umwelthilfe (DUH) zu und fordert von der Politik verbindliche Ökodesign-Anforderungen: Verpackungen sollten generell wiederverwertbar sein. Das wäre in einigen Bereichen recht

Mit einem maßgeschneiderten Katalysator und Wasserstoff werden aus Kunststoffen nützliche chemische Verbindungen. Zum Beispiel bestehen CDs unter anderem aus Polycarbonat (oben links). Jürgen Klankermayer gewinnt aus geschredderten Datenträgern an der RWTH Aachen Bisphenol A (oben rechts), aus dem sich wiederum Polymere wie etwa Polyester herstellen lassen.

einfach umsetzbar, ohne ganz neue Polymere zu entwickeln. So können die Nahinfrarot-Scanner einer Abfallsortiermaschine etwa solche Verpackungen nicht erkennen, die mit Ruß-Schwarz eingefärbt sind. Diese werden daher zur Verbrennung geschickt. Mit einer anderen Farbe oder dem etwas teureren speziellen Infrarot-Schwarz ließe sich das Problem umgehen.

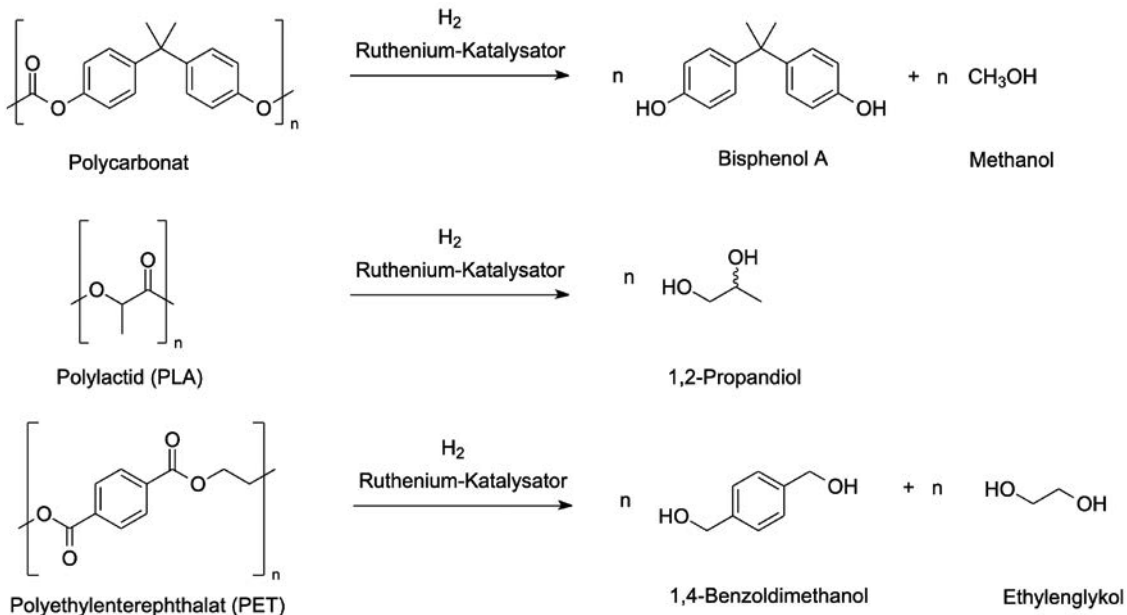
Der DUH-Referent für Kreislaufwirtschaft plädiert auch nicht dafür, die in der Lebensmittelbranche viel genutzten Multilayer-Folien chemisch zu recyceln statt zu verbrennen: »Wir sollten Käseverpackung recycelbar machen und beispielsweise statt vieler verschiedener Kunststofflagen nur einen Kunststoff einsetzen, mit einer recyclingverträglichen Barrierschicht aus Siliziumoxiden.«

Keine Alternative, sondern eine Ergänzung

Geht es um die Umweltverträglichkeit, so steht die Wiederverwertung allerdings erst an dritter Stelle. Besser wäre es, Kunststoffe zu vermeiden oder mehrmals zu verwenden. Unter den Recyclingmethoden ist im Vergleich die mechanische immer noch am umweltgerechtesten. Erst darauf folgt die Solvolyse, welche die Polymerketten erhält und nicht energieaufwändig spaltet. Die Technik, so DUH-Experte Sommer, schneide deshalb schlechter ab als die mechanischen Verfahren, weil die Lösemittel verdampft werden müssen, manchmal sogar mehrmals.

Die »klassischen« chemischen Prozesse, die das Polymer so weit zerkleinern, bis man bei einem dem Erdöl ähnlichen Vorprodukt landet, rangieren erst als letzte vor der Verbrennung. Denn bei der Aufbereitung geht die gesamte Prozessenergie verloren, die bei der Herstellung des Kunststoffs aus dem rohen Erdöl investiert wurde. Ein Vorteil sieht Sommer trotzdem: »Dieses Quasi-Erdöl kommt zumindest nicht aus dem Boden, sondern aus Abfällen.«

Eine Chance, vergleichsweise umweltfreundlich zu sein, hat das chemische Recyceln laut dem Experten nur, wenn es die schwierigen Kunststoffe umsetzt, die weder vermeid-





PETMAL / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/nachhaltigkeit

bar noch wiederwendbar noch werkstofflich behandelbar sind. Das wünscht sich auch der BVSE-Referent Thomas Probst. Aber statt sich an solche Herausforderungen wie beispielsweise Altplastik aus Elektronikschrott oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff heranzuwagen, versuche die chemische Industrie, auf die 420000 Tonnen Mischplastik zuzugreifen, für die es in Deutschland bereits das mechanische Mischkunststoffrecycling gibt, beobachtet Probst. Denn nach seiner Erfahrung verlange die chemische Industrie vor allem nach Polyethylen und Polypropylen, für die in den letzten 30 Jahren große werkstoffliche Verwertungsstrukturen aufgebaut wurden.

Und gleichzeitig warnt Sommer vor einem bedenklichen Modell, auf das die großen Plastik- und Chemikalienhersteller seiner Meinung nach hinarbeiten: »Jetzt versuchen große Chemiekonzerne, die Kunststoff bislang aus Primärdölen hergestellt hatten, vom Erdöl wegzukommen, aber trotzdem ihr Geschäftsmodell zu erhalten«, kritisiert er. »Sie haben sich verbündet mit großen Plastikherstellern, die ihre Wegwerfmodelle behalten wollen.« Sommer zufolge könnten die Hersteller Verpackungen als umweltfreundliche Mehrweglösungen gestalten, oder – wenn alles Einweg bleiben soll – zumindest mechanisch recycelbar machen. Stattdessen würden sie jedoch lieber chemisch recyceltes Rohmaterial für ihre Kunststoffe einkaufen.

Streit um das Verpackungsgesetz

Die Wiederverwertung ist vorgeschrieben, weil das umstrittene Verpackungsgesetz eine Recyclingquote für Plastik vorgibt. Demzufolge muss Deutschland derzeit 58,5 Prozent seines Kunststoffabfalls recyceln, ab 2021 haben es 64 Prozent zu sein. Um diese Quote zu erfüllen, erkennt das Gesetz aber nur die werkstofflichen Verfahren an, nicht die rohstofflichen. Und genau hier liegt der Streitpunkt.

Laut dem Gesetz dürfen die Polymere nach dem Recycling nicht in ihre Monomere gespalten sein, sondern müssen erhalten bleiben. Das ist, abgesehen von den mechanischen Verfahren, nur bei der Solvolyse der Fall. Daher beharren Verfechter derselben – wie etwa Unternehmen, die diese anbieten, sowie der Verband der chemischen Recycler – darauf, den Prozess nicht als chemisch, sondern als werkstofflich einzustufen, und zwar trotz der typisch chemischen Techniken. Doch die politische Debatte reicht noch weiter, denn einige Stimmen fordern, dass das Bundesumweltministerium (BMU) prinzipiell alle chemischen Verfahren im Verpackungsgesetz anerkennt.

Ein Laie dürfte sich fragen, warum sich jemand darum reißt, eine gesetzliche Quote offiziell erfüllen zu dürfen. Hierin liegt jedoch ein lukratives Geschäft: »Die Geldströme können von der Müllverbrennung in die chemische Indus-

trie umgelenkt werden«, erläutert Probst. Um seine Kunststoffabfälle zu vernichten, zahlt ein Gewerbekunde je nach Müllverbrennungsanlage Gebühren von 120 Euro oder mehr pro Tonne. Baut eine Firma eine chemische Anlage auf und übernimmt den Plastikmüll, erhält sie diesen Betrag. Das sei ein wichtiger Punkt, betont Probst, weil bislang keine chemische Recyclinganlage Gewinn bringend arbeite. Wenn die Verfahren hingegen im Verpackungsgesetz anerkannt wären, würde die chemische Industrie für jede Tonne Kunststoff, die in ihren Anlagen landet, um mindestens 120 Euro bezuschusst.

Darüber hinaus ließe sich das Image der Branche polieren: »Die chemische Industrie ist sonst immer der Buhmann. Jetzt hat sie die Chance, eine Herstellerverantwortung wahrzunehmen und neben der Produktion von Kunststoffen auch durch die Verwertung dabei zu helfen, dass die gesetzlichen Recyclingquoten erfüllt werden können.«

Die Experten sind sich uneinig darüber, ob das BMU die rohstofflichen Verfahren in das Verpackungsgesetz aufnehmen sollte. Für Gegner wie beispielsweise Umweltverbände lautet das vorrangige Ziel, Produkte mechanisch wiederverwertbar zu machen, um die vorgegebenen Recyclingquoten einzuhalten.

DGAW-Referentin Henkel ist anderer Meinung: »Chemische Verfahren sollten auch im Verpackungsgesetz anerkannt werden. Denn das chemische Recycling wird immer nur eine Ergänzung zum mechanischen darstellen und auf die bisher nicht recycelbaren Kunststoffe abzielen«, erläutert sie. Außerdem könne es helfen, die ambitionierten Quoten überhaupt zu erfüllen.

Einig sind sich die Beteiligten hingegen darin, dass der Gesetzgeber einen Anteil an wiederverwertetem Plastik in Produkten vorschreiben sollte. »Wir brauchen einen stabilen Absatzmarkt für die Rezyklate«, erklärt Henkel. »Wenn eine Substitutionsquote vorgeschrieben wird, werden mehr Rezyklate nachgefragt, und die Recycler bekommen mehr Investitionssicherheit. Das würde die Kreislaufwirtschaft einen guten Schritt nach vorne bringen.« ◀

QUELLEN

Beydoun, K., Klankermayer, J.: Efficient plastic waste recycling to value-added products by integrated biomass processing. *ChemSusChem* 13, 2020

Blank, L. et al.: Biotechnological upcycling of plastic waste and other non-conventional feedstocks in a circular economy. *Current Opinion in Biotechnology* 62, 2020

Lechleitner, A. et al.: Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 72, 2020

Westhues, S. et al.: Molecular catalyst systems as key enablers for tailored polyesters and polycarbonate recycling concepts. *Science Advances* 4, 2018

WEBLINK

www.boell.de/de/plastikatlas

Im PlastikAtlas der Heinrich-Böll-Stiftung finden sich anschauliche Grafiken und wichtige Zahlen zum Thema Plastikmüll.



FRANK SCHÄDEL (GEBRAUCH FREISTETTER DE PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (REACTICOMIONS ORIGINALS/FR-SA/4.0/LEGAL/0001)

FREISTETTERS FORMELWELT

WARUM DIE ERDE KEINEN RING HAT

Alle vier Riesenplaneten des Sonnensystems sind von Ringen umgeben. Wird die Erde irgendwann auch einen besitzen?

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

► spektrum.de/artikel/1760436

Mit seinem beeindruckenden Ringsystem ist Saturn für viele Menschen der schönste Planet des Sonnensystems. Wenn ich bei Vorträgen über ihn spreche, fragt man mich oft, warum die Erde keine Ringe hat. Oder was passieren müsste, damit auch wir solch hübsche Formationen an unserem Himmel sehen können. Die Antwort steckt in dieser Formel:

$$d = C \cdot R \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_M}{\rho_m}}$$

Sie stammt vom Astronomen Édouard Roche (1820–1883), der 1851 den Ursprung der Saturnringe untersuchte. Seine Idee: Sie könnten entstanden sein, weil ein Mond dem Planeten zu nahe kam und durch die Gezeitenkräfte zerbrach. Die von ihm gelieferte Gleichung gibt an, in welchem Abstand das passiert.

R ist dabei der Radius des größeren Himmelskörpers, ρ_M seine Dichte und ρ_m die Dichte des kleineren Objekts. C ist ein Faktor, der von der Verformbarkeit des Mondes abhängt. Für einen starren Körper liegt C bei etwa 1,26, bei einer idealen Flüssigkeit bei 2,42.

Unterschreitet der Abstand zwischen Planet und Mond die damit berechnete Roche-Grenze d , bricht Letzterer auseinander; ist er hingegen größer, passiert nichts. Für Saturn und einen starren Körper liegt die Roche-Grenze innerhalb seines Ringsystems. Ein Teil der Ringpartikel könnte also tatsächlich durch das Auseinanderbrechen eines Mondes entstanden sein.

Einige Ringe liegen aber außerhalb der Roche-Grenze und haben daher einen anderen Ursprung, etwa Eisevulkanismus. Ebenso können Kollisionen zwischen Monden Ringe erzeugen, ganz unabhängig von der

Roche-Grenze. Sicher ist nur: Die Ringe des Saturns sind ein aus astronomischer Sicht recht junges Phänomen. Es gibt sie erst seit ein paar hundert Millionen Jahren. Wären sie älter, hätte interplanetarer Staub die Eisteilchen der Ringe dunkler gemacht, als sie laut Messungen der Raumsonde Cassini sind.

Andererseits hat Saturn auch Monde, die ihn innerhalb der Roche-Grenze umrunden, ohne auseinanderzuberechnen. Das ist nur möglich, wenn der Mond klein und kompakt ist und die Dichte des Planeten selbst gering. Ein ausreichend dichter Mond kann einen Planeten beliebig nahe umkreisen, ohne jemals auseinanderzuberechnen.

Die Zerstörung von Himmelskörpern bei Überschreiten der Roche-Grenze konnten wir schon live beobachten. Zum Beispiel im Jahr 1992, als sich der Komet Shoemaker-Levy 9 dem Jupiter näherte. Er überquerte die Roche-Grenze und zerbrach in viele Stücke. Ein neuer Ring ist dabei aber nicht entstanden: Die Trümmer waren auf Kollisionskurs mit Jupiter und verschwanden in seiner dichten Atmosphäre.

Bei Erde und Mond liegt die Roche-Grenze zwischen 9500 und 18400 Kilometern, je nachdem, als wie stark verformbar man unseren Trabanten einschätzt. Da der durchschnittliche Abstand des Mondes bei 384000 Kilometern liegt, ist er so oder so weit von der kritischen Distanz entfernt. Er wird nicht auseinanderbrechen – weder jetzt noch in Zukunft. Die Gezeitenkräfte heben den Mond mit der Zeit sogar auf eine immer höhere Umlaufbahn.

Ein anderes Schicksal steht dagegen dem kleinen Marsmond Phobos bevor. Er nähert sich seinem Planeten immer weiter an und wird irgendwann die Roche-Grenze überschreiten. Dann wird er auseinanderbrechen und unserem Nachbarplaneten zu einem Ring verhelfen. Bis es so weit ist, werden aber noch mindestens 30 Millionen Jahre vergehen.

PHYSIK DAS FLÜCHTIGSTE ALLER TEILCHEN

Mit neuen Experimenten wollen Forscher herausfinden, ob es eine vierte Variante des Neutrinos gibt. Sollte sie existieren, könnte das Einblicke in den rätselhaften dunklen Sektor des Universums erlauben.

LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY



LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY

William Charles Louis (links) ist Physiker und Mitglied der American Physical Society. Seit 1987 arbeitet er am Los Alamos National Laboratory. Zuvor war er am Rutherford Laboratory beschäftigt sowie Assistenzprofessor an der Princeton University. **Richard G. Van de Water** ist ebenfalls Physiker am Los Alamos National Laboratory und Mitglied der American Physical Society.

► [spektrum.de/artikel/1760438](https://www.spektrum.de/artikel/1760438)

Im CAPTAIN-Mills-Detektor in Los Alamos halten etliche Photosensoren nach Lichtblitzen Ausschau. Sie werden von Atomkernen abgegeben, die von einem Neutrino getroffen wurden.

AUF EINEN BLICK EXTRA SCHEUE GEISTER

- 1** Neutrinos kommen in drei verschiedenen Varianten vor. Manche Messdaten lassen noch eine vierte Art der Elementarteilchen möglich erscheinen.
- 2** Sollte es diese »sterilen« Neutrinos geben, könnten sie mit den bislang unerklärlichen Phänomenen der Dunklen Materie und Dunklen Energie zusammenhängen.
- 3** Eine Reihe neuer Detektoren soll den hypothetischen Objekten nun nachstellen – und so eine Vierteljahrhundert alte Kontroverse um ihre Existenz auflösen.

► 2010 hielten wir beide einen Vortrag auf einer großen Fachkonferenz in Athen, den viele unserer Kollegen sehnsüchtig erwarteten. Sie gingen davon aus, dass wir hier in einer alten Kontroverse klein beigeben würden: 1996 hatten wir mit Daten eines von uns gebauten Detektors namens LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector) die Lehrmeinung in Frage gestellt, laut der es nur drei Varianten von Neutrinos gibt. Unseren Messungen zufolge sollte jedoch noch eine vierte Art der extrem flüchtigen Elementarteilchen existieren.

Viele andere Physiker waren skeptisch, da konkurrierende Experimente in der Zwischenzeit zu einem anderen Ergebnis gekommen waren. Und so dachten unsere Zuhörer auf der Konferenz in Athen, dass wir nun von unserer Interpretation abrücken würden. Zur allgemeinen Überraschung taten wir jedoch nichts dergleichen. Die Ergebnisse, die wir vorstellten, lieferten aus unserer Sicht noch stärkere Indizien für ein viertes Neutrino.

Sie stammten vom MiniBooNE-Detektor (Mini Booster Neutrino Experiment), den wir 2002 am Fermilab bei Chicago in Betrieb genommen hatten, um die Fährte von LSND weiterzuverfolgen. Die Daten sprachen aus unserer Sicht klar dafür, dass die Teilchenphysiker etwas Entscheidendes übersehen. Die plausibelste Erklärung war ein »steriles«

Neutrino, das nur mittels der Schwerkraft mit der restlichen uns bekannten Materie interagiert. Damit wäre es noch schwerer zu greifen als die Mitglieder der drei bekannten Neutrino-Familien, die immerhin mittels der schwachen Wechselwirkung an Atomkernen rütteln.

Seit unserem Vortrag in Griechenland vor zehn Jahren hat MiniBooNE weiter Daten gesammelt. Demnach besteht eine Chance von 99,999999 Prozent, dass wir es mit einem neuen Phänomen jenseits der etablierten Physik zu tun haben. Allerdings sind sterile Neutrinos als Erklärung nach wie vor umstritten. Denn das Regelwerk der Teilchenphysik – das »Standardmodell der Elementarteilchen« – lässt nur drei Neutrinoarten zu. Und da es zu den am besten getesteten Theorien der Physik gehört, liegt die Beweislast aus Sicht vieler Kollegen bei uns.

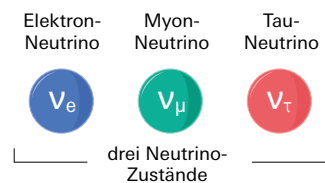
Fest steht: Das Standardmodell kann nicht der Wahrheit letzter Schluss sein. Schließlich liefert es keine Erklärung für Dunkle Materie oder Dunkle Energie, die das Universum in vielerlei Hinsicht zu prägen scheinen. Vielleicht entpuppt sich ein neues Neutrino – sofern es existiert – als Türöffner beim Verständnis dieser rätselhaften Phänomene. Wir wollen daher mit einem weiteren Detektor zusätzliche Indizien für die Existenz der sterilen Partikel sammeln. Dieses Coherent CAPTAIN-Mills Experiment

Vielseitige Elementarteilchen

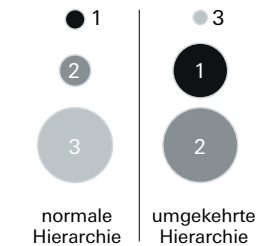
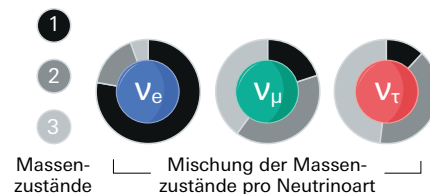
Neutrinos haben Wissenschaftler immer wieder überrascht. Eigentlich sollten sie masselos und lichtschnell sein, was jedoch nicht stimmt: Sie scheinen eine winzige Masse zu haben und daher nicht ganz die Lichtgeschwindigkeit zu erreichen. Die schwer nachweisbaren Teilchen fliegen in gewaltiger Zahl durchs All – und könnten dabei helfen, die großen Rätsel der Physik zu lösen.

Eigenschaften der Neutrinos

Es gibt drei Typen von Neutrinos: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino.



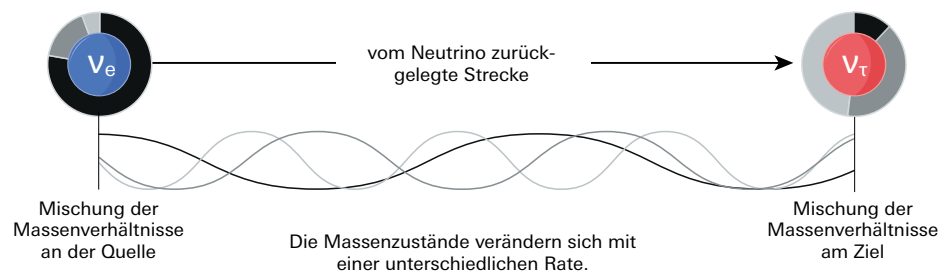
Die einzelnen Zustände bestehen wiederum aus einer Überlagerung dreier möglicher Massenzustände.



Bisher ist unbekannt, wie schwer die jeweiligen Massenzustände sind. Fest steht nur, dass die Massen winzig sein müssen. Theoretische Überlegungen deuten entweder auf zwei besonders kleine und eine etwas größere Masse hin oder das Gegenteil: einen wirklich winzigen Massezustand und zwei größere.

Neutrino-Oszillationen

Während sich Neutrinos fortbewegen, verändern sich ihre Massenzustände mit leicht unterschiedlicher Rate. Mit der Zeit verschiebt sich dadurch das Mischungsverhältnis, wodurch ein Neutrino früher oder später seinen Typ wechselt. Daher kann eines der Teilchen als Elektron-Neutrino starten und als Tau-Neutrino ankommen.



(CCM) ist dabei nur eines von mehreren Vorhaben, die mehr Licht in das Reich der Neutrinos bringen sollen.

Bei Neutrinos handelt es sich um die flüchtigsten Elementarteilchen, die wir kennen. Billiarden von ihnen durchdringen zu jeder Sekunde unseren Körper, wobei sie sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Sterile Neutrinos wären noch einmal deutlich scheuer: Da sie weder auf den Elektromagnetismus noch auf die schwache oder starke Kernkraft reagieren, könnte man sie mit irdischen Messinstrumenten praktisch überhaupt nicht direkt nachweisen.

Allgegenwärtige Geister

Doch vielleicht wechselwirken sie stattdessen mit Teilchen der Dunklen Materie, die zusammen mit der Dunklen Energie rund 95 Prozent des kosmischen Materie-Energie-Haushalts ausmachen soll. Denkbar ist auch, dass es sich bei der vierten Neutrinoart um nichts Geringeres als die Dunkle Materie selbst handelt. Mit ihrer kollektiven Masse könnten die unsichtbaren Neutrinos in diesem Fall jene sonderbaren kosmologischen Vorgänge erklären, die viele Experten auf die Schwereanziehung der Dunklen Materie zurückführen.

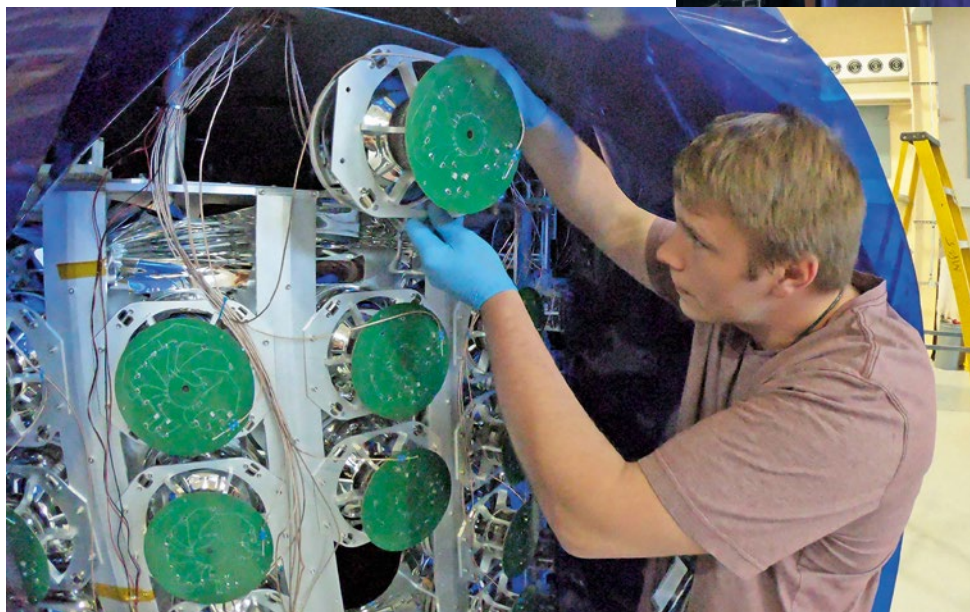
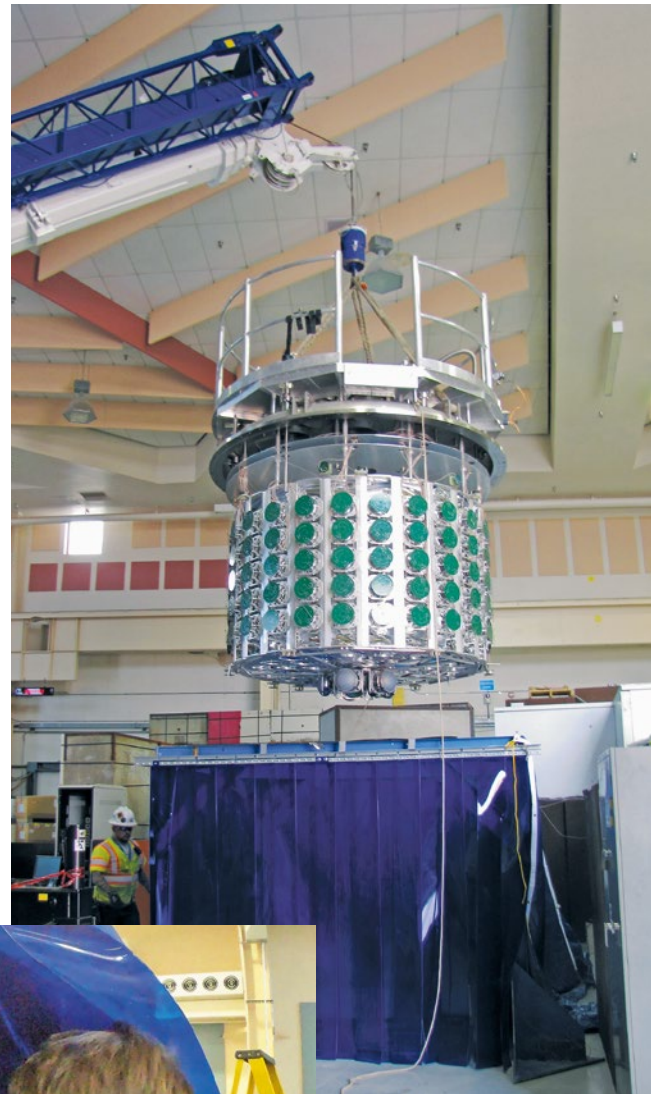
Sollte es die sterilen Teilchen geben, wären sie keineswegs die erste Überraschung, die Wissenschaftler bei der Erforschung von Neutrinos erlebt haben. Los ging es damit bereits in den 1960er Jahren: Damals wollten Forscher herausfinden, wie viele Neutrinos die Sonne abgibt, in deren Innern sie laufend bei der Verschmelzung von Wasserstoffatomkernen zu Helium entstehen. Doch spezielle Observatorien auf der Erde wiesen deutlich weniger der Teilchen nach als erwartet. Das Defizit betraf damals Elektron-Neutrinos – neben Myon- und Tau-Neutrinos eine der drei konventionellen Sorten.

Experten dachten anfangs, man verstünde die Prozesse im Innern der Sonne schlicht nicht richtig. Erst im Lauf der Jahrzehnte kristallisierte sich eine Lösung für das »solare Neutrino­problem« heraus: Die Sonne spuckte nicht etwa weniger Geisterteilchen aus. Nein, die Elektron-Neutrinos schafften es schlicht nicht zur Erde, beziehungsweise sie veränderten während des Flugs ihre Identität.

Neutrinos sind nach heutigem Verständnis keine reinen Objekte, sondern eine Mischung verschiedener Zustände, zwischen denen sie auf ihrem Weg laufend hin und her wechseln (siehe »Vielseitige Elementarteilchen«, links). Ein

Elektron-Neutrino kann so nach kurzer Zeit zum Myon- oder Tau-Neutrino werden und umgekehrt. Das bedeutet jedoch, dass Neutrinos nichtlichtschnell und masselos sein können, wie es das Standardmodell der Teilchenphysik vorhersagt.

Der Grund hierfür liegt in Einsteins spezieller Relativitätstheorie. Ihr zufolge vergeht die Zeit für ein Objekt in Bewegung etwas langsamer als für einen ruhenden Beobachter. Je schneller man unterwegs ist, desto langsamer tickt die Uhr – bis sie irgendwann bei Erreichen der Lichtgeschwindigkeit ganz einfriert. Für ein lichtschnelles Objekt steht das Universum also gewissermaßen still. Der Identitätswechsel von Neutrinos ist jedoch eine Veränderung. Sie kann folg-



Zu Wartungszwecken lässt sich der CAPTAIN-Mills-Detektor aus seinem Isoliergefäß heben (oben). Bei dieser Gelegenheit tauscht das Team einige der Photomultiplier (links) aus.

lich nur dann stattfinden, wenn die Teilchen das Verstreichen der Zeit erleben. Das aber ist nur möglich, wenn sie langsamer als das Licht sind – was laut Relativitätstheorie einzig für Teilchen gilt, die eine Masse haben. Damit aber hat das Standardmodell ein Problem, denn laut ihm sind Neutrinos masselos. Für diese Erkenntnis sowie den Nachweis der Neutrino-»Oszillationen« erhielten Takaaki Kajita und Arthur B. McDonald 2015 den Physiknobelpreis.

Vom Myon- zum Elektron-Neutrino

Um den Chamäleoncharakter der Neutrinos ging es auch bei den Experimenten, die wir in den 1990er und seit den 2000er Jahren mit LSND beziehungsweise MiniBooNE durchgeführt haben. Beide Detektoren hatten wir in der Nähe von Teilchenbeschleunigern aufgestellt. Die Maschinen jagen Atomkerne aufeinander, wobei neben anderen Partikeln ein ständiger Strom von Myon-Neutrinos entstand. LSND und MiniBooNE waren dafür ausgelegt, Elektron-Neutrinos nachzuweisen. So ließ sich abschätzen, wie viele Oszillationen vom Myon- in den Elektronzustand während des Flugs stattfanden.

Dieser Wechsel ist natürlich bloß ein kleiner Ausschnitt dessen, was tatsächlich passiert. Könnte man neben einem einzelnen Neutrino herschauen, sähe man, wie es zwischen allen drei Typen hin und her springt; Elektron-, Myon- und Tau-Facetten wären alle klar nacheinander erkennbar. Eine »sterile« Variante von Neutrinos würde dieses Bild deutlich verändern: Beim Wechsel in diesen vierten Zustand sähe es so aus, als verschwände das Neutrino vorübergehend.

Ob es danach wieder auftaucht, hängt vom verwendeten Modell für das sterile Neutrino ab. In den einfachsten kann sich das extrem flüchtige Teilchen zurück in die anderen Arten verwandeln. Manche Theoretiker glauben dagegen, dass die hypothetischen Versteckkünstler in andere Partikel zerfallen und somit den Oszillationszyklus beenden würden.



MICHAEL HOCH, MAXIMILIEN BRICE, CERN

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/teilchenphysik

Um den Identitätswechsel zwischen den drei bekannten Varianten in der Realität zu beobachten, muss man Neutrinos über weite Strecken fliegen lassen. Bei sterilen Neutrinos wäre das anders. Da sie vermutlich eine größere Masse haben als die drei anderen Zustände, fände der Wechsel zu und von ihnen schneller statt. Oder anders formuliert: Sie wären langsamer unterwegs, weshalb sie zwischen zwei Übergängen eine kürzere Distanz zurücklegen. Aus Sicht von uns Experimentatoren würden sie also den ganzen Oszillationsprozess beschleunigen. Wegen der sterilen Zwischenstation käme es daher bei den von uns untersuchten Myon-Neutrinos schon nach deutlich kürzerer Flugstrecke zu einer Umwandlung in Elektron-Neutrinos.

Tatsächlich lassen sich die von uns gesammelten Messdaten auf diese Weise interpretieren. Laut ihnen haben überraschend viele Elektron-Neutrinos unsere Detektoren getroffen. Das spricht dafür, dass Myon-Neutrinos auf dem Weg von ihrer Quelle zum Detektor häufiger verschwunden sind, als man es mit nur drei Neutrinoarten erwarten würde. Die Oszillationen müssten sich in diesem Fall in Abständen von nur einigen Dutzend bis einigen Hundert Metern ereignen haben, denn LSND stand 30 Meter, MiniBooNE 541 Meter von der Quelle entfernt. Das ist insofern bemerkenswert, als dass die klassische Neutrinotheorie erst nach vielen Dutzend bis einigen Hundert Kilometern einen Zustandswechsel vorsieht. Auflösen ließe sich dieser Widerspruch hingegen, wenn die sterile Art der Geisterteilchen den Oszillationsvorgang stark beschleunigt.

Unsere Messungen sind bei Weitem nicht die einzigen, die in der Vergangenheit eigenartige Ergebnisse zu Tage gefördert haben. So deuten ebenfalls Experimente im Umfeld von Kernkraftwerken darauf hin, dass im Neutrinosektor etwas Sonderbares vor sich geht. In den Brennstäben entstehen Neutrinos als Nebenprodukt der Kernspaltung, was die Anlagen zu einem beliebten Versuchsumfeld für Teilchenphysiker macht. Doch bei den Experimenten kommen längst nicht immer so viele Neutrinos an den Detektoren an, wie Modelle vorhersagen.

Zugegeben, Ergebnisse solcher Messkampagnen sind schwierig zu interpretieren, und mitunter lässt sich manche der dort entdeckten Unstimmigkeiten auf banale Ursachen zurückführen. Beispielsweise wissen Physiker nicht genau, wie viele Neutrinos bei der Kernspaltung entstehen, was ein großer Unsicherheitsfaktor bei Reaktorexperimenten ist (siehe »Spektrum« Juni 2017, S. 6). Zudem ist es knifflig, die Neutrinos aus der Kernspaltung sauber von denen aus anderen Quellen zu trennen, beispielsweise aus der Sonne oder aus radioaktiven Zerfällen im Detektormaterial. Bei Reaktorexperimenten kann man außerdem lediglich ein mutmaßliches Verschwinden von Elektron-Neutrinos nachweisen, nicht aber die Umwandlung von Myon-Neutrinos, die uns am meisten interessiert.

Aber es gibt Versuchsaufbauten, die viele dieser Probleme umschiffen. Beim russischen DANSS-Experiment (Detector of the reactor and antineutrino based on solid-state plastic scintillator) verändern die Forscher beispielsweise alle paar Tage den Abstand zwischen Detektor und Reaktor. Auf diese Weise sieht man deutlicher, ob Elektron-Neutrinos auf kurzen Strecken tatsächlich verschwinden, unabhängig von der tatsächlich vom Reaktor ausgestoßenen Zahl. Denn die Zahl der nachgewiesenen Elektron-Neutrinos fällt dann mit dem Abstand stärker ab, als man es in Konsequenz des größeren Abstands erwarten würde. Leider hat eine jahrelange Suche des DANSS-Teams nichts dergleichen zu Tage gefördert, wie die Forscher Ende 2019 berichtet haben.

Das riesige IceCube-Observatorium am Südpol (siehe »Spektrum« Mai 2016, S. 34) eignet sich ebenfalls für die Suche nach sterilen Neutrinos. Es besteht aus höchst empfindlichen Lichtdetektoren, tief versenkt in Bohrlöchern im ewigen Eis. In einem Volumen von einem Kubikkilometer lassen sich so winzige Blitze nachweisen. Diese Tscherenkow-Strahlung entsteht, wenn energiereiche Neutrinos auf

Atomkerne im Eis treffen und dabei eine Lawine geladener Teilchen lostreten. Indem Wissenschaftler die Signale aufzeichnen und analysieren, können sie Energie, Flugrichtung und Art des jeweiligen Neutrinos rekonstruieren.

Auf einem Umweg lässt sich mit IceCube auch nach zusätzlichen Varianten der Teilchen suchen: Dazu konzentrieren sich die Forscher auf Myon-Neutrinos, die einmal die ganze Erdkugel durchquert haben und von »unten« den Detektor treffen. Modelle für sterile Neutrinos besagen, dass sie bei Oszillationen im Innern der Erdmasse verstärkt entstehen sollten. Folglich müssten deutlich weniger Myon-Neutrinos aus Richtung Erdkern ihren Weg in den Detektor finden.

Eine Auswertung von Daten aus acht Jahren IceCube hat jedoch im Juni 2020 keine Hinweise darauf erbracht. Allerdings sind die dafür nötigen Oszillationsanalysen sehr kom-

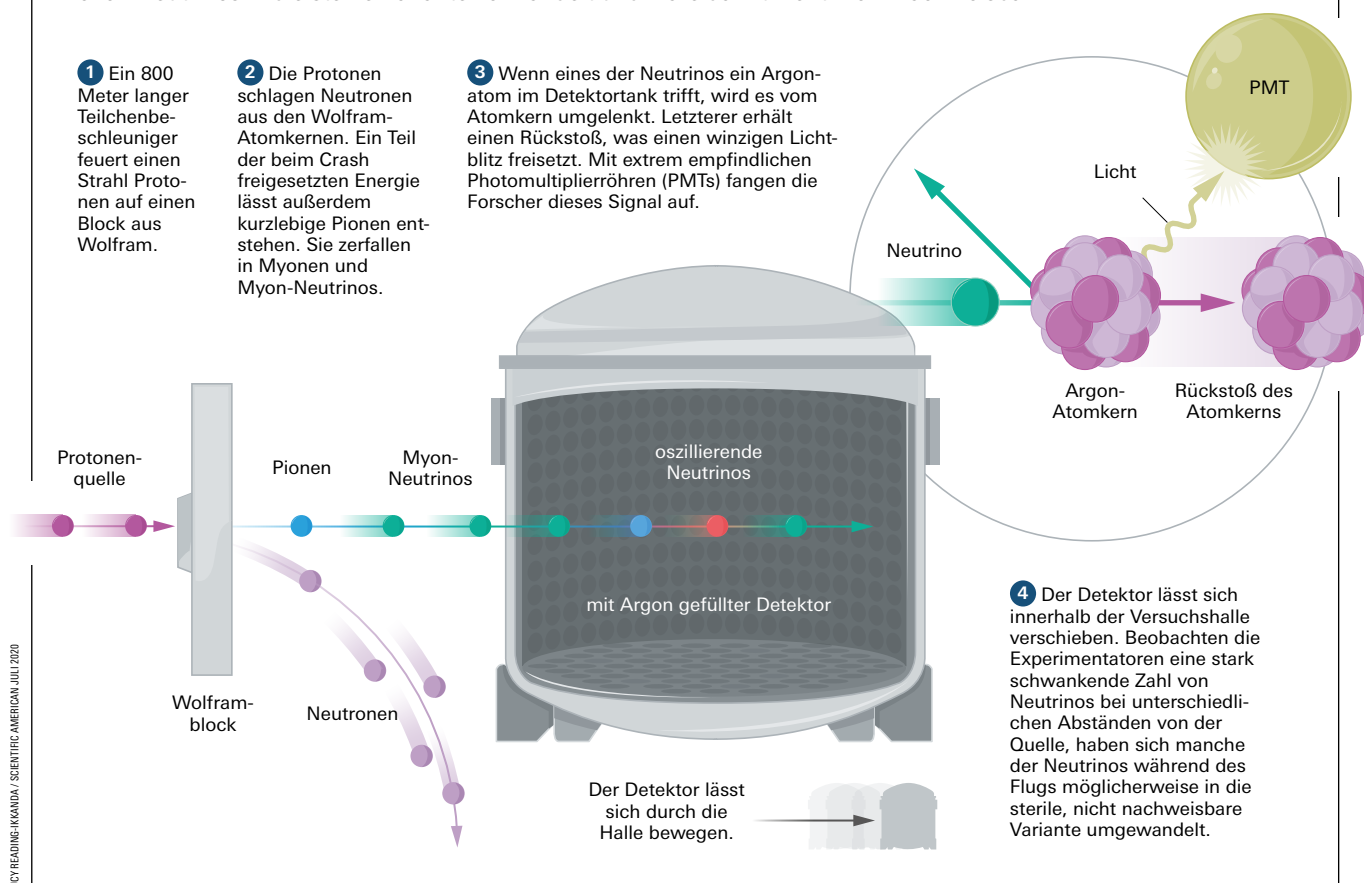
pliziert, unter anderem, weil auf das Observatorium Neutrinos aller möglichen Energien einprasseln. Wir sind daher weiter zuversichtlich, dass es doch noch Schlupflöcher für die neue Art gibt, die wir mit unserem CCM-Experiment absuchen wollen.

Der neue Detektor soll bewusst einen blinden Fleck unserer bisherigen Analysen ausgleichen: Mit LSND und MiniBooNE ließen sich Neutrinos jeweils nur in einem fixen Abstand von der Quelle nachweisen. Generell handelte es sich bei den meisten bisherigen Neutrino-Experimenten um große, schwer bewegliche Apparate. Damit ließen sich gewissermaßen immer nur einzelne Schnapsschüsse des Oszillationsverhaltens aufnehmen – und nicht der lückenlose Film, den man eigentlich bräuchte.

Wie schon gesagt, würden wir am liebsten neben einem Neutrino herfliegen und ihm beim Identitätswechsel zu-

Auf der Spur des vierten Neutrinos

Das Coherent CAPTAIN-Mills Experiment am Los Alamos National Laboratory sucht nach Hinweisen auf einen weiteren Neutrinotyp. Anders als die drei bekannten Arten, die nur selten mit Materie interagieren, würden die »sterilen« Neutrinos dies praktisch überhaupt nicht tun. Mit dem Rest des Universums würden sie nur mittels der Schwerkraft kommunizieren. Gewöhnliche Neutrinos könnten sich jedoch im Flug in den neuen Typ umwandeln (und möglicherweise wieder zurück). Das neue Experiment wäre zwar nicht in der Lage, sterile Neutrinos direkt aufzuspüren. Aber die Neulinge könnten sich dennoch verraten, wenn die Zahl der Neutrino-Interaktionen bei unterschiedlichen Abständen von der Quelle stark schwankt. In diesem Fall hätte sich ein Teil der gewöhnlichen Neutrinos in die sterile Variante verwandelt und wäre damit nicht mehr nachweisbar.



LUCY READING-INKANDA / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2020

schauen. In der Praxis ist das leider unmöglich. Aber mehrere für die nahe Zukunft geplante Neutrino-Experimente werden uns gewissermaßen Schnappschüsse an verschiedenen Punkten der Strecke zur Verfügung stellen. Damit sollten die Chancen gut stehen, Spuren der sterilen Neutrinos zu finden. Entscheidend dafür wird nicht nur unser CCM-Detektor sein, sondern auch das ambitionierte Short-Baseline Neutrino Program am Fermilab (siehe »Spektrum« April 2018, S. 62).

Eine Wette gegen das Standardmodell

Das CCM-Experiment wird in einer Halle am Los Alamos Neutron Science Center (LANSCCE) stattfinden, am Ende eines 800 Meter langen Teilchenbeschleunigers. Dieser feuert einen Strahl aus Protonen auf eine Schicht aus Wolfram. Wenn die Protonen die Atomkerne darin treffen, zersplittern Letztere und setzen im großen Stil Neutronen frei (Experten sprechen von Neutronen-Spallation). Ein Teil der in den Kollisionen freigesetzten Energie lässt Pionen entstehen, kurzlebige Zusammenschlüsse von jeweils zwei Elementarteilchen. Die Gebilde zerfallen nach kurzer Flugzeit in Myonen und Myon-Neutrinos. Letztere erhalten durch die Prozesskette eine klar definierte Energiemenge, was für unser Experiment sehr wichtig ist.

CCM weist die auf diesem Weg entstandenen Neutrinos mittels »kohärenter Neutrinostreuung« nach, die erst vor wenigen Jahren experimentell nachgewiesen wurde (siehe »Spektrum« Oktober 2017, S. 10). Bei der besonderen Form der Neutrino-Materie-Interaktion spielt der aus der Quantenphysik bekannte Welle-Teilchen-Dualismus eine wichtige Rolle. Ihm zufolge verhalten sich Elementarteilchen nur in manchen Situationen wie kleine Murmeln, in anderen lassen sie sich hingegen besser durch eine Welle beschreiben. Die Wellenlänge, die man dem Teilchen dabei zuordnet, ist eng an dessen Energie geknüpft. Bei schnell bewegten Quantenobjekten ist die Wellenlänge sehr kurz, bei langsamen, niederenergetischen Partikeln eher groß.

Wenn nun ein Neutrino einen Atomkern trifft, wird es normalerweise von einem einzelnen Proton oder Neutron im Innern gefangen. Das löst einen »inversen Betazerfall« aus, der den Atomkern in den eines anderen Elements verwandelt. Handelt es sich jedoch um ein Neutrino mit wenig Energie, ist dessen Wellenlänge so groß wie der ganze Atomkern. In diesem Fall passiert etwas anderes: Das heraneilende Teilchen tritt mit dem ganzen Kern in Wechselwirkung und wird von ihm umgelenkt oder »gestreut«. Der Atomkern erhält dabei lediglich einen kleinen Rückstoß, der in geeigneten Detektormaterialien jedoch sichtbare Folgen hat – das Atom gibt einen Lichtblitz ab.

Weist man diesen mit Photomultipliern nach, die selbst kleinste Lichtspuren verstärken, lassen sich sowohl der Ort der Interaktion als auch die auf den Kern übertragene Energie ermitteln. Auf diese Weise können wir zwar nicht sagen, um was für ein Neutrino es sich jeweils handelt. Aber wir können die Summe aller Interaktionen erfassen. Entspricht sie nicht den Erwartungen des Drei-Neutrino-Modells, sind möglicherweise sterile Neutrinos beteiligt. Sie würden nicht an Atomkernen streuen und daher spurlos durch den Detektor sausen.

Beim Design unseres Detektors kommt uns zugute, dass die Begegnung zwischen einem energiearmen Neutrino mit einem ganzen Atomkern viel wahrscheinlicher ist als die zwischen einem energiereichen Neutrino und einem einzelnen Proton oder Neutron. Daher kann unser Gerät deutlich kleiner ausfallen als seine Vorgänger, ohne weniger leistungsfähig zu sein. So bestand MiniBooNE noch aus einem Bottich gefüllt mit 800 Tonnen Erdöl. CCM hingegen wird es auf gerade mal 10 Tonnen flüssigen Argons bringen. Entsprechend ist der Detektor deutlich kompakter. Er lässt sich daher relativ leicht verschieben und kann so an verschiedenen Tagen Neutrinos in unterschiedlichen Abständen von der Quelle auffangen. Zunächst sind 20 und 40 Meter Flugstrecke geplant.

Sollten Neutrinos wirklich so oft oszillieren, wie es die Hypothese vom sterilen Neutrino nahelegt, müsste man zwischen den verschiedenen Positionen einen klaren Effekt sehen. Die Gesamtzahl der Interaktionen im Detektor sollte bei wachsendem Abstand merklich von den Erwartungen abweichen. Natürlich ist denkbar, dass wir nichts dergleichen beobachten. In dem Fall würde die Zahl der Stöße zwischen Neutrinos und Atomkernen bei größerer Distanz sukzessive kleiner werden, ganz so wie eine Glühbirne dunkler erscheint, wenn man sich von ihr entfernt.

Das wäre zwar eine Enttäuschung, aber aus unserer Sicht nicht das Ende der Theorie vom sterilen Neutrino. Durch unser Experiment könnten wir dessen denkbare Eigenschaften besser eingrenzen als bisher. Dies beträfe vor allem die Massendifferenz zu den anderen Zuständen und den »Mischungswinkel«, der die Wahrscheinlichkeit für eine Oszillation in die anderen Arten angibt.

Uns ist bei der ganzen Sache völlig bewusst, in was für einer Situation wir uns befinden: Wenn man als Experimentator Ergebnisse präsentiert, die dem Standardmodell der Teilchenphysik widersprechen, gilt man so lange als schuldig, bis man überzeugende Beweise für das Gegenteil vorlegen kann. Wir schöpfen jedoch Hoffnung daraus, dass Neutrinos schon jetzt mit einem Fuß außerhalb des Standardmodells stehen. Ihre Oszillationen und die damit verbundene winzige Masse lassen sich mit dem Regelwerk nicht erklären.

Sollte das sterile Neutrino am Ende in Los Alamos nachgewiesen werden, würden wir damit übrigens an eine alte Tradition anknüpfen. 1956 haben Frederick Reines und Clyde Cowan die Teilchen hier zum ersten Mal aufgespürt. Vielleicht ist der Nachweis ihrer sterilen Variante nur noch ein paar Messungen entfernt. Aus unserer Sicht wäre das ein überaus befriedigendes Ende einer 25 Jahre alten Kontroverse. ◀

QUELLEN

Aartsen, M. G. et al.: An eV-scale sterile neutrino search using eight years of atmospheric muon neutrino data from the IceCube Neutrino Observatory. *ArXiv* 2005.12942, 2020

Aguilar-Arevalo, A. A. et al.: Significant excess of electronlike events in the MiniBooNE Short-Baseline Neutrino Experiment. *Physical Review Letters* 121, 22, 2018

Alekseev, I. et al.: Search for sterile neutrinos at the DANSS experiment. *Physics Letters B* 787, 2018



// *Qualitätsjournalismus hat es in der Hektik der Social-Media-Welt besonders schwer. Gleichzeitig ist er wichtiger denn je, um Fake News als solche zu entlarven. Um in dieser Gemengelage nicht an Relevanz und Akzeptanz zu verlieren, müssen sich die Qualitätsmedien von Zeit zu Zeit neu erfinden. Die DUZ hat erst kürzlich wieder gezeigt, dass sie das kann. Ich ziehe meinen Hut vor einem Magazin, das lesen muss, wer das deutsche Wissenschaftssystem verstehen möchte.* //

Prof. Dr. Hans-Henning von Grünberg
 ehemaliger Präsident der Hochschule Niederrhein und
 ehemaliger Vorsitzender der Hochschulallianz für den
 Mittelstand

DUZ | MAGAZIN
 FÜR WISSENSCHAFT
 UND GESELLSCHAFT

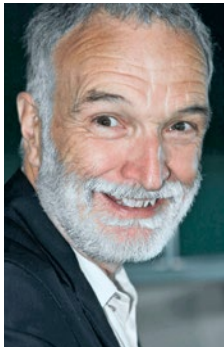
DER DIALOG, EIN FORUM, DIE DUZ.

3 AUSGABEN FÜR 15 EURO IM KENNENLERN-ABO

SHOP.DUZ-MEDIENHAUS.DE/DM-TESTEN.HTML



SCHLICHTING! DÜNEN HALTEN ABSTAND



Sanddünen wandern je nach ihrer Größe unterschiedlich schnell. Dennoch kollidieren sie nicht. Dafür sorgt ein neu entdeckter Strömungsmechanismus, der die Gebilde miteinander verknüpft.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für »Spektrum« über physikalische Alltagsphänomene.

» spektrum.de/artikel/1760440

Wer widersteht dem Strome seiner Umgebungen?

Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832)

► Dünenfelder sind fast ständig Strömungen ausgesetzt, ob in einer stürmischen Sandwüste oder als Rippel unter Wasser. Das verformt die einzelnen Hügel und versetzt sie in Bewegung: Sandkörner gelangen von der dem Wind oder Wasser zugewandten Luv zur abgewandten Leeseite, und mit ihnen wandert allmählich die ganze Düne. Beobachter haben schon sehr früh bemerkt, dass kleine Exemplare schneller sind als große. Das leuchtet wegen der unterschiedlichen Sandmengen, die dafür transportiert werden müssen, auch unmittelbar ein. Eigentlich sollten deshalb die schnelleren die langsameren Hügel einholen, mit ihnen zusammenstoßen und verschmelzen. So müssten die Dünenzwerge langsam verschwinden – doch das passiert nur selten.

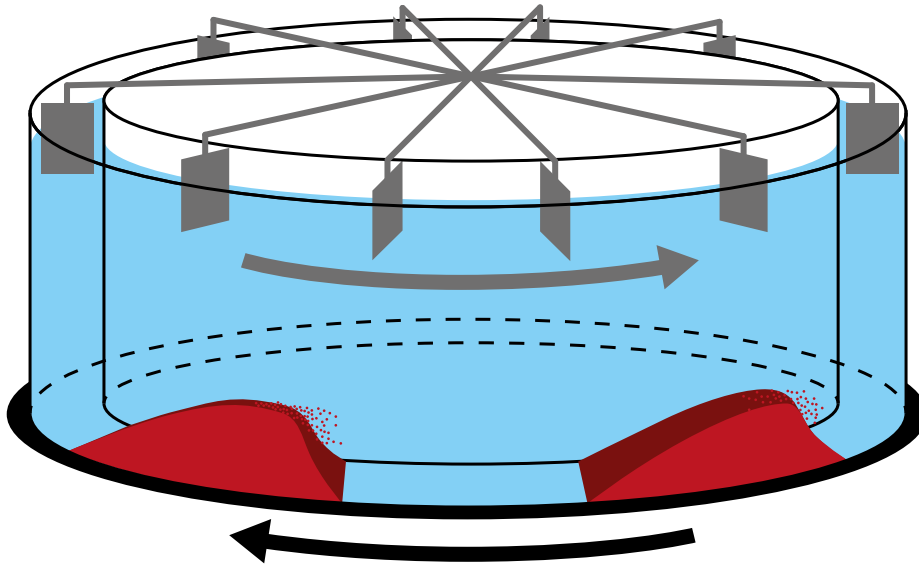
Hinter ihrem überraschenden Überleben steckt ein subtiler Mechanismus, der die Nachbarn auf Abstand hält. Ein Team um den theoretischen Physiker Karol Bacik

von der University of Cambridge hat die Hintergründe des Effekts bei Experimenten zur Wanderbewegung von Dünen entdeckt und die Resultate im Februar 2020 veröffentlicht. Bei Modellversuchen setzten die Wissenschaftler kleine Dünen einer Wasserströmung aus und stießen dabei auf unerwartete Wechselwirkungen: Turbulenzen sorgen für zusätzliche, weit reichende Kräfte und könnten das Phänomen erklären. Die Zusammenhänge dürften sich auf die windgetriebenen Exemplare an Land übertragen lassen.

Bei den Experimenten der Gruppe liefen zwei künstliche Dünen innerhalb einer ringförmigen, mit Wasser gefüllten Rinne im Kreis (siehe Illustration rechts). Statt aus echtem Sand bestanden die Untersuchungsobjekte aus mehreren Kilogramm schweren Haufen von nur etwa einen Millimeter großen Glaskügelchen. Für eine Strömung sorgten einerseits umlaufende Schaufeln an der Oberfläche, andererseits rotierte die Rinne selbst gegenläufig. Der doppelte Antrieb erlaubte es, die Strömungsverhältnisse fein zu justieren. Dank der kreisförmigen Anordnung waren für die Modellversuche auf begrenztem Raum im Prinzip beliebig lange Beobachtungszeiten

Dünenfelder verändern unablässig ihre Gestalt.

H. JOACHIM SCHLICHTING



Beim Laborexperiment treiben rotierende Schaufeln den Wasserstrom in einem ringförmigen Becken an. Es ist auf einer sich entgegengesetzt drehenden Scheibe montiert. Am Boden befinden sich künstliche Dünen, deren Bewegungen und Wechselwirkungen eine mitrotierende und eine fest installierte Kamera dokumentieren.

möglich. So ließ sich die natürliche, weiträumige, lineare Wanderung von Dünen gut nachempfinden – anders als in einem geraden Strömungskanal. Dort wäre jede Translationsbewegung rasch an eine Wand und damit ihr Ende gestoßen.

Das Ergebnis der Versuche: Fließt das Wasser über eine einzelne Düne, wandert diese zwar erwartungsgemäß einfach mit konstanter Geschwindigkeit in Strömungsrichtung. Doch sobald die Forscher zusätzlich ein zweites, gleich großes Hügelchen in einem gewissen Abstand stromaufwärts platzierten, bewegten sich beide mit verschiedener Geschwindigkeit fort und entfernten sich immer weiter voneinander. Da sie sich nicht durch ihre Form, sondern bloß durch ihre relative Lage unterscheiden, kann die Ursache für die Geschwindigkeitsdifferenz nur eine vom Abstand abhängige Wechselwirkung sein.

Die Forscher untersuchten das Wanderverhalten der beiden Dünen über einen längeren Zeitraum und stellten fest, dass die stromaufwärts liegende mit konstanter Geschwindigkeit im Kreis läuft, während die gewissermaßen in ihrem Windschatten befindliche zweite Düne sich zunächst rasch entfernt und sich dann immer mehr dem Tempo ihrer Vorgängerin angleicht. Das dauert so lange an, bis die Objekte in der Rinne einander diametral gegenüberliegen. Schon allein aus Symmetriegründen ist das zu erwarten, weil die beiden Dünen nur in dieser Position denselben Einflüssen ausgesetzt und daher völlig gleichwertig sind.

Die Ursache für die erstaunliche Entwicklung fanden die Forscher, indem sie anhand von Aufnahmen einer mitrotierenden Kamera die Bewegung der einzelnen Glaskügelchen verfolgten. Demnach entstehen an der stromaufwärts gelegenen Düne Wirbel, die bis zur dahinter befindlichen Düne reichen und an deren Spitze zahlreiche

Sandkörnchen ablösen. Diese gelangen in den Wasserstrom, werden ein Stück weit mitgerissen und sinken an der Leeseite der Düne wieder ab. So unterstützen die Wirbel von stromaufwärts den Vorgang des Sandtransports auf der stromabwärts gelegenen Düne. Die Reichweite der Turbulenzen ist jedoch begrenzt. Darum nimmt die beschleunigende Wirkung mit zunehmender Entfernung der beiden Dünen voneinander ab. Schließlich regelt sich ein charakteristischer Abstand ein. Große Haufen enden im ringförmigen Kanal in der symmetrischen Position, bei kleineren reicht die Wechselwirkung nicht so weit, und die Geschwindigkeiten der hinteren und der vorderen Düne werden schon in geringerer Entfernung gleich.

Der Mechanismus sorgt dafür, dass verschiedenförmige Dünen in einem Feld nicht zwangsläufig miteinander kollidieren, sondern sich im Gegenteil gegenseitig stabilisieren. Geht man beispielsweise von einer kleinen Düne neben einer großen aus, so würde die erstere, schnellere Düne die letztere, langsame über kurz oder lang einholen. Durch die Annäherung nimmt jedoch der Einfluss der Wirbel von der kleinen auf die große Düne zu. Das beschleunigt dort den Sandtransport – umso stärker, je näher sich beide kommen. Sofern sich der Größenunterschied in Grenzen hält, wandert das Paar schließlich mit gleicher, konstanter Geschwindigkeit. Die Wissenschaftler um Bacik haben solch eine Situation mit zwei Exemplaren nachgestellt, die sich in ihrer Masse um den Faktor 2,5 unterschieden, und fanden genau so einen abstoßenden Effekt.

QUELLE

Bacik, K.A. et al.: Wake induced long range repulsion of aqueous dunes. *Physical Review Letters* 124, 2020

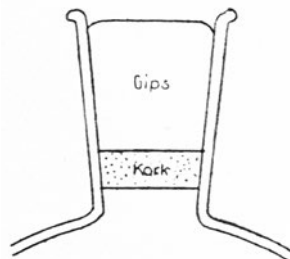
Wissenschaft vor 100 und vor 50 Jahren – aus Zeitschriften der Forschungsbibliothek für Wissenschafts- und Technikgeschichte des Deutschen Museums

WER JUNG SEIN WILL, MUSS OPFER BRINGEN

»Nach jahrelangen Vorarbeiten ist es dem Physiologen Prof. Steinach gelungen, bei greisenhaften Tieren durch Unterbindung oder Einpflanzung von Keimdrüsen, die Alterserscheinungen verschwinden und die Tiere völlig jugendlich erscheinen zu lassen. Diese Verjüngung soll Steinach auch beim Menschen erzielt haben. Frisches Aussehen und Auftreten, wiederkehrende körperliche und geistige Fähigkeiten und jugendliche Manneskraft sind die Kennzeichen des Erfolgs. Um aber überspannten Erwartungen und laienhaften Hoffnungen vorzubeugen, die in vielen Köpfen aufgewühlt wurden, sei nicht verschwiegen, daß Operationen dieser Art mit dauerndem Verlust der Zeugungsfähigkeit verbunden sind.« *Kosmos 10, S. 265*

BOMBENFEST UND DIEBESSICHER

»Ein hübscher, billiger und diebessicherer Verschuß wird von einer Ölfabrik bei der Füllung eingesandter Gefäße angewendet. Es wird eine ganz flache Korkscheibe fest und tief in den konischen Blechhals eingepreßt und der Rest mit Gips vollgegossen. Dieser Verschuß hält auf dem Bahntransport bombenfest, läßt keine Beraubung der Flasche zu und ist leicht zu öffnen, indem man über der Korkscheibe erst sauber den Gips entfernt. Zur Nachahmung empfohlen.« *Technische Monatshefte 10, S. 263*



So bleibt jeder Behälter dicht.

GOETHE: KREATIV DURCH ORDNUNGS-LIEBE UND FAULENZEN

»Goethes Lebensarbeit ist so groß, daß die Frage auftaucht: wie war es möglich, daß dieser Mensch so Vieles und Großes schaffen konnte? [Er] musste sich oft isolieren und selbst von Frau und Kind abschließen, wenn er etwas fertig bringen wollte. Goethes Ordnungsliebe sei bis ins Unglaubliche gegangen. Er entwarf Tabellen über seine Tätigkeit, aus denen am Jahresschlusse Hauptübersichten zusammengestellt wurden. Grundsätzlich tat Goethe [aber] immer nur das, wozu gerade die Lust und Liebe da war. »Mein Rat ist daher, nichts zu forcieren und alle unproduktiven Stunden lieber zu vertändeln und zu verschlafen, als in solchen Tagen etwas machen zu wollen, woran man später keine Freude hat.«« *Die Umschau 43, S. 628*

1920

WELCHE TECHNIK STECKT IM AUTO DER ZUKUNFT?

»Wie der Wagen des Jahres 2000 aussehen wird, kann man heute noch nicht voraussagen. Eines steht aber fest: Alle im Verkehr befindlichen Kraftwagen werden mit einem Computer ausgerüstet sein, der sofort meldet, wenn ein betriebswichtiger Teil reparaturbedürftig wird und auszufallen droht. Und zwar wird diese Meldung erfolgen, ehe die Panne da ist. Ausserdem wird der Wagencomputer im Vorbeifahren Signale aufnehmen, die Auskunft über den Zustand der Strasse, etwaige Stauungen, Glatt-eisgefahr usw. geben.« *Neuheiten und Erfindungen 403, S. 178*

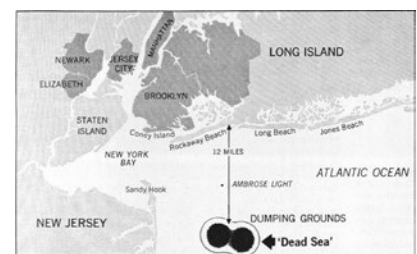
LASER LÄSST SAMEN TURBOKEIMEN

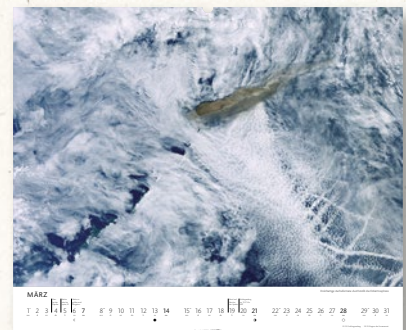
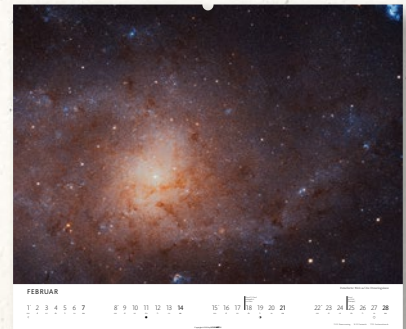
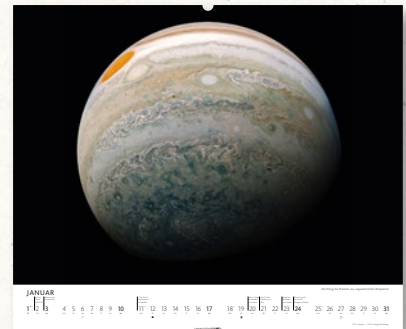
»Eine beschleunigte Keimung wurde bei Bohnen, Rettich und Kürbis beobachtet, nachdem man die Samen dem Licht eines Rubinlasers exponiert hatte. In zwei Experimenten verglich man das Wachstum von bestrahlten Samen mit unbehandelten Kontrollproben. Nach Einpflanzung der bestrahlten Samen erschienen die Keimlinge 7 Tage danach, die Kontrollen erst nach 9 Tagen. Bei einem anderen Versuch erfolgte die Keimung der unbehandelten nach 26 Tagen, bei den bestrahlten nach 16 Tagen. Die praktische Bedeutung wäre, daß sich eine Erhöhung der Ernten erzielen und die Anwendung von Pestiziden reduzieren ließe.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 432*

DAS TOTE MEER VON NEW YORK

»Beim Anflug auf New Yorks Kennedy International Airport sieht man vor der Küste einen schmutzig-braunen Schlick in den normalerweise blaugrünen Gewässern des Atlantischen Ozeans. Das verfärbte Wasser markiert den Ort, an dem die Abwässerwerke seit 40 Jahren ihren Schlamm versenken. Dadurch entstand ein heute etwa 50 Quadratkilometer umfassendes »Totes Meer«, das kaum mehr zu entfernen ist. 20 verschiedene Werke werfen jährlich rund 3,8 Millionen Kubikmeter Schlamm und 6 Millionen Tonnen Ausbaggerungsprodukte in den Atlantik. Das Meeresforschungslaboratorium Sandy Hook fand, daß die Vegetation am Meeresgrund erstickt und Fische an Schuppenverfall leiden.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 431*

Lage des »Dead Sea«, des Toten Meers vor New York.





**STERNE UND
WELTRAUM**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2021

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Infrarotlicht. Die Aufnahmen zeigen die Aschefontäne eines Vulkanausbruchs, den Asteroiden Benu, den Superstern Eta Carinae, den jungen Stern PDS 70, den Riesenplaneten Jupiter und weitere Himmelsregionen und -objekte.

Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die besonderen Himmelsereignisse 2021 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 46 cm; € 29,95 zzgl. Porto;
als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

MOTIVE
VORAB ONLINE
ANSCHAUEN!

HIER KÖNNEN SIE BESTELLEN:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/aktion/hue

E-Mail: service@spektrum.de



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ 3-D-BRILLE FÜR DEN COMPUTER

Katzen in Bildern erkennen – das meistern Algorithmen schon lange. Doch was ist mit komplizierteren Objekten, etwa Proteinen? Durch neue Fortschritte können Computer nun sogar in gekrümmten und mehrdimensionalen Strukturen komplexe Muster erfassen.



John Pavlus ist Publizist und Filmemacher in Portland, Oregon, und schreibt über Themen vor allem aus Wissenschaft, Technologie und Design. Seine Arbeiten erscheinen in zahlreichen Zeitschriften.

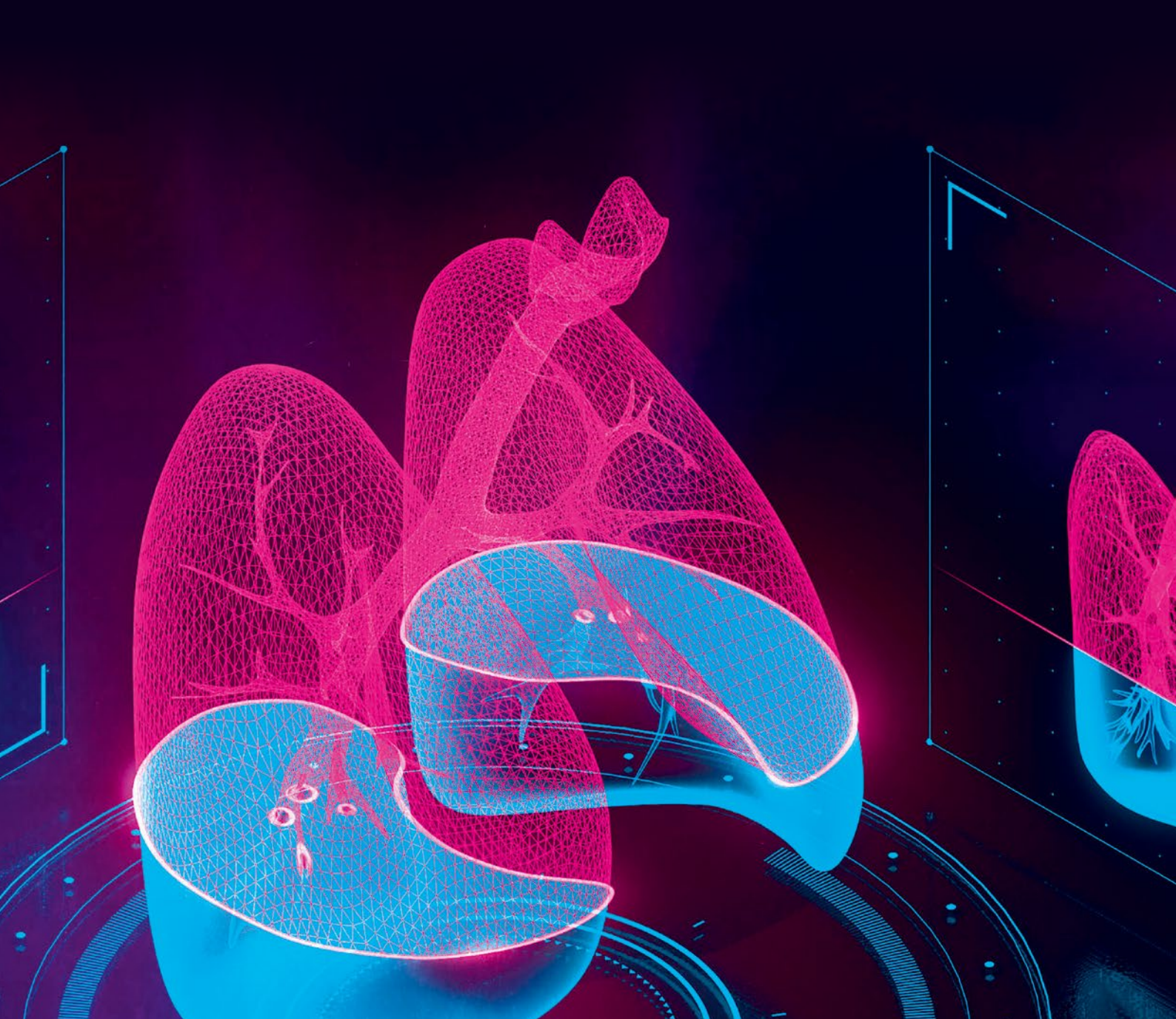
» spektrum.de/artikel/1760442

▶ In den letzten Jahren machten Informatiker im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) bedeutende Fortschritte. Die Maschinen können inzwischen Auto fahren, sie schlagen menschliche Weltmeister bei Brettspielen wie Schach oder Go und verfassen sogar Prosatexte. Die meisten derartigen Errungenschaften beruhen auf leistungsfähigen neuronalen Netzen (siehe Glossar S. 84), deren Aufbau dem visuellen Kortex von Säugetieren nachempfunden ist. Zu dieser Kategorie gehören unter anderem so genannte neuronale Faltungsnetzwerke (englisch: convolutional neural networks, CNNs), die erstaunlich geschickt darin sind, Muster in zweidimensionalen Daten zu erkennen – vor allem wenn es darum geht, handgeschriebene Wörter zu entziffern oder Objekte in digitalen Bildern zu verarbeiten.

Anders verhält es sich dagegen, wenn man solche lernfähigen Algorithmen auf Datensätze loslässt, die keiner ebenen Geometrie entspringen. Möchte man etwa unregelmäßige Formen untersuchen, wie man sie in dreidimensionalen Computeranimationen verwendet, oder die von selbst-fahrenden Autos erzeugten Datenmengen verarbeiten, durch die die Fahrzeuge ihre Umgebung abbilden, stoßen neuronale Faltungsnetzwerke an ihre Grenzen. Der Informatiker Michael Bronstein vom Imperial College London gründete 2015 daher die neue Disziplin des geometrischen Deep Learnings. Dabei verwenden Forscher verschiedene

Informatiker nutzen Methoden aus der Physik, damit neuronale Netze lernen, auch dreidimensionale Strukturen erfolgreich zu untersuchen. Das ist unter anderem in der Medizin nützlich.





AUF EINEN BLICK GEEICHTE MASCHINEN

- 1** Mustererkennung ist eine der Stärken von künstlicher Intelligenz. Wenn die Daten allerdings nicht auf einer Ebene liegen, stoßen die Programme schnell an ihre Grenzen.
- 2** Mit Hilfe physikalischer Methoden lernen Algorithmen, Objekte unabhängig von der gewählten Perspektive zu erkennen – auch in mehr als zwei Dimensionen.
- 3** Dadurch lassen sich komplexe Datensätze, etwa Ergebnisse globaler Klimamodelle oder Aufnahmen selbstfahrender Autos, erheblich besser und schneller analysieren.

physikalische Methoden, durch die Algorithmen lernen, komplizierte und hochdimensionale Objekte zu analysieren.

Die vier Informatiker Taco Cohen, Maurice Weiler, Berkay Kicanaoglu und Max Welling, die an der Universität Amsterdam und für den kalifornischen Computerchiphersteller Qualcomm AI Research arbeiten, haben nun enorme Fortschritte in diesem Bereich gemacht. Sie entwickelten einen theoretischen Rahmen, mit dem selbstlernende Algorithmen Muster auf jeder Art von geometrischen Oberfläche erkennen können. Solche so genannten eichinvarianten neuronalen Faltungsnetzwerke (Eich-CNNs) benötigen dabei wesentlich weniger Daten als herkömmliche Programme, wodurch sie deutlich schneller sind.

Die neuen Algorithmen eignen sich daher, um die Ergebnisse globaler Klimamodelle zu verarbeiten, die Sicht von

Drohnen und autonomen Fahrzeugen zu verbessern oder um nach Mustern in medizinischen Daten zu suchen, die Forscher aus den unregelmäßig gekrümmten Oberflächen von Herzen, Gehirnen oder anderen Organen gewinnen. In einigen derartigen Anwendungen übertreffen Eich-CNNs schon jetzt die bisher verwendeten Programme.

All das erreichten die Informatiker durch Methoden aus der Physik. Eines der wichtigsten Prinzipien des Fachs lautet, dass physikalische Größen und ihre Beziehungen untereinander nicht vom Bezugssystem (oder der Eichung, siehe Glossar, links) abhängen. Das heißt, die Gesetzmäßigkeiten bleiben unverändert, unabhängig davon, ob sich ein Beobachter beispielsweise bewegt oder stillsteht. Messungen, die man in verschiedenen Einheiten vornimmt, müssen sich derart ineinander umwandeln lassen, dass die zu Grunde liegenden physikalischen Beziehungen erhalten bleiben.

Stellen Sie sich etwa vor, Sie messen die Länge eines Fußballfelds zuerst in Yards und anschließend in Metern. Die Ergebnisse werden sich zwar unterscheiden, doch sie lassen sich ineinander umwandeln. Genauso werden zwei Fotografen, die ein Objekt aus verschiedenen Blickwinkeln aufnehmen, nicht das gleiche Bild erzeugen, aber man kann die Fotos zueinander in Beziehung setzen.

Ideen aus der Physik helfen Informatikern dabei, neuartige Programme zu entwickeln

Auf diesem Prinzip der so genannten Eichinvarianz basieren die wichtigsten modernen Theorien wie die allgemeine Relativitätstheorie oder das Standardmodell der Teilchenphysik. Die Eichinvarianz stellt sicher, dass die Modelle nicht von der Perspektive oder den gewählten Maßeinheiten abhängen. »Informatiker wollten die Idee, dass es keine ausgezeichnete Bezugsrichtung gibt, auf neuronale Netze übertragen«, erklärt der Physiker Kyle Cranmer von der New York University, der KI in seiner Forschung nutzt.

Michael Bronstein legte 2015 den Grundstein dafür, als er erstmals den Begriff des geometrischen Deep Learnings prägte. Damit beschrieb er den Versuch, neuronale Netze auf unebene Datensätze anzuwenden. Doch dafür mussten er und seine Mitarbeiter ein Rechenverfahren erweitern, auf dem die KI basiert: Übergibt man den Algorithmen Eingabedaten, dann führen sie eine so genannte Faltungsoperation (siehe Glossar) durch und geben die Ergebnisse anschließend an die nächste Schicht weiter.

»Man kann sich eine Faltung wie ein Schiebefenster vorstellen«, so Bronstein. Das neuronale Netz lässt viele solcher Fenster wie einen Filter über die Daten gleiten, wobei jedes eine bestimmte Art von Muster herausliest. Hat man ein CNN zum Beispiel darauf trainiert, Katzen zu erkennen, dann durchsuchen die ersten Filter die Eingabepixel eines Bilds nach groben Merkmalen wie Kanten. Die nächsten Schichten führen daraufhin zusätzliche Faltungen durch, um weitere Details wie Augen, Schwänze oder dreieckige Ohren zu identifizieren. Anhand der Ergebnisse weist das neuronale Netz letztlich dem gesamten Bild eine Bezeichnung zu, etwa »Katze« oder »nicht Katze«.

Dieser Ansatz funktioniert allerdings nur in der Ebene. »Wenn die Oberfläche, auf der man eine solche Analyse durchführen möchte, gekrümmt ist, dann führt das zu grund-

Glossar

Ein **neuronales Netz** ist eine Variante des maschinellen Lernens, das dem Gehirn von Säugetieren nachempfunden ist. Es besteht aus künstlichen Neuronen, die in Schichten angeordnet sind und Rechenoperationen durchführen.

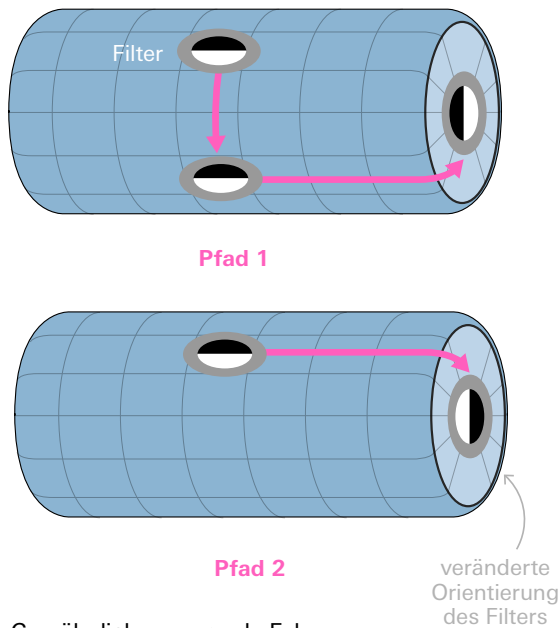
Eine **Faltung** ist eine mathematische Operation. Anschaulich gleicht sie einer bestimmten Form, etwa einem Rechteck oder einer Linie, die wie ein Filter über eine andere Struktur gleitet und als Ergebnis die Schnittmenge beider Objekte liefert.

Die Neurone eines Faltungsnetzwerks führen Faltungen durch, wodurch sie eine **Feature Map** erstellen. Diese entspricht dem Ergebnis der mathematischen Operation, die eine Neuronenschicht berechnet hat. Die Feature Map wird anschließend an die nächste Schicht gesendet, die das Ergebnis weiter verarbeitet.

Eine mathematische Funktion ist **äquivariant**, wenn sie sich in vorhersehbarer Weise unter einer Symmetrietransformation ändert. Betrachtet man beispielsweise eine Funktion, die einem Dreieck einen Flächeninhalt zuordnet, dann ist sie **invariant** unter Kongruenztransformationen, etwa Rotationen oder Verschiebungen: Der Flächeninhalt kongruenter Dreiecke ist stets gleich. Für Skalierungen ist die Funktion dagegen äquivariant, denn der Flächeninhalt eines skalierten Dreiecks ändert sich um einen festen Faktor.

Eine **Eichung** ist eine bestimmte Wahl einer physikalischen Größe in einem Bezugssystem. Wichtig ist dabei, zu beachten, dass sich alle anderen möglichen Eichungen am Ende aus der gewählten rekonstruieren lassen.

Gekrümmte Faltungen



Gewöhnliche neuronale Faltungsnetzwerke funktionieren nicht auf gekrümmten Oberflächen. Ein Filter, der Kanten erkennen soll, verändert abhängig vom gewählten Pfad seine Orientierung. Daher liefert der Filter je nach Weg eine andere Feature Map.

sätzlichen Problemen«, so Welling. Um die Schwierigkeiten nachzuvollziehen, hilft folgendes Szenario: Stellen Sie sich vor, Sie möchten die Küstenlinie Grönlands nachzeichnen, indem Sie ein Stück durchscheinendes Papier an einen Globus halten. Das würde einer Faltung entsprechen, die Konturen herausfiltert. Drückt man das Papier auf die Kugel, knittert es, was die Zeichnung verfälscht, wenn man sie wieder flach auslegt. Hält man das Papierstück dagegen tangential zur Erdkugel und zeichnet die Küste nach (eine als Mercator-Projektion bekannte Technik), ist das Ergebnis ebenfalls verzerrt. Alternativ könnten Sie das Papier auf eine flache Weltkarte legen, doch damit würden Sie nur deren Verzerrungen übernehmen, etwa jene, dass der obere Rand in Wirklichkeit nur einen einzigen Punkt (den Nordpol) auf dem Globus darstellt. Daher verhalten sich mathematische Operationen wie Faltungen auf gekrümmten Flächen grundsätzlich anders als in der Ebene.

Untersucht man statt einer Kugel ein komplexeres Objekt wie die dreidimensionale Form einer Flasche oder gar eines Proteins, dann wird es schwieriger, eine Faltung zu definieren. Glücklicherweise fanden Bronstein und seine Mitarbeiter 2015 eine Lösung für das Problem. Statt eines ebenen Papierstücks als Schiebefenster nutzten sie ein kreisförmiges Spinnennetz. Dieses lässt sich auf einen Globus oder jede andere gekrümmte Oberfläche drücken, ohne zu knittern, zu verzerren oder zu zerreißen.

Als die Informatiker ihr neuronales Netz mit der neu definierten Faltung ausstatteten, konnte es geometrische Zusammenhänge viel besser erkennen. Zum Beispiel setzten sie ihrem Programm mehrere Aufnahmen eines Menschen in verschiedenen Posen vor – etwa mit einem angehobenen Bein –, und es erkannte automatisch, dass die Bilder jeweils ein und dasselbe Objekt darstellen. Zudem lernte das neuronale Netz wesentlich schneller: »Gewöhnliche CNNs benötigen Millionen von Beispieldaten und wochenlanges Training«, sagt Bronstein. »Wir setzten dem Netzwerk nur etwa 100 Formen in verschiedenen Posen vor und trainierten es vielleicht eine halbe Stunde lang.«

Zeitgleich zu diesem Durchbruch machte ein weiteres Forscherteam ebenfalls große Fortschritte auf dem Gebiet, indem es das Problem andersherum anging. Bis zum Ende seines Studiums im Jahr 2015 hatte sich Taco Cohen nicht wirklich mit geometrischen Netzwerken auseinandergesetzt. Stattdessen suchte er nach einer Möglichkeit, um neuronale Netze effizient mit nur wenigen Daten zu trainieren. Möchte man ein CNN dazu verwenden, Katzen zu erkennen, ist es nicht schwer, Hunderttausende oder Millionen von Beispieldaten zu finden – schließlich gibt es unzählige Katzenbilder im Internet, die man nutzen kann. Wenn eine KI aber Krebszellen in Aufnahmen von Lungengewebe erkennen soll, ist es so gut wie unmöglich, genügend Trainingsdaten zu bekommen, die medizinisch genau, angemessen beschriftet und frei von Datenschutzproblemen sind.

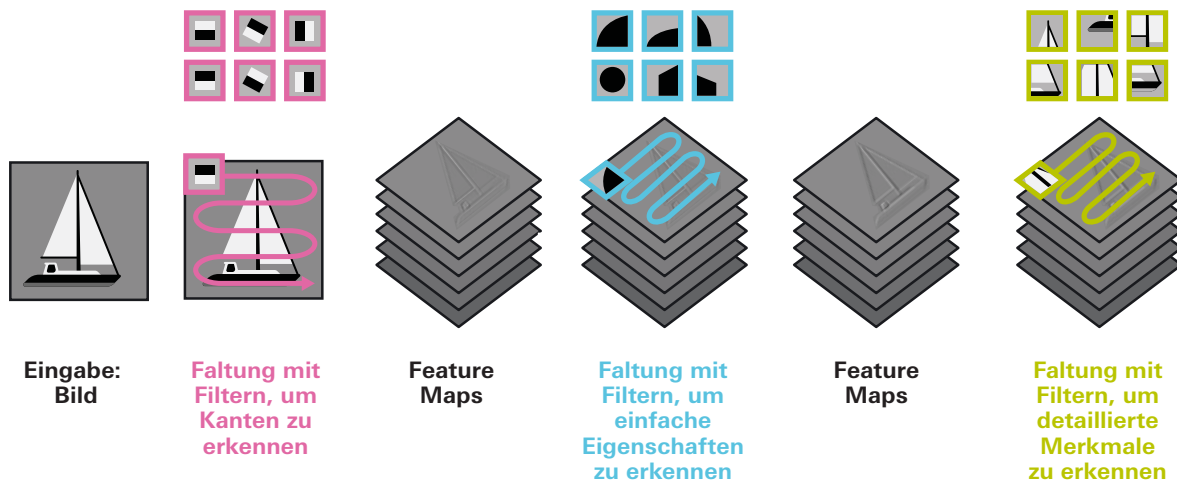
KI zur Erkennung von Lungenkrebs

Um ein Netzwerk effizienter zu gestalten, kann man es im Voraus mit Informationen füttern. Man kann etwa vorgeben, dass ein Lungentumor auch dann einer ist, wenn er in einem Bild gedreht oder gespiegelt erscheint. Normalerweise lernt ein Faltungsnetzwerk solche Eigenschaften, indem es viele Versionen desselben Musters in verschiedenen Orientierungen erhält. Cohen und sein Betreuer Welling codierten diese Annahmen direkt in das neuronale Netz, indem sie Dreh- oder Spiegelsymmetrien verwendeten. Zusammen mit seiner Kollegin Marysia Winkels entwickelte Cohen den Ansatz bis 2018 weiter. Die Forscher erzielten dadurch beeindruckende Ergebnisse bei der Erkennung von Lungenkrebs in CT-Scans: Ihr neuronales Netzwerk benötigte im Vergleich zu herkömmlichen Programmen nur ein Zehntel der Daten, um visuelle Hinweise auf die Krankheit zu identifizieren. Indem Cohen, Welling und Winkels ihre Methode weiter verfeinerten, fanden sie schließlich einen Weg, auch Daten auf gekrümmten Oberflächen effizient anzugehen.

Physik und maschinelles Lernen ähneln sich Cohen zufolge grundlegend: »In beiden Bereichen leitet man aus Beobachtungen Theorien her, die zukünftige Ereignisse vorhersagen sollen.« Entscheidend sei dabei, bemerkt er, dass man keine Modelle einzelner Phänomene sucht – denn es bringt nichts, verschieden ausgerichtete Wassermoleküle separat zu beschreiben –, sondern allgemeine Konzepte zu entwickeln. Schon Albert Einstein beachtete dieses als Äquivarianz oder Kovarianz bezeichnete Prinzip in seiner Relativitätstheorie.

Herkömmliche Faltungsnetzwerke besitzen eine so genannte Translationsinvarianz, das heißt, sie erkennen ein

Wie neuronale Faltungsnetzwerke sehen



LUCY READING/IKANDA / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

- 1 Über das Eingabebild gleiten Filter, die gewisse Merkmale extrahieren. Jede Übereinstimmung zwischen einem Filter und einer Bildposition wird in einer so genannten Feature Map gespeichert.
- 2 Die Feature Map wird an die nächste Schicht im Netzwerk weitergegeben, die weitere Faltungen anwendet und dabei immer detailliertere Informationen extrahiert.
- 3 Am Ende klassifiziert das Netzwerk die übergebenen Eingabedaten.

Objekt unabhängig davon, wo es sich in einer zweidimensionalen Ebene befindet. Ein Filter, der ein bestimmtes Merkmal wie vertikale Kanten in einem Bild identifizieren soll, gleitet über die Pixelebene und codiert die Positionen aller derartigen Kanten – ob sie in der oberen rechten Ecke oder in der unteren linken Ecke eines Bilds liegen, spielt dabei keine Rolle. Die entsprechende Schicht künstlicher Neurone erstellt daraus eine so genannte Feature Map (siehe Glossar), welche diese Positionen enthält, und gibt sie an die nächste Schicht weiter.

Zusammen mit Cohen und seinem damaligen Doktorvater Max Welling erweiterte Weiler die Translationsinvarianz der Faltungsnetzwerke auf andere Symmetrien. Die dabei entstehenden Algorithmen erkannten gedrehte oder gespiegelte Merkmale in ebenen Bildern, ohne dass man sie mit spezifischen Varianten in diesen Ausrichtungen trainieren musste. Zudem gelang es den Computerwissenschaftlern, sphärische Faltungsnetzwerke zu entwickeln, die Feature Maps aus Daten auf Kugeloberflächen erstellen, ohne sie zu verzerren.

Der Trick bestand darin, die Symmetrien der Oberfläche auszunutzen, um Filter darauf zu verschieben. Eine Ebene sieht zum Beispiel immer gleich aus, unabhängig davon, ob man sich einen Ausschnitt oben links oder unten rechts ansieht. Statt einen Filter also darübergleiten zu lassen, kann man die Ebene verschieben. Ähnliches gilt für die Kugel: Sie ist nicht translations-, sondern rotationssymmetrisch. Egal wie man sie dreht, sie sieht immer gleich aus. Indem man die Verschiebung eines darauf befindlichen Filters mit der Rotation der Kugel gleichsetzt, lassen sich

sphärische Faltungsnetzwerke definieren, welche die Daten nicht verzerren.

So viel versprechend diese Ansätze sind, eignen sie sich jedoch nicht, um Strukturen auf unregelmäßigen Oberflächen zu verarbeiten. Gerade solche Fälle sind aber wichtig, wenn man realistische Systeme untersucht, wie Proteine oder eine gekrümmten Raumzeit. Derartige komplizierte und teilweise hochdimensionale Oberflächen, so genannte Mannigfaltigkeiten, besitzen keine globale Symmetrie, durch die ein neuronales Netz einen Filter verschieben kann. Jeder Ort sieht völlig anders aus.

Um das Problem anzugehen, kann man an jedem Punkt auf der Mannigfaltigkeit einen so genannten Tangentialraum definieren: Man betrachtet eine winzige Umgebung des Punkts, von der man annimmt, sie sei flach. Dass das möglich ist, erleben wir in unserem Alltag. Verglichen mit der Größe der Erde ist unser Bewegungsradius so klein, dass uns der Boden flach vorkommt, wenn man von Bergen absieht. So kann man für jeden Punkt einer Mannigfaltigkeit einen entsprechenden Tangentialraum definieren, in dem sich ein Filter problemlos verschieben lässt.

Wenn ein ebener Filter über den Tangentialraum einer gekrümmten Oberfläche gleitet, hängt seine Orientierung allerdings davon ab, welchen Weg er nimmt. Stellen Sie sich einen Filter vor, der aus einem dunklen Klecks links und aus einem hellen rechts besteht. Verschiebt man ihn auf einer flachen Ebene nach oben, unten, links oder rechts, bleibt er dabei stets gleich ausgerichtet.

Das ändert sich jedoch selbst bei so einfachen gekrümmten Objekten wie einer Kugeloberfläche. Solange man den

Filter bloß entlang des Äquators bewegt, ist es wie in der Ebene: Links findet man den dunklen Klecks, rechts den hellen. Gleitet er dagegen vom Äquator aus über den Nordpol wieder zurück zum Ausgangspunkt, dann steht der Filter am Ende auf dem Kopf – dunkler Klecks rechts, heller Klecks links. Als Konsequenz erkennt das Netzwerk nicht mehr das gleiche Muster in den Daten. Die Feature Map sieht je nach Weg, den man entlang der Mannigfaltigkeit geht, anders aus. Auf komplizierteren Oberflächen könnte ein Filter letztlich in beliebig viele verschiedene Richtungen zeigen.

Auf die richtige Eichung kommt es an

Glücklicherweise haben sich Physiker bereits vor Jahrzehnten mit dem Problem beschäftigt und eine Lösung gefunden: das Prinzip der Eichinvarianz. Anstatt alle möglichen Orientierungen zu beachten, die ein Filter auf den verschiedenen Wegen annehmen kann, wählt man anfangs eine feste Ausrichtung, auch Eichung genannt. Mit dieser läuft man dann die Daten ab. Anschließend benötigt man nur noch eine Methode, mit der sich jede andere Orientierung aus der gewählten erzeugen lässt. Wandelt man seine Ergebnisse in eine andere Eichung um, müssen die zu Grunde liegenden Muster erhalten bleiben, so wie bei der Umrechnung der Lichtgeschwindigkeit von Metern pro Sekunde in Meilen pro Stunde. Mit einem eichinvarianten Ansatz, so Welling, »ändern sich zwar die Zahlenwerte, aber sie tun es auf vorhersehbare Weise«.

Cohen, Weiler und Welling konnten die Eichinvarianz 2019 in ihr neuronales Faltungsnetzwerk integrieren. Konkret betrachtet der Algorithmus die Daten in einer kleinen Umgebung eines Punkts auf der Mannigfaltigkeit, wählt darin eine bestimmte Eichung für den Filter und lässt die Faltung ablaufen. Der Filter gleitet dann über den ebenen Bereich. Daraus entsteht eine Feature Map, die äquivariant (siehe Glossar) transformiert. Das heißt, es lässt sich berechnen, wie die Feature Map aussähe, wenn man anfangs eine andere Orientierung gewählt hätte. »Im Grunde kann man dem neuronalen Netz jede Oberfläche übergeben – einschließlich exotischer Mannigfaltigkeiten wie einer kleinschen Flasche oder vierdimensionalen Raumzeitmodellen«, sagt Welling.

Die Theorie der eichinvarianten CNNs ist so allgemein, dass sie automatisch die Annahmen früherer geometrischer Ansätze des Deep Learnings enthält: etwa die Rotations-symmetrie von Kugeln. Sogar die Methode von Bronstein, die es neuronalen Netzen ermöglicht, eine dreidimensionale Form in verschiedenen Posen zu erkennen, meistern die eichinvarianten Faltungsnetzwerke.

Cohen und seine Kollegen haben ihr Programm an globalen Klimadaten getestet, die eine dreidimensionale Kugelstruktur besitzen. Sie erzeugten dabei ein eichinvariantes CNN, das extreme Wetterereignisse wie tropische Wirbelstürme in Ergebnissen von Klimasimulationen erkennen sollte. Das 2017 entwickelte Faltungsnetzwerk, das Forscher bis dahin nutzten, identifizierte Zyklone in den Daten mit 74-prozentiger Genauigkeit; das eichinvariante CNN erkannte dagegen 97,9 Prozent davon. Damit übertraf es sogar einen geometrischen Deep-Learning-Ansatz, der

2018 speziell für Kugeloberflächen entwickelt wurde – dieser war bloß zu 94 Prozent genau.

Der Computerchiphersteller Qualcomm hat Cohen und Welling kürzlich eingestellt und plant nun, die Theorie der Eich-CNNs zu verwenden, um die Sicht von Drohnen und autonomen Fahrzeugen zu verbessern. Beispielsweise könnte man die Geräte mit einem 360-Grad-Blickfeld ausstatten, so dass sie die Daten auf einer kugelförmigen Oberfläche abbilden, genau wie globale Klimamodelle.

Unterdessen sind Eich-CNNs auch für Physiker wie Cranmer attraktiv. Denn mit ihrer Hilfe lassen sich Simulationsergebnisse subatomarer Teilchen besser auswerten. »Wir analysieren Daten im Zusammenhang mit der starken Kernkraft und versuchen zu verstehen, was im Inneren eines Protons vor sich geht«, erklärt er. Weil die Daten vierdimensional sind, liege ein perfekter Anwendungsfall für die eichinvarianten Faltungsnetzwerke vor, so Cranmer.

Selbst wenn solche Netzwerke Physiker in ihrer Forschung unterstützen können, merkt Cohen an, dass die Programme niemals neue Gesetzmäßigkeiten entdecken werden. »Die Netzwerke können exotische Arten von Daten verarbeiten, aber man muss im Voraus wissen, wie die zu Grunde liegende Struktur aussieht«, sagt er. Physiker können Eich-CNNs verwenden, weil Einstein bereits bewiesen hat, dass sich die Raumzeit als vierdimensionale gekrümmte Mannigfaltigkeit darstellen lässt. Die Algorithmen sind jedoch nicht in der Lage, diese Struktur von sich aus zu erkennen. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/kuenstliche-intelligenz



METAMORWORKS / GETTY IMAGES / ISTOCK

QUELLEN

Bronstein, M. M. et al.: Geometric deep learning: Going beyond Euclidean data. IEEE Signal Processing Magazine 34, 2017

Cheng, M. C. N. et al.: Covariance in physics and convolutional neural networks. ArXiv 1906.02481, 2019

Cohen, T. S. et al.: Gauge equivariant convolutional networks and the icoahedral CNN. Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML), 2019

Winkels, M., Cohen, T. S.: 3D G-CNNs for pulmonary nodule detection. International Conference on Medical Imaging with Deep Learning, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »An Idea From Physics Helps AI See in Higher Dimensions« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



REZENSIONEN



KLIMATOLOGIE EIN KONZISES HANDBUCH ZUM THEMA

Der Meteorologe Mojib Latif erklärt die Mechanismen des anthropogenen Klimawandels und hinterfragt, warum bisher so wenig dagegen unternommen wird.

► Wegen der Covid-19-Pandemie sind derzeit viele drängende Probleme in den Hintergrund geraten. Zu ihnen gehört der menschengemachte Klimawandel, der bis zum Ausbruch der Epidemie – befeuert von der Bewegung »Fridays for Future« – in den Medien sehr präsent war. Viele befürchten, die pandemiebedingte Wirtschaftskrise könnte mittelfristig zu Ausgabenkürzungen in allen möglichen Bereichen führen, einschließlich des Klimaschut-

zes. Der unfreiwillige Lockdown, die damit verbundene massive Ausweitung von Homeoffice und Home-Schooling, sowie die drastisch zurückgegangene Zahl der Flüge und Autofahrten haben andererseits gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, die anthropogenen CO₂-Emissionen sehr deutlich zu senken. Vielleicht führt dies zu einem nachhaltigen Umdenken in Politik und Gesellschaft.

Der bekannte Meteorologe Mojib Latif vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel hat nun dieses leicht verständliche Buch zum Thema vorgelegt. Auf 200 Seiten führt er einschlägige Fakten auf mit der Absicht, sie so zu zeigen, »wie sie sind«, ohne zu beschönigen und ohne zu dramatisieren. Als Buchtitel hat er das Wort des Jahres 2018 gewählt: »Heißezeit« – ein Begriff, der nicht nur

auf den extrem heißen und trockenen Sommer 2018 anspielt, sondern durch die Ähnlichkeit zu »Eiszeit« einen epochalen Bezug bekommt.

Das Buch thematisiert mehr als nur die Ursachen und Folgen des Klimawandels. Diese nehmen lediglich etwa die Hälfte von »Heißezeit« ein, bevor der Autor im zweiten Teil nach den Gründen des Scheiterns, warum Menschen – von Ausnahmen abgesehen – in Sachen Klimaschutz nur schwer dazu zu bewegen sind, ihr Verhalten zu ändern. Als wesentlichen Faktor macht er die Entkopplung von Ursache und Wirkung aus. So machen sich die Folgen des anthropogenen Klimawandels bislang vor allem in solchen Regionen bemerkbar, die besonders wenig zu den klimatischen Veränderungen beigetragen haben – allen voran in den Polargebieten und im Südpazifik. In den wohlha-



Auf dem Weg hin zu einem anderen Planeten: Die internationalen Bemühungen, den menschengemachten Klimawandel zu begrenzen, haben bislang nicht zu greifbaren Ergebnissen geführt. Die Emissionen der Treibhausgase steigen weiter, ebenso deren Konzentrationen in der Atmosphäre sowie die globale Durchschnittstemperatur.

Mojib Latif
HEISSZEIT
Mit Vollgas in die Klimakatastrophe – und wie wir auf die Bremse treten
Herder, Freiburg im Br. 2020
224 S., € 20,-



PIVASET / GETTY IMAGES / ISTOCK

benden, hoch entwickelten Staaten Europas, der USA und China dagegen, die zusammen den weitaus größten Teil der menschengemachten CO₂-Emissionen verantworten, prägen sich die klimatischen Folgen langsam und bisher wenig merklich aus. Gerade diese stehen aber zuvorderst in der Pflicht, der Erschöpfung natürlicher Ressourcen entgegenzuwirken, zumal sie historisch am stärksten vom Raubbau an der Natur profitiert haben. In dem Zusammenhang beleuchtet Latif die organisierte Desinformation, um den menschengemachten Klimawandel zu verharmlosen oder zu leugnen – seit Jahrzehnten finanziell üppig unterstützt von der fossilen Brennstoffindustrie – sowie die Rolle, die Politik, Medien und Social Media dabei spielen.

Die Covid-Pandemie, der Latif ein eigenes Kapitel gewidmet hat, sieht er

als Chance, die Weltwirtschaft grundsätzlich umzustellen, um mehr Fairness zwischen entwickelten und Schwellenländern zu erreichen. Dies solle sich, schreibt er, an Nachhaltigkeitskriterien orientieren; Wachstum und Ressourcenverbrauch müssten entkoppelt und die Energieversorgung umgebaut werden. Der Autor betrachtet die Corona-Krise als eine Art Testfall für künftige krisenhafte Entwicklungen, die aus klimatischen Veränderungen folgen: Sie zeige etwa, wie verletzlich globale Lieferketten sind, wie schnell es bei stockendem Nachschub zu Verteilungskämpfen komme und wie wichtig internationale Zusammenarbeit sei. Zum Schluss spricht Latif konkrete Handlungsempfehlungen aus. So darf Klimaschutz seiner Ansicht nach nicht mehr als Einschränkung dargestellt werden. Dieser eröffne vielmehr den

einzelnen Bürgern wie der Wirtschaft und Gesellschaft insgesamt neue Möglichkeiten.

Mit Blick auf derzeit populistisch regierte Länder wie die USA und Brasilien, aber auch auf China, dem mit einem Anteil von 28 Prozent weltweit größten CO₂-Emittenten, befürwortet Latif eine »Allianz der Willigen«, in der Deutschland vorgehen solle. Seine Empfehlungen fasst der Klimaforscher am Ende des Buchs in einem Zehn-Punkte-Plan zusammen. »Heißezeit« ist ein Appell, dringend in Richtung Nachhaltigkeit umzusteuern, denn »ein kleines Zeitfenster bleibt der Menschheit noch, um das Ruder herumzureißen und eine Klimakatastrophe zu vermeiden.«

Die Rezensentin Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.

ANTHROPOLOGIE WAS DEN MENSCHEN EINZIGARTIG MACHT

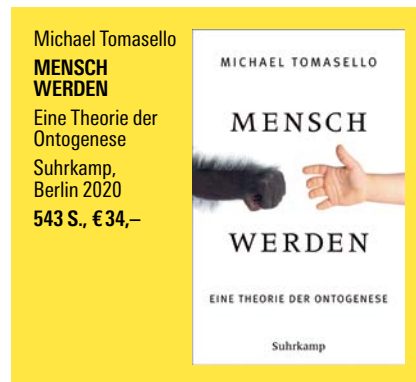
Studien an Affen und Kleinkindern geben Aufschluss über das Zusammenspiel von Genetik und Kultur.

Wie konnte sich der Mensch zu einer Spezies entwickeln, die anders als alle anderen Tiere fortgeschrittene Technologien entwickelt und nutzt, hochkomplexe Sozialstrukturen pflegt und eine außergewöhnliche kulturelle Diversität aufweist? Für den Anthropologen Michael Tomasello liegt die Antwort nicht allein in der Evolution des Genoms, sondern auch in der Ontogenese, also der Individualentwicklung jedes Menschen vom Säugling bis zum Erwachsenen. Neun Jahre lang hat Tomasello als Kodirektor am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig intensiv über Menschenaffen verschiedener Altersstufen sowie über menschliche Kleinkinder geforscht. Dabei hat er detailliert herausgearbeitet, in welchem Alter sich bestimmte kognitive und soziale Fähigkeiten erstmals zeigen, worauf sie aufbauen und worin sich Mensch und Affe unterscheiden.

Das Fazit seiner Arbeiten stellt Tomasello in diesem Werk vor. In einem einleitenden Teil erläutert er Grundlagen der Evolution, Ontogenese und Entwicklungspsychologie. Dabei legt er den Fokus auf die Frage, worin sich Menschen von ihren vormenschlichen Vorfahren unterscheiden und in welchen Umweltfaktoren und Sozialbedingungen das begründet liegt. Eine Basis seiner Ausführungen bilden die Theorien des sowjetischen Psychologen Lew Semjonowitsch Wygotski (1896–1934). Dieser ging davon aus, ein Mensch könne alle einzigartig menschlichen Eigenschaften und Fähigkeiten nur durch soziokulturelle Tätigkeiten erwerben. Tomasello erweitert das durch eine evolutionäre Perspektive: Ihm zufolge erfordert eine normale menschliche Ontogenese sowohl Reifungsprozesse, die auf biologischen Eigenschaften der

Spezies Mensch beruhen, als auch soziokulturelle Erfahrungen.

Der Hauptteil des Buchs dreht sich ausführlich um die Ontogenese der einzigartig menschlichen Kognition und Sozialität. In acht Unterkapiteln geht es um die Entwicklung von sozialer Kognition, Kommunikation, kulturellem Lernen, kooperativem Denken, Zusammenarbeit, Prosozialität, sozialen Normen und moralischer Identität. Den Ausgangspunkt jedes Kapitels bilden die Fähigkeiten von Menschenaffen. Anhand von Verhaltensstudien an Menschenaffen und Kleinkindern, von denen Tomasello viele selbst durchgeführt hat, beschreibt er Gemeinsamkeiten und markante Unterschiede. Beispielsweise können Menschenaffen ebenso wie Kleinkinder durch Imitation lernen. Während aber Kleinkinder ihre Aufmerksamkeit auf die Handlung als solche legen und diese so



exakt wie möglich kopieren, fokussieren sich Menschenaffen auf das Ergebnis und reproduzieren nur dieses, wobei sie Handlungsschritte, die sie als unnötig erachten, auslassen.

Aufbauend auf den geschilderten Studienergebnissen entwickelt Tomasello theoretische Erklärungen, wie es zu den Unterschieden kommen konnte. Das Imitationslernen etwa erfüllt ihm zufolge für Menschen

Der Mensch: eine hyperkooperative Lebensform

nicht nur den Zweck, neue Problemlösungsfähigkeiten zu erwerben. Ebenso wichtig sei es, durch exakte Nachahmung Konformität mit der Gruppe zu signalisieren, um soziale Bindungen zu stärken. In allen Kapiteln geht der Autor außerdem auf individuelle und kulturelle Variationen ein, wobei er sowohl Studien mit Angehörigen anderer Kulturkreise einbezieht als auch Verhaltensexperimente mit autistischen Kindern. Jeder Abschnitt endet mit einem Diagramm, das den zuvor beschriebenen Entwicklungspfad grafisch darstellt.

Im Schlussteil fasst der Autor seine Theorie zusammen. Während er in den vorangegangenen Kapiteln einzelne Mechanismen im Detail beleuchtet hat, integriert er hier die Erkenntnisse in ein Gesamtbild der Ontogenese des Menschen – vom Säugling bis zum Schulkind. Alle entscheidenden Eigenheiten der menschlichen Psychologie haben sich demnach in Anpassung an die »hyperkooperative« Lebensform des Menschen entwickelt. Nur Menschen sind laut Tomasello zu einer Form des gegenseitigen Verständnisses in der Lage, die er als »gemeinsame Intentionalität« bezeichnet. Sie wissen voneinander, dass sie einen gemeinsamen Hintergrund haben, können ihre gemeinsame Aufmerksamkeit auf ein gemeinsames Ziel richten und kooperativ kommunizieren. Die Grundlagen dazu zeigen sich bereits bei Säuglingen, die ihre Bezugspersonen anlächeln oder ihrem Blick folgen und so eine soziale Bindung aufbauen.

Mit seinem Fokus auf die kooperativen Fähigkeiten des Menschen ist das Werk auch über seinen fachlichen Beitrag hinaus gesellschaftlich relevant. Allerdings ist es sehr fachnah geschrieben, so dass das Lesen viel Konzentration erfordert. Die Zielgruppe sind offenbar eher Fachleute als interessierte Laien. Für wissenschaftliche und pädagogische Zwecke stellt Tomasello auf der Website zum Buch mehrere Videos zu zahlreichen Verhaltensexperimenten mit Menschenaffen und Kleinkindern zur Verfügung.

Die Rezensentin Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

GESELLSCHAFT DER AUFGESCHOBENE TOD

Wir leben immer länger – und genießen hoffentlich ein halbwegs beschwerdefreies Alter. Lässt sich die Sterblichkeit technisch überwinden?

► Medizinisch betrachtet sterben wir die meiste Zeit unseres Lebens. Allmählich verschleißten die Zellen unseres Körpers, bis am Ende wichtige Organe versagen. Herz und Kreislauf kommen zur Ruhe, das Gehirn wird nicht mehr mit Sauerstoff versorgt, der Hirntod tritt ein. Falls der Sterbende intensivmedizinische Behandlung erfahren hat, werden nun die technischen Geräte abgestellt. Eventuell entnehmen die Mediziner Organe, die das Leben anderer Patienten verlängern.

Leben und Sterben des Menschen, einst das Natürlichste auf der Welt, unterliegen längst dem Einfluss der Technik. Weltweit wächst die mittlere Lebenserwartung. Gibt es eine prinzipielle Grenze dieser Entwicklung – oder werden unsere Nachkommen irgendwann dem Tod endgültig ein Schnippchen schlagen und Unsterblichkeit erlangen?

Solchen Fragen stellt sich dieser interdisziplinäre Sammelband. Die Beiträge stammen von Medizinern, Juristen, Theologen, Historikern und Kulturwissenschaftlern. Somit stellt das Werk die Lebensverlängerung in einen facettenreichen kulturellen Zusammenhang.

Seit jeher, so geht es aus dem Buch hervor, versuchten die Religionen den Hinterbliebenen Trost zu spenden, indem sie ein Weiterleben nach dem Tod versprachen. Im alten Ägypten wurden die Herrscher mumifiziert und

Hiram Kümper,
Wilfried Rosendahl
(Hg.)

**UNSTERBLICHKEIT
TRAUM ODER
TRAUMA?**

Nünnerich-Asmus,
Oppenheim 2020
152 S., € 20,-



mit Grabbeigaben für die Reise ins Jenseits gerüstet. Christen glauben an eine unsterbliche Seele und hoffen auf die körperliche Wiederauferstehung beim Jüngsten Gericht. Gemäß fernöstlichen Religionen wiederum nimmt die Unsterblichkeit die Form einer endlosen Kette von Reinkarnationen an.

Vor allem im 20. Jahrhundert, nach den Erfahrungen zweier Weltkriege, sträubten sich atheistische und existenzialistische Strömungen gegen alle

Die Spektrum eBookFlat

Mit der **Spektrum eBookFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von zwölf E-Books (PDF-Format) des Sachbuchprogramms von **Springer Spektrum** aus den Bereichen Mathematik und Naturwissenschaften. Jeden Monat wird ein Buch ausgetauscht, so dass Sie im Jahr auf bis zu 24 Bücher zugreifen können. € 99,- im Jahresabo oder € 8,99 im jederzeit kündbaren Monatsabo.



[Spektrum.de/aktion/ebookflat](https://www.spektrum.de/aktion/ebookflat)

Formen religiöser Tröstung. Die Endlichkeit unseres Daseins wurde als dessen Wesenskern begriffen, der Tod zu einem Sinn stiftenden Teil des Lebens erklärt, wie Anna-Katharina Gisbertz darlegt; sie lehrt Neuere deutsche Literaturwissenschaft an der Universität Mannheim. Beispielhaft zitiert sie den Roman »Alle Menschen sind sterblich« von Simone de Beauvoir aus dem Jahr 1946. Die durch einen Zauberspruch unsterbliche Hauptfigur wünscht sich nach einer jahrhundertelangen Irrfahrt durch die europäische Geschichte nur noch, in Frieden zu sterben.

Unterdessen verfolgt die Heilkunst das Ziel, möglichst vielen Menschen ein möglichst langes und gesundes Leben zu gewähren. Alle noch so großen Erfolge der medizinischen Forschung stoßen freilich an biologische Grenzen: Im betagten Organismus häufen sich die Fehler der Zellreplikation und die physiologischen Reparaturmechanismen erlahmen. Welche molekularen Mechanismen dahinterstecken und wie insbesondere die Stammzellforschung dagegen die regenerativen Potenziale des menschlichen Organismus mobilisiert, erläutern Mediziner um Jochen Utecht vom Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg.

Als letzten, utopischen Ausweg malen sich manche Spekulationen ein Umspeichern des biologischen Substrats in gigantische Datenbanken aus, was eine Art digitale Unsterblichkeit garantieren soll. Diese »transhumanistische« Perspektive wird im vorliegenden Band allerdings nicht diskutiert.

Insgesamt geht das reich bebilderte Buch auf überraschend viele Aspekte ein. Es beleuchtet das Thema Unsterblichkeit zwischen Traum und Trauma so aus vielen Perspektiven. Wollte man ein Fazit ziehen, könnte es lauten: lieber ein erfülltes endliches Dasein als eine fade Unsterblichkeit. Wie sagt der Vulkanier Spock vom Raumschiff Enterprise: Lebe lang und erfolgreich!

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker, Kolumnist bei »Spektrum« und Sachbuchautor.

MATHEMATIK 18 GENIALE IDEEN

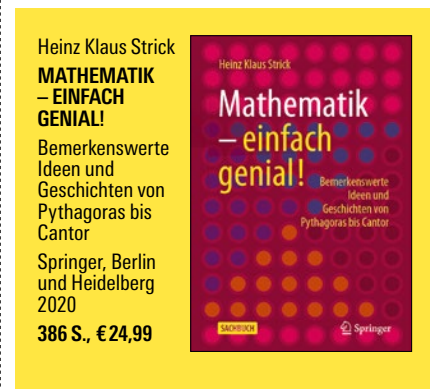
Herausragende Geistesblitze von 18 Personen der Mathematikgeschichte sind das Thema dieses Buchs.

► Da hat der Verfasser mit diesem Buch wieder einen »echten Strick« herausgebracht. Wer eines seiner insgesamt drei Bücher über »schöne Mathematik« kennt, dürfte auch hier wieder ein detailreiches, überaus anschaulich und klar formuliertes Werk erwarten – und wird nicht enttäuscht. Bereits das Layout regt zum genauen Hinschauen an: farbige Grafiken und Zeichnungen, übersichtlich organisierte Tabellen, immer mit unterschiedlichen Farben gegliedert, sowie Textabschnitte, die je nach Typ farblich unterlegt sind. Die Faszination der Mathematik ist das große Thema des Autors, und er demonstriert sie auch anhand von »Kleinigkeiten«, etwa den erstaunlich vielen Abbildungen von Briefmarken, die im Text eingestreut sind und aus denen hervorgeht, welche Bedeutung der Mathematik in verschiedenen Ländern zukommt.

Jedes der 18 Kapitel ist einem Mathematiker gewidmet. Die Auswahl beginnt mit der griechischen Antike und zwei berühmten Namen (Pythagoras, Archimedes), die vielen aus der Schule bekannt sein dürften. Aus dem Mittelalter – dem Rezensenten in Sachen Mathematik bisher eher als »finster« bekannt – werden fünf herausragende Mathematiker vorgestellt; alle kommen aus dem arabisch-persischen Raum. Hierin zeigt sich, dass die arabisch-islamische Forschung den Wissensschatz der Antike übernommen, weiterentwickelt und schließlich ins mittelalterliche christliche Europa transferiert hat. Deshalb gehörten hier Italiener zu den Ersten, die die Mathematik voranbrachten; mit ihnen befasst sich der Autor daher als Nächstes, bevor er zehn weitere bedeutende Persönlichkeiten vorstellt, bei denen es sich um Engländer, Franzosen und Deutsche handelt.

Alle Kapitel können voneinander unabhängig gelesen werden, und da

sie konsequent in derselben Weise gegliedert sind, lassen sich sogar einzelne ihrer Unterabschnitte herausgreifen und miteinander in Beziehung setzen. So enthält der jeweils zweite Abschnitt stets eine kurz gefasste Lebensgeschichte der Person, um die es gerade geht. Dadurch kann man sich schnell über die biografischen Daten verschiedener Protagonisten informieren, etwa Descartes, Fermat und Pascal, die in derselben Zeit gelebt und miteinander korrespondiert haben.



Die zum Verständnis der Mathematik notwendigen Vorkenntnisse gehen, wie schon im Vorwort betont, nur selten über schulische Kenntnisse der Oberstufe hinaus. Und falls doch, gibt der Autor – etwa beim Thema »Kettenbrüche« – etwas ausführlichere Beispiele. Wie überhaupt die Argumentation stets beispielesgebunden erfolgt und nicht etwa in Form abstrakter Beweise.

Der erste Abschnitt eines jeden Kapitels präsentiert, dem Buchtitel folgend, unter dem Stichwort »einfach genial« eine zentrale Idee, die ein bestimmtes mathematisches Problem auf völlig neue Weise zu lösen erlaubt. So entwickelten Pythagoras und seine Schüler die überaus anschauliche Idee der figurierten Zahlen: Punktmuster stellen einfache zahlentheoretische Zusammenhänge überzeugend dar und reichten den »alten« Griechen als Beweis völlig aus.

Genial mutet auch die Methode an, mit der es der persische Mathematiker Omar Khayyam (1048–1131) mit Hilfe von Kegelschnitten schaffte, Gleichun-

gen dritten Grades zu lösen – Jahrhunderte bevor der italienische Mathematiker Niccolò Tartaglia (1499–1557) eine Lösung mit Hilfe geometrischer Anschauung fand, wobei er die Methode des choresmischen Universalgelehrten al-Khwarizmi (9. Jahrhundert) für quadratische Gleichungen verallgemeinerte. Die Bewunderung für diese kreativen Ansätze wird umso größer, wenn man sich klarmacht – wie vom Autor immer wieder angeregt –, dass damals nicht die uns heute vertraute mathematische Formelsprache existierte.

Interessant ist, zu erfahren, welche Lösungsansätze es vor Leibniz und Newton für Aufgaben der Differenzial- und Integralrechnung gab – und spannend, diese Ideen zu vergleichen. So stellt der Autor für die Berechnung von Flächeninhalten Methoden von Archimedes (Exhaustionsprinzip),

Fermat und Pascal vor und beschreibt für das Tangentenproblem Lösungen von Descartes und Fermat.

Über die »genialen Ideen« hinaus führt Strick im dritten Abschnitt jedes Kapitels weitere Themen auf, mit denen sich die jeweiligen Mathematiker beschäftigt haben. Er zieht dabei häufig Verbindungen zu den Vorarbeiten anderer Wissenschaftler und ordnet deren Bedeutung historisch ein. Dabei gelingt ihm eine insgesamt großartige Zusammenstellung vieler höchst bedeutender mathematischer Entdeckungen.

Nicht verwunderlich ist es, dass Euler, »zweifelsohne der produktivste Mathematiker aller Zeiten«, mehr Buchseiten beansprucht als alle anderen behandelten Personen. Allerdings überrascht mich, dass die Wahl für dessen geniale Lösung auf das so genannte Basler Problem (Bestimmung des Grenzwerts der Reihe der

reziproken Quadratzahlen) fiel – hat doch gerade Euler sehr viele Entdeckungen gemacht, die bekannter und für mich beeindruckender sind.

Nicht unerwähnt bleiben darf die Liste der Literaturhinweise, die jedem Kapitel angefügt sind. Meist noch mit einem kurzen Kommentar versehen, nennt der Autor Buch- und Internetquellen, insbesondere auch passende Stichworte zu Wikipedia-Artikeln.

Die Auswahl der in diesem Buch vorgestellten 18 genialen Ideen ist dem Verfasser sicher schwergefallen, kommen mir doch spontan viele weitere bedeutende Namen in den Sinn wie Euklid, Leibniz, Newton, Gauß, Riemann oder Hilbert. Da kann man sich hoffentlich auf einen Folgeband freuen.

Der Rezensent Hartmut Weber war Mathematiklehrer in Kassel und rezensiert regelmäßig für die Deutsche Mathematiker-Vereinigung.

Spektrum PLUS⁺

Ihre Vorteile als Abonnent

Exklusive Extras und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

- ▶ Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**
- ▶ Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von Partnern zum Vorteilspreis
- ▶ **Digitales Produkt** zum kostenlosen Download und weitere Vorteile:

Download des Monats im August: Spektrum Kompakt »Tiere on Tour«

Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Reduzierte Digitalpakete »Exoplaneten«, »Frauen« sowie »Drogen«

Weitere Informationen und Anmeldung:

[Spektrum.de/plus](https://www.spektrum.de/plus)

GESCHICHTE SPAZIERGANG DURCH DAS 16. JAHRHUNDERT

Historiker Ian Mortimer nimmt sein Publikum mit in die Zeit William Shakespeares.

Um es gleich vorwegzunehmen: William Shakespeare spielt in diesem Buch keine große Rolle. Der englische Star-Dramatiker nimmt hier für die deutsche Leserschaft eher die Rolle des prominenten Testimonials ein, verkörpert und verbildlicht er doch wie kein Zweiter das 16. Jahrhundert im englischen Königreich. Und doch trägt Buchautor Ian Mortimer, promovierter Historiker, mit diesem Werk enorm zum Hintergrundverständnis von Shakespeares Werk bei.

Mortimer widmet sich in seinem »Handbuch für Zeitreisende ins elisabethanische England« – so der wörtlich übersetzte Originaltitel – nicht etwa den großen politischen Momenten, Zusammenhängen und Entwicklungen in England unter Elisabeth I. Er legt auch keine historische Abhandlung vor, die ausschließlich Mächtige in den Fokus nimmt.

Die direkte Ansprache der Leser erweist sich als äußerst charmant

Vielmehr schreibt er Sozialgeschichte und konzentriert sich auf das Alltagsleben der Menschen. Dabei spart er kaum einen Lebensbereich und keine soziale Klasse aus. In drei einführenden Kapiteln zur Geografie, zur Bevölkerungsstruktur und zu Glaubensfragen gibt er zunächst einen Überblick über den damaligen Zustand des Landes. Hier wird deutlich, wie die Königin als herausragende Persön-

lichkeit ihrer Zeit das politische, wirtschaftliche und religiöse Geschick ihres Landes prägte – und das, obwohl Frauen in dieser Zeit keine juristischen Ämter ausfüllen durften.

Diese einführenden Abschnitte legen den Grundstein für den zweiten Teil des Buchs, der sich mit ganz verschiedenen Lebensbereichen beschäftigt – von Ernährung, Wohnen und Kleidung über Hygiene und Medizin bis zum Rechtssystem sowie künstlerischen und spielerischen Aktivitäten. Unter anderem beschreibt Mortimer die Menüs während eines festlichen Dinners; präsentiert modische Accessoires wie die Halskrause; informiert darüber, für welche Verbrechen man am Galgen landete; schildert, was die Inselbewohner über ihre Nachbarn auf dem Kontinent dachten und womit sich die Engländer dieser Zeit den Po abwischten. Über den damaligen Stand der Technik und angewandten Wissenschaften informieren beispielsweise einige Seiten zum Buchwesen und zur Seefahrt. Prominente Vertreter der Zunft wie Sir Francis Drake dienen hierbei zur Veranschaulichung. All das und vieles mehr behandelt der Autor in kurzen und prägnanten Kapiteln.

Ausschlaggebend ist die Idee, das Buch als Reiseführer zu konzipieren. Mortimer hat dieses Format bereits für das Mittelalter ausprobiert (siehe Spektrum September 2014, S. 92) und diesem Band einen weiteren über die »Stuart-Restauration« im 17. Jahrhundert folgen lassen, der bisher nur in Englisch vorliegt. Zwar mutet die direkte Ansprache der Leser anfangs etwas gewöhnungsbedürftig an, vor allem wenn es um allgemeinere politische Betrachtungen geht. Bei den kleinteiligen Alltagsthemen jedoch stellt sich das als äußerst charmant heraus. Mortimer geleitet sein Publikum durch ein Land im Aufbruch und vermittelt auf sehr persönliche Weise, wie bedeutsam die zweite Hälfte des 16. Jahrhunderts für die Entwicklung des englischen Königreichs war. Für jeden Fakt hat der Historiker ein passendes Beispiel parat und blättert so die

Lebenswelten diverser sozialer Schichten auf. Hier und da fallen dieser Vorgehensweise einige Differenzierungen zum Opfer, etwa wenn der Autor sich an menschlichen Kategorien wie Humor und Stolz der Zeitgenossen versucht; aber als Leser ist man sich des anekdotischen Charakters solcher Abschnitte meist bewusst.



Geschickt ausgewählte Zitate aus zeitgenössischen Quellen – vom Haushaltsbuch bis zum Reisebericht –, Statistiken, amüsante Geschichten und eindruckliche Einzelschicksale bieten den Lesern Abwechslung und zugleich eine geschichtswissenschaftliche Grundlage. Fußnoten mit den entsprechenden Angaben laden zum Vertiefen ein. Gerade diese verschiedenen Zugänge machen das Buch zu einer farbenfrohen und unterhaltsamen Wanderung durch die Epoche.

»In der Geschichte geht es eigentlich nicht um die Vergangenheit, sondern um das Verständnis der Menschheit in den Läufen der Zeit«, schreibt Mortimer in den Schlussbetrachtungen und begründet seinen Ansatz für das Buch. Und dann ergibt es doch wieder Sinn, dass Shakespeare als Galionsfigur dem Buch voransteht. »Seine Werke sind einfach der größte Schritt, der jemals auf dem Weg zum Verständnis der *Conditio humana* gemacht worden ist. Diesen Weg gehen wir immer noch.«

Der Rezensent Sebastian Hollstein ist Wissenschaftsjournalist in Jena.

LESERBRIEFE

NOCH KEIN BEHÄLTERKONZEPT

In der Schweiz wird untersucht, ob sich eine besondere Gesteinsart namens Opalinuston für ein Atommüll-Endlager eignet. (»Sicher für eine Million Jahre?«, »Spektrum« August 2020, S. 54)

Christian Herold, Berlin: Sie schreiben, während die Schweizer das Material ihrer Behälter derzeit noch offenlassen, hätten sich »die Deutschen bereits für Stahl entschieden«. Doch es gibt für Deutschland noch keine Materialwahl. Dies ist derzeit Gegenstand von Forschungsarbeiten, an denen ich selbst beteiligt bin – weswegen es mir wohl überhaupt nur auffiel. In Berichten der letzten Jahrzehnte sind vor allem verschiedene Endlagerkonzepte in den potenziellen Wirtsgesteinen erdacht, berechnet und bewertet worden. Da die Behälterentwicklung dort nicht im Mittelpunkt stand, wurde meist auf die während der Forschungsarbeiten im Erkundungsbergwerk Gorleben erarbeiteten Konzepte zurückgegriffen, die auf Stahl basieren. Für das zukünftige Endlager sind Adaptationen allerdings ebenso denkbar wie komplette Neuentwicklungen.

DRAMATISCHE BAUMSCHÄDEN

Forstwissenschaftler **Andreas Bolte** beurteilte mögliche Auswirkungen der globalen Erwärmung. (»Der große Waldumbau«, »Spektrum« September 2019, S. 18)

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbriefe@spektrum.de. Oder kommentieren Sie im Internet auf Spektrum.de direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

Dietrich Klingmüller, Bonn: Den interessanten Bericht sollte man zum besseren Verständnis um Daten zum Ausmaß des Waldsterbens ergänzen. Beispielhaft sind die Waldzustandsberichte der Länder, die als Indikator des Baumzustands die Kronenverlichtung benutzen. So waren 2019 in Nordrhein-Westfalen 81 Prozent aller Bäume geschädigt. Ähnlich dramatische Zustände herrschen in Brandenburg, wo sich die Arbeitsstätte des Autors befindet. Dort sind nur noch 14 Prozent aller Bäume gesund. Dies widerspricht den Angaben von Herrn Bolte, dass nur fünf Prozent des Walds – allerdings in ganz Deutschland – geschädigt sind. Im April nannte er in einem Interview im WDR 5 noch zwei Prozent. Der Waldzustandsbericht zeigt: Seit Beginn der Aufzeichnungen 1984 weisen zunehmend alle Baumarten Schäden auf. Das Waldsterben ist ein kontinuierlicher Prozess. Es kommt nicht aus heiterem Himmel, sondern ließ sich absehen.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinkelmann, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzungen: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Ingrid Horn

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-, PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio), des VCBG und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 41 vom 1.1.2020.

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form 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: © 2020 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Laura Helmuth, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Floreck, Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



Angereichert

Ein Arztbesuch mit Folgen. Eine Kurzgeschichte von Karsten Kruschel

Nein, er ist nicht verhaltensoriginell, er ist ein Radaubruder und Vandal«, sagte Herr Perlmann und wies auf die Szene hinter dem Einwegspiegel. Dort war zu sehen, wie sein Sohn Torben-Kevin die Sprechstundenhilfe anbrüllte. Zu hören war nichts, denn der Raum war gut isoliert.

»Das ist ein Sprachgebrauch, den wir nicht mehr ...«, sagte Dr. Geyer, aber der erboste Vater unterbrach ihn. »Außerdem ist er ein Tierquäler und Schläger, natürlich nur, wenn es um Kleinere und Schwächere geht. Sowohl bei Tieren als auch bei Menschen. Er hat sich mit beiden Füßen auf einen lebenden Igel gestellt und sich angeschaut, wie die Innereien herausquellen, zum Teufel!«

Der Kinderarzt ließ seinen Blick von dem lautlos kreischenden Teenager zu dessen Vater wandern. Im Grunde genommen unvorstellbar, dass ein so vernünftig wirkender Vater mit einem solchen Ekelpaket von einem Sohn geschlagen worden war.

»Und bitte keine Sprüche über seine idiotischen Vornamen«, sagte Herr Perlmann, der sichtlich Mühe hatte, sich zu beruhigen. »An denen ist meine erste Frau schuld. Vermutlich ist sie genau deswegen ein paar Jahre später von diesem zugekifften Fahrradkurier überfahren worden. Strafe Gottes oder so.«

»Nach unseren Erfahrungen sind es oft Fehler in der Erziehung ...«, setzte Dr. Geyer neu an, aber der verzweifelte Vater unterbrach ihn.

»Jetzt fangen Sie nicht auch noch damit an«, sagte Herr Perlmann grimmig. »Der Bengel hat jeden einzelnen Lehrer an seiner Schule – und vor allem die Lehrerinnen – mit so vielen Schimpfworten und unflätigen Ausdrücken belegt, dass ich allein aus den Besprechungsprotokollen bei der Schulleitung ein Buch zusammenstellen könnte.« Er atmete tief durch. »Einige dieser Beleidigungen kannte ich nicht einmal. Ach ja, und es laufen noch mehrere Ermittlungsverfahren gegen Torben-Kevin, alles Körperverletzungen auf dem Schulhof.«

Herr Perlmann schaute den Arzt unglücklich an. »Muss ich noch erwähnen, dass sämtliche Opfer mindestens drei Jahre jünger waren als er?«

»Nun, Herr Perlmann«, lenkte Dr. Geyer vom Thema ab, »ich habe Sie und Ihren« – er verschluckte die Worte Plagegeist, Idiot und Heimsuchung – »Sohn heute hierherbestellt, weil wir auf die Ergebnisse der jüngsten Untersuchungen warten. Wir haben ja zum Glück seit kurzer Zeit einige neue Möglichkeiten. Es sollte jeden Moment so weit sein, dass wir ...«

Der missratene Sohn hinter dem Einwegspiegel zeigte der Sprechstundenhilfe die Stinkefinger beider Hände und war offenbar zu gröberen Beleidigungen übergegangen,

denn die Sprechstundenhilfe lief knallrot an und rannte aus dem Raum, wobei sie die Tür kraftvoll zuknallte.

Es gab ein ploppendes Geräusch, und eine unterarmgroße Metallhülse landete im Posteingangskorb auf Dr. Geyers Schreibtisch.

»Ah, die Rohrpost«, sagte er stolz und schraubte den Behälter auf. »Sehr viel besser als E-Mails. Weniger Spam.« Dann überflog er die Inhalte der darin zusammengerollten Blätter, während Herr Perlmann kopfschüttelnd beobachtete, wie Torben-Kevin weitertobte. Wo kam all das Randalieren und all die Gewalt nur her, fragte er sich wohl zum 300. Mal.

Es war, als lebe im Inneren dieses immer noch kindlichen Gehirns ein wütender, fieser Dämon, der unvermittelt und völlig unvorhersehbar mal stillhielt – und dann von einer Sekunde auf die nächste die Macht über den Jungen gewann. Dieser verwandelte sich dann sofort in einen Kotzbrocken, eine Arschkrampe oder eine Kackbratze – so wurde Torben-Kevin von seinen Mitschülern genannt.

Nach ein paar Minuten fiel Herrn Perlmann auf, wie still Dr. Geyer geworden war. Er drehte sich um und schaute zu, wie der Arzt Blätter auf dem Schreibtisch ausbreitete, die mit schillernden Hologrammen versehen waren. Der Gesichtsausdruck des Mediziners gefiel Herrn Perlmann ganz und gar nicht.

»Was?«, fragte er, und seine Stimme klang etwas wacklig.

»Sie kennen das Mikroplastik-Problem?« Es war keine Frage, sondern eine Feststellung.

»Natürlich. Das Zeug ist überall. Im Essen, im Wasser, in der Luft und in den Tasty Nuggets.«

»Und in jedem von uns«, ergänzte Dr. Geyer. »Wenn es sich – beispielsweise – im Gehirn anreichert, kann es das Verhalten beeinflussen. Sind ja schließlich alles körperfremde Substanzen. Zerfallende Polymere und allerlei kaum erforschte Zusatzstoffe, die sich im menschlichen Körper zu unvorhersehbaren chemischen Cocktails entwickeln.«

Herr Perlmann öffnete den Mund, klappte ihn wieder zu und sah hinüber zu Torben-Kevin hinter der Glasschei-

Es war, als lebe ein fieser Dämon im Inneren des Kindes

Im Grunde war es unvorstellbar, dass ein so vernünftiger Vater solch ein Ekelpaket als Sohn hatte

be, der immer noch die klinkenlose Tür anbrüllte, hinter der die Sprechstundenhilfe verschwunden war.

»Und bei ihm ...?«, flüsterte der Vater.

Dr. Geyer hatte das hologrammgespickte Papier in eine Halterung gespannt, und dünne Finger aus Licht, leise knisternd, schrieben irgendetwas darauf. Der Laser ließ etwas Rauch aufsteigen. So wurden heutzutage gerichtsfeste juristische Dokumente verfasst – die Zeit der Aktenordner war vorbei.

»Alle Grenzwerte sind überschritten«, sagte der Arzt bedauernd. »Aber wirklich alle. Deutlich. Da greifen nun diese neuen Gesetze.«

Herr Perlmann sackte ungefragt in den Besuchersessel.

»Ab einem gewissen Anteil von Plastik in seinem Gehirn gilt jemand nicht mehr als menschlich, weil einfach keine normalen Reaktionen mehr möglich sind. Das hat Folgen.«

Der fiese Dämon, dachte Herr Perlmann.

Die Laser bearbeiteten nun schon das zweite Blatt mit Hologrammen.

»Hier werden«, sprach Dr. Geyer weiter, »die amtlichen Dokumente hergestellt, die nötig sind – das geht heute ja sehr viel schneller als früher. Von jetzt an, Herr Perlmann, sind Sie wieder kinderlos, und die Existenz eines Menschen namens Torben-Kevin Perlmann ist beendet.«

»Aber ...«, versuchte der Vater einzuwerfen, doch Dr. Geyer ließ ihm keine Möglichkeit dazu.

»Er wird ab heute nie wieder eine Schule betreten, denn mikroplastiküberverseuchte Hirne benötigen keinerlei Bildung. Sein Nutzerkonto in seiner Schule – wo er ja ohnehin kaum regelmäßig aufgetaucht ist – wurde soeben gelöscht, ebenso wie all seine Accounts in den sozialen Netzwerken, bei allen Online-Händlern und bei den 26 Internet-Pornoanbietern. Sein Smartphone wurde per Eilverfügung deaktiviert und seine drei Mobilfunkverträge gekündigt.«

Herr Perlmann Gedanken rasten. Drei Mobilfunkverträge? 26 Pornoanbieter?

»Die nächste Kindergeldzahlung wird natürlich ebenfalls ausbleiben, und sogar die Geburtenregister wurden bereits bereinigt.«

Durch die Scheibe war zu sehen, wie die Sprechstundenhilfe, immer noch hochrot im Gesicht, in den Raum zurückkehrte, ein handliches Gerät erhob und Torben-Kevin in die Bewusstlosigkeit elektroschockte. Mit einem Gesichtsausdruck tiefster Befriedigung blickte sie hinab auf den krampfenden Teenager, der sich auf dem Fußboden wand und seine teure Designerjeans einnäste.

Herr Perlmann sprang auf. »Hat die gerade meinen Sohn getasert?!«, brüllte er.

Dr. Geyer seufzte. »Sie haben keinen Sohn«, erklärte er ruhig. »Nicht mehr. Sie haben stattdessen ein ganz anderes Problem.«

Fragend schaute er den Doktor an, nur mühsam unterdrückte er seine Erregung. »Ja?«

»Bei einem derart hohen Grad der Mikroplastiküberverseuchung liegt der Verdacht nahe, dass bereits in der Keimbahn der Eltern eine ebensolche vorlag«, sagte Dr. Geyer und riss eine Plastikverpackung auf.

»Deswegen werden wir als Nächstes eine Hodenpunktion beim anwesenden Erzeuger des Falles vornehmen müssen. Danach wird gegebenenfalls das betreffende Organ entfernt werden müssen.«

Es war eine lange, blitzende Nadel, die der Arzt nun in der Hand hatte.

Herr Perlmann presste beide Hände in den Schritt und sah sich verzweifelt um.

Hinter dem Einwegspiegel sah er, wie die Sprechstundenhilfe Torben-Kevin an beiden Füßen aus dem Raum schleifte, dessen Körper dabei eine feuchte Spur auf dem Fußboden hinterließ.

Was ihm jetzt erst auffiel: Auch die Tür des Sprechzimmers hatte auf der Innenseite keine Klinke.

Und auf dem Laser-Schreibgerät für amtliche Dokumente lag bereits das nächste hologrammgespickte Dokument bereit. ◀

DER AUTOR

Karsten Kruschel lebt als Schriftsteller in der Nähe von Leipzig und veröffentlicht Sciencefiction-Romane, Kurzgeschichten, Kritiken und Essays. Er gewann mehrfach den Kurd-Laßwitz-Preis und den Deutschen Sciencefiction Preis.

VORSCHAU

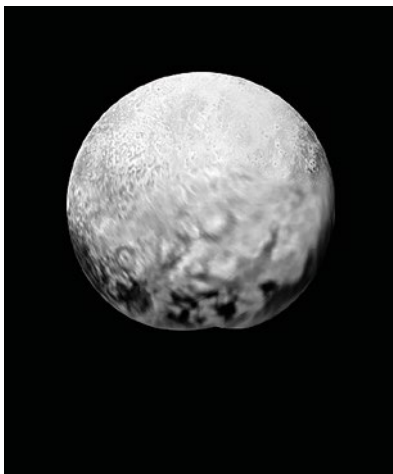


GIGANTEN DER LÜFTE

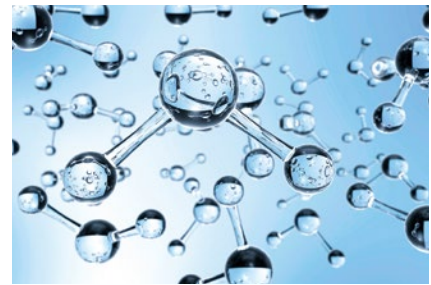
Pterosaurier waren die ersten Wirbeltiere, die aktiv fliegen konnten – 80 Millionen Jahre vor den Vögeln. Während ihrer Vorherrschaft im Erdmittelalter erreichten sie riesige Ausmaße. Wie schafften es die Riesen, den Luftraum zu erobern? Und warum mussten sie am Ende der Kreidezeit wieder abtreten? Neu entdeckte Fossilien geben überraschende Einblicke in das Leben der Herrscher des Urzeithimmels.

PLUTOS DUNKLE SEITE

Als vor fünf Jahren erstmals eine Sonde an Pluto vorbeiflog, gingen die Bilder um die Welt: Sie zeigen eine verblüffend vielseitige Welt, die geologisch noch immer aktiv zu sein scheint. Nun haben Wissenschaftler auch jene Aufnahmen gesichtet, die Tage vor dem Vorbeiflug entstanden sind. Auf ihnen sind Ansichten von Plutos Rückseite zu sehen, die den Zwergplaneten noch rätselhafter und faszinierender machen.



MASA JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY/SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE



EMILIA RANDI/ISTOCK / GETTY IMAGES / ISTOCK

DIE ZWEI GESICHTER DES WASSERS

Wasser verhält sich anders als die meisten Stoffe. Möglicherweise liegt das an einem Nebeneinander zweier molekularer Ordnungen. Neue Daten scheinen die Idee zu stützen – doch unter Experten bleibt sie umstritten.



WHITZY2 / GETTY IMAGES / ISTOCK

HABEN BIOKUNSTSTOFFE EINE CHANCE?

Kompostierbare Mülltüten und Polyethylen-Verpackungen aus Zuckerrohr haben chemisch nichts gemeinsam. Trotzdem zählen beide zu den »Biokunststoffen«. Im Interview diskutieren die Polymerforscher Frederik Wurm und Hans-Josef Endres über den Sinn und Unsinn von biologisch abbaubarem und biobasiertem Plastik.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserexkursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/abo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WÖCHE

NR **34**
22.08.
2020

- > Türkische Politiker wollen Pergamonaltar zurückfordern
- > Die älteste Matratze der Welt
- > Smartphones können erkennen, wann wir angetrunken sind

TITELTHEMA: PSYCHISCHE STÖRUNGEN

»Biologisch gesehen gibt es die psychiatrischen Diagnosen nicht«

In der Psychiatrie denke man noch immer in Schubladen, sagt Anke Hammerschlag von der Universität Amsterdam. Doch laut ihrer Forschung verbergen sich hinter verschiedenen psychischen Erkrankungen oft dieselben Gene, und die Störungen bilden große Cluster.

SONNENSYSTEM
Plutos dunkle Seite

SARS-COV-2 IN NEUSEELAND
»Wir dachten, wir hätten das Virus besiegt«

ANHEDONIE
Keine Lust

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

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 €.

www.spektrum.de/abonnieren

