

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

NEUE WAFFEN
GEGEN KREBS

Impfstoffe und
andere Immun-
therapeutika

MÄRZ 2012

KUNSTSTOFFE

Materialien, die sich
selbst reparieren

ERNÄHRUNG

Wann kommt das Schnitzel
aus der Retorte?

SKLAVEREI

Schwarze Leibeigene bei
den Cherokee-Indianern

Schwarze Löcher: Auftritt der Mittelgewichte

Astronomen entdecken
einen neuen Typ der
Gravitationsmonster

7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Besondere Fragen, besondere Texte

Wenn ich unterwegs bin und Vorträge halte, sprechen mich regelmäßig zwei Typen von Zuhörern an. Man könnte sie holzschnittartig in »die Jüngeren« und »die Älteren« unterteilen; Erstere wollen etwas erhalten, Letztere etwas geben. Die Älteren sind Wissenschaftler. Sie fragen mich, ob »Spektrum« nicht einmal über dieses oder jenes spannende Thema berichten wolle, gern könnten sie Informationen schicken oder selbst in die Tasten greifen. Diese Art der Themen-»Findung« funktioniert freilich nur in Ausnahmefällen; die meisten so an die Redaktion herangetragene Beiträge fallen bei näherer Betrachtung in der wöchentlichen Konferenz durch. Die jungen Menschen, die mich ansprechen, stellen hingegen eine ganz andere Frage: Wie wird man Wissenschaftsjournalist? Die Antwort ist einfach und komplex zugleich: Einen Königsweg gibt es nicht. Woraufhin ich für gewöhnlich etwas aushole. In den Redaktionen unseres Verlags arbeiten insgesamt rund 20 Redakteure. Jeder von ihnen hat ein Universitätsstudium absolviert – Mathematik, Chemie, Archäologie oder ein anderes Fach –, die meisten Redakteure sind sogar promoviert und haben selbst wissenschaftlich gearbeitet. Doch das ist es auch schon mit den Gemeinsamkeiten. Den Einstieg in den Journalismus fanden die Kollegen auf sehr unterschiedliche Weise, von Volontariaten bei Tageszeitungen über Fernstudiengänge zum Fachzeitschriftenredakteur bis hin zu Quereinstiegen durch Redaktionspraktika. Seit einigen Jahren gibt es zudem an einzelnen Hochschulen die Möglichkeit, gleich nach dem Abitur ein Vollstudium »Wissenschaftsjournalismus« anzutreten. Doch egal, welchen Weg man wählt: Das Wichtigste für angehende Wissenschaftsjournalisten ist, viel von Forschung zu verstehen *und* reichlich redaktionelle Erfahrung zu sammeln.

Um jungen Interessenten genau das zu ermöglichen, bieten auch die Zeitschrift »Spektrum der Wissenschaft« und die Onlineredaktion von Spektrum.de Praktika an. Unsere Praktikanten werden mehrere Monate lang in sämtliche Tätigkeiten des Redakteursalltags eingeführt: recherchieren, Interviews führen, Artikel schreiben, die Manuskripte anderer Autoren bearbeiten, Bebilderungsideen entwickeln und vieles andere mehr. Dabei ermuntern wir die »Kollegen auf Zeit«, möglichst viele eigene Arbeitsproben anzuhäufen. Denn diese zählen bei Bewerbungen in der Medienwelt mehr als die Note der Doktorarbeit. Und so kommt es, dass Sie, liebe »Spektrum«-Leserinnen und -Leser, regelmäßig Texte unserer Praktikanten lesen – oft womöglich ohne dies zu bemerken. Daher möchte ich Ihre Aufmerksamkeit in diesem Heft einmal gezielt auf die Beiträge »Die Vorteile der Sterblichkeit« (S. 14) sowie »Cherokee als Sklavenhalter« (S. 54) lenken. In beiden Fällen sind die Autoren ehemalige »Spektrum«-Praktikanten. Dr. Janina Fischer ist Chemikerin, Julian Willuhn Historiker; über die Unterdrückung schwarzer Sklaven durch die Cherokee forschte er vor seinem Wechsel in den Journalismus selbst.

Eine gute Lektüre wünscht Ihr

Carsten Könneker

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Biotechnologe **Eric von Hofe** entwickelt neue Krebstherapien, die ähnlich wie Impfungen wirken. Sie sollen das Immunsystem dazu bringen, Tumorzellen zu vernichten (S. 24).



Die junge Astrophysikerin **Jenny E. Greene** ist eine Pionierin bei der Suche nach großen Schwarzen Löchern im Herzen von Galaxien. Dabei entdeckte sie eine neue Klasse dieser Objekte: solche, die auf dem Weg zu einem supermassereichen Schwarzen Loch auf halber Strecke »verhungern« (S. 38).



Scott R. White (links), Professor für Luft- und Raumfahrttechnik an der University of Illinois in Urbana-Champaign, und **Benjamin J. Blaiszik**, Postdoc am Argonne National Laboratory in Lemont, entwickeln Werkstoffe, die sich wie biologische Systeme selbst reparieren können (S. 82).



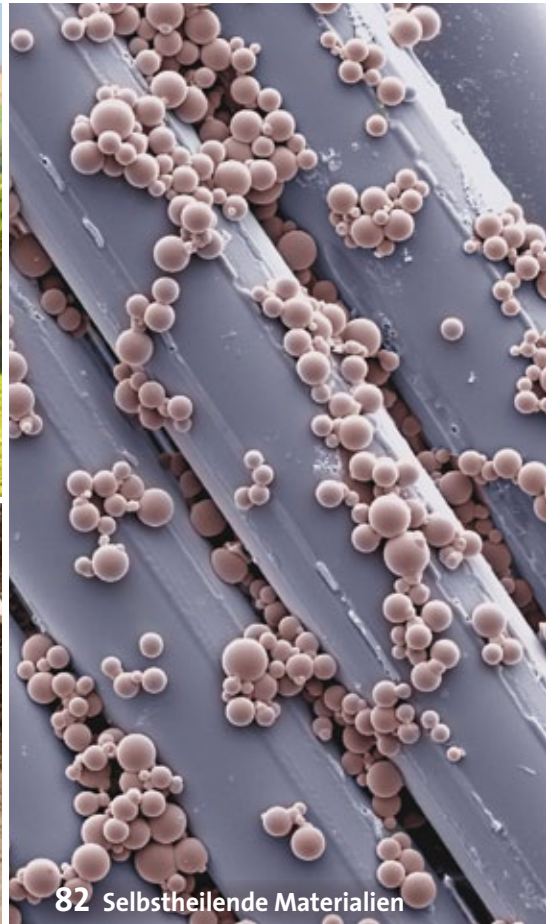
24 Impfen gegen Tumoren



68 Biokraftstoffe



54 Cherokee als Sklavenhalter



82 Selbstheilende Materialien

BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

► 24 Immuntherapie gegen Krebs

Eric von Hofe

Manipulierte Immunzellen könnten den Kampf gegen bösartige Tumoren unterstützen. Ein erster solcher Krebsimpfstoff wurde kürzlich in den USA zugelassen

► 32 Steak aus der Retorte?

Jeffrey Bartholet

Wie lässt sich der wachsende Fleischhunger der Weltbevölkerung befriedigen, ohne den Planeten zu Grunde zu richten? Für einige Forscher lautet die Antwort: Muskelgewebe züchten – in der Petrischale!

TITELTHEMA

► 38 Mittelgewichte unter den Schwarzen Löchern

Jenny E. Greene

Mit fast einer Million Sonnenmassen beeinflussen diese Schwerkraftmonster das Schicksal ganzer Galaxien

INTERVIEW

48 Antirealistischer Querdenker

Der Pionier der Stringtheorie Leonard Susskind bezweifelt, dass wir die Realität jemals erkennen können

SCHLICHTING!

52 Lange Winter, lange Zapfen

H. Joachim Schlichting

Bei genauem Hinsehen zeigt sich, dass selbst ein einfacher Eiszapfen noch Geheimnisse birgt

► 54 Cherokee als Sklavenhalter

Julian Willuhn

Um in der Welt der Weißen zu überleben, setzten auch manche Indianer auf die Sklaverei

INTERVIEW

58 »Mehr als nur Büffel jagende Nomaden«

Der Historiker Gilles Harvard über nordamerikanische Indianer

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

61 Die Bilunabirotunda

Norbert Treitz

Ein merkwürdiges Polyeder vermittelt zwischen Würfeln und Dodekaedern in einer periodischen Raumfüllung

Schwarze Löcher

Astronomen entdecken einen neuen Typ der Gravitationsmonster



ERDE & UMWELT



SERIE: DIE ZUKUNFT DER ENERGIE



68 Tank gegen Teller

Duncan Graham-Rowe

Ackerfrüchte werden in Kraftstoff umgewandelt, bei steigenden Lebensmittelpreisen. Wie entschärfen wir diesen Konflikt?

74 Kein Zuckerschlecken

Katharine Sanderson

Verholzte Pflanzenreste wären eine ideale Quelle für Biokraftstoffe der zweiten Generation

78 Grünes Benzin?

Neil Savage

Treibstoff aus Biomasse muss billig sein und genügend Energie speichern – sonst ist er am Markt chancenlos

TECHNIK & COMPUTER

▶ 82 Selbstheilende Materialien

Scott R. White und Benjamin J. Blaiszik

Wenn Werkstoffe versagen, müssen sie kostspielig ausgetauscht werden. Wäre es da nicht besser, sie könnten sich wie biologische Systeme selbst reparieren? Bei Kunststoffen ist das möglich und im Labor schon mit den verschiedensten Methoden gelungen

Titelmotiv: Don Dixon [M]

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

SPEKTROGRAMM

- 10** Die nächste Eiszeit fällt aus • Doppelsterne mit Planeten • Genetisches Feintuning bei Kraken • Alkohol – wirkungslos gemacht • Quasikristall aus dem All • Fleisch fressende Pflanze jagt unterirdisch

BILD DES MONATS

13 Wehrhafte Gurke

FORSCHUNG AKTUELL

14 Die Vorteile der Sterblichkeit

Frühes Ableben kann der Fitness der Nachkommen förderlich sein

16 Vom Wirbelballen zur Turbulenz

Endlich geklärt: Wann die Strömung in Rohren turbulent wird

19 80 Meter antike Philosophie

Eine monumentale Wandinschrift erläuterte einst die Lehre des Epikur

21 Atome im Kristallspiegel

Röntgenspektroskopie für leichte Elemente

22 Springers Einwüfze

Viele Wohnstätten im Weltall

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbriefze/Impressum

92 Rezensionen

E. P. Fischer:

Das große Buch der Elektrizität

J. H. Reichholf:

Der Ursprung der Schönheit

G. A. Akerlof, R. E. Kranton:

Identity Economics

A. Damasio: Selbst ist der Mensch

S. L. Macknik et al.:

Die Tricks unseres Gehirns u. a.

104 Wissenschaft im Rückblick

Vom Lufttrockner zur Referatmaschine

105 Exponat des Monats

Der Baker Electric »Queen Victoria«

106 Vorschau

Sind Wissenschaft und Religion vereinbar?

Der Philosoph und Theologe Christian Tapp sieht im Glauben keinen Widerspruch zur Vernunft – und antwortet auf ausgewählte Zuschriften. (»Vernunft und Glaube«, Januar 2012, S. 56)

Jakob Thomsen, München: Interessant fand ich im Artikel den Versuch, das Glaubenssystem widerspruchsfrei zu machen. Etwas, was nicht mit experimentellen Mitteln fassbar ist, mit mathematischen Mitteln zu untersuchen, erscheint sinnvoll. Es ließe sich festlegen, dass ein Glaubenssystem sich an die Logik oder Mathematik halten muss. Nicht, weil die Logik über »Glaube« steht, sondern weil wir sonst von Anfang an aufgeben müssten, überhaupt darüber zu reden. Insbesondere gilt das mathematische Werkzeug »Beweis durch Widerspruch«. Stellt sich heraus, dass eine Voraussetzung in sich widersprüchlich ist, so sind alle Szenarien, die diese Voraussetzung enthalten, ungültig.

Etwa der Allmächtigkeitsbegriff: Angenommen X wäre allmächtig. Dann könnte X einen Gegenstand erschaffen, den nichts (auch X) niemals verändern kann. Kann X so etwas nicht erschaffen, ist X nicht allmächtig. Gelingt es X andererseits, so einen Gegenstand zu erschaffen, ist X auch nicht allmächtig, denn dann gibt es etwas, das X nicht kann: den Gegenstand verändern. Alle Szenarien, die als Annahme einen allmächtigen Akteur voraussetzen, sind also hinfällig.

Der »Sinn des Lebens« dient dazu, von etwas abzulenken: der Tatsache, dass die (meisten) Menschen sich eine gute Welt wünschen, aber stattdessen eine Welt vorfinden, in der es auch Leid gibt. Der »Sinn des Lebens« ist irrelevant!

Antwort des Autors Prof. Dr. Christian Tapp: Das Allmachtsproblem wird schon seit Jahren diskutiert. Eine Lösungsmöglichkeit wäre, dass ein allmächtiges Wesen aufhören könnte, allmächtig zu sein. Dann

kann es tatsächlich etwas Unveränderbares erschaffen – es muss nur zugleich seine Allmacht ablegen. Oder: Etwas Unveränderbares zu erschaffen, ist logisch unmöglich – unabhängig davon, ob ein Wesen allmächtig ist oder nicht. Logisch Unmögliches sollte man aber auch von einem allmächtigen Wesen nicht verlangen (sonst wird der Begriff trivialisiert!).

Wenn Sie die mathematisch-logischen Methoden erwähnen, sollte auch klar sein, dass ein indirekter Beweis (durch Widerspruch) nicht erlaubt, auf die Falschheit aller, sondern nur auf die Falschheit mindestens einer Prämisse zu schließen (oder auf die inkompatible Formulierung der Prämissen). Man kann also mit Widersprüchen durchaus wissenschaftlich umgehen und sich fragen, welche der Prämissen man verwerfen muss oder wie man die Prämissen vernünftig umformulieren sollte. Die Frage nach dem »Sinn des Lebens« kann man nicht pauschal als Ablenkungsmanöver darstellen. Das ist eine ernsthafte Frage, die Menschen umtreibt, ob sie nun religiös oder nichtreligiös sind.

Peter Albrecht, Oberkochen: Uns bleibt nichts anderes übrig, als daran zu glauben, dass die Erscheinungen in unserem Bewusstsein, die wir mit Vernunft für das tägliche Leben auswerten und mit wissenschaftlicher Akribie untersuchen, eine reale Entsprechung haben. Dieser Sachverhalt betrifft das tägliche Leben und natürlich alle Disziplinen der Wissenschaft. Damit löst sich der vermeintliche Gegensatz zwischen Vernunft und Glaube auf. Da wir alle in letzter Konsequenz auf den Glauben an eine Realität angewiesen sind, steht auch die Theologie gleichberechtigt neben den anderen Disziplinen der



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CLAUS SCHÄFER

Wissenschaft. Der Theologe glaubt nur etwas anderes als der Naturwissenschaftler.

Antwort des Autors: »Glaube« ist mehrdeutig. Der Theologe hat aber neben dem Glauben, den Herr Albrecht erwähnt und mit dem jeder zu tun hat, auch mit dem spezifisch christlichen Glauben zu tun. Der umfasst weit mehr, nämlich, in Glaubenssprache gesprochen, das Vertrauen auf Gottes Wort und die entsprechende Ausrichtung des eigenen Lebens.

Wolfgang Lüdge, Schulzendorf: Für Herrn Tapp ist Glaube identisch mit dem Gottesglauben der monotheistischen Religion. Der Vielgötterglaube im Hinduismus, der Glaube im Buddhismus, der Glaube an ein harmonisches Zusammenleben gemäß der konfuzianischen Lehre, aber auch der Glaube der Atheisten an das moralische Verhalten der Menschen unabhängig von religiösen Dogmen wurde schlicht ignoriert, obwohl die überwiegende Mehrheit der Weltbevölkerung diese Glaubensarten bevorzugt. Die Gleichsetzung des Begriffs Glaube mit dem Gottesglauben diskriminiert auf diese Weise den Glauben derjenigen, die keinen Gott für ihren Glauben an die moralischen Werte einer Gesellschaft benötigen, indem sie als Ungläubige bezeichnet werden, wie leider auch in diesem Artikel geschehen.

Antwort des Autors: Der Ausdruck »Glaube« wird für viele, nicht nur für christliche Haltungen verwendet. In meinem Artikel ging es aber um den

christlichen Glauben – ohne anderes im Entferntesten diskreditieren zu wollen. Als Ungläubiger wird in meinem Beitrag niemand bezeichnet.

Dietmar Schoder, Wien (Österreich): Entweder glauben Sie etwas oder Sie hinterfragen es. Solange Sie glauben, haben Sie eine Antwort. Sobald Sie fragen, riskieren Sie, dass Sie vielleicht nie eine Antwort finden werden. Aber beides geht nicht.

Antwort des Autors: Klar ist Glauben nicht gleich Fragen, aber kompatibel ist es. Ein rationaler Gläubiger muss beides tun: glauben und fragen. Gläubige sollten nie vergessen, dass sie immer noch selbst Suchende sind. Das Pathos, die Wahrheit zu besitzen, steht keinem gut an.

Daniel Schiller, Köln: Auf S. 61 schreibt der Autor, dass der Wahrheitsanspruch des christlichen Glaubens dazu führt (quasi zwingt), dass er Erkenntnissen der Naturwissenschaften nicht widersprechen kann. Interessant: Diesen Gedanken zu Ende gedacht, schafft sich der Glaube selbst ab. Der Glaube trifft dann keine eigenständige Aussage mehr. Er ist vielmehr darum bemüht, zur echten, immer weiter fortschreitenden Erkenntnis kompatibel zu bleiben. Aber dann kann man es auch gleich mit Ockhams Rasiermesser halten: Unnötiges soll man abschneiden!

Antwort des Autors: Ihre Schlussfolgerung würde tatsächlich gelten, wenn die Naturwissenschaft alles Nötige sagen würde beziehungsweise könnte. Sagt sie uns etwas über den Sinn unseres Lebens? Über Moral? Über Gott? Solange es Bereiche von Fragen gibt, die sich nicht naturwissenschaftlich beantworten lassen, führt Kompatibilität nicht zur Überflüssigkeit.

Gerhard Schufmann, Landsberg am Lech: Zum letzten Absatz Ihres Beitrags über die Unmöglichkeiten zweier Wahrheiten im Glauben einerseits und

in den Naturwissenschaften andererseits: So offenkundig »unmöglich« (Ihre Aussage) ist das nicht: Thomas von Aquin hatte damit keine Probleme. Für ihn gab es eine Wahrheit der Theologie, die für die außerweltlichen Erfahrungen galt, und eine philosophische Wahrheit, die sich auf die weltlichen Erkenntnisse bezog. Beide mussten nicht deckungsgleich sein, da sie nach Thomas von Aquin für verschiedene Erkenntnisstufen galten.

Antwort des Autors: Hier muss man unterscheiden zwischen dem, was ich meinte, und dem, was Sie ganz richtig erwähnen. Nach Thomas von Aquin gibt es zwei Arten von Wahrheiten – natürliche und übernatürliche –, was ihm heute viel Kritik der Theologen einträgt. Was ich meinte, war aber etwas ganz anderes, nämlich ob es zwei Wahrheiten geben kann, die sich widersprechen, sprich: p und non-p sind beide wahr. Das ist logisch unmöglich. Dass allerdings p und q beide wahr sind, auch wenn p und q zu verschiedenen »Arten« von Wahrheiten gehören, ist gut möglich. Zum Beispiel: Dass ich gerade am Computer sitze, ist eine ganz andere Art von Wahrheit, als dass $2 + 2 = 4$. Es gibt in der Mittelforschung jedoch auch Diskussionen darüber, ob Thomas von Aquin tatsächlich zwei Arten von Wahrheit, eine »doppelte Wahrheit«, vertreten hat (Anneliese Maier).

Weihnachtsmann und Tannenbaum

Der Soziobiologe Eckart Voland und der Religionsphilosoph Winfried Löffler loteten die Beziehungen und Grenzen zwischen Vernunft und Glaube aus. (»Was können Wissenschaft und Religion voneinander lernen?«, Januar 2012, S. 64)

Jürgen Jensen, Bremen: Auf der erkenntnistheoretischen Ebene scheint es nach einem Patt auszuschauen,

wenn der Glaube des Wissenschaftlers an die Existenz einer Welt erwähnt wird. Kann man die Annahme einer existierenden Welt mit dem Glauben eines religiösen Menschen an einen, auch nicht hinterfragbaren, Gott vergleichen, von dem es bekanntlich mehrere Ausfertigungen gibt, was nicht verwundert, da er/sie menschliche Konstruktionen sind? Von der logischen Herangehensweise kann man die jeweiligen Annahmen wohl gleichsetzen, ich frage mich aber: Ist der Glaube an die Existenz des Weihnachtsmanns das Gleiche wie der Glaube an die Existenz eines Tannenbaums?

Antwort von Prof. Dr. Dr. Winfried Löffler: Natürlich nicht. Der Tannenbaum wie auch der Weihnachtsmann sind beide als empirisch problemlos umschreibbare Objekte konzipiert, wobei aber für die Existenz des Tannenbaums erdrückend viel spricht, für die des Weihnachtsmanns nichts. Aber so einfach machen es sich die großen Religionen ja auch nicht: Ihr »Gott« ist kein seltsames empirisches Zusatzobjekt, sondern eher so etwas wie eine Annahme zur weltanschaulichen Komplettierung oder zusammenordnenden Einbettung all dessen, was uns in unseren verschiedenen Lebensbereichen so begegnet. Meinem Verständnis nach meinen sich religiöse Menschen einen besseren Reim auf die Gesamtwirklichkeit machen zu können. Nichtreligiöse Menschen meinen ohne so eine Annahme auszukommen, nehmen aber dafür vielleicht andere weltanschauliche Komplettierungen vor. Das »Beweisziel« in Debatten über solche weltanschaulichen Gesamtdeutungen ist aber gar nicht, dem Gesprächspartner die eigene Position »anzudemonstrieren«, sondern der Nachweis, dass es nicht grundsätzlich unvernünftig ist, so zu denken. Und hier scheint mir der Theismus bessere Karten zu haben, als seine momentane Presse glauben machen mag.



ISTOCKPHOTO / ARPAD RADOCZY

Der Einfluss der Luft

Der Journalist Brain Hayes stellte Modelle vor, die das Flugverhalten von Vogelgruppen erklären sollen. (»Rätselhafte Koordination in Vogelschwärmen«, Januar 2012, S. 90)

Hans Palm, Frankfurt am Main: Am Schluss des Artikels werden drei Punkte erwähnt, die den Forschern mysteriös erscheinen:

- Vogelschwärme sind nicht kugelförmig, sondern horizontal abgeflacht;
- an den Rändern eines Schwarms befinden sich mehr Vögel als im Innern;
- Geschwindigkeitsvektoren, die von der Durchschnittsgeschwindigkeit des Schwarms abweichen, korrelieren über weite Teile des Schwarms.

Ich habe den Eindruck, dass den Forschern ein ganz wesentlicher Punkt

entgangen ist: Anders als die im Artikel erwähnten Kugelsternhaufen bewegen sich Vögel nicht im luftleeren Raum, ganz im Gegenteil! Man kann das Verhalten von Vogelschwärmen nicht realistisch analysieren, wenn man die Luftströmungen vernachlässigt, die doch bei so leichtgewichtigen Vögeln sicher eine entscheidende Rolle spielen!

Verständlicherweise bevorzugen die Vögel im Schwarm Positionen, wo sie Windunterstützung haben und sie selbst Kraft sparen können. Daher die abgeflachte Form des Schwarms: So ist die Schwarmoberfläche größer, es haben mehr Vögel Kontakt zum Wind. Daher halten sich die Vögel lieber an den Rändern auf; dort und hinten haben sie höhere Geschwindigkeiten.

So bleibt beim Verhalten von Vogelschwärmen nicht mehr viel Rätselhaftes übrig, außer vielleicht: Warum steigen Vögel derselben Art überhaupt gleichzeitig auf, vereinigen sich zu Schwärmen, die kunstvolle Manöver vollziehen, und lassen sich dann wieder an ihrem Ausgangsort nieder?

Ich vermute, weil es ihnen einfach Spaß macht. Wir Menschen gehen auch gerne zu Popkonzerten oder auf Fußballplätze, um dieses besondere Gemeinschaftserlebnis zu empfinden.

Gelangt fremde RNA auch ins Erbgut?

(»RNA aus der Nahrung beeinflusst Cholesterinspiegel«, *Spektrogramm* November 2011, S. 10)

Bernhard Abmayr, Dormitz: Gerade für die Beurteilung der Gefahren der Gentechnik ist dieser Artikel hochinteressant. Wenn fremde RNA-Schnipsel die Funktionen im eigenen Körper beeinflussen können, liegt doch die Vermutung nahe, dass bei Veränderung der fremden RNA auch dieser Einfluss sich verändert oder neu entstehen könnte. Auf die natürlichen RNA-Schnipsel hat sich der Körper in langer Evolution einstellen können. Wer kann aber abschätzen, wie gentechnisch veränderte RNA-Schnipsel wirken werden? Wie der Autor selbst schreibt, ist dieses Gebiet noch weitgehend unerforscht. Könnte es sogar sein, dass unser Körper in vielfacher Weise auf fremde RNA angewiesen ist? Welche Folgen hätte eine solche Erkenntnis für die Produktion von Nahrungsmitteln, besonders von gentechnisch veränderten Nahrungsmitteln und von Kunsternährung, bei der diese Informationen fehlen oder verändert wurden?

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (vi.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Tragesser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 0 6221 9126-711, Fax 0 6221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 0 6221 9126-600, Fax 0 6221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 0 6221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 0 6221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 0 6221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser

Leser- und Bestellservice:

Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 0 6221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0 711 7252-192, Fax 0 711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Marco Buch, Tel. 0 211 887-2483, Fax 0 211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0 211 887 2481, Fax 0 211 887-2686

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0 211 887-2387, Fax 0 211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preislite Nr. 33 vom 01.01.2012.
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 Zugäng-

lichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



Wenn nun solche fremde RNA in unsere Zellen eindringt, stellt sich die Frage, ob Teile davon gelegentlich auch in unser Erbgut eingebaut werden. Bei Bakterien und anderen niederen Lebewesen ist ein horizontaler Gentransfer ja längst nachgewiesen.

Nachhilfe in französischer Geografie

Der Archäologe Vincent Carpentier beschrieb, wie sich die Wikinger Ende des 9. Jahrhunderts in die westfränkische Gesellschaft eingliederten. (»Friedliche Berserker«, November 2011, S. 60)

Gérard Dossier, Roquebrune (Frankreich): Auf S. 62 steht in der rechten Spalte oben: »So gilt die etwa 15 Kilometer vor der Seinemündung im Atlantik gelegene Insel Oissel ...« In Wirklichkeit stimmt aber:

1. Die Seinemündung läuft zum Ärmelkanal!
2. Oissel ist eine Stadt an der Seine östlich von Rouen, also zirka 50 Kilometer von der Mündung entfernt.
3. Bei Oissel sind tatsächlich Inseln in der Mitte der Seine.

Antwort der Redaktion:

In der Tat liegt Oissel 15 Kilometer südlich (nicht östlich) von Rouen und damit gut 50 Kilometer von der Seine-mündung entfernt. Etwas unklarer ist das Bild bezüglich des Ärmelkanals. Der wird mitunter zum Atlantik gerechnet, mal als Randmeer des Atlantiks bezeichnet und dann wieder als Verbindung von Atlantik und Nordsee.

Spinnen können das auch!

Der Neurobiologe Kenneth Catania erforschte die ausgeklügelte Fangtechniken einer Wasserschlange. (»Die Tricks der Fühlerschlange«, Februar 2012, S. 30)

Wilfried Osterfeld, Verl: An einer sonnenbeschienenen Wand habe ich vor Jahren eine jagende Spinne beobachtet. Sie pirschte sich an eine sitzende Fliege so an, dass sie sich in einer Position

oberhalb ihrer Beute befand. Dann bereitete sie sich auf den Angriff vor wie eine Katze, tupfte ihren Sicherungsfaden fest und sprang. Dabei war nach meinem Eindruck ihr Ziel der Punkt in der Luft oberhalb der Fliege, an dem sie mit der alarmiert startenden Fliege zusammentraf. Der Absturz wurde durch den Sicherungsfaden verhindert. Mahlzeit!

Verwirrende Zahlen

Laut dem Physiker Gerhard Samulat könnte die Windenergie allein bereits den weltweiten Strombedarf decken. (»Die Zukunft der Energie, Teil 2: Frische Brise«, Januar 2012, S. 78)

Fabian Cundano Maltez, Erfurt: Heißt es noch auf S. 80, dass mit der Enercon E-126 Windkraftanlage (7,5 MW) etwa 10 000 Haushalte mit Strom versorgt werden können, so steht auf S. 82, der Èole Vertikalrotor habe mit seinen etwa 4 MW rund 800 Einfamilienhäuser versorgt. Das heißt, pro MW Windenergie können 1300 »Haushalte« oder 200 »Einfamilienhäuser« versorgt werden – ein Unterschied von mehr als Faktor sieben (ein Einfamilienhaus ist genau ein Haushalt). Welche Zahlen stimmen denn nun?

Leider erlebe ich immer wieder, dass Vertreter von unterschiedlichen Energiekonzepten sich ihre Zahlen schönrechnen, um am Ende die Überlegenheit ihres Systems zu preisen. Es wäre wünschenswert, dass Standards erklärt werden, nach welchen Energiekonzepte objektiv verglichen werden können – um den Leser eben gegen Schönfärberei durch Lobbygruppen zu rüsten.

Antwort des Autors Gerhard Samulat:

Die Diskrepanz erklärt sich folgendermaßen: Die Angabe zum Darrieus-Rotor Èole ist eine Quellenangabe aus: www.energyprofi.com/jo/Besondere-Windenergiesysteme.html. Da der Rotor nicht mehr arbeitet, kann ich diese Angabe nicht weiter nachprüfen. Sie deckt sich aber mit anderen Quellen. Hier wird von (kanadischen) Einfamilienhäusern aus dem Jahr 1992 geredet.

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

Die Angabe zur Enercon E-126 habe ich wie folgt berechnet: Energieversorger gehen davon aus, dass ein (deutscher) Haushalt heute im Schnitt 3500 Kilowattstunden Strom im Jahr verbraucht. Ich habe vorsichtshalber einen Wert von 4500 kWh angenommen. Dividiert man ihn durch die Anzahl der Stunden im Jahr ($365 \times 24 = 8760$), macht das einen Durchschnittsverbrauch von 514 Watt. Dann habe ich nur noch die 7,5 MW durch 514 W geteilt und erhielt 14591 Haushalte. Zur Sicherheit habe ich diesen Wert großzügig auf 10 000 Haushalte abgerundet, weil die Haushalte nicht immer gleich viel verbrauchen, sondern mal mehr und mal weniger. Die Aussage kann also so stehen bleiben und hat nichts mit Schönfärberei oder gar Lobbyismus zu tun.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

KLIMAFORSCHUNG

Die nächste Eiszeit fällt aus

Eigentlich müsste die gegenwärtige Warmzeit innerhalb der kommenden 1500 Jahre enden. Denn die sommerliche Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel befindet sich wegen der Bahnbewegungen der Erde derzeit in einem Minimum. Die ansteigende

Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre verhindert jedoch über den globalen Treibhauseffekt, dass die nächste Vereisung einsetzt, behaupten Wissenschaftler um den Geografen Chronis Tzedakis vom University College London.

Die Forscher analysierten die Eiszeitzyklen der vergangenen 800 000 Jahre. Dazu werteten sie verschiedene Daten aus: CO₂- und Methankonzentrationen in Eisbohrkernen, Sauerstoffisotopenwerte in Meeressedimenten und Langzeitsimulationen der irdischen Sonneneinstrahlung. Anhand dieser Angaben fanden die Wissenschaftler eine Warmzeit vor etwa 780 000 Jahren, deren Bedingungen den heutigen glichen; insbesondere endete sie mit einem ähnlichen Minimum der sommerlichen Einstrahlung. Überträgt man ihren Verlauf auf die gegenwärtige Warmphase, die seit etwa 11 000 Jahren anhält, dann sollte die nächste

Vereisung innerhalb der kommenden 1500 Jahre beginnen.

Allerdings betrug der CO₂-Gehalt der Atmosphäre vor 780 000 Jahren nur etwa 250 ppm (parts per million, also tausendstel Promille). Heute liegt er – durch menschliche Einflüsse – bei 390 ppm. Der dadurch bewirkte Treibhauseffekt erklärt, warum das derzeitige Minimum der sommerlichen Einstrahlung die globalen Durchschnittstemperaturen nicht sinken lässt.

Wie die Forscher betonen, kann der natürliche Eiszeitzyklus die menschengemachte Erderwärmung nicht ausgleichen. Denn die eiszeitliche Temperaturabnahme beruht größtenteils darauf, dass größer werdende Eisflächen immer mehr Sonnenlicht zurückwerfen. Wachsen die Eisschilde nicht, dann setzt auch keine verstärkte Reflexion ein und es bleibt warm.

Nature Geoscience 5, S. 138–141, 2012



DREAMSTIME / KEITH WHEATLEY

Eisflächen reflektieren viel Sonnenlicht und wirken so der Erwärmung entgegen.

ASTRONOMIE

Viele Doppelsterne haben Planeten

Lange galt es als unwahrscheinlich, dass zwei einander umkreisende Sterne dauerhaft Planeten an sich binden können. Denn die Schwerkraft in ihrer Umgebung schwankt sehr stark. Ein Team um den Astronomen William Welsh von der San Diego State University (Kalifornien) entdeckte nun jedoch, dass möglicherweise Millionen Doppelsterne in der Milchstraße von Planeten umrundet werden.

Mit Hilfe des Weltraumteleskops Kepler untersuchten Welsh und seine Kollegen 750 ferne Sonnensysteme. In dieser Stichprobe stießen sie auf zwei große Gasplaneten, Kepler-34 b und Kepler-35 b, die je einen Doppelstern umkreisen. Beide sind etwa 5000 Lichtjahre von uns entfernt. Die Planeten verriet sich dadurch, dass sie immer wieder vor ihren Muttersternen vorüberziehen und diese dabei ver-

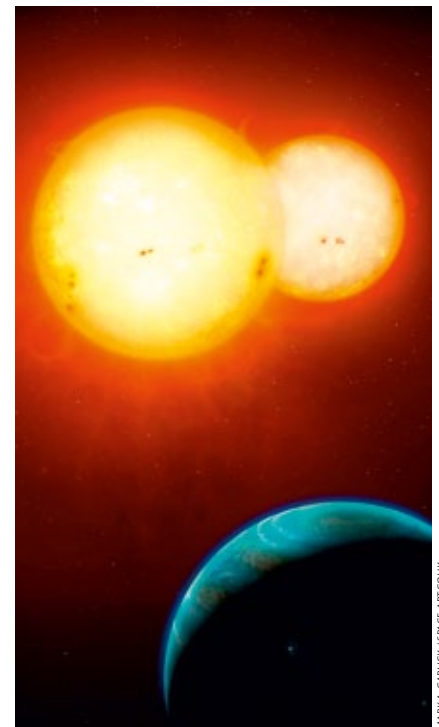
dunkeln. Bereits im vergangenen Jahr hatte ein anderes Forscherteam den ersten Planeten um ein Doppelgestirn entdeckt: Kepler-16 b.

Zusammen mit den beiden neuen Funden kennt man nun also drei davon. Auf die gesamte Milchstraße hochgerechnet sollte es dementsprechend mehrere Millionen Doppelsterne mit Riesenplaneten geben, schreiben die Forscher.

Laut fotometrischen und spektroskopischen Untersuchungen ist Kepler-34 b etwa ein Fünftel und Kepler-35 b etwa ein Achtel so schwer wie Jupiter. Beide Planeten weisen drei Viertel des Jupiterradius auf.

Nature 481, S. 475–479, 2012

Der Planet Kepler-35 b (vorn) umrundet seine Muttersterne einmal in 131 Tagen.



MARKA GARELIK / SPACEARTCOOL

MOLEKULARBIOLOGIE

Genetisches Feintuning bei Nervenzellen von Kraken

Einige Krakenarten leben im warmen Tropenwasser, andere in der eiskalten Arktis. Mit sinkender Temperatur arbeiten jedoch die Ionenkanäle immer langsamer, die sich für die Signalleitung in Nervenzellen öffnen und schließen müssen. Deshalb hatten Forscher bisher angenommen, dass Kraken aus polaren Gebieten veränderte Gene besitzen – für Ionenkanäle, die auch nahe null Grad Celsius rasch auf- und zumachen. Sandra Garret und Joshua Rosenthal von der Universidad de Puerto Rico haben nun gezeigt, dass das nicht der Fall ist: Die betreffenden Gene unterscheiden sich zwischen tropischen und polaren Krakenarten praktisch nicht. Stattdessen übersetzen die verschiedenen Spezies ihre Erbinformation in unterschiedliche Kanalproteine, indem sie nachträglich die von den Genen abgelesene Boten-RNA verändern, welche wiederum den Bauplan für das Protein liefert. Mit Hilfe dieses »RNA-Editing« wandeln Kälte liebende Kraken einen Kaliumkanal so ab, dass er an einer bestimmten Stelle die Aminosäure Valin statt Isoleucin enthält. Der veränderte Kanal klappt schneller vom offenen in den geschlossenen Zustand, was die Feuerrate der Nervenzellen erhöht und auch bei Eiskälte eine rasche Informationsverarbeitung erlaubt.

Scienceexpress 10.1126/science.1212795, 2012

Überleben im Eiswasser: Antarktische Kraken passen sich an die niedrige Außentemperatur an, indem sie schnellere Ionenkanäle



NIERC CRESO VONORTIUM

PHARMAKOLOGIE

Alkohol – wirkungslos gemacht

Alkohol kann viele schädliche Effekte haben, vom »Kater« bis zur Sucht. All diese Wirkungen scheint eine Substanz zu neutralisieren, die Wissenschaftler um Jing Liang von der University of California in Los Angeles untersucht haben. Es handelt sich um das Molekül Dihydromyricetin (DHM) aus dem Japanischen Rosinenbaum. Die Extrakte des Baums gelten in der chinesischen Heilkunde schon seit Jahrhunderten als bewährtes Antikatermittel – zu Recht, wie die Forscher in ihren Experimenten herausfanden.

Als Erstes flößten sie Ratten eine kräftige Dosis Ethanol ein. Legten sie die Tiere anschließend auf den Rücken, gelang es diesen mehr als eine Stunde lang nicht, wieder auf die Beine zu kommen. Hinterher zogen sich die Nager ängstlich in die versteckt gele-

genen Bereiche ihres Laufgeheges zurück – das typische Anzeichen eines Katers.

Hatten die Ratten aber zusammen mit dem Alkohol etwa ein Milligramm DHM pro Kilogramm Körpergewicht erhalten, waren sie bereits nach wenigen Minuten wieder auf den Beinen und verhielten sich wie nüchterne Artgenossen. Der Wirkstoff half sogar beim Entzug: Tiere, die seit Wochen an exzessives Trinken gewöhnt waren, verminderten ihren Alkoholkonsum innerhalb weniger Tage drastisch, sobald ihr Getränk DHM enthielt.

Tests zeigten, dass die Substanz dasselbe Molekül in Nervenzellen beeinflusst, über das auch Alkohol wirkt: den GABA_A-Rezeptor, der hemmende Signale im Gehirn weiterleiten hilft. Nach ersten Einschätzungen hat



PUBLIC DOMAIN

Ein Zweig des Japanischen Rosinenbaums. Extrakte aus dessen Holz bewähren sich schon lange als Antikatermittel.

DHM weniger Nebenwirkungen als andere bisher getestete Pharmaka gegen Alkoholeffekte, die den GABA_A-Rezeptor beeinflussen. Die Forscher sind zuversichtlich, die Substanz bald an Menschen erproben zu können.

The Journal of Neuroscience 32, S. 390–401, 2012

MINERALOGIE

Natürlicher Quasikristall stammt aus dem All

Vor zwei Jahren haben Forscher erstmals einen natürlich entstandenen Quasikristall entdeckt – in einem Stein, der aus den Koryakbergen auf der sibirischen Halbinsel Kamtschatka stammt (siehe SdW 12/2011, S. 18). Nun legt das Team um Paul Steinhardt von der Princeton University, New Jersey, eine detaillierte Analyse des Brockens vor. Daraus folgt, dass er wohl nicht auf der Erde entstanden ist.

Der Stein enthält diverse Mineralien, darunter die seltenen Formen Khatyrkit und Cupalit. In seinem Kern finden sich Quasikristalle aus Iksahe-

drit, einer Legierung aus Aluminium, Kupfer und Eisen, deren Atome sich zu einem Gitter mit fünfzähliger Drehsymmetrie anordnen. Verblüfft waren die Forscher, als sie ein Körnchen Stishovit fanden – eine seltene Variante von Quarz, die nur bei extrem hohem Druck entsteht, etwa während eines Meteoriteneinschlags. Zusätzlich ermittelten die Wissenschaftler das Sauerstoffisotopenverhältnis in den Mineralien des Steins. Es ähnelt dem von Meteoriten, die aus dem Gas- und Staubnebel des frühen Sonnensystems entstanden sind, und unterscheidet sich klar von der Isotopenmischung

MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Aktuelle Spektrogramme finden Sie täglich unter
www.spektrum.de/spektrogramm

irdischer Gesteine. Das lässt nach Ansicht der Wissenschaftler keinen Zweifel daran, dass der Brocken extraterrestrischen Ursprungs ist.

Die Analysen erlauben keinen eindeutigen Schluss darauf, wie der Stein genau entstanden ist. Doch deuten sie darauf hin, dass sich Quasikristalle im Weltall bilden und über sehr lange Zeiträume hinweg stabil bleiben können.

PNAS 109, S. 1396–1401, 2012

BOTANIK

Fleisch fressende Pflanze jagt unterirdisch

Das unscheinbare Wegerichgewächs *Philcoxia minensis* besiedelt im östlichen Brasilien sehr nährstoffarme Sandböden, auf denen nur wenige andere Pflanzen zurechtkommen. Nun haben Forscher um Rafael Silva Oliveira von der Campinas-Universität in Sao Paulo (Brasilien) herausgefunden, wie *Philcoxia* dort überlebt: Die Pflanzen fangen Fadenwürmer mit unterirdischen Klebefallen und nutzen sie als Nahrung.

Philcoxia minensis bildet an ihrer Basis unter der Erdoberfläche kleine Blätter aus, die auffallend klebrig sind. Die Forscher setzten ihr speziell herangezogene Fadenwürmer vor, deren Gewebe mit Stickstoffisotopen ¹⁵N angereichert war. Mehrere Stunden später fanden sich massenhaft tote Würmer auf den unterirdischen Blättern, und ein Teil der Isotope war ins Blattinnere gelangt. Zudem stieg nach der Fütterung der gesamte Stickstoffgehalt der Pflanze deutlich an. Weiterhin wiesen die Forscher so genannte Phosphatasen auf den Fangblättern nach: Enzyme, die die festgeklebten Tiere wohl verdauen helfen.

Die Wissenschaftler beschreiben damit erstmals eine Fleisch fressende Pflanze, die ihre Opfer mit unterirdischen Klebeblättern fängt. Wie bei anderen Fleisch fressenden Gewächsen, zum Beispiel Sonnentau, dürfte es sich dabei um eine Anpassung an den sehr nährstoffarmen Lebensraum handeln.

PNAS 109, S. 1154–1158, 2012



Philcoxia minensis macht auf den ersten Blick nicht viel her. Unterirdisch jedoch bildet sie raffinierte Klebefallen aus (kleines Bild), mit deren Hilfe sie Fadenwürmer (Pfeil) fängt.

BESTECHENDE VERTEIDIGUNG

Junge Gurken wissen sich gegen Fressfeinde zu wehren: Auf ihrer Oberfläche sitzen winzige Härchen (Trichome), deren zarte Spitzen um ein Vielfaches dünner sind als die einer Nähnadel. Das Zubeißen wird so zu einem unangenehm stacheligen Erlebnis. Außerdem enthalten die Trichome an der Basis bittere, toxische Cucurbitacine, die wirkungsvoll den Geschmack verderben.

Für das bloße Auge erscheinen diese Härchen als zarter Flaum – erst bei 800-facher Vergrößerung unter dem Polarisationsmikroskop wird die spitze Verteidigung sichtbar. Das Bild wurde im Rahmen des 2011 International Science and Engineering Visualization Challenge ausgezeichnet.



Die Vorteile der Sterblichkeit

Gibt es einen evolutionären Grund dafür, dass unsere Lebensspanne begrenzt ist? Hinweise darauf liefert nun eine Computersimulation.

VON JANINA FISCHER

Warum müssen wir eigentlich grau, faltig und gebrechlich werden und schließlich sterben? Weil unser Körper dem Verschleiß unterliegt, ist die übliche Antwort. Aber lässt sich dem nicht entgegenwirken?

Der menschliche Körper hat im Lauf seiner Evolution unzählige Reparaturmechanismen entwickelt. Sie beheben oder mildern Zellschäden, wie sie ständig durch Mutationen oder Umwelteinflüsse entstehen. Die Folgen der Langzeitnutzung sind nicht grundsätzlich anderer Art. Eigentlich sollte der Körper sie dann doch ebenso erfolgreich bekämpfen können.

In den Industrieländern ist die durchschnittliche Lebenserwartung in den letzten Jahren deutlich angestiegen. Vieles spricht dafür, dass sich dieser Prozess immer weiter fortsetzt (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 11/2011, S. 52).

Doch wenn eine Lebensverlängerung um mehrere Jahrzehnte oder gar eine potenzielle Unsterblichkeit prinzipiell möglich ist, warum hat sie sich im Verlauf der natürlichen Evolution nicht längst etabliert? Immerhin wäre es ein gewaltiger Selektionsvorteil, wenn man eine unbegrenzte Zeit lang Nachkommen in die Welt setzen könnte.

André C. R. Martins von der Universität São Paulo (Brasilien) hat sich auf die Suche nach Gründen für das Altern gemacht (*Public Library of Science one 6, S. e24328, 2011*). Dazu simulierte er mit Hilfe eines Computerprogramms eine aufs Äußerste vereinfachte evolutionäre Konkurrenzsituation. Wie in solchen Simulationen üblich, besteht das Biotope aus einer quadratischen Fläche, die in lauter einzelne Felder eingeteilt ist –

in diesem Fall zunächst 51 mal 51 Stück. Damit der Rand des Gebiets keine besondere Rolle spielt, denkt man sich die rechte Seite des Quadrats mit der linken und die obere mit der unteren verklebt (periodische Randbedingungen). Auf jedem Feld kann sich höchstens ein Individuum befinden. Die Zeit ist diskretisiert: Aus dem Gesamtzustand des Systems zu einem Zeitpunkt berechnet das Programm den Zustand eine gewisse Zeit – sagen wir ein Jahr – später, daraus den Zustand im übernächsten Jahr und so weiter.

Sterblichkeit ist nachteilig – vorerst

In Martins' Simulation gehören die virtuellen Tierchen zu zwei Arten. Die einen sterben spätestens nach fünf Jahren, die anderen sind im Prinzip unsterblich. Jedes Jahr setzt jeder Überlebende in einem gewissen Abstand vom eigenen Standort ein Kind in die Welt. Sowie dadurch zwei Tierchen auf dasselbe Feld geraten, kommt es zum Zweikampf. Dabei bleibt offen, ob sie sich aktiv umzubringen versuchen oder nur einander die Ressourcen wegfressen. Der Zufall bestimmt, wer aus dem Kampf als Sieger hervorgeht; aber die Gewinnwahrscheinlichkeit ist proportional der Fitness.

In dieser schlichten Zahl fasst Martins alle Eigenschaften zusammen, die dem Überleben des Tiers förderlich sind. Fitness ist erblich, unterliegt allerdings der Mutation. Abhängig vom Zufall ist die Fitness des Kinds entweder gleich der des Elterntiers oder um einen kleinen Betrag M größer oder um denselben Betrag kleiner – jeweils mit Wahrscheinlichkeit $1/3$.

Martins setzte zu Beginn gleich viele Individuen beider Arten in die virtuelle Umwelt und ließ dann »der Natur« ihren Lauf. Zunächst ließ er die Mutationen außen vor, indem er den Parameter M gleich null setzte. In diesem Szenario sind alle Individuen stets gleich fit, gewinnen also im statistischen Mittel gleich oft den Zweikampf. Die sterbliche Art wird jedoch zusätzlich durch den von selbst eintretenden Tod dezimiert. In der Tat beobachtete Martins in allen Durchläufen seiner Simulation, dass die Sterblichen ausstarben.

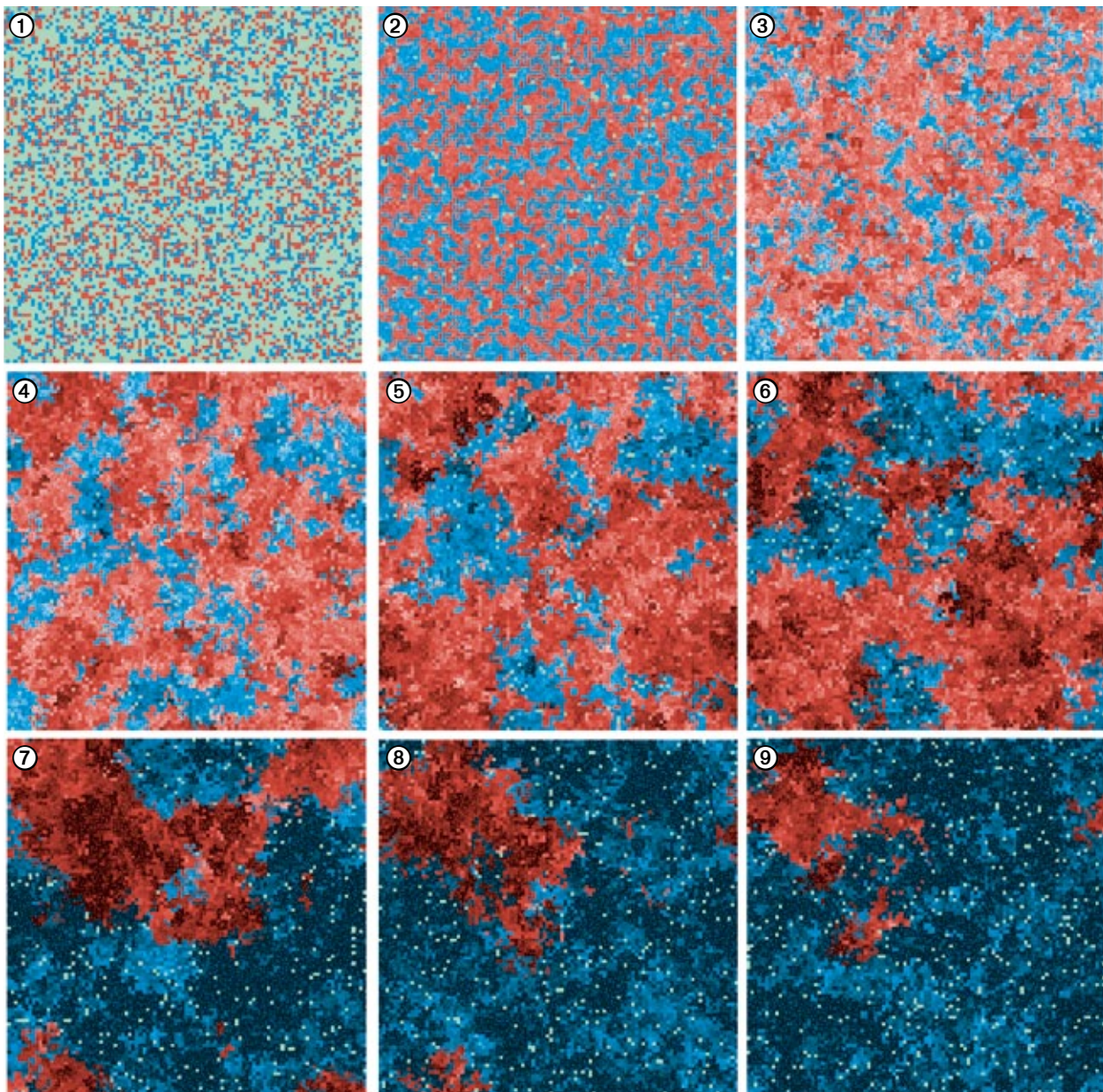
Im nächsten Schritt führte er die Möglichkeit von Mutationen ein, und zwar wieder in gleicher Weise für beide Spezies. Bemerkenswerterweise verschiebt diese scheinbar neutrale Änderung die Verhältnisse zu Gunsten der Sterblichen. Bei einem Mutationsfaktor $M=0,1$ halten sie es bis zum Aussterben im Durchschnitt 1000 Jahre durch anstatt nur 200 Jahre bei $M=0$. In 7 von 50 Durchläufen gewannen sie gar die Oberhand und verdrängten ihre Konkurrenten vollständig.

Wie ist das zu erklären? Die durchschnittliche Fitness wird durch die Mutationen selbst überhaupt nicht verändert, wohl aber durch die Zweikämpfe. Da in der Mehrzahl der Fälle der Fittere übrig bleibt, steigt die durchschnittliche Fitness mit der Zeit an. Dieser Effekt wird bei den Sterblichen durch deren natürlichen Tod verstärkt; denn die Alten stammen aus einer früheren Zeit, als die Durchschnittsfitness noch geringer war. Durch ihren Tod nimmt also die durchschnittliche Fitness zu. In einer Umwelt, in der ohnehin jedes Jahr die Hälfte der Gesamtbevölkerung

Endsieg für die Sterblichen

Zu Beginn eines typischen Simulationslaufs ① werden gleiche Anzahlen sterblicher (blau) und potenziell unsterblicher Individuen (rot) in dem quadratischen Biotop von 101 mal 101 Feldern ausgesetzt. Sie besetzen zügig die noch freien Gitterplätze (grüne Punkte). Da sich ein Kind in der Nähe seines Elterntiers ansiedelt, entstehen kleine bis mittelgroße Flecken einheitlicher Färbung. Dort konkurrieren die Kunstwesen vorrangig mit ihresgleichen.

Da die sterbliche Spezies durch natürliche (nicht durch Kampf verursachte) Todesfälle Mitglieder verliert, ist sie gegenüber ihrer Konkurrenz zunächst klar im Nachteil (② bis ⑤). Ihre Vertreter sind jedoch durchschnittlich fitter (dargestellt durch Farbtöne: je dunkler ein Punkt, desto fitter das dort ansässige Individuum), holen daher im Verlauf der Zeit stark auf und verdrängen schließlich ihre langlebige Konkurrenz sogar von der Bildfläche (⑥ bis ⑨).



MARTINS, A. C.: CHANGE AND AGING SENESENCE AS AN ADAPTATION. IN: PLOS ONE, 6, 5, E34338, 1-12, 2011, FIG. 1

Zweikämpfen zum Opfer fällt, kann dieser Effekt anscheinend die Verluste durch natürlichen Tod aufwiegen oder sogar überkompensieren.

Es erleichtert der sterblichen Gruppe zusätzlich das Überleben, wenn der Selektionsdruck durch die Umwelt mit ins Modell einbezogen wird. Dazu wird – in grober Vereinfachung der komplexen Realität – in jedem Zeitschritt die Fitness aller Beteiligten um einen konstanten Betrag d vermindert. Die Umwelt verändert sich gewissermaßen so, dass alle Lebewesen schlechter an sie angepasst sind als zuvor.

Schon ab $d = 0,01$ wandelte sich im Szenario mit Mutationsfaktor $M = 0,1$ das langsame Dahinsiechen der sterbli-

chen Gruppe in ein Unentschieden: Die Siege waren annähernd gleich auf beide Gruppen verteilt.

Erhöhte Martins schließlich die Größe des virtuellen Biotops auf 101 mal 101 Felder, so entschieden die Sterblichen sogar 39 von 50 Simulationen für sich. Das ist so zu erklären: Auf dem größeren Gebiet kämpfen die Tiere in der Frühphase vorrangig gegen ihresgleichen. Wegen ihrer tendenziell höheren Innovationsrate können die Sterblichen ihre Durchschnittsfitness rascher in die Höhe treiben als die potenziell Unsterblichen und sind ihnen daher bei den folgenden Begegnungen überlegen. Darüber hinaus werden Verluste durch natürlichen Tod rascher ausge-

glichen, wenn noch Platz für eine Neubesiedlung vorhanden ist.

Der Alterstod kann also ein evolutiv-närer Vorteil sein, und zwar, weil die Alten durch rechtzeitiges Abtreten den fitteren Jungen nicht nur die Mühe ersparen, sie im Zweikampf aus dem Weg zu räumen, sondern auch das Risiko, dabei selbst zu sterben. Damit eignet sich dieses Modell, um die Entstehung und Aufrechterhaltung der Sterblichkeit im Lauf der Evolution plausibel zu machen – nicht aber für eine Übertragung auf menschliche Gesellschaften. Dazu ist es doch zu stark vereinfacht.

Janina Fischer ist promovierte Chemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

FLUIDDYNAMIK

Von Wirbelballen zur Turbulenz

Endlich gelang es Forschern, eine mehr als 100 Jahre alte Frage der Strömungsdynamik zu beantworten: Wann gewinnen in Rohrströmungen Turbulenzen die Oberhand?

VON KERSTIN AVILA UND BJÖRN HOF

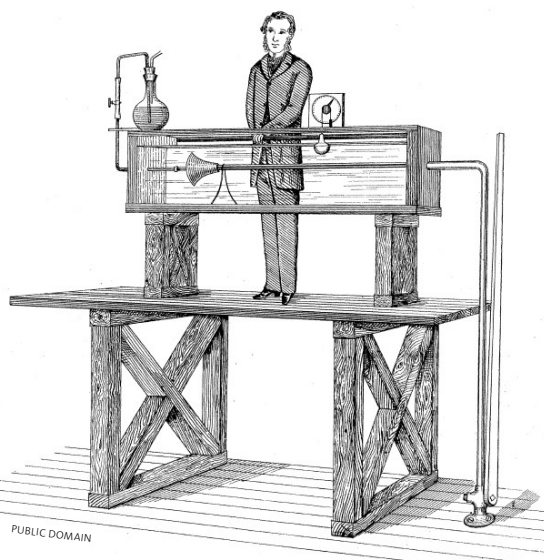
Manch scheinbar simple Frage hat in der Wissenschaft schon Generationen von Forschern beschäftigt, die vergeblich nach der Antwort gesucht, dabei aber fundamentale Erkenntnisse gewonnen haben. Ein gutes Beispiel dafür bietet die Fluidodynamik, die Wissenschaft von der Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen. Schon vor über 120 Jahren wollte Osborne Reynolds (1842–1912) an der University of Manchester herausfinden, wann eine Flüssigkeit nicht mehr glatt durch ein Rohr strömt, sondern Wirbel bildet, die den Strömungswiderstand drastisch ansteigen lassen.

Mit seinen Untersuchungen hat der britische Ingenieur bahnbrechende Fortschritte in der Fluidodynamik erzielt, ohne jedoch seine Ausgangsfrage definitiv beantworten zu können. Das Rätsel blieb bis vor Kurzem ungelöst.

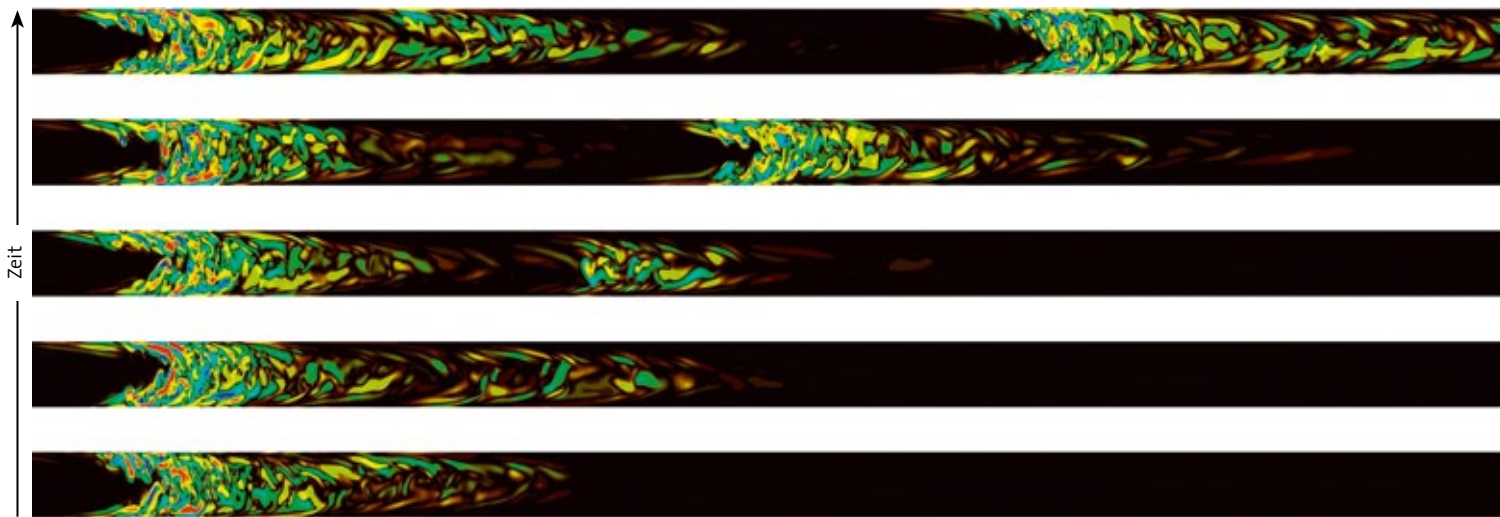
Eine vermeintliche Lösung schaffte es zwar in etliche wissenschaftliche Veröffentlichungen, Lehrbücher und sogar in Wikipedia. Doch beruht sie auf einer inkorrekt zitierten Zahl.

In der Fluidodynamik unterscheidet man zwischen laminaren und turbulenten Strömungen. In ersteren bewegt sich die Flüssigkeit glatt in Schichten, die sich nicht vermischen. Meist ist die Strömungsgeschwindigkeit zeitlich konstant. Man denke etwa an Honig, der von einem Löffel fließt. Turbulente Strömungen sind dagegen stark fluktuierend und verwirbelt, was unter anderem zu deutlich höheren Reibungsverlusten führt.

Um den Übergang zwischen den beiden Strömungsarten zu erforschen, wählte Reynolds einen Versuchsaufbau mit möglichst einfacher Geometrie und großer technischer Bedeutung: ein



Auf der historischen Zeichnung ist Osborne Reynolds bei seinen bahnbrechenden Versuchen zur Strömung von Flüssigkeiten in Rohren zu sehen.



KERSTIN AVILA UND BJÖRN HOF

gerades, glattes Glasrohr mit rundem Querschnitt, durch das er unterschiedlich warmes Wasser strömen ließ.

Durch Einspritzen von Tinte konnte der britische Forscher die Bewegung sichtbar machen und so eindeutig zwischen laminaren und turbulenten Regionen unterscheiden. Wie er feststellte, spielte die Strömungsgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Erst wenn sie relativ hoch war, bildeten sich Wirbel. Außerdem bemerkte Reynolds, dass ein großer Rohrdurchmesser und eine geringe Viskosität – also Zähigkeit – der Flüssigkeit Turbulenzen begünstigten. Das Verhalten der Strömung hing demnach vom Verhältnis der drei Größen zueinander ab.

Bedeutendes Lebenswerk, doch ohne krönenden Abschluss

Dies führte Reynolds zu dem wichtigsten Parameter der Fluidodynamik: der später nach ihm benannten Reynoldszahl. Die dimensionslose Größe ist gleich dem Produkt aus Strömungsgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser, geteilt durch die Viskosität. Auf ihr beruht das reynoldssche Ähnlichkeitsgesetz, wonach es möglich ist, von Beobachtungen an kleinen Modellen – etwa im Windkanal – auf das Verhalten des Originalsystems zu schließen. Dieses Gesetz bildet eine wesentliche Grundlage der experimentellen Strömungsforschung.

Die Messungen von Reynolds zeigten allerdings auch, dass äußere Stö-

Die Schnappschüsse einer Computersimulation zeigen von unten nach oben, wie aus einem wachsenden Wirbelballen – einem »puff« – ein zweiter hervorgeht. Die Flüssigkeit strömt von links nach rechts.

rungen – etwa Wellen im Tank, der das Rohr speist – großen Einfluss darauf haben, wann die Turbulenz einsetzt. So konnten Strömungen bei gleicher Reynoldszahl mal verwirbelt und mal laminar sein. Die Frage, ab welcher Geschwindigkeit – bei gegebener Rohrdicke und Viskosität – eine Strömung turbulent wird, hängt somit stark vom Versuchsaufbau ab und lässt sich daher nicht eindeutig beantworten. Reynolds postulierte allerdings, dass es einen kritischen Wert für die Reynoldszahl (Re_c) geben müsse, oberhalb dessen sich vorhandene Wirbel ausbreiten und zu dauerhafter Turbulenz führen, während sie unterhalb dieses Werts zerfallen, so dass die Strömung schließlich in den laminaren Zustand zurückkehrt.

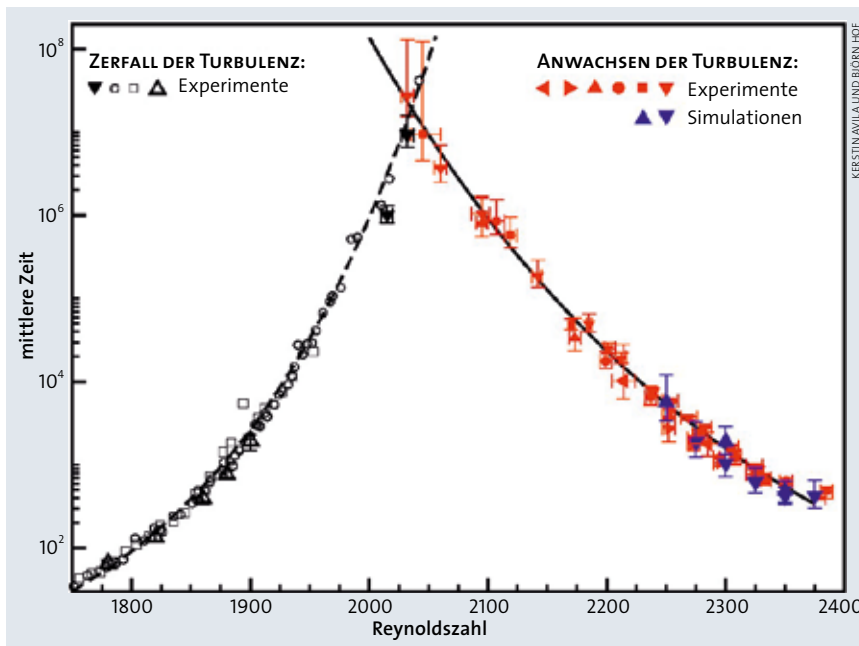
Trotz langjähriger Forschung gelang es dem britischen Forscher aber nicht, diese Zahl zu bestimmen. Seine letzten Schätzungen lagen zwischen 1900 und 2000. In diesem Bereich wird die Strömung nie vollständig turbulent. Vielmehr bleiben zwischen den lokalisierten Wirbelballen, so genannten »puffs«, die eine typische Länge von 20 bis 30 Rohrdurchmessern haben, stets laminare Bereiche bestehen (Bild oben).

Unter der Vielzahl von Versuchen, diesen kritischen Punkt zu bestimmen, fanden Experimente besondere Beach-

tung, die Julius C. Rotta (1912 – 2005) 70 Jahre später an der Aeronautischen Versuchsanstalt in Göttingen durchführte. Sie galten dem Bereich oberhalb von Re_c , in dem sich die turbulenten Regionen auf Kosten der laminaren ausbreiten. Rotta verfolgte, wie diese Ausbreitungsgeschwindigkeit abnahm, während er die Reynoldszahl allmählich senkte; bei Re_c sollte sie gleich null sein. Doch er kam nie so weit, weil sein Rohr zu kurz war und er nicht genügend Experimente durchführen konnte. Seine letzte Messung bei $Re = 2300$ ergab noch eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von zwei Prozent der mittleren Strömung.

Deshalb konnte Rotta das gesuchte Re_c nur extrapolieren. In seiner Veröffentlichung schrieb er: »Der genaue Wert dieser kritischen Reynoldszahl kann aus vorliegenden Versuchen nicht bestimmt werden; er mag bei $Re_c = 2000$ liegen.« Dennoch zitierten viele Wissenschaftler das Ergebnis seiner letzten Messung fälschlicherweise als angebliche Schwelle für den Einsatz der Turbulenz bei der Rohrströmung. Die Zahl 2300 fand so auch Eingang in Lehrbücher und Lexika – darunter Wikipedia.

Da das Problem gelöst schien, beschäftigte sich in der Folge kaum noch jemand damit. Das änderte sich erst, als 2004 theoretische Physiker um Bruno



Ausbreitung und Zerfall von Turbulenzen sind Zufallsprozesse, deren Wahrscheinlichkeit von der Reynoldszahl abhängt. Wo sie sich die beiden Vorgänge die Waage halten – also am Schnittpunkt der beiden Wahrscheinlichkeitskurven –, liegt die kritische Reynoldszahl Re_c , die den Übergang zwischen laminarer und turbulenter Strömung kennzeichnet.

Eckhardt von der Universität Marburg neue Erkenntnisse über das Verhalten der Strömung unterhalb von Re_c vorlegten. Demnach handelt es sich beim Zerfall der Turbulenz im Rohr um einen statistischen Vorgang mit einer exponentiellen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Er findet also vollkommen zufällig statt. Genau wie beim Zerfall radioaktiver Substanzen lässt sich aber eine mittlere Zeit angeben, nach der die Turbulenz zur Hälfte zerfallen ist.

Gleichgewicht zwischen Ausbreitung und Zerfall

Die exakte Bestimmung dieser Halbwertszeit für jede Reynoldszahl erfordert allerdings Tausende bis Hunderttausende von Messungen. Viele Forschergruppen auf der ganzen Welt unterzogen sich dieser Mühe – mit teils widersprüchlichen Ergebnissen. Die Hauptschwierigkeit bestand darin, über Zigtausende von Messungen hinweg alle Versuchsbedingungen exakt konstant zu halten. Ziel der Experimente war es, festzustellen, bei welcher Reynoldszahl die mittlere Zerfallszeit unendlich groß wird. Dies sollte

das gesuchte Re_c sein. Doch zur großen Enttäuschung der Forscher stiegen die Zerfallszeiten mit zunehmender Reynoldszahl zwar sehr schnell an (linker Ast in Grafik oben), erreichten aber nie unendlich. Somit ließ sich Re_c auf diese Weise nicht bestimmen.

Den Durchbruch brachte schließlich die Erkenntnis, dass sich Turbulenz auch schon bei unerwartet niedrigen Reynoldszahlen ausbreiten kann, indem sich Wirbel von einem existierenden »puff« ablösen und einen neuen bilden (Bild auf S. 17). Wie die Beobachtungen unserer Gruppe an einem 15 Meter langen Glasrohr mit vier Millimeter Durchmesser ergaben, geschieht das jedoch extrem selten. Deshalb bleibt ein turbulenter Bereich oft tagelang unverändert, bevor er plötzlich einen zweiten erzeugt. Wie eine statistische Untersuchung ergab, handelt es sich hierbei ebenfalls um einen Zufallsprozess mit exponentieller Wahrscheinlichkeitsverteilung (*Journal of Fluid Mechanics* 646, S. 127, 2010).

Folglich lässt sich nicht nur für den Zerfall, sondern auch für die Ausbreitung der Turbulenz eine Halbwertszeit

bestimmen. Diese fällt mit sinkender Reynoldszahl sehr schnell ab (rechter Ast in Grafik links). Damit war die Lösung des Problems plötzlich ganz einfach. Offenbar überwiegt bei niedrigen Reynoldszahlen der Zerfall der Turbulenz. Dadurch wird die gesamte Strömung irgendwann wieder laminar. Bei hohen Reynoldszahlen hingegen lösen sich turbulente »puffs« langsamer auf, als neue entstehen. Folglich breitet sich die Turbulenz aus und erfasst schließlich die gesamte Strömung. Der kritische Punkt liegt nun genau dort, wo diese beiden Vorgänge sich die Waage halten, also die Kurven der Halbwertszeiten für Ausbreitung und Zerfall sich schneiden. Das ist bei einer Reynoldszahl von 2040 der Fall (*Science* 333, S. 192, 2011). Von uns durchgeführte Computersimulationen bestätigten dieses Ergebnis.

Nach über 100 Jahren konnten wir also eine grundlegende Frage der Strömungslehre mit immenser praktischer Bedeutung endgültig beantworten. Eine besonders wichtige technische Anwendung ist der Transport von Flüssigkeiten und Gasen durch Rohre – etwa Erdöl und Erdgas durch Pipelines. Hier sind Turbulenzen unerwünscht, da sie viel Energie kosten. Ein besseres Verständnis ihrer Entstehung könnte Wege aufzeigen, sie mit geringem Energieaufwand im Keim zu ersticken. Allerdings erfordert das noch tiefere Einblicke in den Mechanismus, wie Wirbelflecken sich aufspalten. Daran arbeiten wir am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen nunmehr mit Nachdruck.

Mathematisch handelt es sich beim Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung übrigens um einen so genannten Nichtgleichgewichtsphasenübergang, der den gleichen Gesetzmäßigkeiten gehorcht wie die Ausbreitung von Waldbränden oder Epidemien.

Kerstin Avila fertigt am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen ihre Doktorarbeit über das Thema dieses Beitrags an. Björn Hof, ihr Betreuer, leitet dort als promovierter Physiker eine Arbeitsgruppe, die über die Entstehung von Komplexität und Unordnung in Strömungen forscht.

80 Meter antike Philosophie

In der antiken Stadt Oinoanda war die Lehre des Philosophen Epikur allen präsent – dank einer monumentalen Inschrift. Altertumsforschern gewährt sie Einblicke in die Weltanschauung des 2. Jahrhunderts n. Chr.

VON MARTIN LEHRER

Jammern und Klagen kamen für Diogenes, Bürger der lykischen Kleinstadt Oinoanda, wohl nicht in Frage. Im 2. Jahrhundert n. Chr. formulierte er: »Das Leben bietet uns zur Ernährung, obgleich für unsere Natur Gerstenbrot ausreichte, vieles, was bei der Nahrungsaufnahme keine Unlust erregt, und ein Lager, das sich nicht gegen den Leib durch seine Härte auflehnt, und Kleidung, die zwar nicht allzu weich ist, aber auch nicht rau.«

Lebensweisheiten, aber auch Traktate zur Natur- und Verhaltenslehre ließ

Diogenes in die Wand einer Säulenhalle meißeln, um – das lässt sich herauslesen – seinen Mitmenschen geistige Medizin zu schenken. 80 Meter lang und gut und gerne vier Meter hoch, suchte diese Inschrift in der antiken Welt ihresgleichen.

Vermutlich brachte ein Erdbeben sie zum Einsturz; die Bruchstücke wurden in der Stadt wiederverbaut. Nachdem der Ort um das 8. Jahrhundert aufgegeben wurde, blieben seine Ruinen mehr als 1000 Jahre unberührt – ein Glücksfall für die Archäologie. Ende des

19. Jahrhunderts untersuchten französische Wissenschaftler die Stätte, die heute in der Südwesttürkei gut zwei Autostunden westlich von Antalya liegt und nach wie vor nur mit Mühe zu erreichen ist. Sie entdeckten Fragmente der Inschrift. Seitdem ist diese ein Thema für österreichische, britische und seit 2007 auch für deutsche Altertumsforscher.

Manche Fragen sind noch offen, sicher aber ist: Diogenes von Oinoanda war Anhänger der Philosophie des Atheners Epikur (341 – 271 v. Chr.). Das

Praktisches aus dem Lesershop



Sammelkassette

Die Sammelkassette von **Spektrum der Wissenschaft** bietet Platz für 12 bis 15 Hefte und kostet € 9,50 (zzgl. Versand).



Jahrgangs-CD-ROM SdW 2011

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); erhältlich ab Ende Februar 2012. ISBN 3-978-941205-92-5

belegen Zitate aus dessen Werk wie auch Überlegungen gemäß Epikurs Denkschule. So hatte dieser gefordert, sich auf das Hier und Jetzt zu fokussieren, da es keine Daseinsform nach dem Tod gebe. In diesem Sinn formulierte Diogenes: »Der Tod ist zu verlachen, da er einer Maske gleicht, die Kinder erschreckt.«

Ungewöhnlich an der Wandinschrift sind nicht allein ihre Ausmaße. Denn zum einen lag die Blütezeit der Epikuräer bereits 400 Jahre zurück, zum anderen gehörte Diogenes nicht zur typischen Zielgruppe jener Philosophie, hatte ihr Urheber doch Wohlstand wie auch politische Betätigung, ja jegliche öffentliche Zurschaustellung abgelehnt. Das stand gerade in römischer Zeit im Gegensatz zum Selbstverständnis der gebildeten Schichten – und damit auch im Widerspruch zur gesellschaftlichen Stellung des Diogenes.

Dieser gehörte offenkundig zu einer der führenden und vermögenden Familien. Vermutlich beschränkte er seine öffentlichen Aktivitäten auf das notwendige Minimum. Da er aber bei sei-

Überwacht von Surveyleiter Dr. Martin Bachmann (links) wird ein Inschriftenblock mit dem Flaschenzug für den Abtransport angehoben.



MARTIN LEHRER



MARTIN LEHRER

nen Mitbürgern einen Bedarf an geistiger Anleitung sah, hoffte er diese durch das Monument zu geben, ohne persönlich in Erscheinung treten zu müssen. Das meint jedenfalls der Altphilologe Martin Ferguson Smith, emeritierter Professor der englischen Durham University, der seine Forschung der Diogenes-Überlieferung gewidmet hat.

Im Oktober 2011 endete eine Serie von fünf Begehungskampagne (Surveys), die das Deutsche Archäologische Institut (DAI) Istanbul gemeinsam mit dem Institut für Altertumskunde der Universität zu Köln organisiert hat. Es

Mit Hilfe von angefeuchtetem und auf den Stein gepresstem Karton entstehen Kopien der Fundstücke, so genannte Abkletsche.

galt, weitere Bruchstücke zu finden, frei zu legen und zu dokumentieren sowie die architektonische Grundstruktur der Stadt zu erfassen. Dazu holte Surveyleiter Martin Bachmann Architekten von der Universität Karlsruhe (Karlsruher Institut für Technologie) ins Boot. Diese zeichneten wichtige Ruinen und Plätze – beispielsweise die hellenistische Stadtmauer mit ihren Wehrtürmen, die Reste einer byzantinischen Kirche sowie die Agora aus römischer Zeit. Jeder herumliegende Stein war in seiner derzeitigen Position festzuhalten – und zwar so, dass seine Zugehörigkeit zu architektonischen Strukturen erkennbar wird. Mit einem Laserscanner wurden Geländestrukturen erfasst und sozusagen als Pausvorlage unter die Zeichenblätter gelegt, um die Bauaufnahme zu beschleunigen.

Auch bei der Dokumentation der Inschrift kam diese Technik neben klassischen Methoden wie Zeichnung, Abkletsch – ein Abdruck mit angefeuchtetem Papier (siehe Foto oben) – und Fotografie ins Spiel. Durch dreidimensionale Punktgitter repräsentiert, sollten sich die Bruchstücke wie ein Puzzle am Computer zusammensetzen lassen. Zudem wurde die beschriebene Seite

mit höherer Auflösung aufgenommen, um mit bloßem Auge kaum zu erkennende Vertiefungen, die ein Schriftzeichen oder ein Teil eines solchen sein könnten, sichtbar zu machen.

Mehr als 70 Fragmente – vom handtellergroßen Bruchstück bis zum mehrere hundert Kilogramm schweren Block – haben die Forscher geortet und dokumentiert. Damit erreicht die Gesamtzahl der Inschriftensteine fast 300. Dennoch sind auch damit nur zwischen 20 und 25 Prozent des gesamten Textes zurückgewonnen. Philologen haben die Schriftmenge einzelner Fragmente auf die vermutete Gesamtfläche der Inschrift hochgerechnet und kamen auf rund 25 000 Worte.

»Wir haben heute ein wesentlich genaueres Bild über die Person Diogenes und sein Denken«, konstatiert Jürgen Hammerstaedt, Professor für Altphilologie an der Universität zu Köln. So seien etliche Hinweise auf vornehme Familien der Zeit aufgetaucht, was dabei hilft, unter den insgesamt 18 in Inschriften der Stadt Oinoanda als Dioge-

nes bezeichneten Personen den Urheber der philosophischen Wandtexte zu identifizieren.

Lettern in lesefreundlicher Größe

Hammerstaedt gemäß schrieb der Autor für die damalige Zeit ungewöhnlich weitschweifig. Der Altphilologe sieht darin ein Indiz, dass Diogenes nicht nur die Oberschicht seiner Stadt ansprechen wollte. Immerhin beherrschten Schätzungen zufolge 10 bis 25 Prozent der Stadtbevölkerung die Kunst des Lesens. Wie sehr Diogenes an sein Publikum dachte, zeigte sich auch in einer variierenden Größe der Buchstaben: Im unteren Bereich der ursprünglich wohl gut vier Meter hohen Wand ließ er Lettern von 1,8 Zentimeter Höhe schlagen, darüber waren sie 2,3, schließlich drei Zentimeter hoch. Philologen vermuten, dass Letztere von unten betrachtet dennoch schlecht zu lesen gewesen waren. Möglicherweise hatte Diogenes die Buchstaben deshalb zusätzlich ausmalen lassen.

Nach wie vor herrscht Ungewissheit über den genauen Standort der Säulenhalle. Südlich und nördlich des Hauptplatzes von Oinoanda haben die Archäologen Fundamente in Frage kommender Gebäude nachgewiesen. Genauer könnten das nur Grabungen ermitteln, doch die türkischen Behörden stellen hohe Anforderungen wie eine Projektlaufzeit von zehn Jahren, eine Anwesenheitspflicht des Grabungsleiters von mindestens zwei Monaten pro Jahr sowie die Rekonstruktion architektonischer Strukturen vor Ort. Den Archäologen Michael Heinzlmann von der Universität zu Köln reizt die Aufgabe dennoch: »Anderorts ist nur noch wenig antike Bausubstanz vorhanden. In Oinoanda sind viele Gebäude nur eingestürzt, man bräuchte die Steinblöcke nach Untersuchung und Dokumentation nur wieder aufeinanderzusetzen.«

Martin Lehrer ist Fachjournalist für Geschichte und Archäologie in Köln sowie Redaktionsleiter der kommunalpolitischen Zeitschrift »Städte- und Gemeinderat«.

NANOPHOTONIK

Kristallspiegel zeigt verborgene Atome

Die klassische Absorptionsspektroskopie mit Röntgenstrahlung versagt, wenn schwerere Elemente im Inneren einer Probe leichte Atomsorten wie Kohlenstoff abschirmen. Finnische Wissenschaftler entwickelten deshalb eine Spektroskopie mit inelastischer Röntgenstreuung.

VON CHRISTIAN G. SCHROER

Ein Beinbruch als Folge eines Unfalls, Gepäckkontrollen am Flughafen – weil Röntgenlicht tief in das zu untersuchende Objekt eindringt, vermag es, innere Strukturen sichtbar zu machen. Das Bild, das auf einem Röntgenfilm oder -chip entsteht, offenbart jene Bereiche, von denen die Strahlung absorbiert wurde. Je dicker der Gegenstand und je schwerer die Elemente, aus denen er besteht, desto energiereicher muss sie sein. Damit erkaufte man sich aber einen oft unerwünschten Nebeneffekt: Leichte Atomsorten zeichnen

sich kaum noch im Bild ab, denn sie entnehmen diesem Licht um mehrere Größenordnungen weniger Energie. Was aber, wenn das Interesse gerade ihnen gilt?

Beispielsweise kommen Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff in natürlichen wie künstlich hergestellten Materialien häufig vor, etwa in modernen Verbundwerkstoffen. Wenn Wissenschaftler klären wollten, wie diese leichten Atomsorten in eine Umgebung aus schwereren eingebunden sind, mussten sie ihre Proben aufschneiden und die Schnitt-

flächen mikroskopisch untersuchen. Ein zerstörungsfreies Verfahren bei solchen Fragestellungen wäre eigentlich die Absorptionsspektroskopie: Forscher durchleuchten eine Probe und messen im austretenden Licht, bei welchen Wellenlängen in welchem Maß Energie entnommen wurde. Denn jedes Element zeigt ein charakteristisches Absorptionsverhalten, anhand dessen sich sogar chemische Bindungen unterscheiden lassen. Die interessanten Anregungen bei den drei genannten leichten Atomsorten liegen aber im Bereich so ge-

Das Weltall wimmelt von Wohnstätten

Fast jeder Stern hat mehrere Begleiter.

Der Himmel ist hier zu Lande oft bedeckt, sternenklare Nächte erlebt man im Frühjahr selten. Außerdem wohnt unsereins zumeist in Städten, wo künstliches Licht die Sterne überstrahlt. Nicht nur deswegen hat das Himmelszelt seinen Rang als Projektionsfläche des herrschenden Weltbilds eingebüßt. Einst wölbte es sich als Domkuppel über dem irdischen Jammertal, dem Schauplatz von Sündenfall, Kreuzestod und Jüngstem Gericht. Als Giordano Bruno im 16. Jahrhundert die Unendlichkeit der Welten predigte, ließ die römische Kirche den Ketzer verbrennen.

Für Kant, den deutschen Philosophen der Aufklärung, war das Firmament zwar nicht mehr Gegenstand religiöser Betrachtung, aber immer noch staunenswert: »Der bestirnte Himmel« erfüllte sein »Gemüt mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Ehrfurcht, je öfter und anhaltender sich das Nachdenken damit beschäftigt.« Hingegen findet wenig später der Philosoph Hegel am Sternenhimmel überhaupt nichts Erhabenes; er vergleicht ihn mit einem Ekzem und einem Insektenschwarm: »Dieser Licht-Ausschlag ist so wenig bewundernswürdig, als einer am Menschen, oder als die Menge von Fliegen.«

Im 20. Jahrhundert schlägt die Stunde der astronomischen Tragiker. Das Weltall erscheint in populären Darstellungen wüst und leer, eisig und lebensfeindlich. Für den französischen Biologen Jacques Monod ist die Entstehung von Leben ein so extrem unwahrscheinlicher Zufall, dass wir uns zwischen den Sternen mutterseelenallein fühlen müssen. Unsere Existenz erscheint Monod so absurd wie seinem Landsmann, dem Schriftsteller Albert Camus.

Darum werden Hegelianer und Existenzialisten meine Begeisterung über einen soeben erschienenen Artikel kaum verstehen, der sich mit der Häufigkeit von Planetensystemen im All befasst. Ein multinationales Astronometeam hat in jahrelanger Arbeit Millionen Sterne danach untersucht, ob sie von Planeten umkreist werden (*Nature* 481, S. 167–169, 2012).

Die Forscher nutzten dabei den Mikrogravitationslinseneffekt. Ein Stern krümmt mitunter durch seine Schwerkraft das Licht eines leuchtenden Hintergrundobjekts und kann dessen Strahlung wie eine Linse bündeln und verstärken. Wird dieser Stern von Planeten umkreist, verrät sich das durch winzige Schwankungen des Linseneffekts. Auf diese Weise konnten die Astronomen erstmals eine recht zuverlässige Planetenstatistik aufstellen. Das Fazit: Planeten sind im All die Regel, nicht die Ausnahme. Unser Sonnensystem hat unzählige Geschwister.

Damit steigt natürlich auch die Wahrscheinlichkeit erdähnlicher Planeten, die ihr Zentralgestirn in einem Abstand umrunden, der Leben zulässt. Im Licht dieses Resultats bietet der Nachthimmel nicht mehr nur den Anblick einer leblosen Sternensüste, eines kalten Vakuums mit darin verstreuten Staub- und Gaswolken. Die Lichtpunkte signalisieren Orte, um die unsichtbar die unterschiedlichsten Gebilde wandern – manche gasförmig, die meisten nicht für lebende Organismen geeignet. Aber angesichts der Unzahl der Sterne und Planeten gibt es unter ihnen sicher auch solche, die Leben beherbergen.

Wir müssen uns also an den paradoxen Gedanken gewöhnen, dass das Weltall trotz allem ein wohnlicher Ort ist. Weil es aber so dünn besiedelt ist, werden wir niemals mit den intelligenten Wesen, die irgendwo da draußen zu ihrem Himmel aufschauen, in Dialog treten können. Auch sie kommen wohl irgendwann zu dem Schluss, dass sie nicht allein im Universum sind – und dass sie dennoch für immer einsam bleiben müssen.



Michael Springer

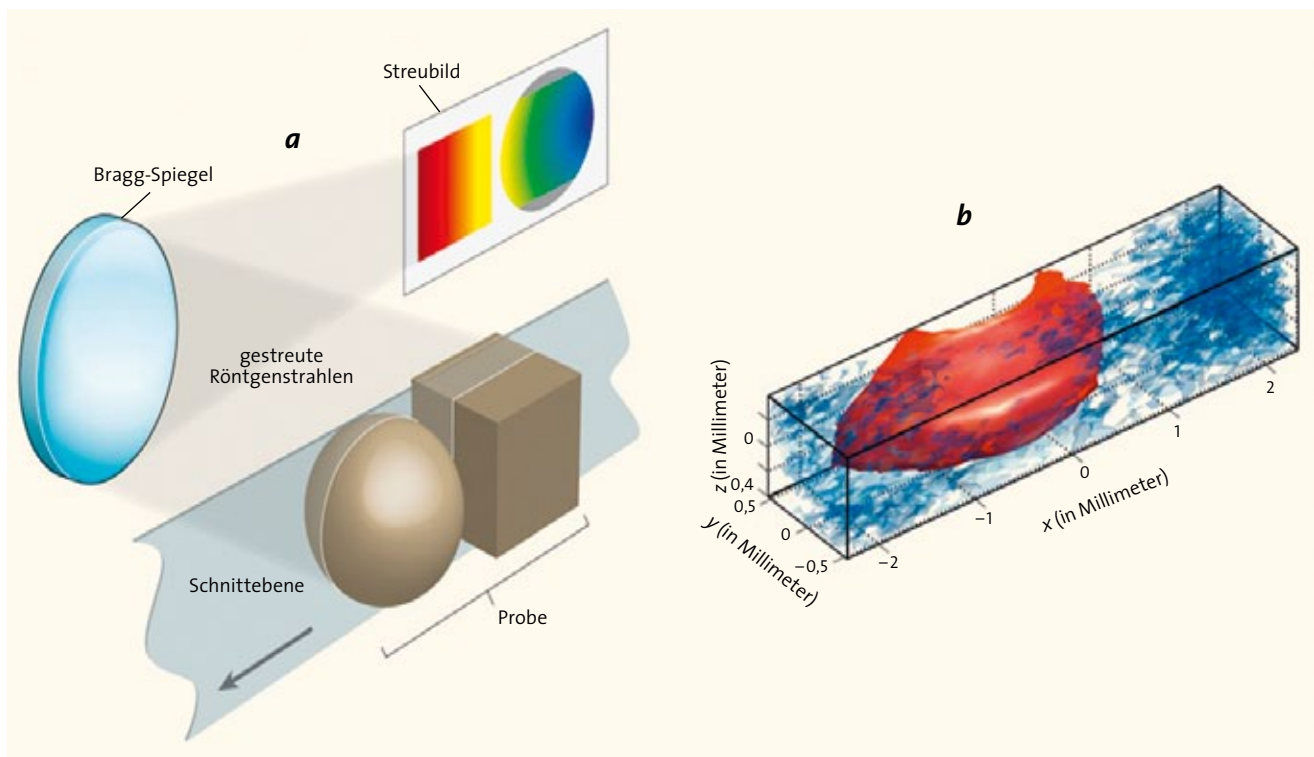
nannter weicher, das heißt energieärmer Röntgenstrahlung. Doch diese dringt nicht weiter als einige tausendstel Millimeter in das Material ein.

Wissenschaftler um Simo Huotari von der Universität Helsinki haben eine trickreiche Lösung erdacht, um leichte Elemente auch in wesentlich dickeren Proben zu beobachten: Mit hartem, also energiereichem Röntgenlicht, das mehrere Millimeter unter die Oberfläche gelangt, bestrahlen sie eine Probe, messen aber nicht, was auf geradem Weg hindurchdringt und auf der anderen Seite wieder herauskommt, sondern analysieren das Spektrum der seitlich gestreuten Strahlung.

Umfassende Information dank unvollständiger Absorption

Die harte Röntgenstrahlung regt leichte Elemente durchaus an, führt also ihrer Elektronenhülle Energie zu. Weil sie aber viel mehr Energie enthält, als für die Anregung eines Elektrons nötig ist, wird sie nicht vollständig absorbiert. Die Photonen übertragen stattdessen nur einen kleinen Teil und werden seitlich abgelenkt; man spricht deshalb von inelastischer Streuung. Bei welchen Wellenlängen und in welchem Maß die Anregung geschieht, hängt wieder vom Element und seiner chemischen Umgebung ab. Diese Informationen lassen sich aus dem Spektrum der Streustrahlung gewinnen.

Bei dem neuen Verfahren fällt das Licht durch einen Spalt und durchdringt die Probe entlang einer dünnen Schnittebene (siehe Grafik rechts). Die verschiedenen Elemente streuen es in alle möglichen Richtungen. Um daraus nur jenes herauszufiltern, das von einer Atomsorte in einer bestimmten Umgebung stammt, verwenden die Forscher einen Bragg-Spiegel. Das ist ein Kristall, der Licht je nach dessen Wellenlänge in eine bestimmte Richtung reflektiert. Fällt es auf einen Fotodetektor, sieht dieser also nur eine schmale Energiebande aus dem gesamten Streuspektrum. Auf dem Messgerät erscheint dann ein direktes Bild der Bestandteile entlang der Schnittebene, von denen diese Strahlung ausgeht – also ein Bild



SCHROER, C. G.: THE CHEMISTRY INSIDE. IN: NATURE 476, S. 159-160, 2011, FIG. 1

der leichten Elemente. Die verschiedenen Signaturen einer Atomsorte, die in ihrem Vergleich Aufschlüsse über die jeweiligen chemischen Bindungen geben, vermessen die Forscher dann, indem sie die Energie der einfallenden Strahlung verändern – das ist einfacher, als bei konstanter Energie den Spiegel über alle möglichen Winkel zu drehen. Schrittweises Verschieben der Probe erzeugt schließlich eine Datenmenge, aus der ein dreidimensionales Modell ihrer inneren Struktur rekonstruiert werden kann. Der Kontrast im Bild entsteht nicht durch verschieden starke Absorption wie beim klassischen Röntgenbild, sondern durch die Art der chemischen Bindung zu den Nachbaratomen. Keine andere Methode kann das Innere einer Probe auf eine solche Weise abbilden.

Dieses Prinzip demonstrierten die Forscher an einem mit Graphit umhüllten Diamanten. Anhand der unterschiedlichen Spektren der inelastisch gestreuten Röntgenstrahlung ließen sich die beiden Kohlenstoffgitter mühelos auseinanderhalten.

Das betreffende Streusignal ist sehr schwach, daher benötigt die neue Abbildungstechnik die stärksten verfügbaren Quellen für Röntgenstrahlen. Für

Das neue Röntgenverfahren beleuchtet eine dünne Scheibe der Probe. Deren innere Strukturen streuen die Strahlung auf einen Kristall, der nur Licht einer bestimmten eingestellten Energie auf eine Röntgenkamera reflektiert. Dort entsteht dann ein Bild vom Inneren der Probe, das nur vom Signal eines ausgewählten Elements und seiner chemischen Bindungen stammt (a). Die Technik kann sogar zwei Bindungsarten reinen Kohlenstoffs unterscheiden: Abbildung (b) zeigt einen Ausschnitt einer Probe, in der ein Diamant (rot) in Graphit (blau) eingebettet ist.

ihre Experimente arbeiteten die Forscher deshalb an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle (ESRF) in Grenoble (Frankreich). Dort laufen Elektronen in einem Speicherring mit etwa 840 Meter Umfang nahezu lichtschnell im Kreis und senden dabei intensive Röntgenstrahlung aus.

Europaweit erzeugen nur etwa 20 Forschungseinrichtungen Synchrotronstrahlung. Sie ist daher begehrt und teuer und wird nur für ausgewählte Proben und Experimente verwendet – prominentes Beispiel war die Himmelscheibe von Nebra, die Forscher am Elektronenspeicherring BESSY II in Berlin untersuchten. Doch auch mit dieser Einschränkung birgt die neue Abbildungstechnik Potenzial für viele Anwendungen in Industrie und Wissenschaft. So ließen sich mit ihr chemische Reaktionen in geschlossenen Behältnis-

sen verfolgen, die Wanderung von Lithiumionen – einer extrem leichten Atomsorte – im Inneren einer Batterie beobachten oder unterschiedliche Phasen (homogene Bereiche) in Kunststoffmischungen abbilden. Sogar Einschlüsse in Fossilien oder in außerirdischem Gestein könnten Forscher aufspüren, ohne die wertvollen Proben zerstören zu müssen. Für lebende Zellen und andere empfindliche Proben ist diese Strahlung allerdings zu intensiv – bei den im Moment noch erforderlichen stundenlangen Belichtungszeiten würde sie die Strukturen zu stark beschädigen. Die Forscher arbeiten aber bereits daran, die Empfindlichkeit ihrer Methode zu steigern.

Christian G. Schroer ist seit 2006 Professor für Strukturphysik der kondensierten Materie an der TU Dresden.

Immuntherapie gegen Krebs

Im Sommer 2010 wurde der weltweit erste therapeutische Krebsimpfstoff in den USA zugelassen. Der Vakzine gegen Prostatakarzinome könnten bald andere folgen.

Von Eric von Hofe

Operation, Chemotherapie, Bestrahlung – das waren bisher die drei Hauptwaffen gegen Krebs. Deren oft schwere Nebenwirkungen lassen sich dank des inzwischen immer gezielteren und besser auf den einzelnen Patienten abgestimmten Vorgehens begrenzen, bei gleichzeitig größerem Therapieerfolg. Es gibt zudem heute schon einige Medikamente, die recht spezifisch die entarteten Zellen angreifen und nicht zu den Chemotherapeutika im engeren Sinn zählen: etwa Herceptin (Trastuzumab), das insbesondere bei einer bestimmten Form von Brustkrebs eingesetzt wird; oder Glivec (Gleevec/Imatinib), womit Ärzte unter anderem eine Leukämieart bekämpfen. Überlebte vor 30 Jahren die Hälfte der Patienten mit invasiv wachsenden Tumoren länger als fünf Jahre, so sind es heute immerhin zwei Drittel. Allerdings haben viele von ihnen noch immer keine normale Lebenserwartung.

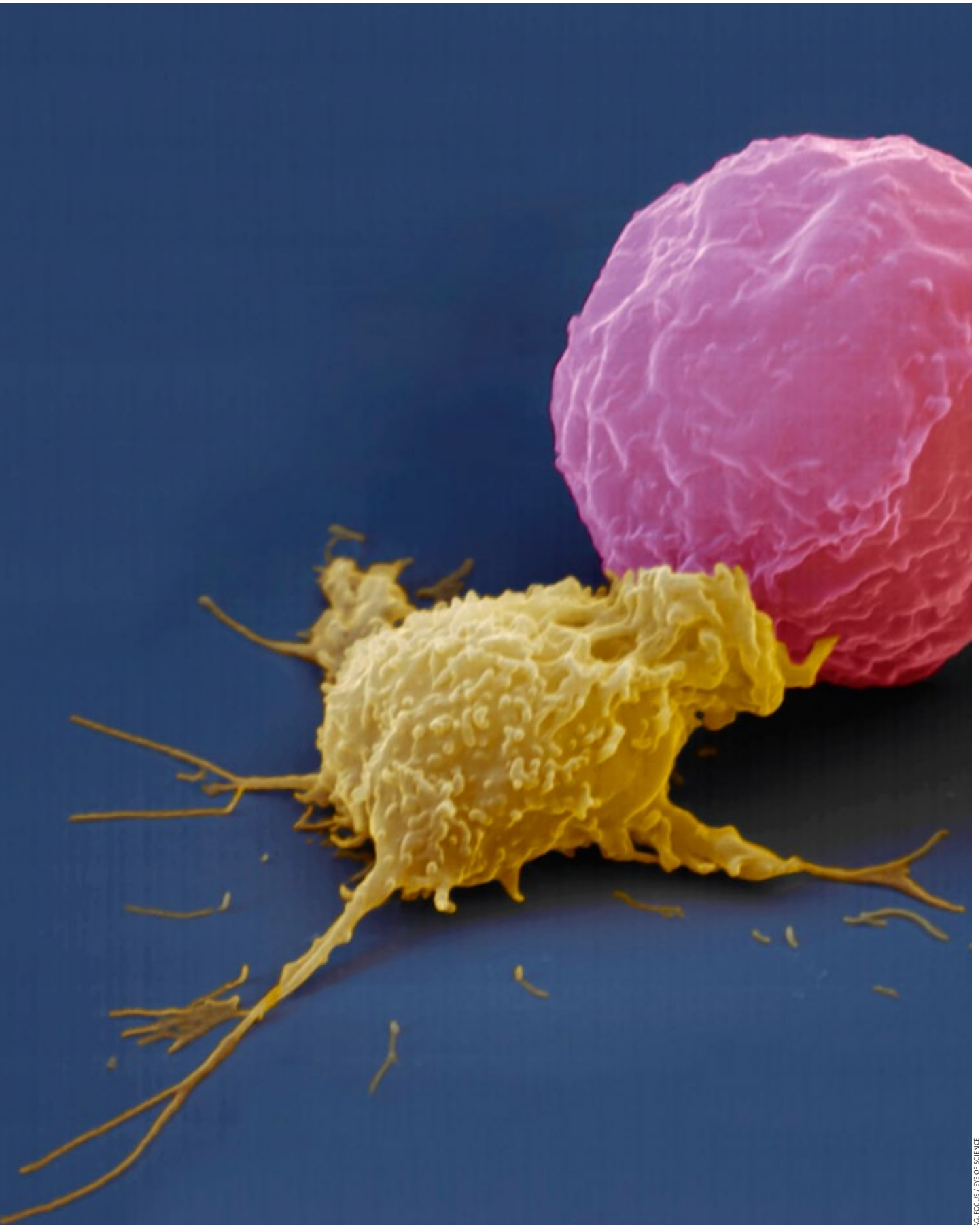
Seit Langem schon überlegen Forscher, dass sich die Aussichten von Krebskranken deutlich verbessern würden, wenn es gelänge, ihr Immunsystem gezielt anzustacheln – als zusätzliche Maßnahme neben den bewährten Behandlungen, die außerdem selbst keine schweren Nebenwirkungen haben dürfte. Doch die Studien der letzten Jahrzehnte enttäuschten meist. Vorübergehend hatten Mediziner beispielsweise große Hoffnung auf das Immunmolekül Interferon gesetzt. Es sollte die körpereigene Abwehr anregen und damit helfen, viele oder sogar alle Krebserkrankungen zu besiegen. Diese hohe Erwartung schwand in den 1980er Jahren bald wieder. Interferon hat zwar in der Krebstherapie inzwischen seinen festen Platz – aber es ist kein Allheilmittel. Auch in den letzten zehn Jahren gab es zahlreiche klinische Studien zu den unterschiedlichsten Ansätzen, einen bestehenden Krebs durch – therapeutisches – Impfen zu behandeln. Keiner davon überzeugte.

Die eine Wunderwaffe haben Forscher zwar immer noch nicht gefunden. Aber die Phase des blinden Vortastens und vergeblichen Probierens könnte bald überwunden sein. Im Sommer 2010 ließ die US-Behörde FDA (Food and Drug Administration) den weltweit ersten therapeutischen Krebsimpfstoff für fortgeschrittene Prostatakarzinome zu: Provenge (Sipuleucel-T). Zwar heilt auch dieses Medikament nicht. Doch einige hundert schwer krebserkrankte Männer, die es zusammen mit einer üblichen Chemotherapie erhielten, gewannen dadurch immerhin ein paar zusätzliche Lebensmonate.

Die Wende kam, als Forscher einige Grundannahmen zur Immunabwehr von Krebszellen einerseits und zu deren Gegenmaßnahmen andererseits überprüften. Die Ergebnisse dieser Arbeiten bewerten die Experten inzwischen vorsichtig optimistisch. Mit dem neuen Wissen könnte es nun doch endlich gelingen, sehr spezifisch wirksame immunverstärkende Therapien zu entwickeln, die sich routinemäßig zusammen mit den klassischen Behandlungsmethoden einsetzen lassen. Und die Nebenwirkungen sollten höchstens den Symptomen eines heftigen grippalen Infekts ähneln.

Die meisten herkömmlichen Impfungen werden vorbeugend verabreicht. Sie zielen darauf ab, Infektionskrankheiten und deren mitunter verheerende Langzeiteffekte von vornherein zu unterbinden – wie die bleibenden Schäden einer Kinderlähmung, Hirndefekte durch Masern oder Leberkrebs infolge einer Hepatitis-B-Infektion. Eine so genannte therapeutische Impfung indessen richtet sich gegen eine schon bestehende Erkrankung. Im Fall von Krebs wäre das Ziel, das

Ein T-Lymphozyt (eine Klasse von Immunzellen, gelb) attackiert eine Krebszelle. Er erkennt sie an bestimmten Molekülen – Antigenen – auf ihrer Oberfläche.



AG. FOCUS / EYE OF SCIENCE

Immunsystem darauf zu trainieren, die unerwünschten Zellen überall im Körper zu erkennen und anschließend zu zerstören, und das selbst noch Jahre später.

Bei vielen vorbeugenden Impfungen bildet unser Immunsystem schlicht Antikörper gegen den Erreger. Gewöhnlich genügt das, um die betreffende Infektionskrankheit zu verhindern. Die Antikörper lagern sich dann beispielsweise an Grippeviren an, und diese können sich nun nicht weiter vermehren. Um Krebszellen abzutöten, reichen Antikörperreaktionen jedoch gewöhnlich nicht aus. Vielmehr muss das Immunsystem dazu seine T-Zellen – T-Lymphozyten – rekrutieren. Bei diesen weißen Blutkörperchen unterscheiden die Forscher unter anderem zwei Haupttypen: CD4- und CD8-Zellen, so benannt nach bestimmten Rezeptorproteinen außen auf den T-Zellen. Gerade CD8-Lymphozyten können Krebszellen effektiv und direkt vernichten – vorausgesetzt, sie sind dafür geschult, solche Zellen als entartet zu erkennen (siehe Kasten S. 29).

Frühe Versuche mit Bakteriengiften

Allerdings entstand der Wunsch, Krebs mit Impfung zu bekämpfen, lange bevor solche Feinheiten entdeckt wurden. Als »Vater der Krebsimmuntherapie« gilt der amerikanische Arzt William B. Coley (1862–1936). Schon Ende des 19. Jahrhunderts, als noch keine Rede von irgendwelchen T-Zellen war, verabreichte er Krebspatienten Bakterientoxine. Denn er hörte von Kranken, deren bösartige Wucherungen nach einer schweren bakteriellen Infektion offenbar verschwanden. Das versuchte er mit Impfreaktionen nachzuahmen. Coley verwendete ein Präparat von zwei lebensgefährlichen und deswegen abgetöteten Erregern. Davon bekamen die Patienten sehr hohes Fieber. Sie erhielten täglich eine höhere Dosis des Toxingemischs injiziert, denn der Forscher vermutete, die Fieberattacken könnten die darniederliegende Immunabwehr der Kranken reaktivieren und dazu bringen, auch die Krebsgeschwülste als unerwünscht zu erkennen und zu bekämpfen. Bei einem beachtlichen Teil der Patienten

Langer Weg zum Erfolg

Seit mehr als 100 Jahren versuchen Forscher, das Immunsystem gegen Krebs anzustacheln.

1890ER JAHRE

William B. Coley injiziert Krebspatienten einen Extrakt aus abgetöteten Bakterien.

1975

Gezielte Herstellung monoklonaler Antikörper; das liefert hochspezifische Immunwaffen.

1909

Paul Ehrlich (Bild) vertritt die These, das Immunsystem könne Tumorzellen unterdrücken.



BEILINER ILLUSTRIERTE ZEITUNG/PHO / PUBLIC DOMAIN

ten zeitigte diese drastische Behandlung tatsächlich sehr guten Erfolg. Coleys Ansicht, die Impfung mit den Bakterientoxinen hätte den Heilungsprozess ausgelöst, war wohl durchaus berechtigt.

Doch es gab auch Widerstand gegen die Methode seitens der Fachkollegen. Andere Behandlungsmöglichkeiten kamen auf, etwa Anfang des 20. Jahrhunderts die Bestrahlung. Als Chemotherapien in den 1950er Jahren immer konsistentere Therapieergebnisse erzielten, verloren Mediziner vollends das Interesse an Coleys Ansatz. Überhaupt geriet die Idee, Krebs durch Impfen zu bekämpfen, völlig in den Hintergrund.

Wissenschaftliche Studien zur Bedeutung des Immunsystems bei Krebs gab es jedoch weiterhin. Mit solchen Forschungen erkannten Mediziner nun auch, dass der deutsche Arzt Paul Ehrlich (1854–1915) wohl 1909 mit seiner These Recht gehabt hatte, wonach die Abwehr normalerweise ständig darüber wacht, ob irgendwo im Körper Krebszellen auftreten. Diese Vorstellung bekam in den 1980er Jahren zusätzlichen Rückhalt, als klar wurde, wie oft bei Zellen im Körper potenziell gefährliche Spontanmutationen auftreten. Demnach müsste Krebs eigentlich sehr viel häufiger vorkommen, als es tatsächlich der Fall ist.

Nach den Beobachtungen bleibt das Immunsystem tatsächlich auch dann nicht untätig, wenn ihm einmal ein Tumor durchschlüpft. Nur kann es später oftmals nicht mehr genug erreichen. Pathologen sagen manchmal, Tumoren seien »Wunden, die nicht heilen« – wissen sie doch schon lange, dass Krebsgeschwülste oft mit Immunzellen durchsetzt sind. Weitere Untersuchungen ergaben aber auch, dass, je größer ein Tumor wird, er umso mehr Substanzen freisetzt, mit denen er die Aktivität von T-Lymphozyten regelrecht unterdrückt. Könnten Krebsimpfungen an dieser Stelle ansetzen? Wie ließen sich die Kräfteverhältnisse so beeinflussen, dass T-Zellen doch noch die Oberhand gewinnen?

AUF EINEN BLICK

KREBS: NEUE THERAPIEN IM VISIER

1 Dank Verbesserungen der konventionellen Krebsbehandlung – mit **Operation, Chemotherapie und Bestrahlung** – sind die Überlebensebenen von Krebspatienten in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegen. Dennoch haben viele der erfolgreich Behandelten noch immer keine normale **Lebenserwartung**.

2 Deswegen möchten Mediziner nun **das Immunsystem** gezielt mit in die Therapie einbeziehen. Neben Immunstimulanzien untersuchen sie zu dem Zweck auch **therapeutische Impfstoffe**.

3 Nach manchen Fehlschlägen in den letzten zehn Jahren scheint sich nun die Wende anzubahnen. Der erste Impfstoff zur Behandlung von Prostatakrebs wurde in Amerika zugelassen, und eine **neue Generation von therapeutischen Krebsvakzinen** wird erprobt.

nomzellen erkannten und abtöteten. Anschließend vermehrten die Forscher die aktivierten T-Zellen massiv und verabreichten sie wieder den Patienten. Solche Verfahren, eigene Immunzellen außerhalb des Körpers scharf zu machen, zu vermehren und dann dem Kranken zurückzugeben, bezeichnen Forscher als adoptive Immuntherapie (siehe hierzu auch den Artikel von Rosenberg in Spektrum der Wissenschaft 7/1990, S. 56). Bei einer Krebsimpfung hingegen würde das Immunsystem die besonderen Abwehrzellen selbst im Körper herstellen.

Vorangegangene Behandlungsversuche von Melanompatienten im Sinn einer adoptiven Immuntherapie allein mit CD8-Lymphozyten waren wirkungslos geblieben. Erst als das Rosenbergteam auch noch CD4-Zellen hinzufügte, gab es bessere, teils eindrucksvolle Resultate. Die Tumoren von 6 der 13 Patienten schrumpften erheblich. Zwei von ihnen bildeten über ein Dreivierteljahr nach Behandlungsende noch immer wirksame krebspezifische Abwehrzellen. Auf die Prozedur selbst reagierten die Kranken meist vorübergehend mit grippeähnlichen Symptomen. Vier der so Behandelten zeigten allerdings zudem eine komplexe Autoimmunreaktion mit teilweisem Verlust der Hautpigmentierung.

Zu viel Aufwand mit Zellen aus dem Labor

Weil diese Versuche bewiesen, dass eine gezielte Krebsbehandlung mittels T-Zellen möglich sein sollte, fanden Ansätze zu Immuntherapien gegen die fatale Krankheit unter Medizinern endlich mehr Akzeptanz. Jedoch erforderte das beschriebene Vorgehen von Rosenbergs Gruppe eine Riesenanzahl an manipulierten Lymphozyten: pro Patient über 70 Milliarden CD8- und CD4-Zellen, was einigen hundert Millilitern Zellsuspension entspricht.

Deswegen suchten die Forscher nun nach einfacheren Verfahren, die trotzdem ebenso gute Ergebnisse erzielen. Sie wollten Immunzellen direkt im Körper dazu bringen, die gewünschten Eigenschaften zu entwickeln und sich stark zu vermehren – eben das, was nach einer erfolgreichen Impfung geschieht.

Wir Forscher bei der Firma Antigen Express freuten uns über Rosenbergs Befund, wonach ein Krebsimpfstoff zugleich CD4- und CD8-Lymphozyten aktivieren muss. Auf Grund eigener Tierversuche hatten wir dies schon vermutet und die Zukunftspläne unseres Unternehmens wesentlich danach ausgerichtet.

Für die Entwicklung eines Krebsimpfstoffs sind von vornherein drei Aspekte entscheidend. Zum einen kommt es darauf an, auf welches molekulare Element – Antigen genannt – des Tumors man das Immunsystem überhaupt ansetzen möchte. Auch muss man erarbeiten, wie man dem Immunsystem die Vakzine am besten darbietet, damit es gut darauf anspricht. Ebenso ist es wichtig zu wissen, für welche

Krebspatienten der Impfstoff in Frage kommt, und auch, in welchem Krankheitsstadium man ihn effektiv einsetzt.

Mitarbeiter von Firmen, die sich mit solchen Entwicklungen befassen, haben in den letzten Jahren viele Proteine und auch Peptide, also kürzere Proteinfragmente, von Tumoren auf ihre Eignung als Impfstoffantigene hin untersucht. Von Vorteil ist in dem Zusammenhang, dass dieselben genetischen Veränderungen, die Krebszellen ungehemmt wachsen lassen, sie auch dazu bringen, bestimmte Proteine

wesentlich mehr zu bilden als gesunde Zellen. Rund zehn Unternehmen, darunter unseres, arbeiten bereits an verschiedenen Peptiden.

Man könnte für den gleichen Zweck auch DNA-Stücke mit Krebsgenen verwenden

oder selbst ganze Krebszellen, die durch Bestrahlung ungefährlich gemacht wurden. Aber Peptide bieten sich unter anderem deshalb an, weil sie recht klein, kostengünstig zu produzieren und insbesondere leicht manipulierbar sind. Mit ihnen kann man daher relativ einfach Impfstoffe entwerfen und in größerer Menge herstellen. Ein weiterer Vorteil: Ein und dieselbe Vakzine müsste sich für verschiedene Krebsarten eignen. Denn soweit bisher untersucht, scheinen die gleichen Peptide immer wieder vorzukommen. Eine zellbasierte Immuntherapie würde dagegen individuell angepasste Präparate erfordern. Nicht zuletzt verursachen sämtliche bisher getesteten Peptidimpfstoffe vergleichsweise geringe Nebenwirkungen, wie vorübergehende Reizungen an der Injektionsstelle oder mitunter Fieber und andere grippeähnliche Symptome.

Vor zehn Jahren hatten Wissenschaftler von Antigen Express ein Peptid umgebaut, das zuvor schon in einem experimentellen Impfstoff gegen Brustkrebs verwendet worden war. Es stammte aus dem HER2-Protein, dem Angriffsziel des eingangs erwähnten Trastuzumab – eines monoklonalen Antikörpers, mit dem bestimmte Formen von Brustkrebs behandelt werden. Als sie dieses Peptid um nur vier Aminosäuren verlängerten, steigerte das seine Stimulationskraft für CD4- und CD8-Lymphozyten enorm, die HER2 produzierende Brustkrebszellen angreifen. Dies war das oben erwähnte Ergebnis, auf das unsere Firma setzte. Uns bestärken jetzt auch kürzlich veröffentlichte vorläufige Befunde anderer Forscher, die unseren Impfstoff mit zwei anderen Peptidvakzinen verglichen, welche nur auf CD8-Zellen abzielen.

Die einzelnen Unternehmen verfolgen unterschiedliche Ansätze. Dendreon etwa, Hersteller des vorne genannten, in Amerika zugelassenen Impfstoffs Provenge gegen Prostatakrebs, sowie einige weitere Firmen manipulieren die dendritischen Immunzellen: die wichtigsten »Wachhunde« des Immunsystems (siehe Kasten rechts, rechts oben). Dendritische Zellen finden sich im gesamten Körper, doch vor allem dort, wo Kontakt mit der Außenwelt besteht, also besonders in der Haut und in der Schleimhaut des Verdauungstrakts. Diese

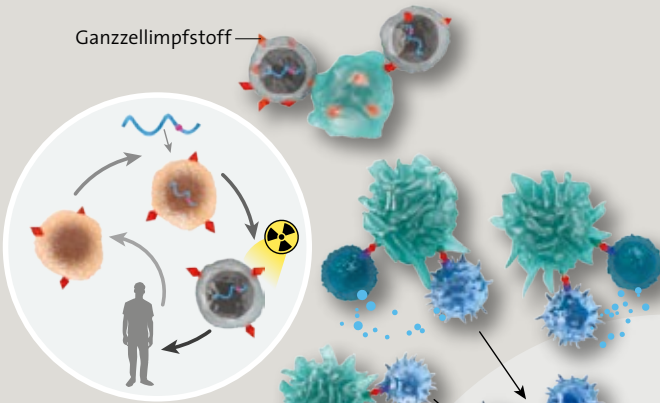
Bei einer regelrechten Krebsimpfung würde das Immunsystem die Abwehrzellen selbst im Körper herstellen

Drei Impfstrategien

Das Immunsystem erkennt Krebszellen nicht ohne Weiteres als fremd oder gefährlich. T-Zellen – bestimmte Immunzellen – von Patienten lassen sich aber im Labor hierzu veranlassen, dann vermehren und zurückübertragen. Noch praktischer wäre ein therapeutischer Impfstoff, bei dem dies im Körper selbst geschieht. Medizinforscher entwickeln hierzu drei verschiedene Ansätze.

1

Ganzzellimpfstoff

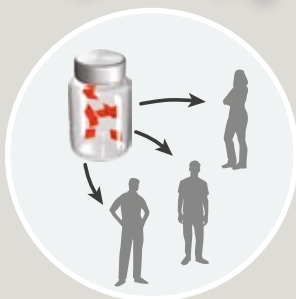


KOMPLETTE TUMORZELLEN

Dem Patienten werden Krebszellen entnommen. In diese schleust man Gene ein, die dem Immunsystem deren Erkennung erleichtern. Vor der Rückgabe werden die Zellen mittels Bestrahlung abgetötet. Sie bieten der Immunabwehr zahlreiche Zielstrukturen.

2

Peptidimpfstoff

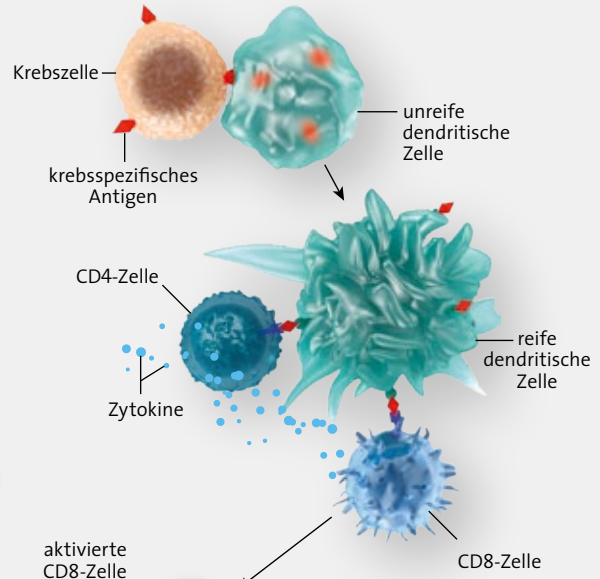


PEPTIDE

Das Immunsystem erkennt krebspezifische Antigene, die etwas verändert wurden, teilweise viel besser. Solche Fragmente oder Peptide sind leicht im Labor herstellbar und für viele Patienten geeignet.

DIE NATÜRLICHE IMMUNREAKTION AUF KREBSZELLEN

Dendritische Immunzellen verschlingen Tumorzellen und präsentieren Bestandteile (Antigene) davon CD4- und CD8-Zellen. CD4-Zellen setzen nun Zytokine frei, welche CD8-Zellen aktivieren helfen. Diese attackieren dann Zellen mit dem betreffenden Antigen, also Krebszellen. Nur ist diese Reaktion oft nicht stark genug, um einen ganzen Tumor zu vernichten.

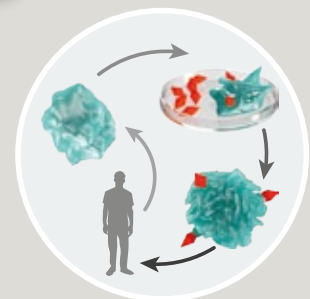


3

DENDRITISCHE ZELLEN

Dendritische Zellen des Patienten werden im Labor mit Tumorantigenen versetzt. Auf diese Weise wird auch der kürzlich in den USA zugelassene Impfstoff gegen Prostatakrebs hergestellt.

Impfstoff mit manipulierten dendritischen Zellen



Wächterzellen gehören zu den ersten, die T-Lymphozyten alarmieren.

Der Trick bei dem Prostataimpfstoff ist, dendritische Zellen im Labor mit Antigenen von Krebszellen zu beladen und sie dem Kranken zuzuführen – was die T-Zellen in Gang bringen soll. Dazu muss man allerdings einigen Aufwand betreiben. Immunzellen nehmen nur von genetisch gleichen Partnern Befehle entgegen. Deswegen werden dem Patienten dendritische Zellen entnommen, mit dem krebsspezifischen Protein versehen und ihm wieder injiziert. Eine vollständige Behandlung kostet derzeit fast 100 000 Dollar. Zu den Nebenwirkungen gehören Schüttelfrost, Fieber und Kopfschmerzen, seltener auch ein Schlaganfall. Die US-Behörde ließ den Impfstoff zu, weil in einer Kurzzeitstudie damit behandelte Männer mit fortgeschrittenem Prostatakrebs im Durchschnitt mindestens vier Monate länger lebten als solche ohne diese Behandlung.

Zeitverzögerte Reaktion auf Immuntherapie

Für Krebsimpfstoffe scheint eine neue Zeit angebrochen – nicht nur wegen Provenge, denn auch eine Reihe anderer viel versprechender Impfstoffe ist derzeit in klinischen Tests. Je weiter wir auf dem Feld vordringen, desto deutlicher wird aber auch, dass an eine Immuntherapie andere zeitliche Maßstäbe anzulegen sind als an eine Chemotherapie oder Bestrahlung. Ob eine konventionelle Behandlung anschlägt oder nicht, pflügt sich in ein paar Wochen herauszustellen. Ist der Tumor dann nicht kleiner geworden, so hat die Maßnahme vermutlich nichts gebracht. Mit Krebsimpfungen ist das verschiedenen klinischen Studien zufolge anders. Offenbar kann es da bis zu einem Jahr dauern, bis das Immunsystem das Tumorwachstum in den Griff bekommt.

Das überrascht nicht wirklich. Die Abwehr benötigt eine Menge Überredung, damit sie gegen Krebszellen vorgeht, denn diese gleichen immunologisch normalen Körperzellen allzu sehr. Viren oder Bakterien zu attackieren, also wirkliche Fremdlinge, fällt ihr sehr viel leichter. Diese Toleranz für körpereigenes dürfte das größte Hindernis sein, das die Forscher bei Krebsimpfstoffen überwinden müssen. Nicht selten scheinen Tumoren nach dem Impfen zunächst sogar noch weiterzuwachsen. Doch wie Gewebeproben zeigten, kann die Zunahme auf eingewanderte Immunzellen zurückgehen, welche die Gesamtmasse der Geschwulst vergrößern.

Sollte das Immunsystem auch weiterhin so schleppend auf die Impfreize ansprechen, wie es bisher der Fall zu sein scheint, würde daraus für Behandlungsstrategien in näherer Zukunft zweierlei folgen: Zum einen hätten Patienten mit frühen Krebsstadien vermutlich die besseren Chancen – solange nämlich die Tumoren nicht so groß sind, dass sie bereits das Immunsystem hemmen. Diesem Personenkreis bleibt auch genügend Zeit, eine Immunantwort abzuwarten. Zum anderen müssten sich Patienten mit fortgeschrittener Erkrankung vor der Impfung zuerst konventionellen Behandlungen unterziehen, die den Tumor zunächst verkleinern. Denn große, länger bestehende Geschwülste vermögen das

Immunsystem nun einmal besser zu schwächen und sogar zu unterlaufen als kleine, jüngere. Weil sie viel mehr Zellen enthalten, geben sie nicht nur mehr immunsupprimierende Substanzen ab, sondern auch eine größere Palette davon. Im Spätstadium der Erkrankung kann selbst ein gesundes Immunsystem der Tumormasse wohl einfach nicht mehr Herr werden.

Auch wenn sicherlich noch einige Hürden bestehen, wissen wir nun: Das Immunsystem lässt sich bei einer Krebstherapie erfolgreich einbeziehen. Diese Erkenntnis gab vielen Krebsforschern aus wissenschaftlichen Institutionen und der Industrie, die auf dem Gebiet arbeiten und allzu oft Rückschläge einstecken mussten, neue Zuversicht. Sogar manche Ergebnisse früherer klinischer Studien, die bisher als gescheitert galten, werden jetzt neu auf übersehene Anzeichen von Immunreaktionen hin analysiert. Ein solcher Verdacht besteht etwa im Fall der potenziellen Prostatakrebsvakzine Prostavac. Dieser Impfstoff verfehlte damals das gesetzte Ziel, das Tumorwachstum aufzuhalten, und die kleine Firma, die ihn entwickelte, gab auf. Später stellte sich jedoch heraus, dass die Behandlung den Kranken mehr Lebenszeit schenkte. Glücklicherweise hatte sich ein anderes Unternehmen die Rechte an Prostavac gesichert und befasst sich nun damit.

Wer in einem Pharmabetrieb auf diesem Feld forscht, lernt bald, keine zu schnellen Versprechen abzugeben. Dennoch – immer mehr von uns sehen die therapeutische Krebsimpfung als zukünftiges Standbein neben den drei klassischen Verfahren Operation, Chemotherapie und Bestrahlung. Für einige der häufigsten Krebsarten könnte sie in absehbarer Zeit Wirklichkeit werden. ~

DER AUTOR



Eric von Hofe ist Präsident der Firma Antigen Express mit Sitz in Worcester, Massachusetts. Seine wissenschaftliche Arbeit widmet er der biotechnologischen Entwicklung neuer Krebstherapeutika.

QUELLEN

Perez, S. et al.: A New Era in Anticancer Peptide Vaccines. In: Cancer 116, S. 2071–2080, 2010; www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20187092
Vergati, M. et al.: Strategies for Cancer Vaccine Development. In: Journal of Biomedicine and Biotechnology 2010; www.hindawi.com/journals/jbb/2010/596432

LITERATURTIPP

Neue Strategien gegen Krebs. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 3/2009
Ausgewählte Artikel von »Spektrum der Wissenschaft« zum Thema Krebs

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139700

Kampf dem Schmerz.



Medizinthemen spielen in FOCUS schon immer eine zentrale Rolle. In FOCUS-GESUNDHEIT bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten. Die aktuelle Ausgabe bringt Sie auf den neuesten Stand zum Thema Rücken: Sie präsentiert innovative Behandlungsmethoden, beleuchtet vorbeugende Maßnahmen und nennt anerkannte Spezialisten.

Außerdem in diesem Heft:

- **Selbst-Test:** Wie beweglich sind Sie? Wie kräftig? Wie gefährdet?
- **Bandscheibe:** Was bringt die Operation?
- **Rückenschmerz:** Woher er kommt, was wirklich hilft. Die besten Ratschläge der Experten.
- **Prävention:** Den Rücken stark machen – jeden Tag.

Jetzt am Kiosk.

FOCUS-GESUNDHEIT gibt es auch unter: Tel. 0180 5 480 1000*, Fax 0180 5 480 1001*, www.focusgesundheit.de

* € 0,14/Min. aus dem dt. Festnetz. Aus dem Mobilnetz max. € 0,42/Min.

ERNÄHRUNG

Steak aus der Retorte?

Wie lässt sich der wachsende Fleischhunger der Weltbevölkerung befriedigen, ohne den Planeten zu Grunde zu richten? Für einige Forscher lautet die Antwort: Muskelgewebe züchten – in der Petrischale!

Von Jeffrey Bartholet

Visionäre vertreten ihre Sache leidenschaftlich – ja sogar fanatisch. Willem van Eelen ist da keine Ausnahme. Mit 87 Jahren kann er auf ein langes, außergewöhnliches Leben zurückblicken. Geboren wurde er im damals niederländisch beherrschten Indonesien, als Sohn eines Arztes, der eine Lepra-Kolonie verwaltete. Noch als Jugendlicher kämpfte er im Zweiten Weltkrieg gegen Japan und verbrachte mehrere Jahre in Kriegsgefangenenlagern. Die japanischen Wächter beuteten die Gefangenen als Sklavenarbeiter aus und ließen sie hungern. »War ein streunender Hund dumm genug, über den Zaun zu springen, hechteten die Gefangenen auf ihn zu, zerrissen ihn und aßen ihn roh«, erinnert sich van Eelen. »Wenn man meinen Bauch anschaute, sah man die Wirbelsäule. Ich war eigentlich schon tot.« Diese Erfahrung führte zu einer lebenslangen Obsession mit den Themen Ernährung und Kunst des Überlebens.

Wachsen lassen wie Getreide

Einige Jahre nach der Befreiung Indonesiens studierte van Eelen Medizin an der Amsterdamer Universität. Dort zeigte ein Professor den Studenten, wie er ein Stück Muskelgewebe im Labor am Leben hielt. Die Demonstration brachte van Eelen auf die Idee, essbares Fleisch zu züchten, ohne dafür Tiere aufziehen und schlachten zu müssen. Er entwickelte die Vision von proteinreicher Nahrung, die man wie Getreide wachsen lassen könnte – unabhängig von Klima- und anderen Umweltbedingungen und ohne Lebewesen töten zu müssen.

Heute scheint die Idee aktueller denn je. 1940 gab es etwas mehr als zwei Milliarden Menschen auf der Welt, und globale Erwärmung war kein Thema. Heute beherbergt unser Planet dreimal so viele Personen. Laut einem Bericht der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen von 2006 ist der Viehzuchtsektor für etwa 18 Prozent der menschengemachten Treibhausgasemissionen verantwortlich – ein größerer Anteil als jener sämtlicher Transportmittel zusammengenommen! Darüber hinaus erwartet die Organisation fast eine Verdoppelung des weltweiten Fleischverzehrs zwischen 2002 und 2050.

Fleisch aus Bioreaktoren statt Bauernhöfen könnte die schädlichen Auswirkungen auf unseren Planeten mildern. Hanna Tuomisto, eine Doktorandin an der University of Oxford, veröffentlichte 2010 eine Untersuchung der möglichen Vorteile, wenn Muskelzellen in einem Kultursubstrat aus

AUF EINEN BLICK

FLEISCHLABORE DER ZUKUNFT

1 Fleisch aus Laborkulturen könnte proteinreiche Nahrung liefern – ohne die **Umweltbelastungen** und **ethischen Bedenken**, die mit der **Massentierhaltung** einhergehen. Doch die Forschung kommt bislang nur schleppend voran.

2 Ein viel versprechender Ansatz ist die Kultur von **embryonalen Stammzellen in Nährmedien** und ihre **anschließende Ausdifferenzierung zu Muskelzellen**. Allerdings sind hier noch viele wissenschaftliche und technologische Hürden zu überwinden.

3 Kritiker bezweifeln, dass die **Konsumenten** das Laborfleisch überhaupt akzeptieren würden. Derzeit geht eine Studie dieser Frage nach – erste Ergebnisse sprechen dafür, dass die Menschen sich durchaus mit den künstlichen Hamburgern anfreunden könnten.

Ein vollständiges Stück Fleisch direkt aus der Petrischale wird noch lange ein Wunschtraum bleiben. Als Erstes dürfte In-vitro-Muskelgewebe in Form von Würsten und Hamburgern auf den Markt kommen – sofern sich die technischen Hürden überwinden lassen.



KEVIN VAN AELST

Zyanobakterien-Hydrolysat gezüchtet würden. Demnach könnte dies im Vergleich zur konventionellen Fleischproduktion den Energieverbrauch in Europa um 35 bis 60 Prozent senken, den Ausstoß von Treibhausgasen um 80 bis 95 Prozent und die Flächennutzung um 98 Prozent.

Im Moment dienen 30 Prozent der eisfreien Fläche der Erde als Weideland oder zum Anbau von Viehfutter. Wenn sich künstlich gezüchtetes Fleisch durchsetzen würde, ließe sich ein Großteil dieser Landfläche für andere Zwecke nutzen: etwa für neue Wälder, die der Luft Kohlendioxid entziehen. Fleisch müsste nicht mehr rund um den halben Globus transportiert werden, weil die Produktionsstätten nahe am Verbraucher gebaut würden. Einige Befürworter der Idee stellen sich beispielsweise kleine städtische Fleischlabors vor, die ihre Produkte auf Straßenmärkten anbieten.

Schon Winston Churchill hielt In-vitro-Fleisch für eine gute Idee. »In 50 Jahren werden wir der Unsinnigkeit entkommen, ein ganzes Hühnchen zu züchten, nur um eine Brust oder einen Flügel zu essen, indem wir diese Teile separat in einem geeigneten Medium heranzüchten«, sagte der spätere britische Premierminister 1932 in seinem Buch »Thoughts and Adventures« voraus. Für den größten Teil des 20. Jahrhunderts nahmen nur wenige diese Idee ernst – van Eelen aber ließ sie niemals los. Zwar hatte er im Lauf der Jahre viele unterschiedliche Jobs: Er verkaufte Zeitungen, arbeitete als Taxifahrer, fertigte Puppenhäuser an, gründete eine Organisation zur Unterstützung benachteiligter Kinder und besaß Kunstgalerien und Cafés. Daneben verfasste er jedoch immer wieder Vorschläge zum Thema In-vitro-Fleischproduktion und investierte sogar viel Geld in die Anmeldung von Paten-

ten. Zusammen mit zwei Partnern erhielt er 1999 ein niederländisches Patent, dann weitere europäische Patente und schließlich zwei US-amerikanische. 2005 konnte er gemeinsam mit anderen den niederländischen Wirtschaftsminister davon überzeugen, die dortige Forschung zur In-vitro-Fleischproduktion mit zwei Millionen Euro zu unterstützen – die größte Summe, die eine Regierung bis heute diesem Gebiet zur Verfügung stellte.

Damals war es einem amerikanischen Wissenschaftler bereits gelungen, ein Stück Fischfilet im Labor heranzuziehen. Unterstützt von einem kleinen Stipendium der US-Raumfahrtbehörde NASA, die sich für die Entwicklung von Nahrungsquellen für lange Weltraumreisen interessierte, hatte Morris Benjaminson einem Goldfisch kleine Stückchen Skelettmuskulatur entnommen und diese in Kulturgefäßen wachsen lassen. Danach wurden die Explantate kurz in Olivenöl, gehacktem Knoblauch, Zitrone und Pfeffer mariniert, in Semmelbröseln paniert und frittiert. »Einige Kolleginnen beurteilten danach das Ergebnis«, sagt Benjaminson, heute emeritierter Professor am Touro College in Bay Shore, US-Bundesstaat New York. »Es sah aus und roch eigentlich genauso wie ein Fisch, den man im Supermarkt kaufen kann.« Doch die NASA war wohl überzeugt davon, dass es einfachere Wege geben müsse, um Astronauten während langer Weltraumreisen mit Proteinen zu versorgen, und verweigerte weitere Forschungsgelder.

Außer Spesen nichts gewesen?

Mit dem Geldsegen der niederländischen Regierung wollten van Eelen und sein Kollege Henk P. Haagsman von der Universität Utrecht beweisen, dass man Stammzellen – die sich in eine Vielzahl verschiedener Zelltypen differenzieren können – aus Nutztieren entnehmen, kultivieren und schließlich dazu anregen kann, sich zu Skelettmuskelzellen zu entwickeln. Sie finanzierten ein Team aus einem Vertreter der Fleischfirma Meester Stegeman BV sowie führenden Wissenschaftlern von drei niederländischen Universitäten: Experten aus Amsterdam konzentrierten sich auf die Herstellung effizienter Wachstumsmedien; eine Arbeitsgruppe in Utrecht arbeitete daran, Stammzellen zu isolieren, zu vermehren und zu Muskelzellen zu differenzieren; und Forscher an der technischen Universität Eindhoven versuchten, die Muskelzellen zu »trainieren«, damit sie größer würden.

Die Wissenschaftler machten durchaus Fortschritte. So konnten sie feine, dünne Streifen von Muskelgewebe im Labor heranziehen – das aussah wie Stückchen von Muschelfleisch und eine zähe Konsistenz ähnlich der von Tintenfisch aufwies –, doch verhinderten immer noch zahlreiche Hürden eine vermarktungsfähige Großproduktion. »Wir lernten ständig dazu, aber wir hatten immer noch nichts aus einer Petrischale, das wie ein Steak schmeckte«, so Peter Verstrate, der damalige Sprecher von Meester Stegeman. Schließlich ging das niederländische Geld aus.

Heute schimpft van Eelen, dass einer der beteiligten Wissenschaftler »dumm« gewesen sei und dass andere ihn und



die niederländische Regierung lediglich ausgenommen hätten. »Ich weiß nicht, was sie in den vier Jahren getan haben. Reden, reden, reden – und jedes Jahr mehr von dem Geld nehmen«, sagt er. Laut den Wissenschaftlern hat van Eelen allerdings die Größe der Herausforderungen unterschätzt. »Er hatte die naive Idee, dass man Muskelzellen in eine Petrischale legen könnte, und sie würden einfach so wachsen. Und wenn man genug Geld in ein Projekt steckt, hätte man in ein paar Jahren Fleisch«, so Bernard Roelen, ein Zellbiologe, der an dem Projekt in Utrecht mitarbeitete.

Van Eelen war mit seinen revolutionären Visionen nicht allein. Im Jahr 2005 schloss ein Artikel in der »New York Times« mit der Vorhersage: »In einigen Jahren könnte es Fleisch aus Labors geben, das sich als Würstchen oder Pastete vermarkten lässt.« Einige Monate zuvor hatten Wissenschaftler den ersten begutachteten Fachartikel über die Realisierbarkeit der industriellen Fleischproduktion in Laborkulturen in der Zeitschrift »Tissue Engineering« veröffentlicht. Zu den Autoren zählte auch Jason Matheny, Gründer von New Harvest, einer Unterstützerorganisation für synthetisches Fleisch. Er versteht die Herausforderungen besser als die meisten anderen. »Noch ist die Gewebezucht sehr schwer und extrem teuer«, sagt er. »Um vom Markt akzeptiert zu werden, müssen wir vor allem die technischen Probleme lösen, die die Kosten in die Höhe treiben.« Dazu bräuchte es aber Geld, und nur wenige Regierungen oder Organisationen waren bisher gewillt, die nötigen Mittel bereitzustellen.

Den beteiligten Wissenschaftlern erscheint diese Weigerung kurzsichtig. »Ich glaube, es wird schließlich unsere einzige Wahl sein«, ist Mark Post, Leiter der Abteilung für Physiologie an der Universität Maastricht, überzeugt. »Ich sehe nicht, wie wir in den kommenden Jahrzehnten weiterhin auf die hergebrachte Viehhaltung bauen können.«

In Theorie würde die In-vitro-Fleischproduktion etwa so ablaufen: Zuerst entnehmen Labortechniker einem Schwein, Huhn oder anderen Tier Stammzellen und lassen diese in Bioreaktoren mit Hilfe einer Nährsubstanz wachsen. Die Zellen teilen sich fortlaufend über viele Monate. Danach lassen die Techniker sie sich spezifisch zu Muskelgewebe ausdifferenzieren, im Unterschied etwa zu Knochen- oder Gehirngewebe. Schließlich werden die Muskelzellen »aufgebaut« – so

wie auch Tier und Mensch ihre Körperkraft mittels Bewegung und Belastung steigern. Zurzeit stellen sich bei jeder Stufe dieses Ablaufs Probleme. Eines besteht darin, Stammzelllinien zu entwickeln, die sich lange Zeit nur vermehren, ohne sich spontan zu differenzieren. Eine weitere Herausforderung ist es, zu erreichen, dass die Mehrzahl der Stammzellen schließlich tatsächlich zu Muskelzellen wird. »Von zehn Zellen sollten sich mindestens sieben oder acht zu Muskelzellen entwickeln«, sagt Roelen. »Im Moment schaffen wir das lediglich bei der Hälfte.«

50 000 Tonnen Fleisch aus zehn Zellen

Die Forscher aus Utrecht versuchten, embryonale Stammzelllinien aus Schweinen zu gewinnen und zu vermehren. Unter normalen Bedingungen könnten sich solche Zellen über einen langen Zeitraum jeden Tag verdoppeln, womit zehn Zellen in nur zwei Monaten prinzipiell zu der beeindruckenden Menge von rund 50 000 Tonnen Fleisch heranwachsen könnten. »Die Kultivierung embryonaler Stammzellen wäre für diesen Zweck ideal, da diese Zellen eine nahezu unerschöpfliche Fähigkeit zur Selbsterneuerung haben«, so ein 2009 erschienener Bericht des Utrecht-Teams. »Theoretisch würde eine solche Zelllinie ausreichen, um buchstäblich die ganze Welt zu ernähren.«

Bis jetzt gibt es jedoch solche Zelllinien nur von Mäusen, Ratten, Rhesusaffen und Menschen. Embryonale Stammzellen von Nutztieren neigen dazu, sich sehr schnell von selbst zu spezialisierten Zellen zu differenzieren. Laut Bericht der Utrechter schlagen Schweinezellen dabei meistens eine »neurale« Richtung ein. Ergebnis: Gehirn statt Schinken.

Die Utrechter Gruppe arbeitete auch mit adulten Stammzellen, die bereits weit gehend auf einen Gewebetyp vorprogrammiert sind. Sie finden sich unter anderem in der Skelettmuskulatur und reparieren dort das Gewebe bei Verletzungen oder anderen Schädigungen. Will man also für die Herstellung von In-vitro-Fleisch möglichst sichergehen, tatsächlich Muskelgewebe zu erhalten, wären adulte Stammzellen aus Skelettmuskulatur die erste Wahl. Doch bis jetzt konnten Wissenschaftler diese noch nicht dazu bringen, sich so bereitwillig wie embryonale Zellen zu vermehren.

Die Kosten stellen eine weitere Hürde dar. So ist die Nährsubstanz, die zur Zucht von Stammzellen jeglicher Art benötigt wird, sehr teuer. Mit den derzeit erhältlichen Kulturmedien würde die Produktion eines knappen halben Kilos Fleisch etwa 50 000 US-Dollar kosten, so Roelen, und die beste Nährsubstanz wird dazu noch aus Kälberföten oder dem Serum von geschlachteten Pferden gewonnen. In den letzten Jahren haben Wissenschaftler zwar Rezepte für Medien entwickelt, die keine tierischen Produkte enthalten. Mittels Gentechnologie brachten sie etwa Pflanzenzellen dazu, tierische Proteine zu produzieren, die sich für die Fleischzucht im Labor eignen. Doch teuer sind diese Nährmedien ebenfalls noch. Ein auf Algen basierendes Medium könnte möglicherweise am besten funktionieren, da solche Gewächse all jene Proteine und Aminosäuren erzeugen können, die Zellen zum

Überleben benötigen – aber auch das ist zumindest heute noch alles andere als preisgünstig.

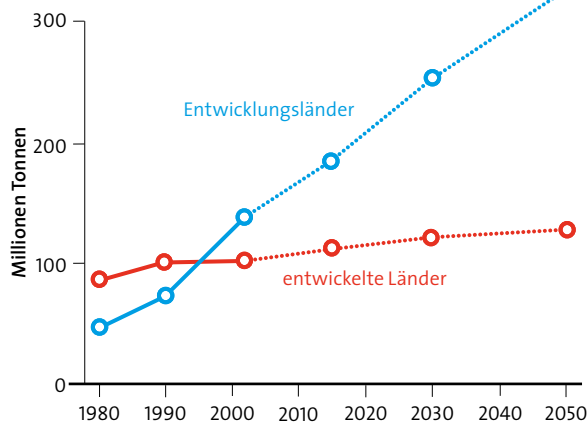
Angenommen, die Forscher schaffen es, Muskelzellen im großen Stil zu produzieren, so müssen sie diese am Leben erhalten und aufbauen. Zurzeit können sie einen hauchdünnen Gewebestreifen herstellen – doch sobald der dicker als ein paar Zelllagen wird, beginnen Teile davon abzusterben. Denn alle Zellen brauchen zum Leben eine stete Zufuhr frischer Nährstoffe. Im Körper liefert der Blutstrom diese Substanzen und transportiert gleichzeitig den Abfall ab.

Daher arbeitet der Maastrichter Mark Post derzeit an einem dreidimensionalen System zur Verteilung solcher Nährstoffe. Er erforscht auch, wie sich die Muskelzellen vergrößern ließen. »Wenn man nach einem Knochenbruch seinen Gips abnimmt, erschrickt man: Die Muskeln sind praktisch verschwunden«, sagt er. »Doch innerhalb einiger Wochen kommen sie wieder zurück. Wir müssen lernen, diesen Prozess nachzustellen.« Der Körper erreicht das auf mehreren

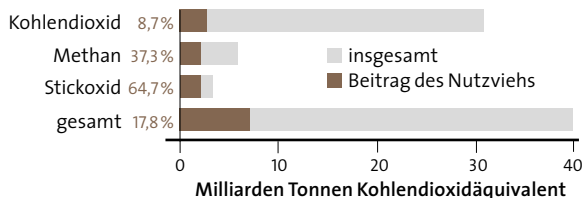
Weltweit zunehmender Fleischverzehr

Die Einwohner reicher Länder essen bereits viel Fleisch, doch die Entwicklungsländer holen auf. Denn immer mehr Menschen ziehen in Städte, und verbesserte Infrastruktur gewährleistet, dass das Fleisch auf dem Weg vom Schlachthaus bis zur Küche gekühlt bleiben kann. Mit der Nachfrage nach Fleisch werden aber auch die Konsequenzen für die Umwelt wachsen. Schon heute ist die Tierhaltung für ein knappes Fünftel aller Treibhausgasemissionen verantwortlich.

WELTWEITER FLEISCHVERBRAUCH



DERZEITIGER BEITRAG DES NUTZVIEHS ZU TREIBHAUSGASEMISSIONEN

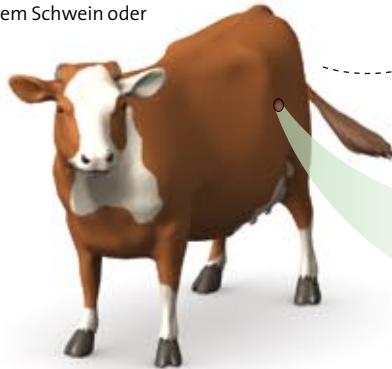


JEN CHRISTIANSEN: FLEISCHVERBRAUCH NACH THORNTON, P.K.: LIVESTOCK PRODUCTION – RECENT TRENDS, FUTURE PROSPECTS. IN: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B 365, S. 2853–2867, 2010. EMISSIONEN NACH LIVESTOCK'S LONG SHADOW. REPORT OF THE FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, ROMA 2006

Fleisch aus dem Labor: Eine Zukunftsvision

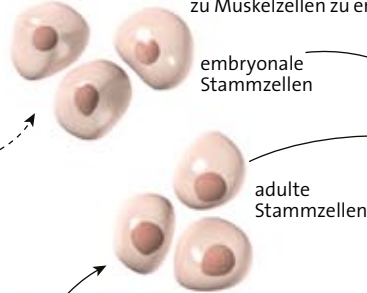
So könnten sich essbare Fleischprodukte aus Stammzellen von Nutztieren züchten lassen.

- 1 Forscher isolieren embryonale oder adulte Stammzellen aus einer Kuh, einem Schwein oder einem Huhn.

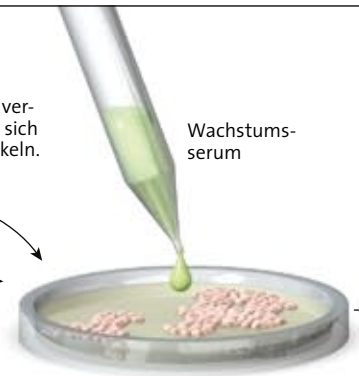


Biopsie aus Muskelgewebe

- 2 a) Embryonale Stammzellen sind leicht zu vermehren, aber nur schwer dazu zu bringen, sich zu Muskelzellen zu entwickeln.



- 2 b) Im Gegenzug lassen sich adulte Stammzellen aus Muskelgewebe schwer züchten, sind aber schon in die gewünschte Entwicklungsrichtung vorprogrammiert.



- 3 Wissenschaftler kultivieren die Stammzellen in einem Wachstumsmedium, um sie stark zu vermehren. Dann veranlassen sie sie dazu, sich zu Muskelzellen zu differenzieren.

Wegen, darunter durch schlichtes Training. Im Labor können die Wissenschaftler Gewebe mit elektrischen Pulsen stimulieren. Aber das kostet viel und bringt wenig, da die Zellen lediglich um etwa zehn Prozent wachsen. Eine andere Methode bietet Verankerungsstellen an: Wenn sich die Zellen an verschiedenen Punkten fixieren können, entwickeln sie von allein eine gewisse Spannung. Post testete das Prinzip mit einem Gerüst aus Zuckerpolymeren, das im Lauf der Zeit zerfällt. Doch derzeit, sagt er, ergibt das auch noch keine Schwarzenegger-Muskeln.

Ihm schwebt aber eine weitere Methode vor, die womöglich am besten funktionieren könnte. Der Körper stimuliert das Muskelwachstum natürlicherweise mit winzigen Mengen von Chemikalien wie etwa Acetylcholin. Diese Stoffe sind billig, was unter anderem den Charme dieses Ansatzes ausmacht. »Der Trick besteht darin, die Substanzen nur in Form sehr, sehr kurzer Pulse zu geben«, sagt Post. Dies stellt die Forscher vor allem vor technologische Herausforderungen, nicht vor wissenschaftliche.

Für Fortschritte auf all diesen Gebieten braucht man natürlich Geld. 2008 bot die Tierrechtsorganisation PETA (People for the Ethical Treatment of Animals) eine Million US-Dollar dem Ersten, der bis zum Jahr 2012 kommerziell vermarktungsfähiges Hühnerfleisch im Labor herstellen kann. Doch war das in erster Linie ein Werbetrick und nutzte keinem Wissenschaftler, der gerade Geld für seine laufenden Forschungen brauchte. Ernster zu nehmen sind die rund 800 000 Euro, die die niederländische Regierung 2011 für ein neues Vier-Jahres-Projekt bewilligte. Damit wird die Erforschung der Stammzellen in Utrecht fortgesetzt – und eine neue Studie über die sozialen und moralischen Fragen zum Thema synthetisches Fleisch gestartet.

Denn manche glauben, dass die größte Hürde für die In-vitro-Produktion von Fleisch im kommerziellen Maßstab eine ganz andere ist: die soziale Akzeptanz. »Ich habe mit

Wissenschaftlern über gezüchtetes Fleisch gesprochen, und sie meinen alle: »Gute Idee«, sagt Tuomisto aus Oxford. »Wenn ich aber mit Laien darüber rede, reagieren sie skeptisch. Es klingt abschreckend. Dabei ist es doch im Grunde genommen das gleiche Zeug: Muskelzellen. Es wird nur auf unterschiedliche Art hergestellt.«

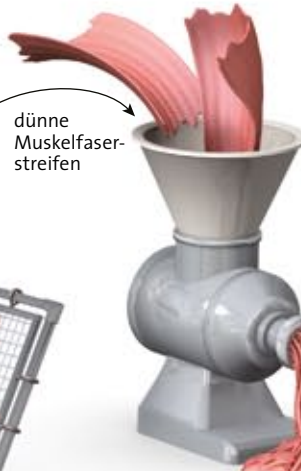
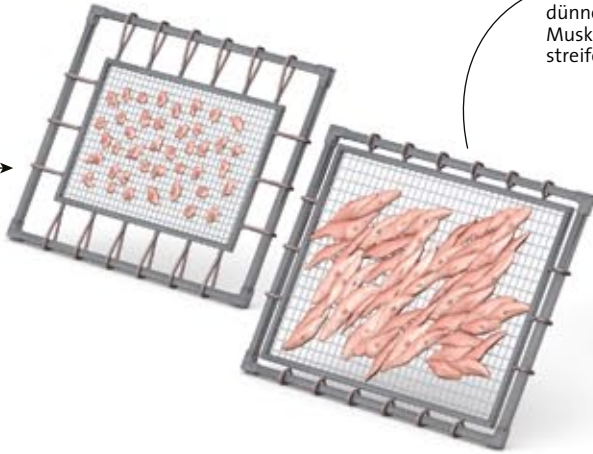
Die »Bäh-Antwort«

Cor van der Weele von der niederländischen Universität Wageningen untersucht die philosophischen Aspekte zum Beispiel anhand der Frage: Ist Fleisch aus der Retorte moralisch abstoßend oder im Gegenteil geradezu ein moralischer Imperativ – oder beides? Sie war verblüfft von den emotionalen Reaktionen mancher Leute. »Wir nennen es die »Bäh-Antwort«, sagt sie. »Die Leute glauben zuerst, dass das etwas Kontaminiertes oder Ekelhaftes sein könnte.«

Doch dann beobachtete van der Weele, dass viele Menschen synthetisches Fleisch mit zwei anderen Ideen assoziieren: mit genetisch modifiziertem Essen – was vor allem in Europa einen schlechten Ruf hat – und einer negativen Wahrnehmung der modernen Fleischproduktion im Allgemeinen, vor allem wegen der Massentierhaltung und der damit verbundenen Krankheiten und Tiermisshandlungen. Wird ihnen erst einmal klar, dass Fleisch aus Laborkultur nicht manipuliert ist und eine saubere, tierfreundliche Alternative darstellt, so sagt sie, »kann sich die erste, negative Reaktion schnell ändern«.

Natürlich erfassen solche Beobachtungen nur Einzelfälle. Die niederländische Studie wird detailliert die gängigsten Antworten zum In-vitro-Fleisch zusammentragen und dabei die Reaktionen in unterschiedlichen Gegenden und Kulturen vergleichen. Zudem soll sie herausfinden, wie sich die Akzeptanz der Verbraucher verbessern ließe. Die Befürworter der Methode träumen von dem Tag, an dem Regierungen eine besondere Umweltsteuer für Fleischprodukte aus Viehhaltung

4 Auf Gerüsten angeordnet sollen die Zellen Muskelfasern bilden. Einwirkende Spannkraft trainieren die Zellen, so dass sie größer werden.



5 Die Fleischstreifen werden zu Würstchen oder Hackfleisch verarbeitet.

EMILY COOPER

erheben oder Verbraucher sich für In-vitro-Fleisch mit dem Etikett »ohne Grausamkeit hergestellt« entscheiden können.

»Ich glaube nicht, dass die Menschen wirklich etwas über die hygienischen Bedingungen in den meisten US-amerikanischen Schlachthäusern erfahren möchten oder über die dortigen Tötungsmethoden«, sagt Post, der sieben Jahre an der Harvard University und am Dartmouth College forschte, bevor er 2002 in die Niederlande zurückkehrte. Ein erneuter Ausbruch einer Seuche wie Rinderwahnsinn oder Vogelgrippe könnte das Laborfleisch wesentlich appetitlicher erscheinen lassen. »Wir sind einfach zu weit weg von dem, was wir essen«, sagt Roelen. »Wenn wir einen Hamburger bestellen, denken wir nicht ›Ich esse jetzt eine tote Kuh‹. Da fällt es aber auch nicht schwer, sich vorzustellen, dass die Leute künstlich gezüchtetes Fleisch akzeptieren könnten.«

Post hat einen gewagten Plan ausgeheckt, um an neue Forschungsgelder zu kommen: Er will eine In-vitro-Wurst herstellen – einfach nur um zu demonstrieren, dass es möglich ist. Die Wurst dürfte etwa 300 000 Euro kosten und ein halbes Jahr Arbeit für zwei Doktoranden und drei Inkubatoren bedeuten. »Wir werden zwei oder drei Biopsien von einem Schwein nehmen – sagen wir etwa 10 000 Stammzellen«, sagt Post. »Nach 20 Populationsverdopplungen haben wir dann zehn Milliarden Zellen.« In 3000 Petrischalen sollen die Doktoranden viele kleine Stücke von Schweinemuskelgewebe herstellen. Diese werden zusammen mit Gewürzen und einigen anderen nichtfleischlichen Zutaten, die Konsistenz und Geschmack verleihen, in eine Hülle gestopft. Am Ende soll die Wurst dann zusammen mit dem lebendigen, unversehrten Schwein vorgeführt werden, aus dem sie gemacht wurde.

»Im Grunde genommen ist es nur ein Trick, um mehr Forschungsgelder zu bekommen«, sagt Post. »Wir versuchen der Welt zu beweisen, dass wir ein echtes Produkt herstellen können.« Doch wird es auch wie eine Wurst schmecken? »Ich glaube schon«, meint Roelen. »Der Geschmack einer Wurst

wird ja großteils künstlich erzeugt, indem man Salz und alle möglichen anderen Sachen hinzufügt.«

Van Eelen hält dagegen nicht viel von der Idee. Als unverbesserlicher Idealist glaubt er, dass die In-vitro-Revolution mit Fleisch beginnen sollte, das genauso aussieht, riecht und schmeckt wie das vom Bauernhof. Vermutlich wird van Eelen auch klar, dass die Zeit, seinen lebenslangen Traum noch zu verwirklichen, allmählich knapp wird. »Jedes Mal, wenn man mit ihm spricht, erzählt er von einem anderen Spitzenforscher, den er gefunden hat und der das Problem lösen wird«, sagt Roelen. »Ich verstehe ja seinen Standpunkt – aber die Gesetze der Natur kann ich auch nicht ändern.«

DER AUTOR



Jeffrey Bartholet ist Journalist. Er leitete früher das Washingtoner Büro des Magazins »Newsweek«.

QUELLEN

Bhat, B. F., Bhat, Z.: Animal-Free Meat Biofabrication. In: American Journal of Food Technology 6, S. 441–459, 2011

Haagsman, H. P. et al.: Production of Animal Proteins by Cell Systems. University of Utrecht, 2009

Jones, N.: A Taste of Things to Come? In: Nature 468, S. 752–753, 2010

Thornton, P. K.: Livestock Production – Recent Trends, Future Prospects. In: Philosophical Transactions of the Royal Society B 365, S. 2853–2867, 2010

WEBLINK

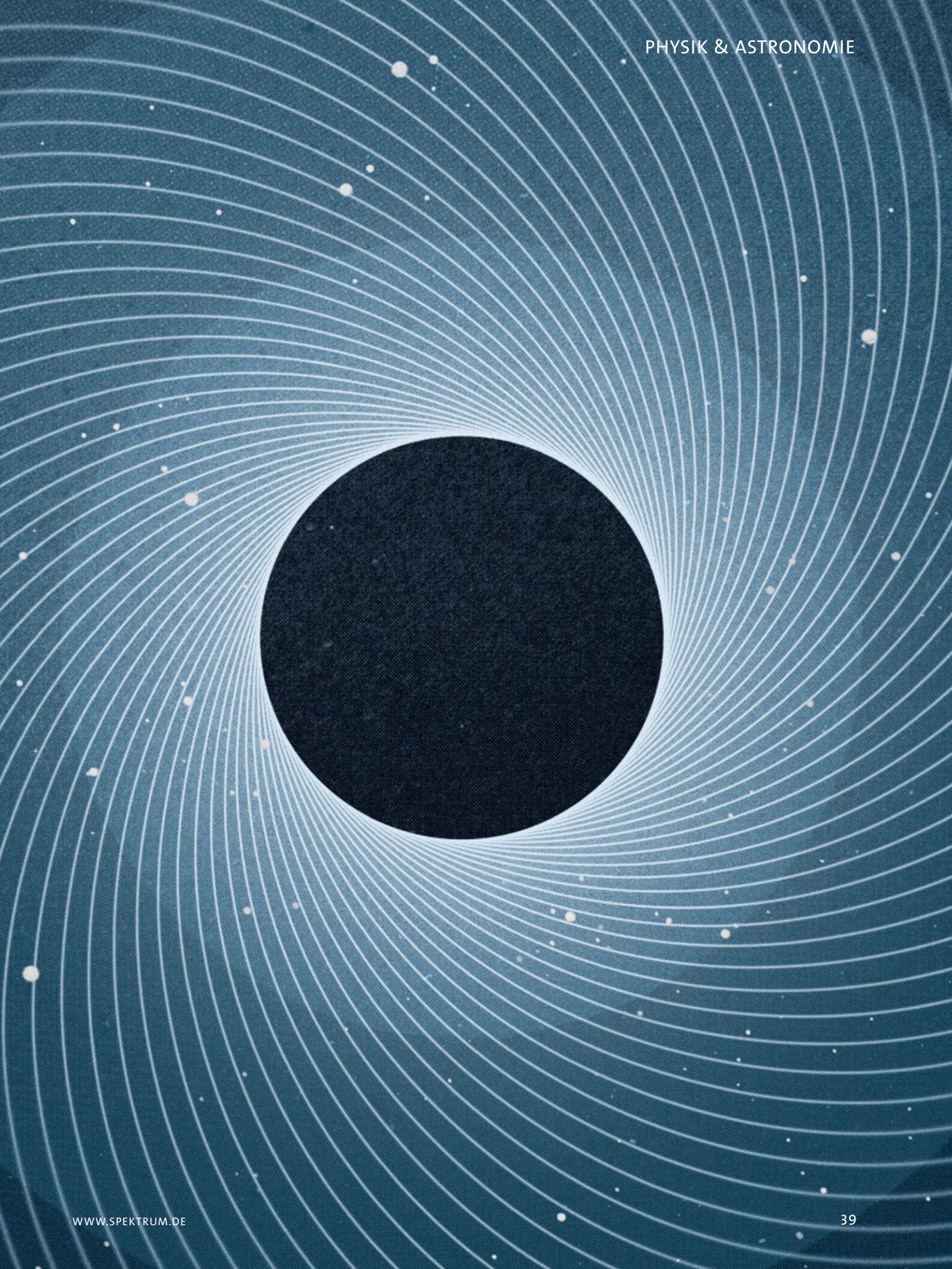
Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139699

TITELTHEMA: ASTROPHYSIK

Mittelgewichte unter den Schwarzen Löchern

Die dunklen Himmelsobjekte sorgen bei Astrophysikern für helle Begeisterung: Schwarze Löcher von knapp einer Million Sonnenmassen liefern Informationen über die Entstehung ihrer massereicheren Geschwister sowie ganzer Galaxien.

Von Jenny E. Greene



Seit einigen Jahrzehnten wissen Astronomen, dass fast jede große Galaxie in ihrem Zentrum ein gigantisches Schwarzes Loch enthält – ein Objekt also, dessen Schwerkraft so groß ist, dass aus ihm nicht einmal Licht entweichen kann. Der Tod von Sternen kann kleine Schwarze Löcher produzieren – mit Massen von 3 bis 100 Sonnen. Sie sind aber winzig im Vergleich zu den Giganten in Galaxienzentren, die Millionen bis Milliarden Sonnenmassen schwer sind (siehe Kasten S. 46).

Diese supermassereichen Schwarzen Löcher stellen uns Forscher vor große Rätsel: Warum treten sie in Galaxien so häufig auf? Was war zuerst – die Galaxie oder das Schwarze Loch? Und schließlich: Wie sind sie entstanden? Das Rätsel wird noch dadurch vergrößert, dass es offenbar bereits im jungen Kosmos supermassereiche Schwarze Löcher gab. Im Juni 2011 berichtete ein Astronometeam über die Entdeckung des bislang ältesten solchen Objekts: Bereits vor 13 Milliarden Jahren, also gerade mal 770 Millionen Jahre nach dem Urknall, enthielt es bereits zwei Milliarden Sonnenmassen. Wie konnte es in so kurzer Zeit zu solcher Größe anwachsen?

Eine derart schnelle Entstehung dieser Objekte ist verblüffend. Denn Schwarze Löcher haben nicht nur eine Reputation als gewaltige »Staubsauger«, sondern auch als »Laubbläser«. Wenn nämlich Gas auf ein Schwarzes Loch zustürzt, dann akkumuliert es sich zunächst in einer großen rotierenden Scheibe, die um den Massegiganten kreist: in der so genannten Akkretionsscheibe. Dort heizt sich die Materie auf und sendet Strahlung aus, und zwar umso mehr, je mehr sie sich dem Punkt ohne Wiederkehr am inneren Rand der Scheibe nähert. Nachfolgende einfallende Materie wird durch diese Strahlung jedoch wieder fortgeblasen und begrenzt so das mögliche Wachstum durch Akkretion, also das Einverleiben von Gas und Staub aus der galaktischen Umgebung. Physiker haben berechnet, dass ein Schwarzes Loch, das sich andauernd Materie mit der maximalen Rate einverleibt, alle 50 Millionen Jahre seine Masse verdoppeln kann. Das aber ist viel zu langsam, um in knapp einer Milliarde Jahren aus einem ursprünglich stellaren Schwarzen Loch ein Milliarden-Sonnenmassen-Monster zu machen.

AUF EINEN BLICK

DIE ENTDECKUNG DER MITTELKLASSE

1 Schwarze Löcher mit Milliarden Sonnenmassen gab es bereits im frühen Universum. Das rasche Wachstum dieser Giganten ist noch immer ein großes Rätsel der Astronomie.

2 Zwei Szenarios halten Astronomen für möglich: das **Verschmelzen** zahlreicher kleiner Schwarzer Löcher, die aus kollabierenden Sternen entstanden. Oder es kollabierten direkt **gewaltige Wolken aus kosmischem Urgas** zu großen Schwarzen Löchern.

3 Astronomen versuchen diese Rätsel zu lösen, indem sie nach übrig gebliebenen **Schwarzen Löchern mit mittlerer Masse** suchen. Erste Hinweise zeigen, dass mittelgroße Schwarze Löcher, die durch einen direkten Kollaps entstanden, vor allem im frühen Universum eine wichtige Rolle spielten.

Astrophysiker haben deshalb zwei Wege vorgeschlagen, wie sich die »Saatkörner« der supermassereichen Schwarzen Löcher bilden können. Die ursprüngliche, bereits vor vielen Jahren entwickelte Idee geht davon aus, dass die ältesten großen Schwarzen Löcher tatsächlich die Überreste explodierter Sterne sind. Die ersten Sonnen im Kosmos hatten vermutlich im Vergleich zu heutigen Sternen extrem große Massen. Der Grund dafür ist, dass die Wolken aus dem kosmischen Urgas noch kaum schwerere Elemente enthielten, die das Gas stark abkühlen und so kleinere Verdichtungen hätten ermöglichen können.

Wie konnten die Monster so schnell wachsen?

Die riesigen Sterne waren schnell ausgebrannt und produzierten Schwarze Löcher mit etwa der 100-fachen Sonnenmasse. Danach muss ein Prozess eingesetzt haben, der diese Schwarzen Löcher anders und schneller anwachsen ließ als nur über die Akkretion. Eine Möglichkeit dazu bieten dichte Sternhaufen. In ihnen versammeln sich die größten Sterne (und Schwarzen Löcher) in der Nähe des Haufenzentrums. Zusammenstöße und Verschmelzungen von Schwarzen Löchern können dort die übliche Wachstumsbegrenzung überlisten und zu einem raschen Anwachsen auf 10 000 Sonnenmassen führen. Das weitere Wachstum kann dann wieder über gewöhnliche Akkretion voranschreiten, wobei vielleicht noch das eine oder andere große Schwarze Loch mit auf dem Menüplan steht.

Doch nach der Entdeckung von supermassereichen Schwarzen Löchern, die offenbar bereits in der Frühzeit des Universums existierten, fragten sich viele, wie stellare Schwarze Löcher in so kurzer Zeit derart große Massen erreichen konnten – selbst wenn sie ihr Leben schon mit einem beschleunigten Wachstum begonnen hatten. Daher suchten die Forscher nach Alternativen für die Entstehung der frühesten Schwarzen Löcher. Sie analysierten, wie sich größere Exemplare gebildet haben könnten als beim Sternentod.

Sie untersuchten Modelle, die sogar ganz ohne Sterne als Zwischenstadium auskommen. Stattdessen soll eine riesige Gaswolke direkt zu einem Schwarzen Loch kollabieren – ohne Umweg über eine Sternexplosion. Dieser Prozess könnte, so zeigten Berechnungen, Schwarze Löcher von 10 000 bis 100 000 Sonnenmassen hervorbringen, was die rasche Entstehung supermassereicher Schwarzer Löcher erlauben würde. Heute ist ein solcher direkter Kollaps mangels ausreichender Gaswolken nicht mehr möglich, aber im jungen Kosmos herrschten eben andere Bedingungen.

Leider lässt sich nur schwer herausfinden, welches dieser beiden Szenarios verwirklicht wurde – ob supermassereiche Schwarze Löcher von sterbenden Riesensternen ausgingen oder ob sie durch den Kollaps von Gaswolken entstanden. Die Astronomen können zwar weit zurück in die Zeit schauen, indem sie mit ihren Fernrohren in große Entfernungen blicken, doch sie können nicht darauf hoffen, die Entstehung der ersten Schwarzen Löcher direkt zu beobachten. Selbst die größten dieser Objekte wären aus so enor-

mer Entfernung mit heutiger Technik nicht zu erkennen. (Das James Webb Space Telescope könnte sie vielleicht aufspüren, aber sein Start wird nicht vor 2018 stattfinden – wenn es überhaupt die politischen Machtkämpfe um seine Finanzierung übersteht.) Gemeinsam mit Kollegen habe ich daher einen anderen Weg beschritten: Wir suchten nach unveränderten Schwarzen Löchern aus der Frühzeit, die nicht zu supermassereichen Monstern angewachsen sind, sondern – aus welchen Gründen auch immer – auf halbem Weg stehen blieben.

Gingen supermassereiche Schwarze Löcher von Sternen aus, dann sollten viele von ihnen übrig geblieben sein, sowohl in den Zentren als auch in den Randgebieten von Galaxien. Denn die ersten Sterne sind überall verglüht. Außerdem würden wir dann viele Schwarze Löcher in einem Bereich von 100 bis 100 000 Sonnenmassen erwarten, da ein Mangel an Nachschub ihr Wachstum an jedem Punkt der Entwicklung unterbrochen haben könnte.

Wären sie dagegen eher durch direkten Gaskollaps entstanden, dann gäbe es nur noch wenige von ihnen, denn ein direkter Kollaps ist viel seltener als eine Supernova. Statt eines weiten Bereichs hätten die meisten der aus kosmischer Frühzeit stammenden Schwarzen Löcher Massen von über 100 000 Sonnen. Die Modelle legen dies nämlich als typische Masse für die Objekte nahe.

Überraschend verdoppelte Massenwerte

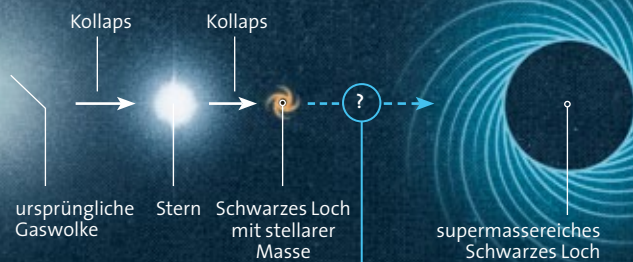
Wie andere Forscher auch habe ich mich deshalb auf die Suche nach dieser neuen Art von Schwarzen Löchern gemacht: Wir wollten nachsehen, ob die Häufigkeit und der Massenbereich solcher Objekte besser mit dem Sternkollaps- oder dem Gaswolkenkollapsmodell übereinstimmte. Als wir vor sieben Jahren mit der Suche begannen, war die Lage alles andere als viel versprechend. Astronomen kannten damals erst ein einziges Schwarzes Loch mittlerer Masse und hielten es daher für eine Ausnahme. Doch inzwischen haben wir hunderte weitere entdeckt.

Was genau zählt als »mittlere Masse«? In diesem Artikel meine ich damit den Bereich von 1000 bis zwei Millionen Sonnenmassen. Die obere Grenze ist ein wenig beliebig, sie schließt jedoch die kleinsten bekannten supermassereichen Schwarzen Löcher aus, wie zum Beispiel das Objekt im Zentrum der Milchstraße mit gut vier Millionen Sonnenmassen. Aber alle diese Grenzen verlaufen ohnehin etwas unscharf. Denn in der Praxis erweist sich die Massebestimmung eines Schwarzen Lochs zumeist als relativ unsicher. So mussten alle Massenwerte der zuerst entdeckten mittelgewichtigen Schwarzen Löcher vor einigen Jahren in etwa verdoppelt werden, als neue Daten eine bei den Berechnungen benutzte physikalische Größe korrigierten. Entscheidend ist, was die Astronomen in den kommenden Jahren über die Gesamtheit der Schwarzen Löcher unterhalb des supermassereichen Bereichs herausfinden werden – unabhängig davon, wo diese Grenze genau gezogen wird. Doch auch schon das, was wir bis heute über die Mittelgewichte gelernt haben, hat uns eine

EVOLUTION

Wie entstanden supermassereiche Schwarze Löcher?

Schon im frühen Universum gab es gewaltige Schwarze Löcher mit Massen von mehr als einer Milliarde Sonnen. Bisher nahmen Forscher an, dass diese Objekte als stellare Schwarze Löcher, also durch den Kollaps eines ausgebrannten Sterns, entstanden sind. Doch solch ein kleines Schwarzes Loch kann nicht schnell genug wachsen, um so früh schon so massereich zu werden (obere Grafik). Daher bleibt die Frage: Wie können größere Schwarze Löcher als »Saatkörner« für supermassereiche Schwarze Löcher entstanden sein (Mitte und unten)?



Eine mögliche Erklärung lautet, dass ein großes stellares Schwarzes Loch in einem Sternhaufen relativ rasch auf 10 000 Sonnenmassen anwachsen kann, indem es viele andere Schwarze Löcher verschlingt. Ein so entstandenes Mittelgewicht kann dann durch einströmendes Gas weiter zu einem supermassereichen Schwarzen Loch anwachsen.



Eine andere Möglichkeit: Eine Gaswolke kollabiert direkt zu einem Schwarzen Loch mittlerer Masse. Auch ein solches Schwarzes Loch könnte dann durch einfallendes Gas weiter anwachsen.

ursprüngliche Gaswolke Schwarzes Loch mittlerer Masse

Kollaps



Die Suche nach Schwarzen Löchern mittlerer Masse soll klären, welches dieser Szenarios zutrifft.

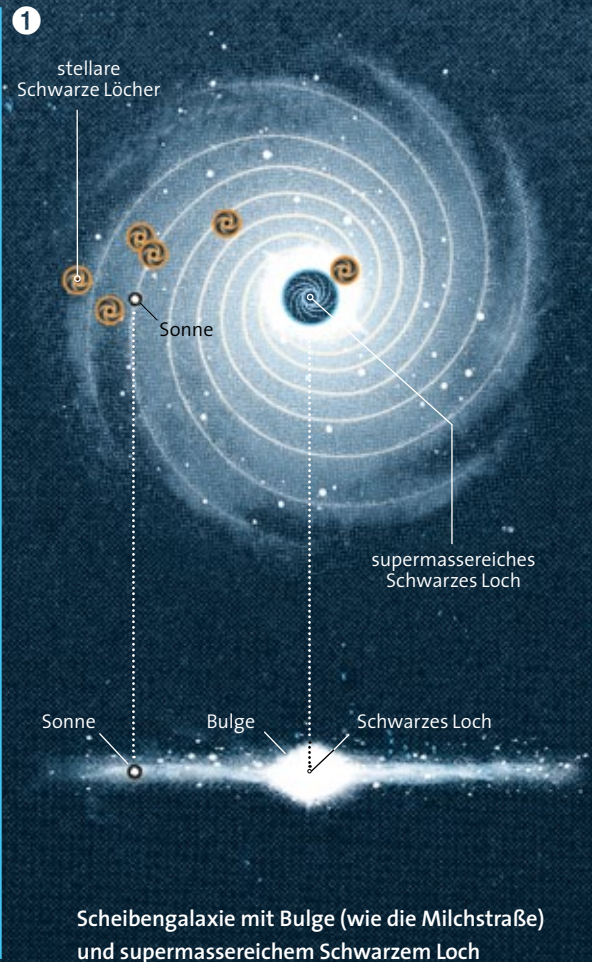
Wo unterschiedliche Typen von Schwarzen Löchern hausen

Es gibt viele Arten von Galaxien, einige davon enthalten supermassereiche Schwarze Löcher. Unsere Galaxie, die Milchstraße, ist eine Scheiben- oder Spiralgalaxie mit einem Bulge (Ausbeulung), einer großen, dichten Ansammlung von Sternen ①. Im galaktischen Zentrum wurde ein supermassereiches Schwarzes Loch mit vier Millionen Sonnenmassen entdeckt (blau). In der Milchstraße haben Astronomen außerdem viele stellare Schwarze Löcher (orange) entdeckt. Der Kugelsternhaufen M15 beherbergt möglicherweise ein Schwarzes Loch mit einer Masse von einigen tausend Sonnen.

Galaxien mit Bulge und große elliptische Galaxien ② scheinen alle ein supermassereiches Schwarzes Loch zu enthalten. Im Gegensatz dazu kommen Schwarze Löcher mittlerer Masse (③, gelb) bevorzugt in Galaxien ohne großen Bulge vor.

KLASSIFIZIERUNG SCHWARZER LÖCHER

In Abhängigkeit von ihrer Masse fallen die bekannten Schwarzen Löcher in drei Kategorien. Die Massen der Schwarzen Löcher werden üblicherweise in Sonnenmassen oder einfach in »Sonne«-Einheiten angegeben.

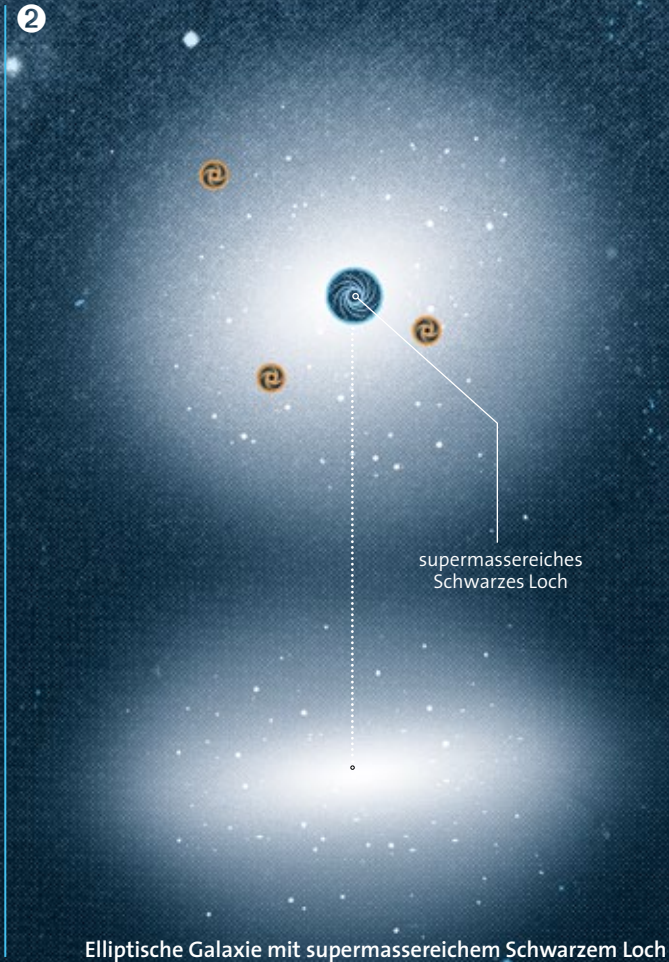


neue Sicht auf die Wechselwirkung zwischen Schwarzen Löchern und ihren Heimatgalaxien eröffnet.

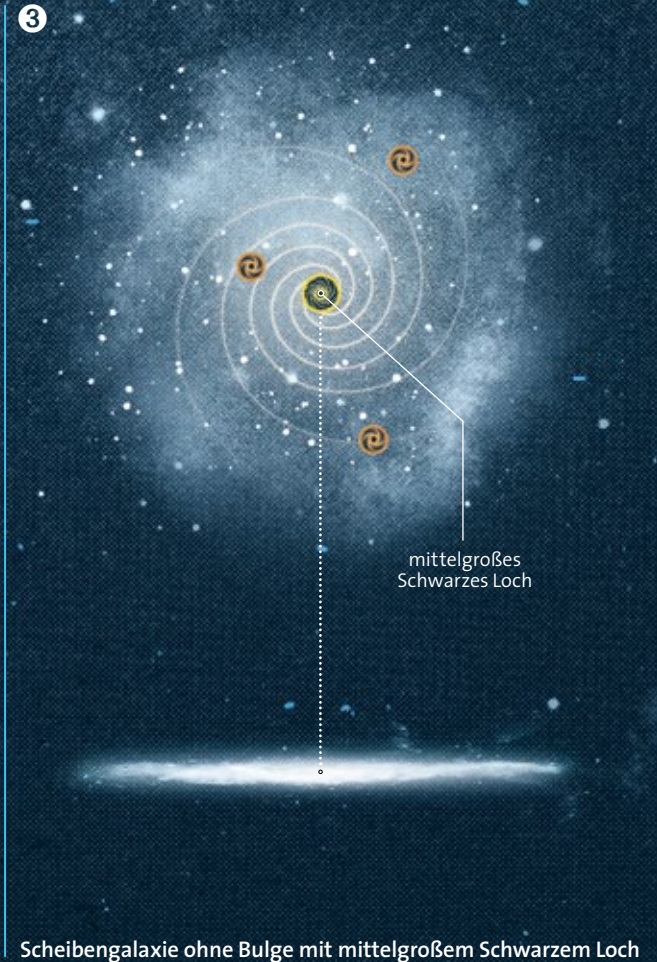
Schwarze Löcher können sich auf mehrere Arten bemerkbar machen. So liefern beispielsweise Sterne, die auf engen Bahnen um das Zentrum einer Galaxie rasen, verräterische Indizien für solche überschweren Zentralobjekte. Jene mittlerer Masse sind jedoch zu klein, um sich auf diese Weise durch ihre Anziehungskraft zu verraten. Die Forscher konzentrieren sich daher auf »aktive« Schwarze Löcher – also solche, bei denen heiße, einstürzende Materie ungeheure Strahlungsmengen aussendet, die sich beobachten lassen.

In langjährigen Suchkampagnen wiesen Astronomen nach, dass sich aktive Schwarze Löcher bevorzugt in Galaxien eines bestimmten Typs aufhalten. Galaxien, insbesondere jene mit großen Massen, treten in zwei verschiedenen Arten auf: als Spiral- oder Scheibengalaxien wie unsere eigene, mit einer großen rotierenden Scheibe von Sternen, die von der Seite betrachtet einem Teller ähneln; und als elliptische Galaxien, die letztlich Haufen von Sternen sind.

Einige Scheibengalaxien bergen in ihrem Zentrum sogar kleine elliptische Galaxien, die Fachleute als »Bulges« (Ausbeulungen) bezeichnen. Aktive Schwarze Löcher treten vor allem in elliptischen Galaxien auf, außerdem in Scheibengalaxien mit ausgeprägten Bulges. In nahezu jeder dieser Kernregionen, deren Abstand zu uns klein genug ist, um eine genaue Untersuchung zu erlauben, haben die Astronomen ein Schwarzes Loch mit der millionen- oder gar milliardenfachen Sonnenmasse entdeckt. Ein größerer Bulge hat außerdem, so zeigen die Daten, auch ein größeres Schwarzes Loch – typischerweise wiegt es ein Tausendstel der Bulge-Masse. Dieser Zusammenhang überraschte die Astronomen: Denn er bedeutet, dass sich Galaxien und ihre Schwarzen Löcher gemeinsam entwickelt haben müssen – auf eine Art und Weise, welche die Forscher bislang noch nicht verstanden haben. Diese Beziehung zeigt den Forschern aber auch, wo sie nach den Mittelgewichten Ausschau halten müssen: vor allem bei den kleinsten Galaxien. Aber bei welchen von ihnen? Ein rätselhafter Vertreter dieser Gattung führte auf die rich-



Elliptische Galaxie mit supermassereichem Schwarzen Loch



Scheibengalaxie ohne Bulge mit mittelgroßem Schwarzen Loch

tige Spur. Der Astronom Luis C. Ho von den Carnegie Observatories in Pasadena, Kalifornien, hatte sich 1995 für seine Doktorarbeit rund 500 nahe, helle Galaxien vorgeknöpft. Dabei war ihm aufgefallen, dass die meisten Galaxien mit großen Bulges auch aktive Schwarze Löcher enthalten, solche ohne Bulges dagegen nicht.

Allerdings gab es eine interessante Ausnahme: die Scheibengalaxie NGC 4395 im Sternbild Jagdhunde, 14 Millionen Lichtjahre entfernt. Sie besitzt ein aktives Schwarzes Loch, jedoch keinen Bulge. Hos eigener Doktorvater hatte diese Kuriosität bereits 1989 bemerkt, doch die meisten Forscher sahen darin nicht mehr als eine Anomalie. Immerhin: Davon abgesehen bestätigte die Arbeit von Luis C. Ho die generelle Regel, dass Galaxien ohne Bulge auch keine aktiven Schwarzen Löcher enthalten.

Die Masse des Schwarzen Lochs in der merkwürdigen Galaxie genau zu bestimmen, war eine Herausforderung. Das direkteste astronomische Verfahren misst die Umlaufbahnen von Begleitobjekten. So kann man aus Geschwindigkeit

und Umlaufbahn etwa der Erde die Masse der Sonne ableiten. Ganz ähnlich errechnet sich in einer Galaxie aus den Bahnen von Sternen die Masse des zentralen Schwarzen Lochs – aber nur, wenn es groß genug ist, um mit seiner Schwerkraft die Bewegung der Sterne messbar zu beeinflussen. Leider ist dieser Effekt beim Schwarzen Loch in NGC 4395 viel zu klein.

Deshalb mussten die Astronomen auf indirekte Verfahren ausweichen – auf die Messung von Röntgenstrahlung. So ist der Energieausstoß eines Schwarzen Lochs zeitlich variabel: Je größer das Objekt, desto langsamer variiert das ausgesandte Röntgenlicht. Der Astronom David C. Shih und seine Kollegen von der University of Cambridge entdeckten 2003, dass die Röntgenwellen von NGC 4395 sich sehr rasch verändern. Entsprechend musste die Masse relativ klein sein – vermutlich nur 10 000- bis 100 000-mal jene der Sonne. Luis C. Ho ermittelte im gleichen Jahr einen ähnlichen Wert.

Dem Astronomen Bradley M. Peterson von der Ohio State University und seinen Mitarbeitern gelang es 2005, die Masse

etwas direkter zu bestimmen. Das Team nutzte dazu das mächtige Hubble Space Telescope und ein Verfahren namens Reflexionskartierung. Es basiert auf der Bewegung von Gaswolken, die um ein Schwarzes Loch kreisen. Anhand der zeitlichen Verzögerung von Lichtechos, die an den Wolken reflektiert wurden, lassen sich nämlich ihre Umlaufbahnen ableiten. Peterson und sein Team folgerten, dass das Schwarze Loch etwa 360 000 Sonnenmassen haben sollte. Doch auch mit dieser Methode bleibt die Unsicherheit auf Grund bestimmter Annahmen, die in die Berechnungen eingingen, noch groß – etwa bei dem Faktor drei.

Verblüffende Ähnlichkeit zweier Galaxien

Die kuriose Galaxie NGC 4395 scheint damit genau die Art von Schwarzen Loch mittlerer Masse zu beherbergen, nach der wir suchen. Doch von Hos 500 Galaxien ist sie die einzige ohne Bulge, aber mit klaren Hinweisen auf ein aktives Schwarzes Loch. Ein zweites Exemplar dieser Spezies hatte im Jahr 2002 Aaron J. Barth entdeckt. Der damals am California Institute of Technology tätige Astronom hatte mit dem Keck-II-Teleskop auf Hawaii ein Spektrum der ungewöhnlichen, aber bis dahin kaum untersuchten Galaxie POX 52 aufgenommen. Ähnlich wie bei NGC 4395 gab es auch bei diesem Objekt einige Anzeichen für ein aktives Schwarzes Loch, obwohl es eigentlich nicht zu den üblichen Verdächtigen für ein supermassereiches Zentralobjekt zählte. POX 52 hat fast Kugelform (»sphäroidal«), ist also ein seltener Galaxientyp, der sich sowohl von den elliptischen als auch von den Scheibengalaxien mit einem Bulge unterscheidet.

Barth schickte Ho sein frisch beobachtetes Spektrum von POX 52. Dieser schaute nur kurz darauf und fragte Barth so-

fort: »Wo hast du ein derart schönes Spektrum von NGC 4395 gefunden?« Die Daten beider Galaxien ähnelten sich so sehr, dass selbst Ho sie nicht unterscheiden konnte. Demnach vertrat sich die Anwesenheit eines Schwarzen Lochs durch bestimmte Merkmale im Spektrum.

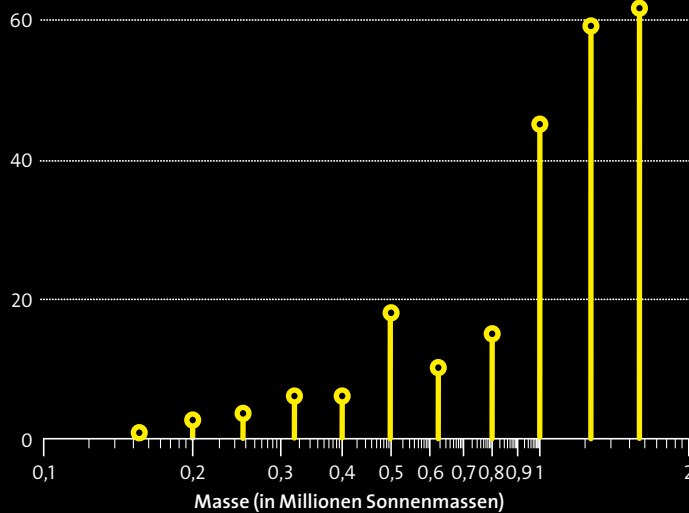
Da POX 52 rund 300 Millionen Lichtjahre von uns entfernt ist – 20-mal weiter als NGC 4395 –, lässt sich die Masse ihres Schwarzen Lochs nur indirekt abschätzen. Trotzdem deutet alles darauf hin, dass die Galaxie ein zentrales kompaktes Objekt mit etwa der 100 000-fachen Sonnenmasse beherbergt. Damit enthielt die Klasse der Schwarzen Löcher mittlerer Masse bereits zwei Exemplare.

Doch um das Rätsel der Entstehung supermassereicher Schwarzer Löcher zu lösen, benötigt man natürlich viel mehr Objekte. Dann erst lassen sich die kritischen Fragen angehen: Wie häufig sind Schwarze Löcher mittlerer Masse? Enthält jede Galaxie ohne Bulge eines – oder sind das nur seltene Ausnahmen? Gibt es diese Himmelskörper auch noch an anderen Orten? Und existieren noch kleinere Exemplare als die zwei bislang aufgespürten? Nur wenn Astrophysiker diese Rätsel klären, können sie verstehen, wie die ersten Schwarzen Löcher entstanden und welche Rolle sie im frühen Universum spielten.

Leider eignen sich die Standardverfahren nur schlecht für eine solche Fahndung. Je größer die Objekte sind, desto mehr Materie können sie verschlingen und desto heller strahlen sie auch. Aber kleinere Schwarze Löcher leuchten nur schwach und sind deshalb schwer aufzuspüren. Doch es gibt auch gute Nachrichten. Elliptische Galaxien, in denen die großen Schwarzen Löcher typischerweise vorkommen, erweisen sich als außerordentlich beobachtungsfreundlich.

GEFUNDENE MITTELGEWICHTE

Die Indizien favorisieren bisher das Gas-Kollaps-Szenario



Anzahl der Schwarzen Löcher mittlerer Masse, die Astronomen über die Untersuchung optischer Strahlung bis heute aufspürten

Die Beobachtung der optischen Strahlung von 500 000 Galaxien hat zur Entdeckung von über 100 Schwarzen Löchern mit weniger als zwei Millionen Sonnenmassen geführt. Weitere Suchaktionen im mittleren Infrarot-, Röntgen- und Radiobereich haben weitere Kandidaten erbracht. Die bisherigen Daten sprechen dafür, dass die meisten Galaxien ohne Bulge keine mittelgroßen Schwarzen Löcher enthalten – bei den anderen handelt es sich zumeist um ein größeres Exemplar. Diese Beobachtungen unterstützen das Szenario, in dem Gaswolken direkt zu großen Schwarzen Löchern kollabieren. Denn wenn supermassereiche Schwarze Löcher aus kollabierten Sternen hervorgegangen wären, müssten alle derartigen Galaxien mindestens 10 000 Sonnenmassen haben.

JEN CHRISTENSEN, NACH: GREENE, J.E., HOL, C.: A NEW SAMPLE OF LOW-MASS BLACK HOLES IN ACTIVE GALAXIES. IN: ASTROPHYSICAL JOURNAL, 670, 5, 99–104, 2007

Die Sterneneinseln enthalten kaum Gas und erzeugen daher kaum neue Sterne. Das gestattet uns einen weitgehend ungehinderten Blick in ihr Zentrum. Im Gegensatz dazu entstehen in Scheibengalaxien – wo die Astronomen die meisten Schwarzen Löcher mittlerer Masse vermuten – laufend neue Sterne. Deren Strahlung sowie die damit verbundenen Wolken aus Gas und Staub können ein aktives Schwarzes Loch verdecken.

Um die Hindernisse zu überwinden, haben mein Doktorvater Ho und ich uns einer Datensammlung zugewendet, die dafür prädestiniert ist, Nadeln im kosmischen Heuhaufen zu finden: dem Sloan Digital Sky Survey. Seit dem Jahr 2000 hat ein ausschließlich diesem Projekt gewidmetes Teleskop im US-Bundesstaat New Mexico ein Viertel des Himmels fotografiert und dabei die Spektren von Millionen von Sternen und Galaxien aufgezeichnet.

Wir haben 200 000 Galaxienspektren durchforstet und sind dabei auf 19 neue Kandidaten für unser Projekt gestoßen: kleine Galaxien ähnlich wie NGC 4395, die aktive Schwarze Löcher mit weniger als einer Million Sonnenmassen enthalten. Weitere derartige Suchaktionen haben in den vergangenen Jahren auf der Basis neuerer Sloan-Daten die Gesamtzahl solcher Objekte auf rund drei Dutzend erhöht, hinzu kamen noch mehr als 100 mit einer Masse knapp über der Millionen-Sonnen-Grenze.

Keine direkte Massebestimmung möglich

Die Methode, mit der die Massen bestimmt wurden, ist eher indirekt. Die Spektren der Sloan-Durchmusterung liefern Informationen darüber, wie schnell sich das Gas um das Schwarze Loch bewegt. Für eine direkte Berechnung der Masse, wie sie die Astronomen am liebsten hätten, ist das aber nur die Hälfte der erforderlichen Informationen, die nötig wären. Die andere Hälfte betrifft den Durchmesser der Umlaufbahn, womit sich dann über die keplerschen Gesetze die Masse des Zentralobjekts direkt ableiten ließe. Ohne diese Daten behelfen sich die Forscher anders. Sie wissen durch Beobachtungen: je kleiner die Masse eines aktiven supermassereichen Schwarzen Lochs, desto geringer auch die Umlaufgeschwindigkeit der Gaswolken. Eine Extrapolation dieses Trends zu etwas niedrigeren Massen ermöglichte es uns, die neuen Objekte aus den Sloan-Daten herauszupicken.

Die Durchmusterung bestätigte, was wir auf Basis von NGC 4395 und POX 52 bereits vermutet hatten – es gibt tatsächlich eine größere Population von Schwarzen Löchern mittlerer Masse. Und, was wir ebenfalls erwartet hatten: Diese Himmelskörper finden sich überwiegend in Galaxien ohne Bulge. Trotzdem scheinen die Mittelgewichte vergleichsweise selten zu sein. Nur eine von 1000 Galaxien, die hell genug strahlen, um bei der Sloan-Durchmusterung erfasst zu werden, liefert auch Hinweise auf ein solches Objekt.

Doch unsere Methode könnte auch viele Schwarze Löcher übersehen. Schließlich basiert sie nur auf Beobachtungen im optischen Bereich – also den Wellenlängen, die wir mit unseren Augen sehen können. In diesem Fenster können jedoch



Staubwolken die Schwarzen Löcher verdecken. Um das Problem zu umschiffen, nutzen die Himmelsbeobachter Wellenlängen, die auch Staub durchdringen können: Röntgen-, Radio- und Infrarotstrahlen.

Der Astronom Shobita Satyapal von der George Mason University in Fairfax, Virginia, suchte im Infrarotbereich nach Anzeichen verborgener aktiver Schwarzer Löcher in Galaxien ohne Bulge. In ein solches Objekt einfallende Materie sendet Röntgenstrahlung aus, die im umgebenden Gas ungewöhnliche chemische Elemente produziert, zum Beispiel angeregte Zustände hoch ionisierter Neonatome. Emissionen der Ionen hinterlassen im mittleren Infrarotspektrum charakteristische Fingerabdrücke. Es gibt aber nur wenige Galaxien, die sich für diese Art von Suche wirklich eignen. Deshalb ist Satyapals Team auch nur auf wenige Schwarze Löcher mittlerer Masse gestoßen. Andere Astronomen haben aber im Röntgen- und Radiobereich weitere Hinweise auf solche Himmelskörper gefunden. Nachfolgebeobachtungen, mit denen diese Kandidaten bestätigt werden sollen, laufen derzeit.

Alle Beobachtungen deuten bisher darauf hin, dass die rein optische Suche tatsächlich zahlreiche Galaxien ohne Bulge übersieht, in denen Schwarze Löcher mittlerer Masse hinter Staub verborgen liegen. Das endgültige Ergebnis steht zwar noch aus, aber vermutlich enthalten nur 5 bis 25 Prozent der Galaxien ohne Bulge auch ein Schwarzes Loch mittlerer Masse, das groß genug ist, um entdeckt werden zu können.

Solche Informationen könnten uns dabei helfen, den Zusammenhang zwischen größeren Schwarzen Löchern und großen Bulges aufzuklären. Wie schon erwähnt, haben supermassereiche Schwarze Löcher in solchen Galaxien typischerweise ein Tausendstel der Masse der Zentralregion. Das Wachstum eines großen Schwarzen Lochs scheint also eng an das Wachstum seiner Umgebung geknüpft zu sein. Wenn sich diese Korrelation aber bereits in der Entstehungsphase einstellt, dann sollte es eigentlich keinen Zusammenhang zwischen den Eigenschaften von Galaxien ohne Bulge und ihren mittelgewichtigen Schwarzen Löchern geben.

Laut den meisten Forschern entstehen elliptische Galaxien und große Bulges durch die Verschmelzung von Spiral-

galaxien. Im Verlauf dieser Fusion verquirlen sich die Scheibensterne kräftig. Die Sterne kreisen danach nicht mehr nur innerhalb der Scheibe, sondern auf zufälligen Bahnen in einer Kugel (dem neuen Bulge oder der elliptischen Galaxie). Gaswolken kollidieren während der Verschmelzung miteinander, bewegen sich zum galaktischen Zentrum und

lösen dort einen mächtigen Ausbruch von Sterngeburten aus, der die Gesamtmasse der Sterne in der Kernregion erhöht.

Währenddessen verschmelzen auch die zentralen Schwarzen Löcher der ursprünglichen Galaxien miteinander und fressen einen Teil der einströmenden Gaswolken. Durch die

Rekordmonster im All

Kürzlich entdeckten Astronomen zwei gigantische Schwarze Löcher mit jeweils zehn Milliarden Sonnenmassen.

Riesige Schwarze Löcher mit mehreren Milliarden Sonnenmassen faszinieren Fachleute ebenso wie Laien oder Sciencefiction-Autoren. Diese »supermassereichen Schwarzen Löcher« sind keineswegs nur theoretische Spitzfindigkeiten, sondern existieren tatsächlich in den Zentren großer Galaxien. Vor 15 Jahren haben Astronomen sie erstmals nachgewiesen – und bald wurde ihnen klar, dass solche Objekte die Entstehung und Entwicklung ganzer Galaxien erheblich beeinflussen können.

Das löste eine ganze Welle von Untersuchungen über die gemeinsame Evolution von Galaxien und Schwarzen Löchern aus. Jüngster Höhepunkt war im Dezember 2011 die sensationelle Entdeckung von zwei supermassereichen Schwarzen Löchern – den massereichsten, die je gefunden wurden. Die beiden Objekte sind jeweils etwa zehn Milliarden Sonnenmassen schwer und sitzen in den Zentren von NGC 3842 und NGC 4889: zwei Galaxien in einer Entfernung von 320 und 335 Millionen Lichtjahren, inmitten der Galaxienhaufen Leo und Coma.

Der Coup gelang einem Team von Astronomen unter der Leitung von Nicholas J. McConnell von der University of California in Berkeley mit Hilfe der Daten verschiedener Großteleskope (*Nature* 480, S. 215–218, 2011). Bis dahin war das größte bekannte Schwarze Loch ein Objekt mit 6,3 Milliarden Sonnenmassen im Zentrum der elliptischen Galaxie M87 – 54 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Zum Vergleich: Jenes im Zentrum der Milchstraße bringt es gerade einmal auf 4,3 Millionen Sonnenmassen, weniger als ein Tausendstel davon.

Ursprünglich waren die Monsterlöcher von Theoretikern erdacht worden, um die intensive Strahlung zu erklären, die von Quasaren ausgesandt wird, einem Typ besonders aktiver Galaxien. Diese Punktstrahler finden sich vor allem in großen kosmologischen Entfernungen, als das Universum höchstens halb so alt war wie heute. Ihre enorme Helligkeit beruht auf erhitztem Gas, das sich in Richtung galaktisches Zentrum stark beschleunigt und dabei einen letzten Strahlungsblitz abgibt. Inzwischen ist dieses Gas aber weit gehend für die Bildung neuer Sterne aufgebraucht, was erklärt, warum wir in unserer kosmischen Umgebung keine Quasare mehr beobachten. Wenn allerdings supermassereiche Schwarze Löcher für die Quasarstrahlung verantwortlich sind, sollten sie quasi als Schläfer in den Zentren der massereichsten Galaxien noch nachzuweisen sein.

Dort stießen die Astronomen nun tatsächlich auf solche Objekte, für die sich die Masse auch zuverlässig bestimmen ließ.

Doch sind sie im Allgemeinen zu klein, um die Strahlung der hellsten Quasare zu erklären. Ideale Wirtsgalaxien für die größten dieser Löcher sind schwere elliptische Galaxien, wie sie in der Zentralregion von Galaxienhaufen vorkommen. Die Sternansammlungen saugen Gas und Sterne von Nachbargalaxien auf und füttern ihr eigenes supermassereiches Schwarzes Loch. Allerdings ist der nächste Galaxienhaufen von der Erde über 300 Millionen Lichtjahre entfernt, was die Bestimmung der Masse eines mutmaßlichen Monsterlochs erschwert.

McConnell und sein Team nahmen sich jeweils eine zentrale elliptische Galaxie in zwei Galaxienhaufen vor. Mit den kombinierten Messdaten mehrerer Großteleskope wie dem Hubble Space Telescope sowie den Keck- und Gemini-Teleskopen auf Hawaii gelang es ihnen, die Bahnen von Sternen zu beobachten, die in den Zentren beider Galaxien jeweils ein sonst unsichtbares Objekt umkreisen. Damit konnten sie die Masse Letzterer zu mehr als zehn Milliarden Sonnenmassen bestimmen. Vermutlich handelt es sich um zwei der erwähnten Schläferobjekte, die im jungen Kosmos die Kraftwerke der hellsten Quasare bildeten.

Entstanden sind diese Monstergelände vermutlich durch Gas, das sie laufend aus ihrer Heimatgalaxie aufsaugten, was aber zugleich die zentrale Ausbeulung (»Bulge«) der Galaxie anwachsen ließ. Der Prozess läuft so lange, bis die vom Schwarzen Loch ausgestrahlte Energie das nachstürzende Gas aufheizt und wieder ins All zurückdrängt. Die Beobachtungen weisen darauf hin, dass die neu entdeckten Superlöcher weniger durch das einstürzende Gas wuchsen, sondern vor allem durch die Verschmelzung gasarmer Nachbargalaxien.

Die Suche nach weiteren supermassereichen Schwarzen Löchern sieht viel versprechend aus: Mit Hilfe der nächsten Generation von 40-Meter-Teleskopen wie etwa dem European Extremely Large Telescope dürfte sich die Zahl der Galaxien, die detailliert analysiert werden können, dramatisch erhöhen.

Michele Cappellari

Der Autor ist Astronom am Department of Physics der University of Oxford.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 480, S. 187–188, 2011

NGC 4395 ist eine Balkenspiralgalaxie im Sternbild Jagdhunde, die 14 Millionen Lichtjahre von uns entfernt ist. Sie war die erste Galaxie ohne Bulge, in deren Zentrum Astronomen ein Schwarzes Loch mittlerer Masse entdeckten.



ROBERT FRANKE, FOCAL POINT OBSERVATORY

großräumigen Prozesse bei der Verschmelzung können supermassereiche Schwarze Löcher und große Bulges gemeinsam wachsen. Sobald das Zentralobjekt ein Tausendstel der Bulge-Masse erreicht hat, kehrt sich der Vorgang teilweise um, denn es agiert nun als »Laubbläser«: Mit seiner Strahlung bläst es Restgas aus dem Zentrum der Galaxie heraus und beendet so seine Wachstumsphase.

Kollabierende Gaswolken als Urheber

Mittelgewichte in Galaxien wie NGC 4395 kommen dagegen niemals in den Genuss einer solchen gemeinsamen Mahlzeit. Stattdessen verschlucken sie nur gelegentlich Gas aus dem Galaxienzentrum – kleine Happen ohne Bedeutung für die Entwicklung der Galaxie als Ganzes. In vielen Galaxien ohne Bulge wächst möglicherweise gar kein Schwarzes Loch heran. Ein Beispiel dafür ist die Scheibengalaxie M33, die ansonsten NGC 4395 ähnelt. M33 enthält eindeutig kein Schwarzes Loch mit einer Masse von mehr als 1500 Sonnen. Die Beweise für dieses Modell, welches das Wachstum der Zentralkörper mit der Entstehung der Bulges verknüpft, mehren sich, doch die Frage ist noch ungeklärt.

Wie sind nun die supermassereichen Schwarzen Löcher ursprünglich entstanden? Hier neigt sich die Waagschale zu Gunsten der Theorie des direkten Kollapses von Gaswolken im frühen Universum. Wenn stellare Schwarze Löcher, die durch Sternexplosionen entstanden, als Saatkörner supermassereicher Schwarzer Löcher dienen, dann sollten all diese Galaxien auch solche Objekte mit mindestens 10 000 Sonnenmassen enthalten. Es sieht jedoch so aus, als ob im Gegensatz zu NGC 4395 die meisten Galaxien ohne Bulge keine Schwarzen Löcher in ihrem Zentrum besitzen.

Auch andere Beobachtungen stützen das Szenario mit direktem Kollaps. So ähnelt die schwache Korrelation zwischen den Massen der Mittelgewichte und den Massen ihrer Wirtsgalaxien eher den Vorhersagen dieses Modells. Und es ist offenbar wesentlich einfacher, ein Schwarzes Loch mit der milliardenfachen Masse der Sonne zu produzieren, wenn man bereits mit einem massereichen Schwarzen Loch startet.

Noch bleiben viele wichtige Fragen zu diesen Schwarzen Löchern neuen Typs offen:

- Treten die Mittelgewichte häufiger in speziellen Arten kleiner Galaxien auf? Das würde darauf hindeuten, dass sich Schwarze Löcher und ihre Galaxien bereits vor den Verschmelzungen, aus denen Bulges und supermassereiche Schwarze Löcher hervorgehen, auf bislang unbekannte Art gegenseitig beeinflussen.
- Gibt es in den meisten Galaxien ohne Bulge wirklich keine solchen Zentralobjekte? Oder sind ihre Schwarzen Löcher nur zu klein, um bislang entdeckt zu werden?
- Besitzen doch alle Galaxien ohne Bulge Schwarze Löcher mit 10 000 bis 100 000 Sonnenmassen, die kaum Licht oder Röntgenstrahlung aussenden?

Antworten auf diese Fragen könnte die Theorie der supermassereichen Schwarzen Löcher in neue Richtungen lenken. ~

DIE AUTORIN



Im Rahmen ihrer Doktorarbeit an der Harvard University untersuchte **Jenny E. Greene** Schwarze Löcher mittlerer Masse. Heute ist sie Assistant Professor für Astronomie an der Princeton University und arbeitet dort über die Strukturentwicklung von Galaxien.

QUELLEN

- Greene, J. E.:** Big Black Hole Found in Tiny Galaxy. In: Nature 470, S. 45–46, 2011
- Greene, J. E., Ho, L. C.:** Active Galactic Nuclei with Candidate Intermediate-Mass Black Holes. In: Astrophysical Journal 610, S. 722–736, 2004
- Kormendy, J. et al.:** *e Back Holes do not Correlate with Galaxy Disks or Pseudobulges. In: Nature 469, S. 374–376, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139701

Antirealistischer Querdenker

Schon als Teenager rebellierte **Leonard Susskind** gegen herkömmliche Ansichten. Heute ist er davon überzeugt, dass unsere Erkenntnisfähigkeit die Wirklichkeit niemals ganz zu erfassen vermag.

Von Peter Byrne

Mit Vorliebe heckt Leonard Susskind Ideen aus, die den physikalischen Status quo verändern. Vor 40 Jahren zählte der Theoretiker von der Stanford University im US-Bundesstaat Kalifornien zu den Begründern der Stringtheorie: Diese wurde zunächst nicht ernst genommen, gilt aber heute als führender Kandidat für eine vereinheitlichte Theorie der Natur. Jahrelang bestritt er Stephen Hawkings Annahme, dass Schwarze Löcher Objekte nicht nur verschlingen, sondern auch die in ihnen steckende Information unwiederbringlich vernichten – und damit die Quantenmechanik verletzen. Am Ende war es Hawking, der nachgab. Susskind trug auch zu dem modernen Konzept der Paralleluniversen bei, indem er den Begriff einer »Landschaft« von Stringtheorien prägte. Das zerstörte den Traum der Physiker, das Universum lasse sich als eindeutiges Ergebnis von Grundprinzipien erklären.

Letztlich meint Susskind, dass die Realität unsere begrenzte Anschauung überfordert. Damit steht er nicht allein. Schon in den 1920er und 1930er Jahren spalteten sich die Begründer der Quantenmechanik in Realisten und Anti-

realisten. Albert Einstein und andere Realisten behaupteten, die Physik müsse ein geistiges Abbild der objektiven Realität zu Stande bringen – und sei es noch so unvollkommen. Antirealisten wie Niels Bohr fanden, solche Abbilder seien zum Scheitern verurteilt; die Forscher sollten sich darauf beschränken, empirische Vorhersagen zu machen und zu überprüfen. Nach Susskinds Meinung rechtfertigen die Paradoxien der modernen Physik die Bedenken Bohrs.

Beispielhaft illustriert das sein Prinzip der Komplementarität Schwarzer Löcher. Es besagt, dass Objekte, die in ein Schwarzes Loch stürzen, ein zutiefst zweideutiges Schicksal erleiden. Vom Standpunkt des Objekts aus betrachtet durchquert es den so genannten Ereignishorizont des Schwarzen Lochs ohne Zwischenfall und wird erst bei Erreichen der Singularität im Zentrum zerstört. Doch für einen externen Beobachter wird das Objekt schon am Horizont vernichtet. Was also geschieht wirklich? Die Frage ist nach dem Komplementaritätsprinzip sinnlos: Beide Interpretationen treffen zu.

Eine verwandte Idee, die den Antirealismus stützt, ist das holografische Prinzip, das Susskind und der Nobelpreisträger Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht (Niederlande) Mitte der 1990er Jahre formulierten. Demnach lassen sich die Ereignisse in einem bestimmten Raumzeitvolumen durch die Vorgänge auf seiner Oberfläche erklären. Gewöhnlich stellen wir uns bewegte Objekte in einem dreidimensionalen Raum vor, aber ebenso gut können wir dabei an flache Kleckse denken, die über eine zweidimensionalen Fläche gleiten. Was ist also die echte Realität: die Grenzfläche oder das Innere? Die Theorie gibt keine Antwort. Im holografischen Bild ist die Realität Ansichtssache.

Peter Byrne: Wie kam der Sohn eines Klempners aus dem New Yorker Stadtteil Bronx dazu, das Wesen der Realität in Frage zu stellen?

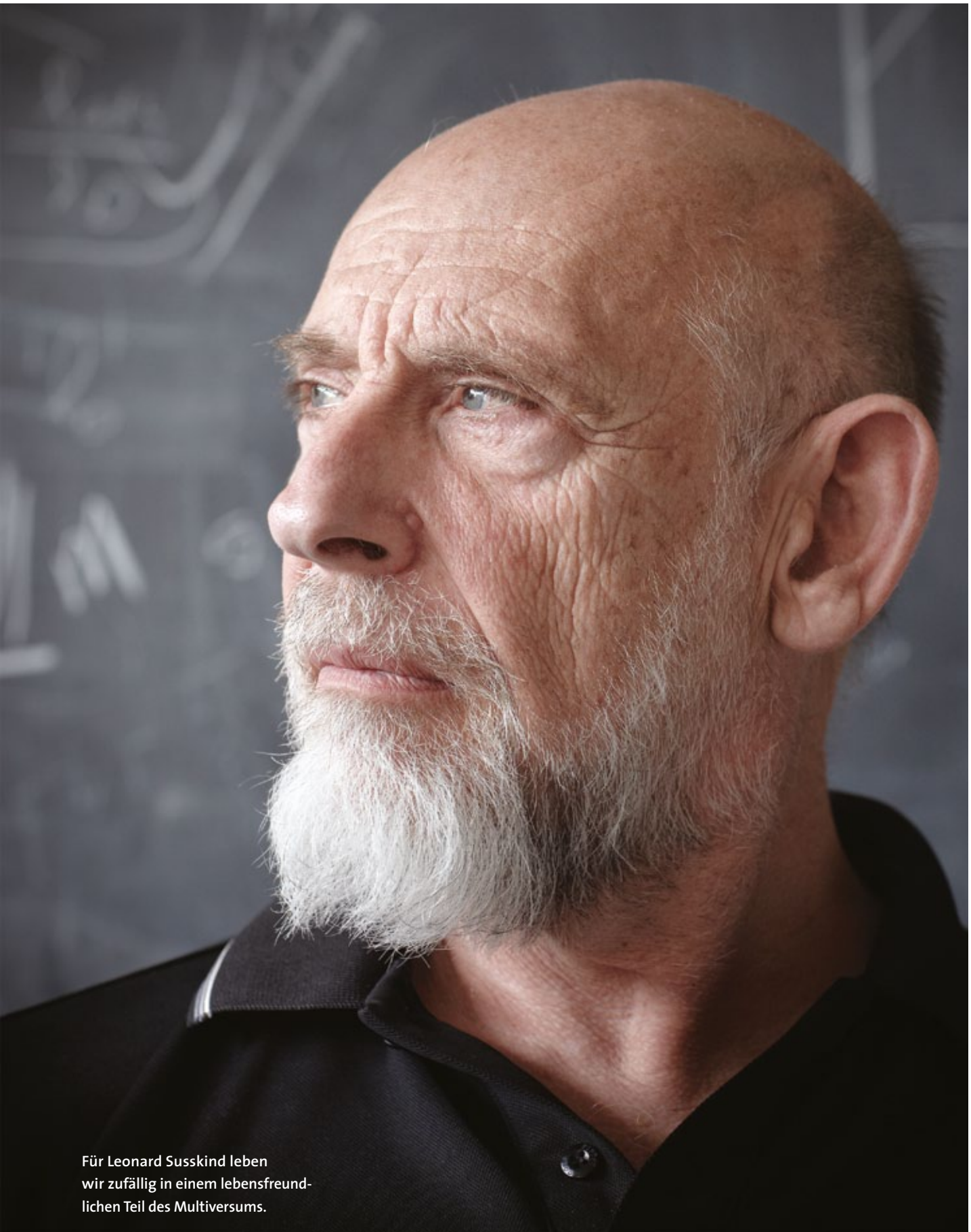
AUF EINEN BLICK

LEONARD SUSSKINDS PHILOSOPHIE

1 Der theoretische Physiker von der Stanford University gilt als **Pionier der Stringtheorie**, der Physik Schwarzer Löcher und des Multiversums.

2 Darüber hinaus stellt Susskind philosophische Fragen nach dem grundlegenden **Wesen der physikalischen Realität**.

3 Seine Antwort lautet: Wir werden über diese Realität wohl **keine endgültige Aussagen** machen können. Das Universum und seine Bestandteile lassen sich nicht eindeutig beschreiben.



Für Leonard Susskind leben wir zufällig in einem lebensfreundlichen Teil des Multiversums.

TIMOTHY ARCHIBALD

LEONARD SUSSKIND: Ich war ein schlechter Schüler – sehr gut in Mathematik, aber sonst ein schlimmer Junge mit vielen Scherereien. Deshalb durfte ich erst nicht Physiker werden, sondern lernte zunächst Automechaniker. Aber in der Ausbildung hatte ich erstmals Physik und war darin gleich weitaus besser als alle anderen, sogar besser als der Lehrer. Zum Glück machte er sich nichts daraus. Dann sagte mir ein anderer Techniklehrer, ich würde mich wohl eher nicht zum Ingenieur eignen. Damit hatte er Recht. Ich fragte ihn: Was soll ich tun? Er sagte: Na ja, du bist ungewöhnlich schlau. Du solltest Wissenschaftler werden.

Haben Sie auch Philosophievorlesungen besucht?

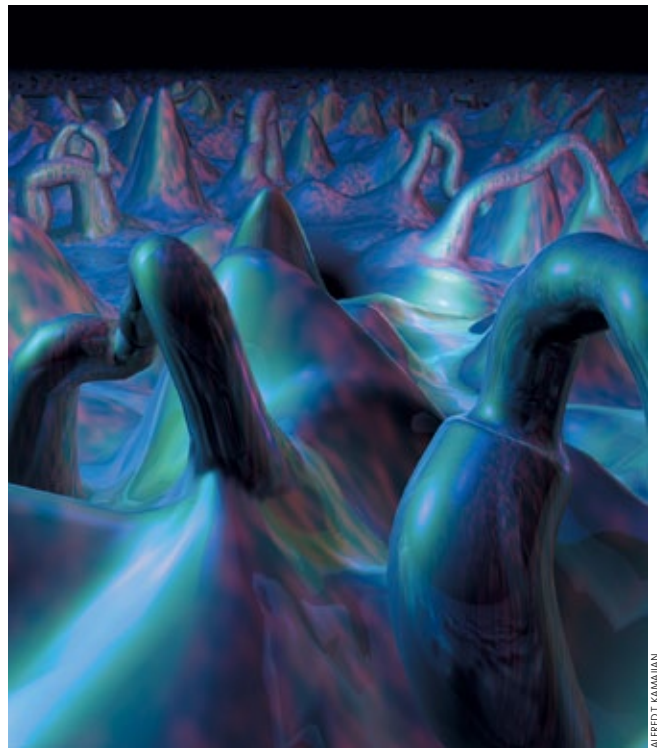
SUSSKIND: Ja, anfangs schon. Von einigen Gedanken war ich ziemlich fasziniert. Aber als ich voll in die Physik einstieg, verlor ich das Interesse.

Gibt es Wissenschaftsphilosophen, die Ihnen zusagen?

SUSSKIND: Ich gehöre, soweit ich weiß, zu den wenigen Physikern, die den amerikanischen Wissenschaftshistoriker und -soziologen Thomas Kuhn (1922–1996) mögen. Von ihm stammt die Idee des Paradigmenwechsels, eines plötzlichen, radikalen Wandels in der Wissenschaft. Gelegentlich werden völlig neue Begriffe, Abstraktionen und Vorstellungen wichtig. Die Relativitätstheorie war ein solcher Paradigmenwechsel. Somit erfinden wir immer wieder neue Realitätsbilder. Sie verdrängen die alten Ideen niemals völlig, sondern ersetzen sie großteils durch Konzepte, die besser funktionieren und die Natur besser beschreiben. Oft sind sie so unvertraut, dass sie die Frage aufwerfen, was »Realität« überhaupt bedeutet. Dann kommt die nächste Umwälzung und wirft alles über den Haufen. Und wir sind jedes Mal wieder überrascht, dass das alte Denken auf den gewohnten Bahnen einfach versagt.

Gibt es bei diesem fortwährenden Modellwechsel überhaupt Platz für so etwas wie objektive Realität?

SUSSKIND: Jeder Physiker muss irgendwie voraussetzen, dass es in der Welt objektive Dinge gibt und dass es unsere Aufgabe ist, etwas darüber herauszufinden. Ich glaube nicht, dass man ohne dieses Gespür für eine objektive Realität Forschung treiben könnte. Das Indiz für Objektivität ist die Reproduzierbarkeit der Experimente. Wenn man gegen einen Stein tritt, schmerzt die Zehe. Wenn man zweimal tritt, schmerzt sie zweimal. Die Wiederholung desselben Experiments führt zu demselben Effekt. Allerdings sprechen Physiker fast nie von Realität. Der Begriff hat mehr mit Biologie und Evolution zu tun als mit Physik, er betrifft eher unsere biologische Hardware. Wie sind Gefangene unserer neuronalen Architektur. Manche Dinge können wir uns anschaulich vorstellen, andere nicht. Einsteins abstrakte, vierdimensionale Geometrie ließ sich nur schwer veranschaulichen. Vorstellbar wurde sie durch mathematische Beziehungen. Als die Relativitätstheorie plötzlich auf der Bildfläche erschien, müssen sich viele gefragt haben: Was ist mit der »wirklichen« Zeit geschehen? Was wurde aus dem »wirklichen« Raum? Beide sind irgendwie zu dieser komischen Raumzeit vermischt worden, aber es gibt Regeln – klare und präzise mathematische Regeln, die sich aus der Raumzeit abstrahieren lassen. Sie überdauern, wäh-



Die Stringtheorie, an der Susskind mitwirkte, betrachtet die makroskopisch glatte Raumzeit als unruhigen »Quantenschaum«.

rend die alten Realitätsbegriffe verblassen. Darum sage ich: Trennen wir uns von dem Wort »Realität«. In unserer ganzen Diskussion wollen wir ohne diesen Begriff auskommen. Er stört. Er beschwört Dinge herauf, die uns kaum helfen. Das Wort »reproduzierbar« ist nützlicher als »real«.

Was ist mit der Quantenmechanik? Gemäß dieser Theorie kann der Tritt gegen denselben Stein tatsächlich unterschiedliche Resultate ergeben.

SUSSKIND: Das ist eben die große Frage. In der Quantenmechanik gibt es zwei Entdeckungen, die unseren klassischen Realitätsinn durcheinanderbringen. Erstens die Verschränkung. Sie besagt etwas sehr Bizarres: Man kann alles über ein zusammengesetztes System wissen, ohne alles über die einzelnen Bestandteile zu wissen. Für solche Abstraktionen sind wir biologisch einfach nicht ausgerüstet; sie unterminieren unseren Sinn für die Wirklichkeit. Die zweite Entdeckung, die den klassischen Realitätsbegriff erschütterte, war das heisenbergsche Unbestimmtheitsprinzip. Wenn man versucht, ein Objekt als etwas zu beschreiben, das sowohl einen Ort als auch einen Impuls hat, dann kommt man in Schwierigkeiten. Man muss sich vorstellen, dass es entweder einen eindeutigen Ort oder einen definierten Impuls besitzt, nicht beides zugleich.

Das meinen Physiker mit »Komplementarität«?

SUSSKIND: Genau. Wie sich herausstellt, ähnelt die Mathematik des Ereignishorizonts eines Schwarzen Lochs dem Unbestimmtheitsprinzip. Wieder geht es um »oder« versus »und«. Ganz klassisch betrachtet fällt etwas entweder in ein Schwarzes Loch, oder es fällt nicht hinein. Es gibt Dinge au-

ßerhalb des Schwarzen Lochs, und es gibt Objekte innerhalb. Doch wie wir heute wissen, darf man nicht so denken. Man sollte sich nicht vorstellen, dass manche Dinge außerhalb des Horizonts geschehen und manche drinnen. Das sind redundante Beschreibungen derselben Sache. Das heißt, wir müssen die alte Idee aufgeben, ein Bit Information nehme einen eindeutig bestimmten Ort ein (siehe »Das Informationsparadoxon bei Schwarzen Löchern« von Leonard Susskind, Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 58).

Wenn ich Sie recht verstehe, erweitert das holografische Prinzip das Komplementaritätsmodell für Schwarze Löcher auf das ganze Universum.

SUSSKIND: Angenommen, wir möchten irgendein System höchst präzise beschreiben. Um es mit großer Genauigkeit zu messen, brauchen wir hohe Energien. Wenn man die Präzision immer mehr steigert, erzeugt man schließlich Schwarze Löcher. Die gesamte in einem Schwarzen Loch enthaltene Information befindet sich auf seiner Oberfläche, dem Ereignishorizont. Wenn man immer feinere Beschreibungen des Systems anfertigt, platziert man die Information am Ende auf einer Grenzfläche. Es gibt zwei Beschreibungen der Realität: Entweder ist die Realität das Raumzeitvolumen innerhalb der Grenzfläche, oder die Realität ist die Fläche selbst. Welche Beschreibung ist nun real? Darauf gibt es keine Antwort. Wir können uns ein Objekt entweder als ein Ding innerhalb des Volumens vorstellen oder als eine kompliziert verschlüsselte Information auf der Grenzfläche, die es umgibt. Beides zugleich geht nicht. Entweder oder. Es handelt sich um eine unglaublich verworrene Abbildung des einen auf das andere.

Das ursprüngliche Ziel der Stringtheorie war eine eindeutige Erklärung der Realität. Jetzt liefert sie uns multiple Universen. Was ist passiert?

SUSSKIND: Viele Physiker haben den Versuch aufgegeben, unsere Welt als eindeutig zu erklären, als die einzige mathematisch mögliche Welt. Derzeit wird das Multiversum favorisiert. Nicht jeder arbeitet daran, aber es gibt kein schlüssiges, starkes Gegenargument.

Warum?

SUSSKIND: Das Universum ist sehr, sehr groß. Empirisch wissen wir, dass sein Volumen mindestens 1000-mal größer ist als der für uns jemals sichtbare Teil. Der Erfolg des Modells der kosmischen Inflation eröffnet die Möglichkeit, dass das Universum in genügend großem Maßstab unterschiedlich beschaffen ist. Die Stringtheorie liefert quasi Legosteine, die sich auf enorm viele Arten zusammensetzen lassen. Darum hat es keinen Sinn, nach Erklärungen dafür zu suchen, warum unser Stückchen Welt gerade so und nicht anders beschaffen ist, denn es gibt andere Weltstücke, die nicht genau so sind wie unseres. Es kann keine universelle Erklärung für alles geben, die mehr wert ist als die Behauptung, es gebe ein Theorem, wonach die mittlere Temperatur eines Planeten 15 Grad Celsius beträgt. Jeder, der versucht, rechnerisch zu beweisen, dass Planeten 15 Grad warm sind, ist ein Narr, denn es gibt unzählige Planeten im All, die nicht diese Temperatur haben.

Doch niemand kennt die Grundregeln für Multiversen. Der Vorgang der ewigen Inflation erzeugt einfach eine Blase nach der anderen – unter anderem auch zahllose gleichartige Blasen mit beliebigen Eigenschaften. Die Wahrscheinlichkeit der einen Art gegenüber der anderen ist unendlich durch unendlich. Wir besäßen gern eine Häufigkeitsverteilung, die besagt, dass eine Blase wahrscheinlicher ist als die andere; dann könnten wir Vorhersagen machen. So sind wir von einem sehr überzeugend anmutenden Bild zu dem absurden Versuch verführt worden, eine Unendlichkeit von Wahrscheinlichkeiten zu messen. Wenn das Inflationsmodell scheitern sollte, dann aus diesem Grund (siehe »Kosmische Inflation auf dem Prüfstand« von Paul J. Steinhardt, Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 40).

Ist es möglich, theoretische Physik zu betreiben, ohne auf philosophische Ideen zu kommen?

SUSSKIND: Die meisten großen Physiker hatten einen recht ausgeprägten Hang zu philosophischen Überlegungen. Mein Freund Richard Feynman (1918–1988) hasste die Philosophie und ihre Vertreter, aber ich kannte ihn gut und weiß, dass er zu tiefen Überlegungen allgemeiner Art neigte. Die Auswahl der Probleme, über die man nachdenkt, wird durch eine philosophische Grundeinstellung bedingt. Andererseits möchte ich betonen: Es gibt immer wieder Überraschungen, welche die philosophischen Vorurteile auf den Kopf stellen. Die gängige Meinung besagt, für Wissenschaft gebe es Standardregeln: Man macht Experimente, bekommt Ergebnisse, interpretiert sie und hat am Ende Erkenntnis gewonnen. Doch der wirkliche Wissenschaftsprozess ist so chaotisch und widersprüchlich wie alles, was Menschen machen. ~

DER AUTOR



Peter Byrne ist Journalist in Nordkalifornien und Verfasser des Artikels »Die Parallelwelten des Hugh Everett« in Spektrum der Wissenschaft 4/2008, S. 24. Daraus ist sein aktuelles Buch »Viele Welten – ein Familiendrama zwischen Kaltem Krieg und Quantenphysik: Das faszinierende Leben des Hugh Everett III« (Springer, Heidelberg 2012) hervorgegangen.

QUELLEN

Feyerabend, P.: Irrwege der Vernunft. Suhrkamp, Frankfurt 1990
Susskind, L.: Der Krieg um das Schwarze Loch. Wie ich mit Stephen Hawking um die Rettung der Quantenmechanik rang. Suhrkamp, Frankfurt 2010
Susskind, L.: The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design. Back Bay Books, New York 2006

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/jul2011/susskind
Diskussion über das Wesen der physikalischen Realität (in englischer Sprache)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139703



Jeder Zapfen ist ein Individuum – die »Bauprinzipien« sind jedoch bei allen dieselben. Am längsten werden die Objekte, wenn über einen größeren Zeitraum hinweg tiefe Temperaturen herrschen, sich aber immer wieder die Sonne zeigt.

zusätzliches Wasser gefrieren und dabei Wärme abgeben, wodurch die Temperatur wieder auf null Grad ansteigt. Und wäre sie höher, würde Eis schmelzen und dafür Wärme benötigen, so dass die Temperatur auf null Grad sank. Ein Wärmetransport ist also nur von der Wassersäule nach oben zur Zapfenwurzel möglich (siehe Grafik links) – lediglich dort, an der Dachtraufe, ist es kälter als null Grad.

Von der Existenz des inneren Flüssigkeitsfadens kann man sich übrigens leicht mit einem Draht oder Schaschlikstäbchen überzeugen. Wächst dieser »Hohlraum« von oben nach unten allmählich aber doch zu, hinterlässt er eine Spur von eingeschlossenen Luftblasen. Diese entstehen aus den Luftmolekülen, die zuvor im Wasser gelöst waren (siehe Foto oben rechts).

Während Experimente typischerweise unter gleich bleibenden Bedingungen stattfinden, ist die Natur unberechenbar. Mal begünstigt stärkerer Wind die Wärmeabfuhr, mal fließt plötzlich mehr Wasser über den wachsenden Zapfen. Besonders starken Windstößen gelingt es sogar, Wasser aus dessen Innerem he-



Versiegt die Zufuhr von Wasser, gefriert auch das zuvor flüssige Wasser im Inneren des Zapfens. In kleinen Blasen sammelt sich dabei die darin gelöste Luft. Die große Blase ist wohl Folge eines Windstoßes, der Wasser aus dem Hohlraum absaugte.

rauszusaugen. Dort können dabei recht große Luftblasen entstehen. Man muss die individuelle Form eines Zapfens also nur richtig »lesen«: Große Blasen deuten auf eine stürmische Vergangenheit hin, eingeschnürte Stellen auf wärmere Perioden und so weiter. »Tot« ist ein Zapfen erst, wenn die Wasserzufuhr versiegt und auch sein Inneres zufriert.

Eine weitere Auffälligkeit wird oft übersehen: die wellenartige Oberfläche von Eiszapfen. Als würden sie sich nach dem metrischen System richten, beträgt die Länge der Wellen etwa einen Zentimeter. Diesem Phänomen liegt ein weiterer Selbstorganisationsprozess zu Grunde, bei dem zwei entgegengesetzte Tendenzen miteinander konkurrieren. Die eine wird als Laplace-Instabilität bezeichnet und verstärkt kleinste zufällige Dickschwankungen des Zapfens. Denn je exponierter eine Stelle auf der Außenseite ist, beispielsweise ein Wellenberg gegenüber einem Wellental, desto besser wird die Wärme abgeleitet und desto schneller wächst die Eisschicht.

Die andere ist das Bestreben der Natur, Temperaturdifferenzen auszuglei-

chen. Das über den wachsenden Zapfen fließende Wasser erwärmt demzufolge die »kalten« Wellenberge und kühlt die »wärmeren« Wellentäler. Dieser Effekt bremst das Eiswachstum und regelt es auf einen gleich bleibenden Wert ein. Er ist umso stärker, je mehr sich die Temperatur zwischen beiden unterscheidet.

Zur Beschreibung dieser Phänomene haben Wissenschaftler der japanischen Hokkaido-Universität eigens eine Theorie entwickelt. Sie erklärt nicht nur die beobachtete Wellenlänge, sondern zeigt darüber hinaus, wie sich die Wellenstruktur der Zapfen allmählich fortbewegt. Indem Wellenberge und -täler unten schmelzen und weiter oben in gleichem Maß gefrieren, wandern sie den Forschern zufolge halb so schnell nach oben, wie der Zapfen wächst. Diese Vorhersage harret meines Wissens aber noch der Überprüfung.

Höhlenforscher haben für Erkenntnisse rund um Eiszapfen übrigens ebenfalls Verwendung. Zumindest erleichtern sie, weil ihr Wachstum universellen Prinzipien folgt, manches Experiment. Eiszapfen bilden sich nämlich auf ähnliche Weise wie Stalaktiten in Tropfsteinhöhlen – nur dass die einen binnen weniger Wochen eine beachtliche Länge erreichen, während die anderen dazu Jahrtausende benötigen. ☞

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting

war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLE

Ogawa, N., Furukawa, Y.: Surface Instability of Icicles. In: Physical Review E 66, 041202, Oktober 2002

LITERATURTIPP

Schlichting, H.J.: Eiszapfen, die gen Himmel wachsen. In: Spektrum der Wissenschaft 3/2011, S. 38–39

Cherokee als Sklavenhalter

Um sich den Weißen anzupassen und ihre wirtschaftliche Lage zu verbessern, erwarben Indianer der Cherokee-Nation afrikanische Sklaven: ein wenig beachtetes Kapitel der nord-amerikanischen Geschichte.

Von Julian Willuhn

Aus Afrika entführte Sklaven und ihre Nachkommen galten weißen Plantagenbesitzern als minderwertig. Diesen Rassismus übernahmen Indianerstämme im Gebiet der Südstaaten, darunter die Cherokee (im Bild: ehemalige Sklaven der Cherokee um 1900).

Weiß, Schwarz und Rot – drei Hautfarben, mit denen sich eindringliche Bilder zur Geschichte der USA, insbesondere der Südstaaten, verbinden: weiße Großgrundbesitzer, deren aristokratischer Lebensstil auf der Arbeit afrikanischer Sklaven gründet; weitläufige Plantagen auf einem Land, das Indianern geraubt wurde. Mögen diese Vorstellungen von Opfern und Tätern auch in vielem der Wahrheit entsprechen, liefern sie nach heutiger Kenntnis doch kein vollständiges Geschichtsbild. Denn mit Ausnahme der Seminolen übernahmen die großen Indianerstämme des Südostens – die Creek, Choctaw, Chickasaw, vor allem aber die Cherokee – auch manche Aspekte europäischer Kultur, bis hin zu Rassismus und Sklaverei. Erst seit den 1970er Jahren untersuchen Forscher die Lebensumstände schwarzer Sklaven in den Indianernationen.

Vor der Ankunft der Weißen lebten die Stämme dort vom Jagen, Sammeln und Gartenbau. Doch mit den Europäern setzte der Niedergang ihrer Kultur ein. Der im 17. Jahrhundert

beginnende Pelzhandel mit den englischen Kolonien in Virginia hatte einen massiven Rückgang der Wildbestände zur Folge – für einige der Völker ging eine wichtige Lebensgrundlage verloren. Eingeschleppte Infektionskrankheiten erreichten von Virginia aus über Zwischenstationen auch die Cherokee und dezimierten ihre Zahl.

Die Briten, die sich der indianischen Krieger seit 1730 als Verbündete gegen die französischen Kolonien bedient hatten, boten Unterstützung an – sofern die Cherokee den christlichen Glauben annahmen und Ackerbau betrieben. Doch Gartenarbeit galt als Frauensache, Männer erlangten Ruhm und Ehre im Krieg und bei der Jagd. Zudem fehlte es den Stämmen an Gerätschaften und Saatgut sowie am nötigen Wissen, um große Getreidefelder zu bestellen oder gar Baumwolle und Tabak anzubauen. Doch der »einzige Weg, dem Hungertod zu entgehen, war, die Lebensweise des weißen Mannes zu übernehmen«, wie der amerikanische Historiker William McLoughlin von der Brown University in Providence konstatierte.



OKLAHOMA HISTORICAL SOCIETY, RESEARCH DIVISION, PHOTO 1365

Nach der Unabhängigkeitserklärung von 1776 setzte die junge US-Regierung die Integrationspolitik fort. Während ihre Agenten versuchten, die Indianer in die Geheimnisse von Ackerbau und Viehzucht einzuweihen, lösten manche Stammesangehörige ihr Problem auf ungewöhnliche Weise. Oft handelte es sich dabei um Söhne weißer Händler, die Cherokeefrauen geheiratet hatten. Dank ihrer Englischkenntnisse, des ererbten Vermögens und der guten Kontakte konnten sie Schwarzafrikaner kaufen.

Bis dahin diente die Versklavung von Kriegsgefangenen eher dem Renommee der Krieger. Nun aber vermochte eine kleine Gruppe Gewinne zu erwirtschaften, ohne selbst die Hacke schwingen zu müssen. Nicht anders als bei den Weißen lebten Sklaven im Haus ihres Herrn oder in separaten Quartieren, bestellten die Felder, hüteten das Vieh, führten den Haushalt und gingen handwerklichen Tätigkeiten nach. 1809 bezifferte eine Steuererhebung die Zahl der Cherokee auf 12395, die ihrer Unfreien auf 584, 1828 kamen auf 14.972 India-

ner immerhin schon 1038 Schwarze. Freilich war das um Größenordnungen kleiner als auf den Plantagen der Weißen: In den Vereinigten Staaten lebten zu dieser Zeit über zwei Millionen Sklaven. Anfangs hatten die Europäer auch Indianer auf

AUF EINEN BLICK

ÜBERLEBENSSTRATEGIE RASSISMUS

1 Sklaverei und Rassismus fanden sich nicht nur bei der weißen Bevölkerung Nordamerikas: **Um sich anzupassen**, erwarben auch **indianische Nationen** schwarze Sklaven.

2 Im Zuge dessen übernahmen insbesondere die Cherokee den Rassismus der Europäer und betrachteten geraubte Afrikaner als **minderwertig und weit gehend rechtlos**.

3 Diese Anpassung verfolgten die Cherokee noch nach ihrer **Deportation nach Oklahoma**. In der Folge spaltete die Sklaverei ihre Nation, weshalb **im amerikanischen Bürgerkrieg** auch Cherokee gegen Cherokee kämpfte.

ihre Felder gezwungen. Doch ihre Anfälligkeit für Infektionskrankheiten und die häufigen Fluchtversuche in die nahen Dörfer ließen den Sklavenhandel mit Afrikanern boomen.

Vor der Ankunft der Weißen hatten die Cherokee Fremden meist misstrauisch gegenübergestanden – durch Adoption konnte aber jeder zu einem vollwertigen Mitglied des Stamms werden. Allmählich übernahmen sie dann jedoch europäische Vorstellungen von Rasse und Hautfarbe. So schränkte auch die Cherokee-Nation die Rechte der verschleppten Afrikaner massiv ein. Sklaven durften weder Vieh besitzen noch Handel treiben; einem Freigelassenen war es untersagt, Indianerland zu betreten. 1824 verbot der oberste Rat zudem die Mischehe. Dem war das Gesuch des renommierten Kriegers Shoebots vorausgegangen, seine Kinder aus der Verbindung mit einer Sklavin mit vollen Bürgerrechten auszustatten. Der Rat gewährte dies zwar, bezeichnete die Liaison aber als entwürdigend und wollte Derartiges künftig unterbinden. Die amerikanische Historikerin Fair Yarbrough von der University of Oklahoma in Norman verglich diesen Vorgang mit Verboten von Mischehen in den weißen Kolonien. Während dort auch die Ehe mit Indianern untersagt war, erlaubten die Che-

rokee Verbindungen zu Weißen. Die Forscherin sieht darin eine demonstrative Gleichstellung mit den Eroberern. Die Schwarzen hingegen galten per se als minderwertig, was ihre Versklavung rechtfertigte. Lediglich ihre grundlose Tötung zählte immer noch als Mord.

Weißer warfen den Cherokee dennoch vor, die Afrikaner zu nachsichtig zu behandeln. Der Historiker Rudi Halliburton jr. von der Northeastern Oklahoma State University in Tahlequah veröffentlichte 1977 indes von ihm gesammelte Erfahrungsberichte Freigelassener. Deren Aussagen zeichnen ein differenziertes Bild vom Leben der Sklaven unter den Cherokee. Einige lobten, dass »der Master niemals jemanden bestrafte« und wünschten sich gar, »die Sklaverei wäre niemals vorbeigegangen«. Andere schilderten rohe Gewaltanwendung wie das Auspeitschen Kranker, die ihrer Arbeit nicht nachkamen. Der Umgang mit dem menschlichen Produktionsmittel variierte offenbar von Besitzer zu Besitzer. Plantagen wie bei den Weißen, auf denen ein Sklave selten länger als zwei Jahre überlebte, gab es in der Cherokee-Nation aber tatsächlich nicht.

Zudem lehnten etliche Indianer die Sklaverei ab. Allerdings nicht aus humanitären Gründen, sondern weil sie in der Anpassung an die Weißen einen Verrat an der traditionellen Lebensweise sahen. Für jene, die sich hatten verschleppen lassen, hegten diese Verfechter des althergebrachten Kriegerturns wenig Mitleid – nur der Starke verdiente Freiheit.

In einem Punkt gab die Geschichte ihnen Recht: Die Hoffnung, durch eine Transformation der Stammesgesellschaft

Seminolen, Creek, Chickasaw, Choctaw und Cherokee bildeten die »fünf zivilisierten Nationen« im Südosten Nordamerikas. In den 1830er Jahren wurden sie aus ihren bereits geschrumpften Stammesgebieten nach Oklahoma deportiert (»Pfade der Tränen«).





Die Cherokee gehörten zu den mächtigsten Stämmen des Südostens (Bild des Häuptlings Austenaco von 1762, eines im Volk hoch geachteten Kriegers). Vor dem Unabhängigkeitskrieg waren sie Verbündete der Briten und mussten nun in der neuen Welt der Südstaaten ihren Platz finden. Nicht wenige suchten ihr Heil in der Anpassung an die Lebensweisen der Weißen.

nach dem Vorbild der Eroberer die Anerkennung der Indianerterritorien als souveräne Staaten zu erreichen, wurde bitter enttäuscht. Immer wieder brachen die USA Verträge, in denen sie den Eingeborenen Kontrolle über ihr Land zugesichert hatten. Im Staat Georgia veranlasste der 1829 einsetzende Goldrausch die Regierung dazu, den Indianern die Schürfrechte in ihren Siedlungsgebieten zu entziehen. Klagen vor dem Obersten Gerichtshof der USA hatten zwar Erfolg, doch Präsident Andrew Jackson setzte sich 1830 über diese Entscheidung hinweg und unterzeichnete den Indian Removal Act, der die Umsiedlung der östlich des Mississippi lebenden Stämme anordnete. Auf dem »Pfad der Tränen« in das gut 2000 Kilometer entfernte Indianerterritorium in Oklahoma starben nach neueren Forschungen etwa 8000 der deportierten 13000 Cherokee – viele andere hatten ihr Land vorher schon freiwillig verlassen.

Der neue Lebensraum bot schlechtere Lebensbedingungen, doch nach bürgerkriegsähnlichen Auseinandersetzungen entstand ein europäisch anmutendes Gemeinwesen mit Kirchen, Zeitungen und einem Parlament in der neuen Hauptstadt Tahlequah. Es fällt aber auf, dass sich die Situation der Sklaven verschlechterte. Ihnen wurde es beispielsweise untersagt, lesen und schreiben zu lernen, auch durften sie keine Waffen mehr tragen. Neue Erlasse erklärten Freigelassene und »Mischlinge« für unwürdig, ein Amt zu bekleiden, die Strafen für Mischehen wurden verschärft und schließlich alle freien Schwarzen ausgewiesen. Offenbar verfolgte die herrschende Schicht der Cherokee weiterhin die längst gescheiterte Strategie der Abgrenzung, für Yarbrough ein Beispiel dafür, »wie sich eine Gruppe gegen eine rassistische Einordnung und die Unsicherheit ihrer eigenen Position wehrt, indem sie eine andere Gruppe rassistisch einstuft«.

Das Gesamtbild der Nation erweist sich im Licht der Forschung allerdings als weit differenzierter. Denn nur wenige

profitierten von der Sklaverei. Viele ärmere Cherokee litten Jahre nach der Vertreibung noch bittere Not. Sie wehrten sich gegen den Einfluss der Amerikaner und forderten die Abschaffung der Sklaverei. Geheimbünde von Gegnern und Befürwortern kämpften gegeneinander. Als sich der amerikanische Bürgerkrieg 1861 an der Sklavenfrage entzündete, standen Cherokee in der Schlacht anderen Cherokee gegenüber. Am 18. Februar 1863 proklamierte der unionstreue Teil der Nation das Ende der Sklaverei, doch erst das Ende des Sezessionskriegs 1865 brachte den Schwarzen im Reservat tatsächlich die Freiheit.

Von vollkommener Gleichberechtigung konnte allerdings keine Rede sein. Beispielsweise waren die Schulen auch in der Cherokee-Nation nach Hautfarbe getrennt, farbige Kinder wurden in Waisenhäusern nicht aufgenommen. Dabei waren die ehemaligen Sklaven mittlerweile kulturell mit den Indianern verbunden, sprachen ihre Sprache und pflegten die gleichen Bräuche.

Als Theodore Roosevelt 1906 die unabhängigen Indianerterritorien Oklahomas mit einem Federstrich den USA anschloss, verloren diese zwar ihre Unabhängigkeit, erhielten aber endlich die gleichen Rechte wie die Weißen. Die Situation der Abkömmlinge ihrer Sklaven verbesserte sich dabei nicht. 1983 schloss der Oberste Gerichtshof der Cherokee sie offiziell aus der Nation aus, im vergangenen September bestätigte er das Urteil. Für die Betroffenen geht es um die Anerkennung ihres kulturellen Erbes wie auch um handfeste Fragen etwa der Krankenversicherung. Die Indianer betonen zwar heute, dass ein einziger auf Klanlisten verzeichneter indianischer Vorfahr zur Aufnahme in die Nation genüge, die Betroffenen aber fordern, die kulturelle Zugehörigkeit zur Welt der Indianer sollte entscheidend sein. Obwohl der offene Rassismus der Cherokee vielfach kritisiert wird, mischen sich die Behörden der Vereinigten Staaten bisher nicht in die internen Angelegenheiten des Stamms ein. ~

DER AUTOR



Julian Willuhn ist Historiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

QUELLEN

Katz, W.L.: Black Indians. A Hidden Heritage. Atheneum Books for Young Readers, New York 1986
Yarbrough, F.A.: Race and the Cherokee Nation. Sovereignty in the Nineteenth Century. University of Pennsylvania Press, Philadelphia 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139705



INTERVIEW

»Mehr als nur Büffel jagende Nomaden«

Der Historiker **Gilles Harvard**, Mitarbeiter der französischen Forschungseinrichtung MASCIPO (Mondes Américains. Sociétés, Circulations, Pouvoirs) erzählt von den Eigenheiten nord-amerikanischer Indianer und ihrer wechselvollen Geschichte.

Spektrum der Wissenschaft: *Mit dem Begriff Indianer verbindet sich die Vorstellung von Büffel jagenden Reiternomaden. Wird sie der geschichtlichen Wirklichkeit gerecht?*

GILLES HARVARD: Absolut nicht. Europäische Kolonialisten beschrieben die indigenen Völker im 17. Jahrhundert zwar oft als streunende Wilde, doch viele Gruppen waren sesshaft und betrieben Ackerbau. Zu ihnen zählten etwa die Huronen und Irokesen im Gebiet der Großen Seen. Sie pflanzten Mais und Kürbis an, jagten, fischten und sammelten aber auch, was die Natur an Essbarem hergab. Die gesellschaftlichen Strukturen waren ebenfalls vielfältig: Es gab sowohl egalitär als auch streng hierarchisch organisierte Gruppen.

Wie lässt sich diese Heterogenität aus Sicht der Forschung systematisch fassen?

HARVARD: Amerikanische Anthropologen teilen Nordamerika in zehn Kulturreale, beispielsweise die Großen Ebenen mit den Prärien, das nordöstliche und das südöstliche Waldland oder die Subarktis. Dort lebten Indianer mit gemeinsamen kulturellen Merkmalen, in denen sich die Nutzung der jeweiligen Ressourcen niederschlug. In den Laub- und Mischwäldern des Nordostens etwa errichteten die Menschen Langhäuser und Wigwams, jagten und bauten Feldfrüchte an. In den Großen Ebenen lebten im 19. Jahrhundert Reiternomaden, die in Zelten wohnten und ihre Habe auf dem Travois – einer Art Schlitten – transportierten; ihre wichtigste Lebensgrundlage war die Bisonjagd. Diese Lebensweise beruhte aber auf der Verfügbarkeit von Pferden, und die gelangten erst mit den Europäern nach Nordamerika. Vor dem 17. Jahrhundert hingegen waren die Cheyenne, die wir als typische Prärieindianer kennen, sesshafte Ackerbauern, die in Lehmhütten wohnten. Die Umweltbedingungen ließen also durchaus einen gewissen Spielraum und diktierten nicht die Überlebensstrategien. Das zeigt auch dieses Beispiel: Indianer im fruchtbaren Kalifornien lebten als Jäger und Sammler, während im eigentlich dünnen Südwesten Mais kultiviert wurde.

Helpen denn die jeweiligen Sprachen bei der Systematisierung?

HARVARD: In Nordamerika gab es hunderte Sprachen, als die Europäer eintrafen. Forscher teilen sie in Familien ein wie Algonkin, Irokesisch oder Sioux, aber die lassen sich nicht unbedingt mit den Kulturrealen in Deckung bringen. Inzwischen drohen übrigens viele dieser Sprachen auszusterben. Im Reservat der Sioux-Lakotas in Pine Ridge (in South Dakota) beherrschten 1965 noch drei Viertel der Stammesmitglieder Lakota, heute sprechen es nur noch zehn Prozent fließend.

Lassen sich überhaupt Gemeinsamkeiten zwischen den verschiedenen Stämmen Nordamerikas finden?

HARVARD: Drei Konstanten sind schon erkennbar. Erstens glaubten die Indianer an eine enge spirituelle Verbindung von Mensch und Lebensumwelt. In dieser animistischen Vorstellungswelt galten für Tiere und Pflanzen dieselben Regeln der sozialen Organisation wie für die menschlichen Gemeinschaften. Die zweite Gemeinsamkeit: Das Züchten von Tieren im Sinn der Selektion kam für Indianer nicht in Frage. Sie hielten durchaus Haustiere: gezähmte Biber und Bären. Hunde zogen die Travois, Pferde spielten in den Prärien eine große Rolle. Aber diese Tiere galten eher als Teil der Familie. Schließlich das dritte Merkmal: Indianer waren meist kriegerisch, überfielen andere Gruppen, versklavten Gefangene, adoptierten sie aber auch gelegentlich. Ob Feind oder nicht – diese Einordnung war stets fließend. Man schloss ein Bündnis, und es bildeten sich Konföderationen, aber binnen kurzer Zeit herrschte wieder Krieg. Diese labilen Verhältnisse wussten sich Franzosen, Engländer und später Amerikaner im Kampf gegeneinander und gegen indianische Stämme zu Nutzen zu machen.

Müssten sich bei den Stämmen, die im Übergangsbereich zu Mittelamerika siedelten, nicht auch Ähnlichkeiten mit den Kulturen der benachbarten präkolumbischen Indianer finden?



AKG IMAGES / NORTH WIND PICTURE ARCHIVES



CORBIS IMAGES / EDWARD S. CURTIS

HARVARD: Die gab es durchaus. Im 12. Jahrhundert erinnerte manches im Mississippital und im Südosten der Vereinigten Staaten an die Azteken und Mayas. In der Nähe des heutigen St. Louis erstreckte sich auf einer Fläche von zehn Quadratkilometern Cahokia, eine Art Stadtstaat. Dort lebten 25 000 Einwohner – mehr als im London jener Zeit. Wie in Mittelamerika baute man monumentale, gelegentlich pyramidenförmige Hügel mit einer Plattform auf ihrer Kuppe. Mehr als 120 solcher Tumuli wurden nachgewiesen, darunter etliche Grabmäler. Zudem war die Gesellschaft sehr hierarchisch organisiert, man pflanzte Mais an und praktizierte den Sonnenkult. Wie in den südlicheren Gefilden kannte ihre Mythologie Vogelmenschen und Federschlangen.

Diese Mississippizivilisation ging ab dem 14. Jahrhundert unter, hinterließ aber Spuren: Als sich die Franzosen um 1700 am großen Strom ansiedelten, stießen sie auf die Natchez. An deren Spitze regierte eine »Große Sonne«, die sich auf die Klasse der »Sonnen« stützte. Diesen wiederum waren drei weitere Gesellschaftsschichten untergeordnet. Der Häuptling durfte nie den Boden berühren und wurde deshalb auf einer Liege getragen. Starb eine »Große Sonne«, erdrosselte man hunderte Angehörige als Opfergabe.

Wie gelingt es, diese Geschichte zu erforschen?

HARVARD: Um die Besiedlung Amerikas nachzuzeichnen, die womöglich schon vor einigen zehntausend Jahren begonnen hat, ist die Archäologie sehr wichtig. Anhand von Grabfunden – Beigaben wie auch Skelettresten – lassen sich Rückschlüsse auf Ernährung und Krankheiten ziehen, aber auch auf die Trauerrituale. Siedlungen und Lagerplätze geben anhand von Fundamenten, Tonscherben und anderen Artefakten Aufschluss über den Alltag jener Menschen. Die mündlichen Überlieferungen der heute lebenden Indianer bergen ebenfalls manche Information. Eine ganz wichtige Quelle sind natürlich die Aufzeichnungen amerikanischer Anthropologen und Ethnologen aus der Zeit zwischen 1880 und 1940. Sie konnten Indianer befragen, die traditionelle Lebensweisen

Die Indianer Nordamerikas verstanden es, die Ressourcen ihrer Umgebung optimal zu nutzen. So lebten die auch Feldbau treibenden Stämme der Waldländer in festen Siedlungen (links: Langhausdorf auf der Insel Manhattan), während Präriebewohner mit der Verfügbarkeit von Pferden – ein Import der Europäer – eine nomadische Lebensweise aufnahmen (Foto rechts).

noch aus eigener Anschauung kannten. Schließlich darf man auch die Schriften der Kolonisten nicht vergessen, die als Missionare, Beamte, Entdecker oder Händler kamen. Freilich sind diese Texte oft aus einer bestimmten Perspektive geschrieben, müssen also kritisch gelesen werden.

Wann erfolgten die ersten Kontakte mit Europäern?

HARVARD: Das dürfte schon Ende des 15. Jahrhunderts gewesen sein, als Kabeljaufischer ihre Beute im Sankt-Lorenz-Golf jagten und den Fisch an Land trockneten. Anfang des 17. Jahrhundert entstanden die ersten Kolonien von Franzosen, Briten und Spaniern. Wo immer der Tauschhandel lohnte oder die Neuankömmlinge ohne militärische Allianzen mit indianischen Gruppen nicht überleben konnten, entwickelte sich ein Miteinander. Gab es Probleme, eskalierten sie mitunter jedoch zu bewaffneten Auseinandersetzungen. Als die Engländer in Virginia den Anbau von Tabak ausweiteten, gerieten sie in Streit mit den Powhatans. In Neuengland bekämpften britische Puritaner die Pequots und Wampanoags. Die Franzosen waren genauso wenig Unschuldslämmer: Im Mississippital verbündeten sie sich mit den Natchez, vernichteten den Stamm aber 1730 gemeinsam mit den Choctaw; auch dabei ging es um Landbesitz. Im Übrigen starben viele Indianer nicht durch Waffengewalt, sondern infolge von Infektionen: Von den Spaniern eingeschleppte Bakterien und Viren töteten im Südosten vermutlich 80 Prozent der indigenen Bevölkerung.

Was hat sich mit der Gründung der Vereinigten Staaten geändert?



CORBIS IMAGES / EDWARD S. CURTIS

Im heutigen New Mexico verstanden es indianische Stämme, trotz der Trockenheit ein vor allem auf Ackerbau basierendes Wirtschaftssystem aufzubauen. Wie hier in Acoma (Foto von 1926) errichteten sie Pueblos aus Lehmziegeln. Zur Bewässerung wurde Regen in Zisternen aufgefangen.

HARVARD: Bereits 1763 hatte Großbritannien gegen Frankreich gesiegt, 1776 erklärten die britischen Kolonien ihre Unabhängigkeit vom Mutterland. Im nun folgenden Krieg kämpften manche Irokesen auf Englands Seite – und George Washington ließ mehrere Indianerdörfer zerstören. 1783 wurde der Unabhängigkeitskrieg offiziell beendet. Die Regierung der jungen Vereinigten Staaten schloss in der Folgezeit nicht weniger als 370 Abkommen mit indianischen Stämmen – die immerhin noch als souveräne Nationen galten. Meist ging es dabei um die Abtretung von Land.

Um 1830 versuchte man das »Indianerproblem« östlich des Mississippi endgültig zu lösen: Etwa 100 000 Cherokee, Choctaw und andere mussten ihre Heimat verlassen und in das Indianerterritorium in Oklahoma umsiedeln (siehe den vorigen Beitrag). Ab 1840 drangen Siedler auch dorthin vor, Indianeraufstände von Minnesota bis nach Kalifornien waren die Folge, blieben aber ein letztes Aufbäumen. Als 1876

die Sioux und Cheyenne den legendären Sieg am Little Big Horn errangen, war der Krieg längst verloren. In Reserven gedrängt, wurden sie einem Assimilierungsprogramm unterzogen, um ihre Kultur auszulöschen. Erst 1930 wurde das in Frage gestellt.

Wie ist die Situation heute?

HARVARD: Um 1900 gab es in den Vereinigten Staaten nur noch etwa 250 000 Indianer, heute sind es mehr als vier Millionen; dazu kommt etwa eine Million in Kanada. Freilich haben sie sich verändert. Durch Mischehen findet man auch blonde Indianer mit blauen Augen oder wieder andere vom afroamerikanischen Typ.

In den 1960er und 1970er Jahren kämpfte die militante Red-Power-Bewegung für mehr Rechte. Indianische Kultur blühte wieder auf. So sind die Powwow genannten traditionellen Treffen nun wieder verbreitet. Und auch wenn das für manchen einen Beigeschmack haben mag: Die Eröffnung von Spielkasinos in einigen Reservaten hat die wirtschaftliche Lage dort verbessert. So finanzieren beispielsweise die Mashantucket-Pequot in Connecticut mit einem der modernsten Kasinos der USA unter anderem Kulturprojekte und ein Museum ihrer Stammesgeschichte. ∞

Das Interview führte **Loïc Mangin**, stellvertretender Chefredakteur von »Pour la Science«.

RAUMFÜLLUNGEN

Verstecke der Bilunabirotunda

Ein einfaches, aber keineswegs triviales Polyeder erweist sich an manchen Stellen als charmanter Lückenbüsser.

VON NORBERT TREITZ



NORBERT TREITZ

Es gibt erstaunlich viele Möglichkeiten, den Raum lückenlos mit mehr oder weniger regelmäßigen Körpern zu füllen. Die einfachste ist das Mauerwerk aus lauter gleichen Würfeln. Etwas weniger regelmäßige Körper wie der Oktaederstumpf oder das aus dem Würfel herzuleitende Rhombendodekaeder sind ebenfalls raumfüllende Einzelbausteine. Wer zwei verschiedene Sorten »Ziegel« zu verwenden bereit ist, kann aus einer unüberschaubaren Anzahl von Möglichkeiten wählen, darunter Tetraeder und Oktaeder gleicher Kantenlänge (wobei auf jedes Oktaeder zwei Tetraeder kommen), Oktaeder und

Kuboktaeder, Oktaeder und Würfelstümpfe oder auch die jüngst entdeckten Füllungen, bei denen Oktaeder beziehungsweise Tetraederstümpfe zwischen sich nur noch für kleine Tetraeder mit einem Drittel der Kantenlänge Platz lassen (Spektrum der Wissenschaft 2/2012, S. 68).

Bei allen genannten Raumfüllungen – und den meisten anderen – machen drei der fünf platonischen (höchst regelmäßigen) Körper samt ihren Abkömmlingen die Sache unter sich aus. Entweder ist der Baustein selbst ein Tetraeder, Oktaeder und Würfel, oder er ist aus einem solchen herzuleiten, indem

Die Bilunabirotunda, hier mit teilweise ausgefüllten Flächen im Geomag-Modell, wird von vier Fünfecken, zwei Quadraten und acht Dreiecken begrenzt. Je zwei Fünfecke bilden ziemlich scharfe Winkel miteinander; die Symmetrie ist die relativ bescheidene des Quaders mit nur drei Spiegelebenen, die paarweise rechtwinklig zueinander stehen. Alle Stereobildpaare dieses Artikels sind fürs Parallelschließen angeordnet: Betrachten Sie das linke Teilbild nur mit dem linken und gleichzeitig das rechte nur mit dem rechten Auge!

Die innere Verwandtschaft zweier platonischer Körper

Im Dodekaeder steckt ein Würfel, der seine acht Ecken mit jenem gemeinsam hat. Er kommt zum Vorschein, indem man vom Dodekaeder sechs dachförmige Polyeder abschneidet. Es handelt sich um modifizierte Pyramiden mit quadratischer Grundfläche: Sie haben zwei Spitzen und einen First dazwischen. Die Quadratseiten sind Fünfecksdiagonalen, und die anderen Kanten sind zugleich solche des Dodekaeders. Das Verhältnis der beiden Kantenlängen ist der goldene Schnitt $\tau = (\sqrt{5} + 1)/2$, denn das ist das

Verhältnis von Diagonale zu Kante des regelmäßigen Fünfecks.

Jedes »Dach« hat ein Quadrat über der langen Seite als Grundfläche, darüber zwei gleichschenklige Dreiecke (mit einer langen und zwei kurzen Seiten) und zwei gleichschenklige Trapeze (eine lange und drei kurze Seiten). Mit ihren langen Seiten vereinen sich je ein Dreieck und ein Trapez aus benachbarten Dächern zu einem Fünfeck des Dodekaeders.

Wickelt man in diesem Modell die sechs Dächer ab, die zusammen die Ober-

fläche des Dodekaeders bilden (a), tritt ein würfelförmiger Hohlraum zu Tage (b; der gelbe Stern dient hier nur als Abstandshalter). Man kann die sechs Dächer in der Ebene ausbreiten (c) und andersherum zum Würfel zusammenwickeln (d). Im Inneren passen die Dachgiebel bündig aneinander und lassen zwischen sich einen Hohlraum in Form des gelben, nur eingeschränkt symmetrischen Sterns. Diese »Abwicklung« stammt von Carl Kemper (Spektrum der Wissenschaft 2/1991, S. 6).



CHRISTOPH PÖPPE

man ihn auf symmetrische Weise, das heißt alle seine Flächen gleich behandelnd, modifiziert. Der Oktaederstumpf entsteht aus dem Oktaeder, indem man jede seiner Ecken samt einem Drittel aller anliegenden Kanten abschneidet. Das Rhombendodekaeder ist ein Würfel, dem auf jede Fläche eine Pyramide geeigneter Höhe aufgesetzt wird.

Die beiden anderen platonischen Körper Dodekaeder und Ikosaeder sind an diesem Spiel dagegen praktisch nicht beteiligt. Dafür gibt es einen guten Grund: Die Raumfüllung soll periodisch sein – das heißt, es soll eine »Elementarzelle« aus einem oder mehreren Bausteinen geben, von der sich beliebig viele Exemplare parallelverschoben genau passend aneinandersetzen lassen.

Das verträgt sich nicht gut mit der fünfzähligen Symmetrie dieser beiden Körper. Obendrein will ein Fünfeck vom Dodekaeder nicht recht an ein Quadrat vom Würfel passen.

Johnsons wilde Polyeder

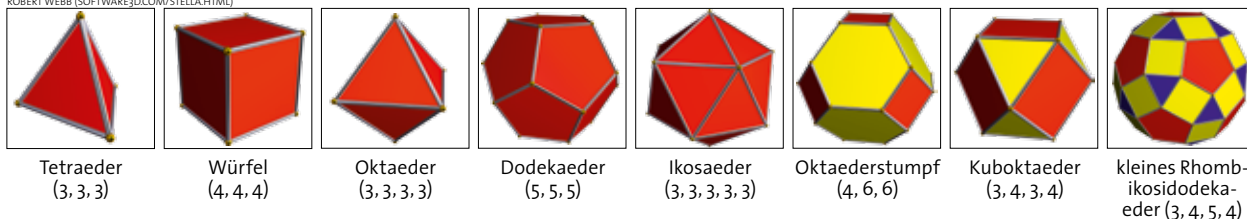
Aber das Problem lässt sich überwinden. Es gibt zwar keine oberflächliche Beziehung zwischen den beiden Körpern, aber eine tief innerliche. Im Dodekaeder steckt nämlich ein Würfel. Genauer: Von den 20 Eckpunkten des Dodekaeders sind acht zugleich Ecken eines Würfels; dabei gibt es fünf verschiedene Möglichkeiten, diese acht Punkte auszuwählen (Kasten S. 61).

Diese Beziehung wird sich zwar als hilfreich herausstellen; aber trotzdem

kann man die beiden ungleichen Körper nicht einfach aneinandersetzen. Ein dritter Körper muss zwischen ihnen vermitteln; und da er sich beiden anpassen muss, kann er nicht mehr ganz so regelmäßig sein. Man wird fündig bei den so genannten Johnson-Polyedern (Kasten unten).

Das Polyeder unserer Wünsche hat in Johnsons Liste die Nummer 91 und hört auf den nicht ganz selbsterklärenden Namen »Bilunabirotunda«, was ungefähr als »Doppelmond-Doppelrotunde« zu übersetzen wäre (Bild S. 61 oben). Was Johnson fantasievoll einen »Mond« nennt, würde ich eher als Schuhsohle bezeichnen. Es handelt sich um ein Quadrat mit Dreiecken an zwei gegenüberliegenden Seiten.

ROBERT WEBB (SOFTWARE3D.COM/STELLA.HTML)



Johnson-Polyeder – die weniger schönen Verwandten

Unter den Polyedern (den von ebenen Flächen begrenzten Körpern) genießen traditionell die fünf platonischen Körper (oben links) das höchste Ansehen. Sie sind die regelmäßigsten, denn sie sind von lauter gleichen regelmäßigen Vielecken begrenzt und obendrein eckenkongruent; das heißt, zu je zwei Ecken gibt es stets eine Kongruenzabbildung, die den Körper auf sich selbst und die eine Ecke auf die andere abbildet.

Auf dem zweiten Rang stehen die 13 archimedischen Körper (Beispiele oben rechts). Sie dürfen verschiedenartige Flächen enthalten, müssen aber nach wie

vor eckenkongruent sein. Der Oktaederstumpf, das Kuboktaeder und das kleine Rhombikositododekaeder sind archimedische Körper.

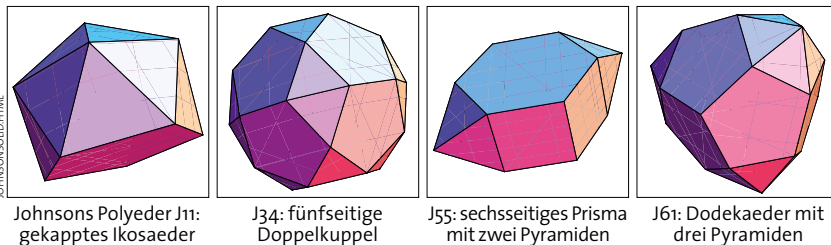
Gleichrangig damit sind die unendlich vielen Prismen und Antiprismen. Ein Prisma besteht aus einem regelmäßigen n -Eck als Boden, quadratischen Wänden und wieder einem regelmäßigen n -Eck als Dach. Bei einem Antiprisma sind Boden- und Dachfläche um eine halbe Kante gegeneinander verdreht, und die Wände bestehen aus gleichseitigen Dreiecken, die mit der Spitze abwechselnd nach oben und nach unten weisen.

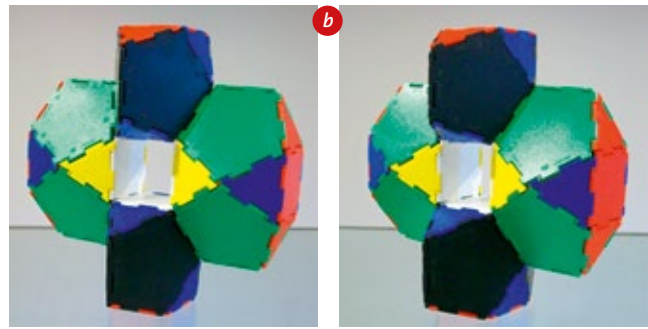
Was bleibt übrig, wenn man nur noch fordert, dass der Körper von regelmäßigen Vielecken begrenzt und konvex, das heißt ohne einspringende Ecken oder gar Löcher, sein soll? Ein buntes Sortiment aus ziemlich wild geformten Körpern. Der amerikanische Mathematiker Norman W. Johnson hat 1966 eine Liste von 92 Stück zusammengestellt; drei Jahre später hat Victor Zalgaller bewiesen, dass Johnson keinen übersehen hatte.

Die meisten kann man durch Zerschneiden oder Zusammenkleben entlang bereits vorhandener Kanten aus schon bekannten Polyedern erzeugen. So kann man vom regulären Ikosaeder fünfzählige Pyramiden abschneiden und dabei nicht nur das fünfzählige Antiprisma, sondern auch neue Polyeder bekommen.

Neun können nicht auf diese Weise hergeleitet werden und sind darum besonders interessant; Johnson hat ihnen die Nummern 84 bis 92 gegeben.

MATHWORLDWIDE.COM/JOHNSONSOLID.HTML





Man bedeckt einen Würfel zunächst an zwei gegenüberliegenden Flächen mit Bilunabirotunden (a). Das nächste Paar muss gegenüber dem ersten sozusagen verdreht angebracht werden (b); das Bild zeigt ein Modell aus Jovo-Scheiben mit freigelassenem Würfel in der Mitte. Im vollen »Sechserpack« (c) verschwindet der Würfel im Inneren.

Wie erzeugt man nun mit Würfeln, Bilunabirotunden und Dodekaedern eine Raumfüllung? Auf dem Weg zur Lösung stellt sich als erste Teilaufgabe, Bilunabirotunden passgenau an einen Würfel zu setzen.

Die Formen der Körper legen die Lösung nahe: Man füge Quadrat an Quadrat – geeignet verdreht, damit die etwas ausladenden Bilunabirotunden einander nicht in die Quere kommen. Insgesamt kann man Würfel mit einem Sechserpack aus Bilunabirotunden einhüllen (Bilder oben). Diese passen wunderschönerweise mit ihren Dreiecksflächen genau zusammen und halten auf ihrer Außenseite achtmal je drei aneinandergrenzende Fünfecke bereit.

An diese Plätze kann man Dodekaeder setzen und durch Fortsetzung des Verfahrens die gesuchte Raumfüllung erzeugen. Dass das tatsächlich funktioniert, zeigen wir, indem wir den Raum zunächst mit (sehr großen) Würfeln

füllen, jeden von ihnen auf die gleiche Weise zersägen und die Teile dann zu einem (kleinen) Würfel, einem Dodekaeder und drei Bilunabirotunden zusammensetzen.

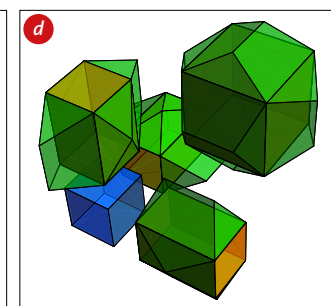
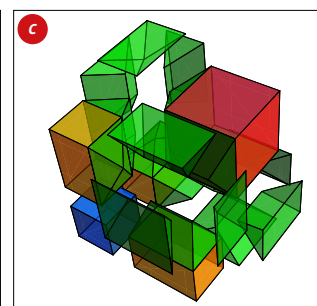
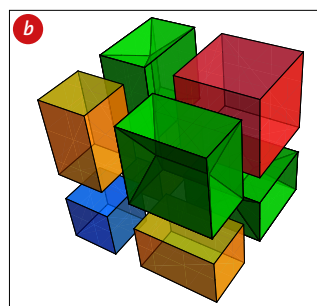
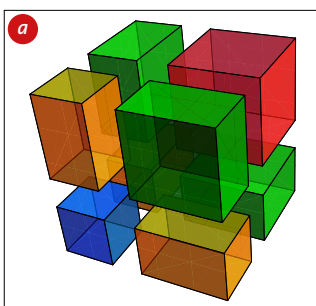
Geometrie mit Säge und Leim

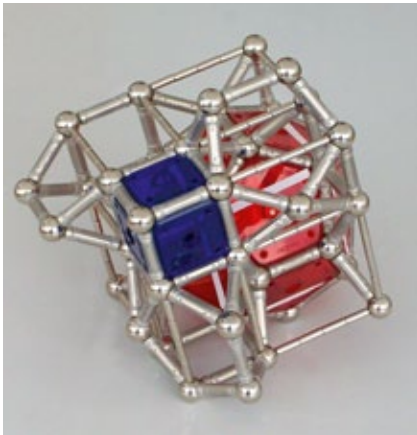
Ein solcher »Urwürfel« soll die Kantenlänge $a+d$ haben; dabei ist a die gemeinsame Kantenlänge aller Bausteine, die am Ende entstehen werden, und d verhält sich zu a wie die Diagonale des regelmäßigen Fünfecks zu seiner Kante: $d = \tau a$ (siehe Kasten S. 61). Wir zersägen nun den Urwürfel in den drei verschiedenen Raumrichtungen paral-

lel zu seinen Seitenflächen, so dass alle Kanten in Teile der Längen a und d zerschnitten werden (Bild unten, a). Dabei entstehen ein Würfel der Kantenlänge a , einer der Kantenlänge d , drei Quader mit den Kantenlängen a , a und d (die »Stangen«) und drei mit den Kantenlängen a , d und d (die »Platten«).

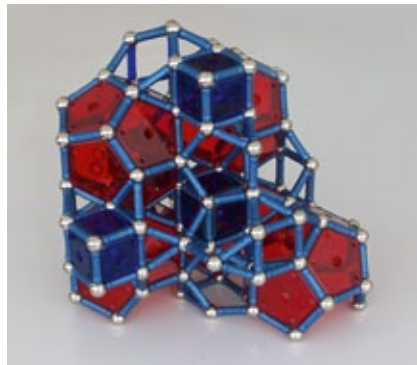
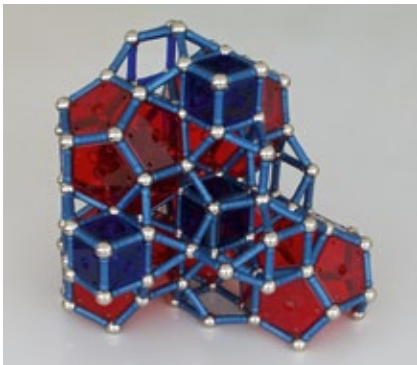
Die Platten zerkleinern wir weiter. Und zwar schneiden wir zwei (unregelmäßige) Pyramiden aus ihnen heraus. Deren Grundflächen sind zwei gegenüberliegende (nichtquadratische) Seitenflächen der Platte mit den Kantenlängen a und d , und die vier Kanten, die zur Spitze jeder Pyramide führen,

Ein Würfel der Kantenlänge $a + d$ wird zunächst (a) zerlegt in einen kleinen Würfel der Kantenlänge a (blau), einen großen der Kantenlänge d (rot), drei »Stangen« (orange) und drei »Platten« (grün). Jede Platte wird anschließend zersägt in zwei Pyramiden, zwei flache und zwei steile Dächer (b). Die Fragmente werden dem jeweils nächstgelegenen Teilkörper zugeschlagen (c) und ergeben mit diesen zusammen ein Dodekaeder und drei Bilunabirotunden (d).





Geomag-Modell der Elementarzelle aus einem Würfel (blau), einem regulären Dodekaeder (rot) und drei Bilunabirotunden. Man lasse in der Vorstellung alle Kugeln zu Punkten und alle Stäbe zu unendlich dünnen Kanten schrumpfen. Dann haben alle Stäbe die Kantenlänge a . Die aufgeklebten Papierstreifen markieren Fünfecksdiagonalen, die dünnen, aus je vier Teilen zusammengesetzten Stäbe zu ihnen parallele Strecken. Die überstehenden Dächer dieser Zelle passen genau in ihre Einbuchtungen auf der gegenüberliegenden Seite.



Ein Ausschnitt aus der Raumfüllung: Dodekaeder (rot) haben entlang von Kanten Kontakt miteinander, Würfel mit Dodekaedern nur an einzelnen Eckpunkten und Würfel miteinander gar nicht.



Das kleine Rhombikosidodekaeder (3, 4, 5, 4): In diesem Geomag-Modell sind zur besseren Durchsicht die dem Betrachter zugewandten Flächen nicht ausgefüllt.

haben ebenfalls die Länge a (Bild S. 63 unten, **b**). Wir verbinden die Spitzen beider Pyramiden durch eine Kante. Wie sich herausstellt, hat auch sie die Länge a . Zu ihr verlaufen vier Kanten der verstümmelten Platte parallel. Wir führen Sägeschnitte von jeder dieser Kanten zur zentralen Kante. Somit zerfällt die ganze Platte in die beiden genannten Pyramiden sowie zwei flache und zwei spitze »Dächer«; allen Dächern dient die zentrale Kante als Dachfirst.

Die flachen Dächer sind nun genau diejenigen, die den großen Teilwürfel zum Dodekaeder ergänzen. Wir verschieben die Fragmente jeder Platte in Richtung auf den jeweils angrenzenden Teilkörper. Dabei geraten die flachen Dächer an die großen Würfel, die spitzen Dächer an zwei der vier nichtquadratischen Seitenflächen der Stangen und die Pyramiden an die beiden anderen (Bild S. 63 unten, **c**). Und siehe da: Aus dem großen Würfel wird ein Dodekaeder und aus jeder Stange eine Bilunabirotunda, was zu beweisen war.

Man beachte, dass bei dieser Prozedur gewisse Fragmente einer Platte von einem Urwürfel zum benachbarten wechseln (Bild S. 63 unten, **d**). Anders ausgedrückt: Nimmt man dem Urwürfel genau diese Fragmente an einer Seite weg und fügt sie an der gegenüberliegenden Seite an, so erhält man die Elementarzelle unserer Raumfüllung (Bild links oben), bestehend aus drei unterschiedlich orientierten Bilunabirotunden, einem Würfel der Kantenlänge a und einem Dodekaeder der gleichen Kantenlänge. Beliebige viele Elementarzellen kann man nun in allen drei Raumrichtungen bündig aneinander setzen (Bild links Mitte).

Ein Dodekaeder hat jeweils eine Kante (den Dachfirst) mit seinen sechs Nachbardodekaedern oben, unten, links, rechts, vorne und hinten gemeinsam und grenzt mit acht Ecken an jeweils einen Würfel. Diese Würfel passen genau zwischen die Dodekaeder, und dazwischen noch die Bilunabirotunden in dreifacher Anzahl.

Überraschenderweise lässt sich das Sechserpack aus einem Würfel und den

ALLE FOTOS: DIESE DOPPELSEITE: NORBERT TREITZ



Acht Exemplare dieses Restkörpers (links) plus zwölf Fünfeckspyramiden ergänzen das Sechserpack zum kleinen Rhombikositodekaeder. Hier sind nur die fünfseitigen Flächen ausgefüllt. Das rechts abgebildete Modell besteht ausschließlich aus den acht Restkörpern, die zwölf Pyramiden erscheinen hier also als Krater.

sechs aufgesetzten Bilunabirotunden noch auf ganz andere Weise ergänzen. Das Ergebnis ist diesmal nicht eine unendliche periodische Raumfüllung, sondern einer der komplizierteren unter den archimedischen Körpern.

Vom Innenleben des kleinen Rhombikositodekaeders

Leider haben sich für diese Körper keine einheitlichen Bezeichnungen etabliert. Wer auf Klarheit Wert legt, zählt der Reihe nach die Vielecke auf, die jeder Ecke anliegen (es sind definitionsgemäß an jeder Ecke die gleichen). Für unseren Körper – man nennt ihn meistens das kleine Rhombikositodekaeder – ist diese Eckenfigur (3, 4, 5, 4) (Bild S. 64 unten). Es hat mit dem Dodekaeder und dem Ikosaeder deren beachtliche Symmetrie gemeinsam: 15 Spiegelebenen (durch je ein Paar von Kanten), sechs fünfzählige Drehachsen (durch je ein Paar von Fünfecksmittelpunkten oder Ikosaeder-ecken), zehn dreizählige (durch je ein Paar von Dodekaederecken oder Ikosaeder-Dreiecksmittelpunkten) und 15 zweizählige (durch je ein Paar von Mitten gegenüberliegender Kanten).

Das kleine Rhombikositodekaeder – nennen wir es im Folgenden einfach (3, 4, 5, 4) – entsteht aus dem Dodekaeder oder auch dem Ikosaeder durch geeignetes Abschneiden sämtlicher Ecken und Kanten oder – weniger destruktiv – durch eine spezielle Art des Brötchenbackens: Man forme aus Brotteig ein Dodekaeder und ritze mit ei-

nem scharfen Messer sämtliche Kanten ein. Wenn man es dann in den vorgeheizten Backofen schiebt, gehen wie beim klassischen Brötchen die eingritzten Kanten auf, bis sie so breit wie lang sind, während die Fünfecksflächen im Wesentlichen unverändert bleiben. An den Ecken des Dodekaeders tun sich Dreiecke auf. Mit dem Ikosaeder an Stelle des Dodekaeders funktioniert es übrigens genauso.

Insgesamt hat das (3, 4, 5, 4) zwölf Fünfecke, so viele, wie das Dodekaeder Flächen und das Ikosaeder Ecken hat. Es hat 20 Dreiecke wie das Ikosaeder – das sind so viele, wie das Dodekaeder Ecken hat – und 30 Quadrate: so viele, wie beide jeweils Kanten haben.

Es stellt sich nun heraus, dass sich unser Sechserpack perfekt in diesen Körper einpassen lässt. Dessen äußerste Teile, die sechs »Schuhsohlen« (»lunae« bei Johnson) fallen genau mit den gleich aussehenden Teilen der Oberfläche des (3, 4, 5, 4) zusammen. Das ist mit den hier abgebildeten Baukastenteilen sofort zu sehen, aber nicht einfach nachzurechnen. Das ganze kleine Rhombikositodekaeder kann man zusammensetzen aus dem zentralen Würfel, den sechs Bilunabirotunden, zwölf fünfzähligen Pyramiden und acht nichtkonvexen Restkörpern.

Von diesen hat jeder auf der Seite, die im fertigen Objekt nach innen weist, drei Fünfecke wie im Dodekaeder und auf der anderen, der »Außenseite«, ein Dreieck mit drei angrenzenden

Quadraten wie im (3, 4, 5, 4), abgeschlossen durch dreimal zwei Dreiecke, die drei Talfalten bilden (Bild oben, links).

Lässt man nun das innere Sechserpack weg, so entsteht aus den verbleibenden zwölf Pyramiden und acht Restkörpern ein sehr interessanter, hochsymmetrischer Hohlkörper (Bild oben, rechts). Er sieht von außen aus wie das komplette (3, 4, 5, 4), hat aber vier Öffnungen in Gestalt der »lunae«. Damit hat er immerhin noch die Symmetrie des Quaders, seine konvexe Hülle (also das (3, 4, 5, 4)) aber die weiter gehende des regulären Dodekaeders oder Ikosaeders. ∞

DER AUTOR



Norbert Treitz ist pensionierter Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

WEBLINKS

- www.mathcurve.com/polyedres/polyedres.shtml
Großes Sortiment von Polyedern mit zahlreichen Erläuterungen und Videosequenzen (französisch). Von Robert Ferréol
- www.georgehart.com/virtual-polyhedra/vp.html
Ebenfalls großes Polyedersortiment von George Hart (englisch)
- <http://mathworld.wolfram.com/Polyhedron.html>
Verweist auf zahlreiche Polyeder in Eric Weissteins »Math World« (englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139709



Tank gegen Teller

Biokraftstoffe sind umstritten. Am schwersten wiegt der Einwand, dass sie Anbauflächen beanspruchen, die dann nicht mehr für die Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung stehen. Fortschritte in der Landwirtschaft wie in der Kraftstoffherstellung sollen diese Konkurrenz entschärfen.

Von Duncan Graham-Rowe

Als die Formel-1-Rennfahrer von Ferrari vor zwei Jahren beim Großen Preis von Bahrain den ersten und zweiten Platz belegten, hatten sie eine außergewöhnliche Mischung in ihren Tanks: Der Sprit enthielt einen kleinen Anteil von Biokraftstoff der so genannten zweiten Generation, gewonnen aus Lignozellulose (siehe Beitrag S. 74). Selbst die oktangeschwängerte Welt der Formel 1 stellt sich also langsam der Realität des Klimawandels und der schwindenden Ölreserven. Seit 2008 schreibt das Formel-1-Reglement vor, dass mindestens 5,75 Prozent des Kraftstoffs aus pflanzlichen Quellen stammen müssen. Der beigemischte Biosprit in den Tanks der Ferraris erfüllte dies in vorbildlicher Weise, indem er aus nichtessbaren Pflanzenteilen gewonnen wurde. Damit machte der renommierte Rennstall vor, wie Biokraftstoffe unseren Energiehunger stillen können, ohne die Nahrungsmittelproduktion zu gefährden.

Nach Angaben der Welternährungsorganisation FAO stiegen die Nahrungsmittelpreise in jüngster Vergangenheit außergewöhnlich stark. Kritiker lasten das dem zunehmenden Gebrauch von Biotreibstoffen der ersten Generation an. Diese werden aus essbaren Teilen von Nahrungspflanzen – etwa Zuckerrohr oder Mais – hergestellt und anschließend dem gewöhnlichen Benzin oder Diesel beigemischt. In vielen Entwicklungsländern kommt es wegen der hohen Lebensmittelpreise zu sozialen Unruhen. Ist es da ethisch überhaupt vertretbar, dass westliche Regierungen die Nutzung von Bio-

kraftstoffen zunehmend fördern? Lassen sich Klimaschutz und Nahrungsversorgung unter einen Hut bringen?

Für Ferrari lautet die Antwort eindeutig Ja. Das Team entschied sich für Ethanol aus Stroh, das in der Landwirtschaft als Restprodukt anfällt – ein Beispiel dafür, wie sich die derzeitigen Probleme der Biokraftstoffe überwinden lassen. Neue chemische Verfahren, bessere Landnutzungsstrategien und höhere landwirtschaftliche Erträge könnten uns den Weg aus der Zwickmühle »Tank oder Teller« weisen.

Die Idee, aus Anbaupflanzen Treibstoff zu gewinnen, ist nicht neu. Bereits im 19. Jahrhundert fuhren die Motoren von Rudolf Diesel mit pflanzlichen Ölen. Und die Brasilianer mischen ihrem Benzin seit 1929 Ethanol bei, der aus Zuckerrohr stammt. Doch erst seit gut zehn Jahren spielen Biokraftstoffe eine wichtige Rolle in der globalen Energie- und Klimapolitik. Dem zu Grunde liegen die zunehmende Angst um die sichere Versorgung mit Erdöl, die Befürchtungen hinsichtlich des Klimawandels und der unerbittlich wachsende Energiehunger.

Die Eile, mit der Biokraftstoffe weltweit eingeführt wurden, haben indes zu handfesten Landnutzungskonflikten geführt. Auf dem malaiischen Teil Borneos etwa rodeten Bauern und Großunternehmer riesige Dschungelgebiete, um sie durch Palmölplantagen zu ersetzen. Andernorts werden enorme Mengen von geernteten Nahrungspflanzen – etwa Mais – zu Bioraffinerien transportiert, um sie dort in Sprit zu verwandeln. 2007 pflanzten US-Farmer Mais auf der Rekordfläche von 375 000 Quadratkilometern an. Nicht weniger als ein Drittel davon ging in die Ethanolherstellung. Das war nach Ansicht mancher Fachleute der Grund dafür, dass die Maispreise gegen Ende 2010 um mehr als 70 Prozent anstiegen. Zu Beginn des Jahres 2011 verzeichnete die Welternährungsorganisation einen Höchststand bei ihrem Index der Lebensmittelpreise.

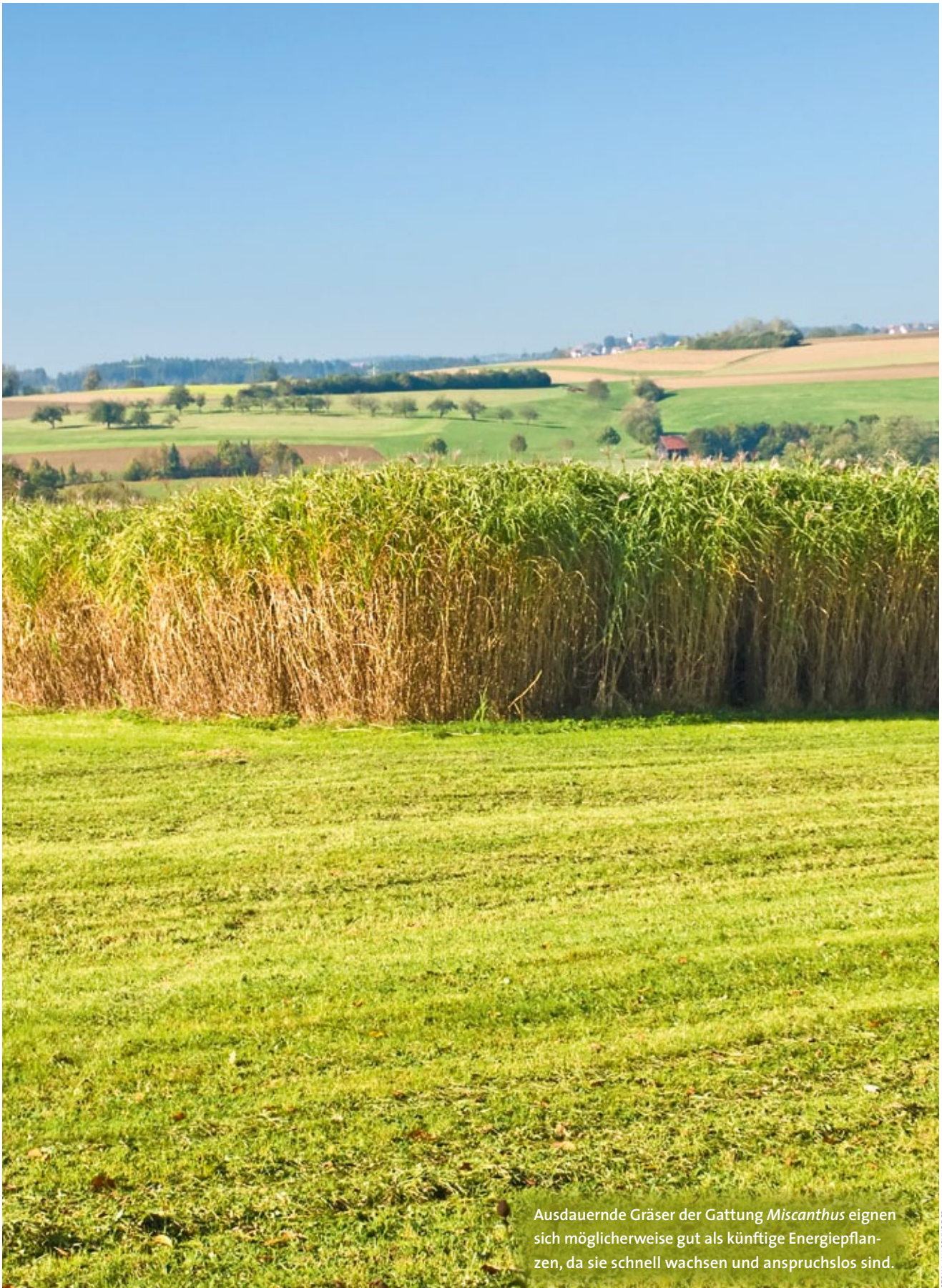
Bei genauer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass Biokraftstoffe nur ein Teil des Problems sind. Gemäß dem Weltbankreport »A Note on Rising Food Prices« von 2008 waren sie zwar hauptverantwortlich dafür, dass die Lebensmittelpreise in den vergangenen Jahren nach oben kletterten, doch

ÜBERBLICK

DIE ZUKUNFT DER ENERGIE



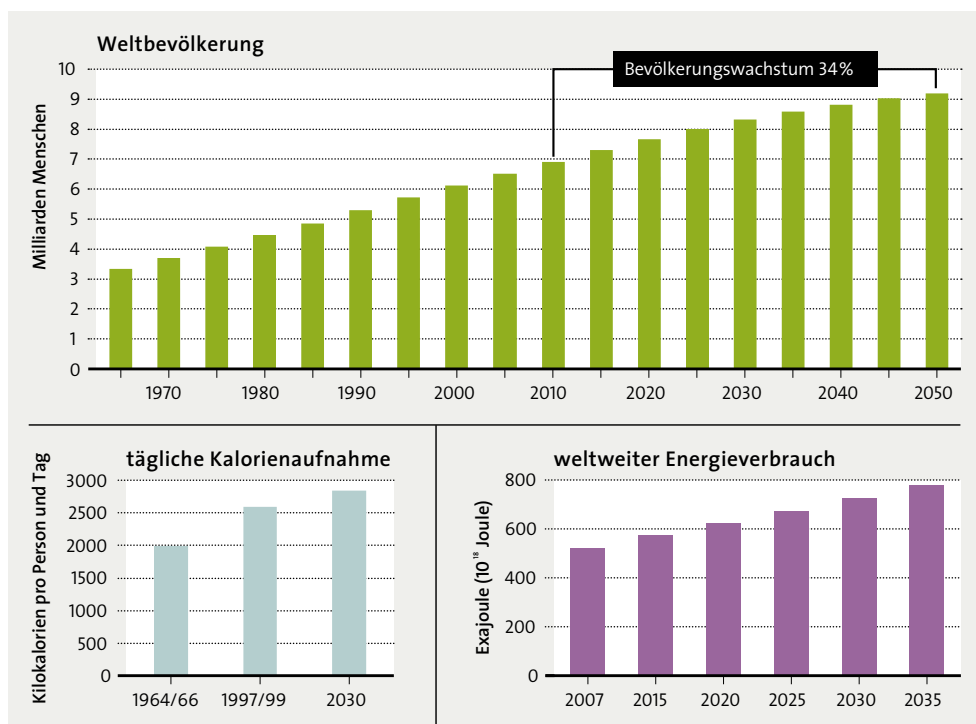
Teil 1	Strom aus der Sonne	Dezember 2011
Teil 2	Windräder	Januar 2012
Teil 3	Wasserkraft	Februar 2012
Teil 4	Biotreibstoffe	März 2012
Teil 5	Energiespeicher I: Batterien	April 2012
Teil 6	Energiespeicher II: Wasserstoff	Mai 2012



Ausdauernde Gräser der Gattung *Miscanthus* eignen sich möglicherweise gut als künftige Energiepflanzen, da sie schnell wachsen und anspruchslos sind.

FOTOGRAFIA/HI SCHNEIDER

Im Jahr 2050 werden voraussichtlich neun Milliarden Menschen auf der Welt leben – 34 Prozent mehr als heute. Darüber hinaus wachsen Kalorienverzehr und Energieverbrauch pro Kopf stetig an. Deshalb wird die Nachfrage nach Lebensmitteln und Kraftstoffen drastisch zunehmen. Um damit Schritt zu halten, müssen Landwirtschaft und Industrie künftig deutlich mehr produzieren.



Börsenspekulationen und extreme klimabedingte Ereignisse trugen ebenfalls dazu bei. Auch dürfen die steigenden Kosten für Erdöl nicht außer Acht gelassen werden. Sie haben einen direkten Einfluss auf Nahrungsmittelpreise, sagt Ottoline Leyser. Die Pflanzengenetikerin an der Cambridge University (Großbritannien) hat ein Gutachten über Biokraftstoffe mitverfasst, das der Nuffield Council on Bioethics – eine gemeinnützige britische Organisation, die sich mit bioethischen Fragen befasst – unlängst herausgab. Um Ernten einzubringen, zu transportieren und zu verarbeiten, bedarf es Leyser zufolge viel Energie, hauptsächlich in Form fossiler Kraftstoffe.

Aber die Nahrungsmittelpreise sind nicht die einzigen Kritikpunkte. Obwohl die meisten Biokraftstoffe nicht speziell dafür entwickelt worden sind, den Ausstoß von Treibhausgasen zu vermindern, erwartet man dies doch von ihnen.

AUF EINEN BLICK

DER LANGE WEG ZUM BESSEREN BIOSPRIT

1 Die Lebensmittelpreise sind in den vergangenen Jahren stark gestiegen. Kritiker lasten dies dem zunehmenden Gebrauch von Biokraftstoffen an. Denn diese Kraftstoffe werden **bislang aus essbaren Pflanzen wie Mais** hergestellt, was das Angebot auf den Nahrungsmittelmärkten verknappt.

2 Neue Technologien könnten helfen, die Konkurrenz zwischen Tank und Teller zu entschärfen, etwa das **Züchten spezieller Gewächse** oder Produktionsverfahren für Biosprit, die auch **holzige Pflanzenteile** verwerten. Zudem lassen sich die Ernteerträge vielerorts noch deutlich steigern.

3 Es wird zwar Jahre dauern, diese Ansätze in großem Maßstab umzusetzen, doch die ersten Fabriken sind **bereits im Bau**.

Nigel Mortimer vom englischen Energieberatungsunternehmen North Energy hat jedoch in einer Analyse gezeigt, dass Biokraftstoffe oft nur minimal besser dastehen als fossile Kraftstoffe, was die Treibhausgasemission anbelangt. Und laut Angela Karp, wissenschaftliche Direktorin am landwirtschaftlichen Forschungszentrum Rothampsted im britischen Harpenden, werden für Biokraftstoffe der ersten Generation oft große Mengen an Wasser und Stickstoff benötigt, um genügend Pflanzenmasse wachsen zu lassen. Das wirkt sich ebenfalls negativ auf ihre Klimabilanz aus. Kenneth Stone, Agraringenieur an der Forschungseinrichtung Agricultural Research Service in Florence (South Carolina, USA), kommt zu dem Schluss, dass sich der Wasserverbrauch in der Landwirtschaft versechsfachen würde, wenn man gemäß den Zielen des US-Energieministeriums künftig verstärkt Bioethanol aus Mais herstellen würde.

Dennoch bleibt der Kampf um die Anbauflächen eines der schwierigsten Probleme. Idealerweise sollte die Herstellung von Biokraftstoffen nur geringwertige, kohlenstoffarme Äcker in Anspruch nehmen, sagt Ian Crute, Chefwissenschaftler im Agriculture and Horticulture Development Board (Entwicklungsausschuss für Landwirtschaft und Gartenbau) im englischen Kenilworth. Tatsächlich aber bauen immer mehr Farmer Energiepflanzen auf hochwertigen Böden an, die eigentlich für die Nahrungsmittelproduktion vorgesehen sind, weil sie damit hohe Erlöse erzielen können. Das betont Olivier Dubois, Koordinator der FAO-Bioenergiegruppe in Rom. Um diesen Konflikt zu entschärfen, müsse zusätzliches Land urbar gemacht werden.

Einen ähnlichen Verdrängungswettbewerb gibt es bei der Viehzucht. Bruce Dale, Chemieingenieur an der Michigan

State University in East Lansing, fand heraus, dass mehr als 80 Prozent der US-amerikanischen Landwirtschaftsproduktion als Viehfutter dienen. »Eine unglaubliche Verschwendung«, kommentiert Leyser. Der weltweit zunehmende Fleischkonsum erweist sich somit als weiterer wichtiger Grund dafür, dass die Nahrungsmittelpreise in die Höhe schießen.

Zugleich wird es mit zunehmender Weltbevölkerung immer schwieriger, genügend neue Anbauflächen zu erschließen. In 40 Jahren werden voraussichtlich neun Milliarden Menschen auf der Welt leben, also 2,3 Milliarden mehr als heute, die ernährt werden müssen, wie der FAO-Bericht »How to feed the world in 2050« vermerkt. Schlimmer noch: Weil Fleischkonsum und Kalorienverzehr pro Kopf stetig zunehmen, steigt der Bedarf an Lebensmitteln überproportional an. »Im Jahr 2050 brauchen wir 70 Prozent mehr Nahrungsmittel«, schätzt Dubois. Die Nutzung von Pflanzen zur Energiegewinnung verschärft die Situation weiter. In den kommenden 25 Jahren nimmt der Energieverbrauch in den Schwellenländern voraussichtlich um 84 Prozent zu. Nahezu ein Drittel davon wird vermutlich aus Biokraftstoffen stammen.

Wenn die Landwirtschaft weltweit nicht schon bald einen deutlichen Entwicklungsschub erfährt, werden diese Ent-

wicklungen zu einer dramatischen Verknappung von Anbauflächen führen – sowohl für Nahrung als auch für Biotreibstoffe. Zwar ließen sich die landwirtschaftlich nutzbaren Flächen in den kommenden vier Jahrzehnten theoretisch verdoppeln. Doch rechnet die FAO in diesem Zeitraum nur mit einem Zuwachs von etwa fünf Prozent, weil viele anbaufähige Gebiete voraussichtlich dem Wachstum der Städte anheimfallen werden. Um die landwirtschaftliche Produktivität zu erhöhen, müssen deshalb die Ernteerträge deutlich steigen, meint Dubois.

Leider sprechen die bisherigen Entwicklungen eine andere Sprache. Zwar wuchsen die globalen Ernteerträge innerhalb der letzten 50 Jahre, jedoch mit abnehmendem Tempo: Die Steigerungsrate fiel von 3,2 Prozent im Jahr 1960 auf 1,5 Prozent im Jahr 2000. Dennoch ist Ian Crute hoffnungsvoll. Es gäbe trotz alledem immer noch Wachstum, sagt er, und außerdem jede Menge Raum für Verbesserungen. So existieren

Biokraftstoffe der zweiten Generation: Im Karlsruher Institut für Technologie entsteht zurzeit die bioliq-Pilotanlage, die Stroh und Holz zu Biosprit verarbeiten soll.



KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)



tierten nach wie vor enorme Ertragsunterschiede zwischen den Ländern und damit noch viel »Luft nach oben«. Beispielsweise liegen große Flächen in Afrika brach, hauptsächlich deshalb, weil sie unzureichend an die Infrastruktur angebunden sind. Die dortigen Bauern haben keine Möglichkeit, ihre Produkte auf den Markt bringen, und pflanzen folglich nur das an, was ihre Familien benötigen, erläutert Crute. Der Anbau von Energiepflanzen in diesen Regionen könnte einen positiven Einfluss haben sowohl auf die Infrastruktur als auch auf die Nahrungsmittelproduktion.

Auch die Gentechnik könnte die Landwirtschaft beflügeln. Schon heute hilft sie, Pflanzen widerstandsfähiger gegen Schädlinge zu machen. »Bald werden wir auch Maissorten erzeugen, die weniger Wasser benötigen und Trockenzeiten besser überstehen«, prognostiziert Crute. Zudem arbeiten die Forscher an salztoleranten Pflanzen. Sie sollen etwa in Regionen angepflanzt werden, in denen ein steigender Meeresspiegel zur Versalzung des Grundwassers führt. Mais und einige andere Pflanzen besitzen überdies deutlich effizientere Fotosynthesemechanismen als Weizen oder Reis, wie Crute betont. Diese könnten mittels Gentechnik von einer Pflanzenart auf andere übertragen werden.

Nicht nur Verbesserungen in der Landwirtschaft und Gentechnik, auch neue Produktionsverfahren für Biokraftstoffe dürften die Konkurrenz zwischen Tank und Teller entschärfen. Gelänge es, die gesamte Pflanze zu verwerten und nicht nur ihre essbaren Teile, ließen sich viel mehr Arten von Biomasse nutzen. In Sprossen, Blättern und Wurzeln ist deutlich mehr Energie gespeichert als in Früchten – diese Energie ist aber schwerer zu gewinnen, sagt Chris Somerville, Direktor am Energy Biosciences Institute der University of California in Berkeley. Deshalb ist die Verwertung kompletter Pflanzen teurer als die derzeitige Produktion von Ethanol aus Mais.

Um für das Ferrari-Team Biosprit aus Stroh herzustellen, nutzte die kanadische Biotechnologiefirma Iogen beispielsweise ein Enzym der Pilzart *Trichoderma reesei*. Mit dessen Hilfe verdaut der Pilz Lignin – einen Hauptbestandteil holziger Pflanzenteile – und gelangt dadurch an Nährstoffe in Bäumen. Es gibt noch andere ligninverdauende Enzyme, allerdings arbeiten die zurzeit verfügbaren allesamt nicht sehr

effizient und kosten zwischen 10 und 20 Cent pro Liter erzeugtem Kraftstoff. Ganz im Gegensatz zu den Enzymen für die großtechnische Herstellung von Ethanol aus Mais: Sie kosten etwa einen halben Cent pro Liter.

Es ist zwar möglich, Pflanzen gentechnisch so zu verändern, dass sich ihr Lignin einfacher aufbrechen lässt. Aber bis dahin liege noch ein weiter Weg vor uns, meint Somerville. Mehr Erfolg verspricht der Vorschlag, mittels genetischer Analysen nach besonders energiereichen Pflanzen zu fahnden oder diese selektiv zu züchten. Charles Wyman, ein Chemiker und Umweltingenieur an der University of California in Riverside, untersuchte beispielsweise 47 Pappelarten, um herauszufinden, bei welcher sich das Lignin am einfachsten zu Zucker aufschließen lässt. Gemeinsam mit seinen Kollegen ermittelte er eine erreichbare Zuckerausbeute zwischen 28 und 92 Prozent des theoretischen Maximums, abhängig von Gehalt und Struktur des Lignins.

Die ganze Pflanze ist gefragt

Mit verbesserten Technologien, um die bislang nicht nutzbaren Pflanzenteile großtechnisch und kostengünstig zu verwerten, wäre es möglich, dieselben Gewächse mehrfach zu nutzen. Zum Beispiel könnte man die Kolben von Maispflanzen als Lebensmittel verwenden und ihre Stängel und Blätter in Treibstoff umwandeln. Doch so elegant sich das anhört, so kompliziert ist die praktische Umsetzung, betont Dubois: »Pflanzenreste sind auch anderweitig sehr begehrt, nämlich als billiger organischer Dünger.« Der kanadische Agrarwissenschaftler Guy Lafond wies im Jahr 2009 nach, dass die Qualität der Böden bereits zurückgehen würde, wenn man nur 40 Prozent weniger Stroh unterpflügte. Da ist es wenig erstaunlich, dass die Biotechfirma Iogen offenbar Probleme damit hat, genügend von diesem Reststoff aufzutreiben: Ihre Demonstrationsanlage erzeugt im Schnitt nur 256 000 Liter Ethanol pro Jahr, obwohl sie auf 1,9 Millionen Liter ausgelegt ist. Das Unternehmen erklärt die Lücke damit, dass es sich um eine Testanlage handle, die nicht kontinuierlich in Betrieb sei. Wenn aber der Ölkonzern Shell, einer der Hauptinvestoren von Iogen, die Bioethanolproduktion in kommerziellem Maßstab betreiben würde, dann läge der Bedarf bei 20 bis 30 Tonnen Stroh pro Tag, was zu Engpässen führen dürfte.

Um solche Mengen an Biomasse zu gewinnen, wird es nicht reichen, Anbaupflanzen mehrfach zu verwerten, prophezeit die Pflanzengenetikerin Ottoline Leyser. Vielmehr werde es nötig sein, schnell wachsende Pflanzen anzubauen, die nur für die Erzeugung von Biokraftstoff vorgesehen sind. Diese dürften aber nicht mit Nahrungspflanzen um Anbauflächen wetteifern. Schnell wachsende Pappeln oder Weiden etwa könnten auf belasteten Böden wachsen und sie dabei zugleich reinigen. Die Bäume wandeln Kohlendioxid schneller in Biomasse um als die meisten anderen Pflanzen.

Ausdauernde Gräser wie *Miscanthus* oder die Rutenhirse *Panicum virgatum* sind vielleicht noch bessere Kandidaten. Sie brauchen wenig Wasser und speichern Nährstoffe in ih-

ren Wurzeln. »Bei der Ernte holt man nur oberirdische Pflanzenteile ein, die sehr wenig Nährstoffe enthalten«, sagt Leyser, »dadurch wird der Boden kaum ausgelaugt und infolgedessen fast kein Dünger benötigt.« Ausdauernde Gräser wachsen zudem auf Böden, die für Ackerkulturen unbrauchbar sind. Somerville hält den letzten Punkt für entscheidend: So manche Einöde könne zu einer Plantage für Energiepflanzen werden, etwa indem man dort trockentolerante Gewächse wie die Agave anbaut.

FAO-Koordinator Olivier Dubois hingegen meint, dass Biokraftstoffe der zweiten Generation ebenfalls Nachteile haben. Auch sie benötigten Anbauflächen, und selbst die genügsamsten Gewächse würden mit den Nahrungspflanzen um Ressourcen konkurrieren. Zudem habe die Technologie für Bioethanol der ersten Generation bereits ein halbes Jahrhundert Entwicklung hinter sich. »Um Biotreibstoffe der zweiten Generation in großem Maßstab zu produzieren, braucht es noch fünf bis zehn Jahre«, lautet seine Einschätzung.

Einiges tut sich bereits. So baut das Energieunternehmen BP im Highlands County (USA) für 400 Millionen Dollar eine Fabrik, die Zellulose aus energiereichem Zuckerrohr, aus Rutenhirse oder aus *Miscanthus* zu Ethanol verarbeiten soll. Das Werk ist auf eine Produktion von 136 Millionen Liter Treibstoff pro Jahr ausgelegt, was es nach den Kriterien des amerikanischen Energieministeriums zu einer kommerziellen Bio Raffinerie machen würde. Obgleich sich die Menge gewaltig anhört, ist sie gering im Vergleich zu den Millionen Litern Benzin pro Tag, die herkömmliche Raffinerien ausstoßen.

Doch auch wenn sie noch eine Weile brauchen werden, um sich durchzusetzen: Die neuen Biokraftstoffe werden kommen. Ob am Ende Flüssigkeiten der zweiten Generation unsere Tanks füllen – und die der Formel-1-Wagen – oder ob es eine dritte und vierte Generation geben wird, sei dahingestellt. So oder so werden sie künftig eine wichtige Rolle spielen, um den globalen Energiehunger zu stillen. Und mit modernen Technologien, umsichtiger Landnutzung und schonendem Umgang mit Ressourcen sollten noch genügend Anbauflächen für Nahrungspflanzen bleiben. ~

DER AUTOR



Duncan Graham-Rowe arbeitet als Wissenschaftsautor in Brighton (England).

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139692

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 474, S. 8–9, 23. Juni 2011

WWW.SPEKTRUM.DE



**Natur
Energie
Plus**

Mit der Natur auf einer Welle.

**In den letzten zwölf
Monaten haben sich über
25.000 Bürger für Strom
aus 100 % Wasserkraft von
NaturEnergiePlus entschieden.
Wann wechseln Sie zum
Strom aus sauberer Quelle?**

→ **Jetzt wechseln!**



www.naturenergieplus.de

Kein Zuckerschlecken

Verholzte Pflanzenreste sind zu schade für die Verbrennungsanlage – man könnte Biokraftstoffe aus ihnen herstellen. Doch ihre Zuckerverbindungen aufzuschließen, bereitet Chemikern noch gewaltige Probleme.

Von Katharine Sanderson

Jedes Jahr fallen mehr als 40 Millionen Tonnen feste Pflanzenabfälle an, von den Halmen der Getreideernte bis zu Reststücken aus der Holz verarbeitenden Industrie. Was normalerweise im Häckselwerk oder der Müllverbrennungsanlage endet, könnte die Grundlage für Biotreibstoffe der zweiten Generation werden – anders als bei ihren in Verruf geratenen Vorgängern würde die Herstellung nicht mit der Produktion von Lebensmitteln konkurrieren.

Im Grunde eignen sich alle Teile einer Pflanze für diesen Zweck, womit sich auch die Ausbeute beim Anbau von Energiepflanzen verbesserte: Im Vergleich zu den Biokraftstoffen der ersten Generation wäre der Ertrag pro Hektar bis zu dreimal höher. Der größte Vorteil aber wäre die Verwertung von Abfällen aus all jenen Bereichen in Landwirtschaft und Industrie, wo strukturbildende Pflanzenteile anfallen.

Denn die enthalten die auf Kohlenstoff basierenden Polymere Zellulose, Hemizellulose und Lignin; man fasst sie unter dem Begriff Lignozellulose zusammen. Zellulose besteht aus miteinander verknüpften Glukosemolekülen und ist Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände. Könnte man diesen Vielfachzucker extrahieren, ließe sich daraus durch Gärung Ethanol herstellen, das seit einiger Zeit auch hier zu Lande Benzin zugemischt wird. Als Hemizellulosen bezeich-

net man andere Vielfachzucker, die als Stütz- und Gerüstsubstanz der Pflanzen dienen. Ihre Moleküllängen variieren beträchtlich, was es erschwert, daraus ein reines Produkt wie Ethanol zu gewinnen. Das Lignin schließlich ist in den Zellwänden eingelagert und lässt sie verholzen (nach lateinisch »lignum«, Holz). Das Rückgrat dieses Polymers besteht aus Phenolgruppen, das sind aromatische, also ringförmige Kohlenstoffstrukturen, die mindestens eine Hydroxygruppe (OH-Gruppe) tragen.

Das Problem ist, dass sich die Lignozellulosen nur schwer aus ihrem Verband herausholen lassen. So sind Polysaccharide generell – anders als Einfachzucker – in Wasser nahezu unlöslich. Zellulose bildet zudem stabile kristalline Strukturen, Mikrofibrillen genannt, die von Hemizellulosen zu einem dichten Netzwerk verknüpft werden. Mikrofibrillen organisieren sich zu Fasern, die der Zellwand vor allem Zugfestigkeit verleihen. Wie bei einem Verbundwerkstoff bettet eine Matrix aus Lignin diese Fasern ein, um Druckkräfte aufzunehmen. Gerade die Mischung von diversen, miteinander verknüpften Polymeren verleiht dem Material Robustheit – auch gegenüber den Versuchen, das Lignin aufzubrechen und anderweitig zu nutzen. Erschwerend kommt hinzu, dass seine genaue chemische Zusammensetzung von Pflanze zu Pflanze variiert.

Aus diesem Grund beginnt die Kraftstoffherstellung mit dem Schreddern des Ausgangsmaterials; danach zerstören Hitze, Säure oder Ammoniak das Lignin. Nun können Enzyme alles durchdringen und die Polysaccharide freisetzen. Bislang läuft dieser Prozess inklusive der abschließenden Fermentation meist noch in Pilotanlagen – anders als bei der gut etablierten Erzeugung von Bioethanol aus Zuckerrohr oder Getreide, also aus Melasse oder Stärke. Denn die bislang verwendeten Enzyme arbeiten für den großtechnischen Einsatz nicht effizient genug.

Deshalb hoffen die Entwickler auf eine noch kaum genutzte Quelle für Biokatalysatoren: Holz verdauende Organismen. So produziert das spanische Energieunternehmen

AUF EINEN BLICK

HOFFNUNG AUF DIE ZWEITE GENERATION

1 Statt **Ethanol** und andere **Kohlenwasserstoffe** aus Feldfrüchten zu gewinnen, sollen Biokraftstoffe einer neuen Generation vor allem aus pflanzlichen Abfällen entstehen.

2 Chemiker suchen deshalb nach Verfahren, **Zuckermoleküle aus Lignozellulose** zu gewinnen, dem Molekülmix, der Zellwände verholzen lässt.

3 Die dafür **erforderlichen Enzyme** sind noch teuer und wenig stabil. Lösungen versprechen jedoch **neuartige Lösungsmittel** ebenso wie die **Biotechnologie**.



PICTUREALLIANCE / REINHARD KLINGEL

Abengoa in einer Anlage in Salamanca bereits fünf Millionen Liter Ethanol pro Jahr aus Ernteresten des Maisanbaus und aus Stroh – dank eines Pilzes. Den hat die in Florida ansässige Biotechnologiefirma Dyadic gezüchtet, um preisgünstig Enzyme zu liefern, die Lignozellulose gut zersetzen. Auch Termiten sind für Forscher interessant, denn in ihrem Verdauungstrakt leben Mikroben, die Holz zersetzende Enzyme ausscheiden.

An der britischen Universität in York studiert der Pflanzenzellexperte Simon McQueen-Mason noch einen anderen Organismus: die Holzbohrassel *Limnoria quadripunctata*. Dieser kleine Meeresbewohner gilt als Schädling in den Häfen dieser Welt, zersetzt er doch Bootsanleger, Molen und anderes mehr. Das Besondere aber ist, dass sein Darmsystem keine Mikroben enthält. Die Holzbohrassel muss also selbst Enzyme absondern.

Vorbild für Chemiker: Die Holzbohrassel

Bislang haben McQueen-Mason und seine Kollegen 60 Gene dieses Organismus identifiziert, die an der Produktion so genannter Glykosidasen beteiligt sind. Das sind Enzyme, die Zellulose mit Hilfe von Wasser spalten können; Chemiker sprechen von einer Hydrolyse. Die Glykosidasen der Assel umfassen offenbar drei oder vier Gruppen, die jeweils an anderen Teilen der Zellulose angreifen. Wie das Tier aber Lignin verdaut, ist noch ungeklärt.

Sägeabfälle bestehen wie alle holzigen Teile von Pflanzen aus Lignozellulose. Daraus können Enzyme chemische Substanzen herauslösen, aus denen Biokraftstoffe gewonnen werden können.

Dennoch hoffen die Forscher, sein Verdauungssystem in den nächsten drei Jahren vollständig aufzuklären. Um herauszufinden, welche Enzyme besonders geeignet sind, Zucker ohne weitere Vorbehandlung aus Biomasse herauszulösen, arbeiten sie mit dem dänischen Unternehmen Novozymes zusammen, das in Kalifornien ein Bioethanol-Labor unterhält. Dessen Leiter Claus Fuglsang ist überzeugt, dass die Kraftstoffe der zweiten Generation viele verschiedene Biokatalysatoren erfordern werden, und jeder muss in Kombination mit allen anderen getestet werden.

Optimierungsbedarf besteht auch bei der Vorbehandlung der Abfälle. Viel versprechend sind so genannte ionische Flüssigkeiten – Salze, die kein Lösungsmittel wie Wasser benötigen, sondern bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen in positive und negative Ionen zerfallen. Insbesondere solche Vertreter sind hier interessant, die bereits bei Raumtemperatur oder knapp darüber flüssig werden. Sie können Lignin gut durchdringen und verholzte Biomasse auf diese Weise in einen Brei verwandeln. Zwar versteht man noch nicht genau, wie sie das bewerkstelligen, aber die Arbeitsgruppe um den Chemiker Brad Holmes vom Joint BioEnergy

Institute im kalifornischen Emeryville setzt ionische Flüssigkeiten bereits ein, um kristalline Zellulose aufzulösen und dann als einfacher handhabbaren, amorphen Festkörper erstarren zu lassen.

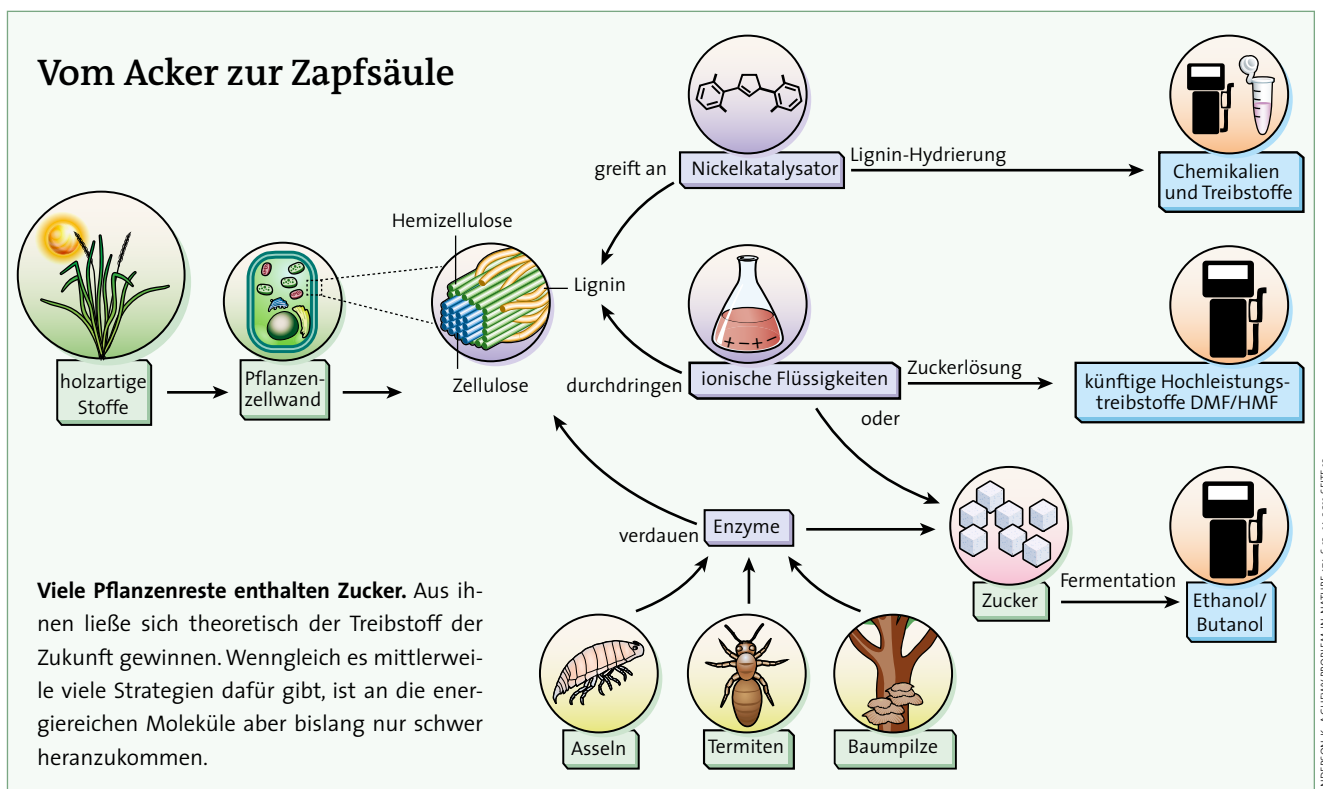
Zuckerpolymere daraus zu gewinnen, erweist sich aber als schwierig. Ein Teil der teuren Lösungsmittel geht ohnehin verloren, jeder Rest davon in der Zuckermischung blockiert die Enzyme im nachfolgenden Gärungsschritt. Holmes' Gruppe untersucht derzeit, ob es mit Hilfe von Borsäure möglich ist, die Zucker zu extrahieren, ohne die ionischen Flüssigkeiten zu zerstören. Doch der Chemiker schätzt, dass noch mindestens zehn Jahre vergehen werden, bis die Technik ausgereift ist.

Die Alternative: Ionische Flüssigkeiten

Angesichts der enormen Menge an teuren Enzymen, die eine kommerzielle Produktion von Biokraftstoffen benötigen würde, nutzt Ronald Raines von der University of Wisconsin-Madison gleich einen ausschließlich chemischen Ansatz. Seine Forschungsgruppe hat ein Verfahren entwickelt, das auf einer ionischen Flüssigkeit aus N,N-Dimethylacetamid und Lithiumchlorid basiert. Sie löst Zellulose auf, ohne deren chemische Struktur zu verändern. Damit will die Gruppe Biokraftstoff bei Temperaturen unter 140 Grad Celsius herstellen. Die Forscher zielen dabei nicht auf Ethanol, sondern auf die Produktion von Furanen, einer Klasse aromatischer Moleküle. 2,5-Dimethylfuran (DMF) hat eine 40 Prozent höhere Energiedichte als Ethanol und wäre somit als Beimengung zu Benzin besser geeignet.

Erste Tests verliefen viel versprechend: DMF verbrennt ähnlich wie der konventionelle Kraftstoff, die dabei freigesetzten Partikel haben auch eine vergleichbare Größe zu herkömmlichen Emissionen. Bevor es als Biokraftstoff auf den Markt darf, muss DMF aber nicht nur Studien bezüglich der technischen Implikationen bestehen. Auch Sicherheitsaspekte bedürfen noch eingehender Klärung, denn DMF ist bekanntermaßen giftig – es greift das Nervensystem an.

Die Chemiker John Hartwig und Alexey Sergeev von der University of Illinois in Urbana-Champaign entwickeln ebenfalls eine Alternative zu Enzymen. Sie berichteten kürzlich von einem Nickelkatalysator, der Sauerstoffatome selektiv aus Ligninverbindungen herauslöst, ohne das Molekül ganz zu zerstören. Der Vorteil: Je weniger Sauerstoff Lignin besitzt, desto besser eignet es sich als Basis für Treibstoffe. Der Katalysator bricht Kohlenstoff-Sauerstoff-Bindungen von organischen Gruppen auf und ersetzt dort Sauerstoff- durch Wasserstoffatome. Konventionell bewirkt man das Gleiche bislang mit hohen Temperaturen und Drücken, doch besetzt der Wasserstoff oft die falschen Stellen – es entsteht eine Mischung von Produkten, die nicht optimal ist. Der Nickelkatalysator schafft aber noch nicht völlige Abhilfe, denn er liegt bislang in gelöster Form vor, lässt sich also nur schwer von den gleichfalls flüssigen Reaktionsprodukten abtrennen. Hartwig entwickelt deshalb eine Feststoffversion, über oder durch die das verflüssigte Lignin fließen soll. Zudem erfolgten alle Tests bislang an Modellsubstanzen, nicht an natürlichem, aus Abfällen gewonnenem Lignin – vor Überraschungen sind die Wissenschaftler also nicht gefeit. Dennoch sind





Der Meeresbewohner *Limnoria quadripunctata*, eine Holzbohrassel, sondert ein Verdauungsenzym ab, welches Hafenanlagen aus Holz ruinieren kann; es könnte aber auch nützlich sein, um Biokraftstoffe herzustellen. Forscher versuchen deshalb, die beim Holzabbau aktiven Gene zu ermitteln und das Verdauungssystem des Tiers zu verstehen.

sie optimistisch und suchen obendrein nach Möglichkeiten, den Wasserstoff durch Elektrolyse oder aus Biomasse zu gewinnen, um das Verfahren nachhaltiger zu gestalten.

Angesichts solcher Hürden haben enzymgestützte Verfahren immer noch die Nase vorn. So plant die italienische Firma Mossi & Ghisolfi, in diesem Jahr die weltweit größte Fabrik zur Herstellung von Ethanol aus Zellulose in Betrieb zu nehmen. Mit den Biokatalysatoren von Novozymes will man gut 50 Millionen Liter pro Jahr herstellen. Das ist doppelt so viel, wie die amerikanische Umweltschutzagentur EPA als Beimischung zu Kraftstoffen für das Jahr 2011 anpeilte.

Bei solchen Größenordnungen gilt es weit mehr zu beachten als die chemischen Prozesse in den Reaktoren. Beispielsweise geht Katherine Smart, Leiterin von LACE – Lignocellulosic Conversion to Ethanol, einem Gemeinschaftsprojekt von Industrie und Wissenschaft der britischen University of Nottingham – wirtschaftlichen, sozialen und ethischen Fragestellungen nach, die sich bei den Biotreibstoffen der zweiten Generation ergeben. LACE arbeitet dabei unter anderem mit dem Ölkonzern BP, British Sugar sowie dem holländischen Chemieriesen DSM zusammen. Smart zufolge fehlt es an Investoren und klaren gesetzlichen Vorgaben. Das größte Problem aber stelle der Massentransport von Biomasse, Enzymen sowie anderen Stoffen zur Produktionsanlage dar. Es

könnte sogar notwendig sein, Biokatalysatoren direkt auf dem Firmengelände herzustellen. Fuglsang von Novozymes schlägt in die gleiche Kerbe. Kleine Produktionsanlagen sollten seines Erachtens dort stehen, wo Biomasse anfällt. Am Ende, so vermutet er, werde sich die gesamte Infrastruktur für Bioethanol, angefangen von der Herstellung bis zur Verteilung, vollkommen von jener unterscheiden, die für Erdöl entwickelt wurde. ~

DIE AUTORIN



Die promovierte Chemikerin **Katharine Sander-son** arbeitete lange als Reporterin im Team der Zeitschrift »Nature«. Inzwischen ist sie freiberuflich als Wissenschaftsjournalistin tätig und lebt in Toulouse, Frankreich.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139695

Auf der Suche nach »grünem« Benzin

Ein aus Biomasse fabrizierter Treibstoff muss konzentrierte Energie enthalten und billig sein. Sonst kann er mit herkömmlichem Benzin nicht konkurrieren.

Von Neil Savage

Ein einziges Wort fasst zusammen, wie ein künftiger Biokraftstoff beschaffen sein muss: wie Benzin. »Wir wollen die gleichen Moleküle wie in Benzin, Kerosin und Diesel herstellen«, sagt George Huber, ein Chemieingenieur an der University of Massachusetts-Amherst, der Verfahren zur Umwandlung von pflanzlichem Material in Kraftstoffe entwickelt. Ein idealer Biokraftstoff soll sich wie Benzin in die heutige Infrastruktur einfügen und jedes Fahr- oder Flugzeug ans gewünschte Ziel bringen.

Lange konzentrierte sich die Biokraftstoffindustrie auf Ethanol, doch dessen Energiedichte ist bescheiden: Mit einem Liter Ethanol schafft ein Auto nur rund 70 Prozent der Strecke, die ein Liter Benzin garantiert, und für schwere Lastwagen und Flugzeuge liefert Ethanol schlicht zu wenig Leistung. Außerdem vermischt es sich mit Wasser aus der Umgebung und wird verdünnt. Da Ethanol obendrein korrodierend wirkt, lässt es sich nicht ohne Weiteres in heutige Maschinen einspeisen oder billig durch vorhandene Pipelines befördern.

Darum versuchen Forscher aus Biomasse Alkohole zu gewinnen, die komplexer sind als Ethanol, sowie Kohlenwasserstoffgemische, die wie Erdöl aus verschiedenen langen Molekülen bestehen. Solche biologisch-chemischen Prozesse sollen Substanzen ergeben, die entweder direkt als Treibstoff dienen oder in bestehenden Raffinerien weiterverarbeitet werden können. Dabei will man möglichst viel Biomasse nut-

zen – nicht nur die einfachen Kohlenwasserstoffe, die sich aus Zuckerrohr oder Maiskörnern gewinnen lassen, sondern auch Zellulose und Lignin aus Maisstängeln, Holz und Präriegras (*Panicum virgatum*), die schwieriger aufzuspalten sind.

Ein »höherer Alkohol« – ein Molekül mit mehr Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen als Ethanol – kommt dem Ideal schon näher. Ethanol enthält zwei Kohlenstoffatome, die mit fünf Wasserstoffatomen verbunden sind, sowie eine Hydroxylgruppe. Die nutzbare Energie steckt in den Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindungen; bei der Verbrennung brechen sie auf und setzen Energie frei. Durch Hinzufügen von zwei weiteren Kohlenstoff- und vier Wasserstoffatomen entsteht Butanol; es verursacht weniger Korrosion und bringt mehr Leistung. Mit seinen vier Kohlenstoffen hat Butanol rund 90 Prozent der Energie von Benzin, einem Molekülgemisch mit fünf bis acht Kohlenstoffatomen. Diesel und Kerosin besteht aus Molekülen mit 9 bis 16 Kohlenstoffatomen.

Größere Alkohole

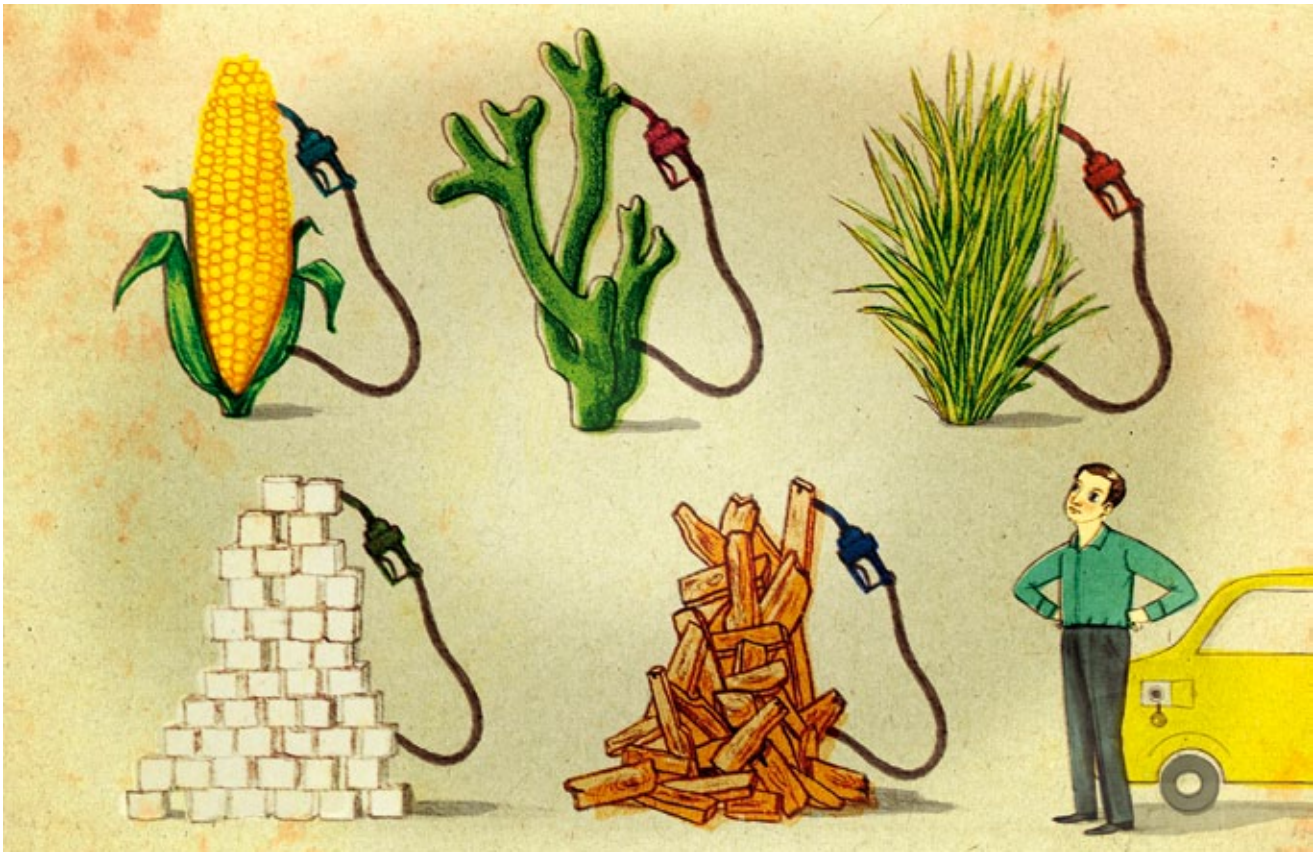
Derzeit wird dem Benzin oft Ethanol beigemischt, um das Klopfen – vorzeitiges Zünden – zu verhindern. Heutige Benziningemische enthalten meist maximal 10 Prozent Ethanol, aber ein Gemisch mit 50 bis 70 Prozent Butanol wäre durchaus vorstellbar. Manche Befürworter meinen sogar, unveränderte Automotoren könnten mit purem Butanol laufen. »Mit diesen längeren Molekülen können wir viel mehr erneuerbare Energie in den Kraftstoff packen«, sagt Michelle Chang, Chemikerin an der University of California in Berkeley. Sie hat Mikroben dazu gebracht, Butanol zu produzieren. Letztlich könnte Butanol sogar billiger herzustellen sein als Ethanol. Wenn ein Stück Hefe den beispielsweise aus Mais gewonnenen Zucker umsetzt, entsteht ein Gemisch aus Ethanol und Wasser. Letzteres muss durch Erhitzen entfernt werden, was zusätzliche Energie kostet. Da sich Butanol und Wasser nicht mischen, lassen sie sich mit weniger Energieaufwand trennen.

Wie gewinnt man überhaupt genügend Alkohol? Hefestämme werden seit Jahrtausenden gezüchtet, um alkoholische Getränke herzustellen, indem sie pflanzliche Glukose in

AUF EINEN BLICK

DER IDEALE TREIBSTOFF

- 1 Künftige **Biokraftstoffe** müssen im Vergleich mit fossilem, aus Erdöl gewonnenem Benzin bestehen.
- 2 **Ethanol und andere Alkohole** können es wegen mangelnder Energiedichte nicht mit Benzin aufnehmen.
- 3 Darum versuchen Forscher, mit chemischen und biotechnischen Verfahren aus Biomasse die für Benzin typischen **Kohlenwasserstoffe** zu synthetisieren.



Ethanol umwandeln. Durch Genmanipulation lässt sich die Ethanolausbeute ohne Weiteres steigern. Zwar gibt es auch natürliche Organismen, die Butanol und höhere Alkohole erzeugen, doch die meisten liefern nur winzige Mengen, sagt Chang. »Die Frage ist, wie man dieselbe Ausbeute wie bei Ethanol gewinnt. Davon ist man noch weit entfernt.«

Immerhin hat Chang kürzlich ein Verfahren entdeckt, das die Butanolproduktion verzehnfacht – zumindest im Labor. Sie entnahm verschiedenen Organismen Gene und pflanzte sie in das Darmbakterium *Escherichia coli* ein. Einige der Erbfaktoren stammen aus dem Bakterium *Clostridium*, das Butanol erzeugt. Allerdings, so Chang, ist *Clostridium* mehr auf das eigene Überleben programmiert als auf das Produzieren großer Butanolmengen. Sobald die Zelle feststellt, dass es zu viel davon gibt, beginnen dieselben Enzyme, die das Butanol hergestellt haben, es wieder abzubauen. Ähnliche Versuche anderer Forscher lieferten darum bloß ein halbes Gramm Butanol pro Liter Glukoselösung. Also mischte Chang Gene von zwei anderen Bakterien bei, *Treponema denticola* und *Ralstonia eutropha*. Sie produzieren etwas abweichende Versionen der Enzyme, welche die Fermentation steuern – und diese Enzyme bauen Butanol weniger stark ab.

Die Manipulation ist bei längeren Kohlenstoffketten schwieriger. Je größer das Molekül, desto mehr Schritte erfordert seine Herstellung – und jeder Schritt gibt der Zelle die Chance, die Produktion wieder in eine natürlichere Richtung umzuleiten. »Um gut zu produzieren, müssen die Zellen gesund sein«, erklärt Shota Atsumi, Chemiker an der University

Der Autofahrer erwartet, an der Zapfsäule einen Biosprit vorzufinden, der so viel leistet wie herkömmliches Benzin – nur welchen?

of California in Davis. »Doch wenn wir manche Herstellungsschritte immer wieder ausschalten, werden die Zellen krank.« Auch Atsumi hat Gene anderer Organismen in *E. coli* eingefügt, damit die Bakterien Butanol produzieren sowie Pentanol, einen Alkohol mit fünf Kohlenstoffatomen.

Atsumis Mitarbeiter James Liao, ein Chemieingenieur an der University of California in Los Angeles, stellte kürzlich einen höheren Alkohol her, indem er zwei Verbesserungen gegenüber der Ethanolproduktion aus Mais kombinierte. Er ging von einem *Clostridium*-Typ aus, der Zellulose zu verdauen vermag und somit die verfügbare Biomasse besser nutzt. Statt *E. coli* zu manipulieren, veränderte Liao einen Genabschnitt in *Clostridium* so, dass das Bakterium Isobutanol produzierte. Isobutanol hat dieselbe chemische Summenformel wie Butanol, aber eine andere, verzweigte Struktur; dadurch leistet es im Verbrennungsmotor mehr und lässt sich leichter zu anderen Substanzen synthetisieren.

Mehrere Firmen möchten die Produktion von Butanol oder Isobutanol aus Biomasse kommerziell nutzen. Im Dezember 2010 verkaufte das Biotechnikunternehmen Green Biologics in Abingdon, Großbritannien, sein auf einem *Clostridium*-Stamm beruhendes Verfahren an zwei chinesische Biochemiefirmen. Butamax Advanced Biofuels, ein Joint Venture zwischen dem Ölkonzern BP und dem Chemiegran-



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Energie«
finden Sie unter

www.spektrum.de/energie

ten DuPont, hat eine Versuchsanlage im britischen Hull eröffnet und hofft, 2013 auf den Markt zu gehen. Gevo, eine Firma für fortgeschrittene Biokraftstoffe in Englewood (Colorado), baut eine Ethanolfabrik in Minnesota mit dem Ziel um, von 2012 an jährlich rund 68 Millionen Liter Isobutanol zu produzieren. Wie Ethanol wird Butanol vermutlich als Benzinbeimischung eingesetzt werden.

Atsumi meint freilich, dafür müsse die Isobutanolausbeute erst einmal um mehrere Größenordnungen steigen. Er hält nichts davon, mit genmanipulierten Mikroben noch höhere Alkohole herzustellen, denn es sei ziemlich einfach, Isobutanol auf konventionelle Weise in andere nützliche Moleküle umzuwandeln. »Isobutanol ist bereits ein großartiger Biokraftstoff«, sagt er; Alkohole mit vier oder fünf Kohlenstoffatomen seien gut genug für die Treibstoffindustrie. Aus Isobutanol wird beispielsweise durch Abspalten von Wasser Isobuten, aus dem sich wiederum alles Mögliche von Benzin bis zum Düsentreibstoff machen lässt.

Kohlenwasserstoffe taugen mehr

Doch kein Alkohol wird wohl Benzin vollständig ersetzen können, wenn es gilt, das vorhandene System zur Aufbewahrung und Verteilung des Kraftstoffs zu nutzen. »Mit Alkohol, insbesondere mit Ethanol, steigt der Verbrauch gewaltig«, sagt John Regalbuto von der University of Illinois in Chicago. Alkohol ist »einfach nicht so energiedicht wie Kohlenwasserstoffe«, meint der Chemieingenieur, der früher das Katalyse- und Biokatalyseprogramm der amerikanischen National Sci-

ence Foundation leitete; es fördert Projekte zur Umwandlung von Biomasse in Kraftstoff und andere nützliche Substanzen.

Je ähnlicher die von Mikroben produzierten Moleküle den in heutigen Motoren verbrannten Verbindungen werden, desto besser passen sie in die bereits existierende Infrastruktur. Regalbuto zitiert gern das Motto von LS9, einer Biotechnikfirma in South San Francisco (Kalifornien), die Mikroben dazu bringt, Kohlenwasserstoffketten zu produzieren: »Der beste Ersatz für Öl ist Öl.«

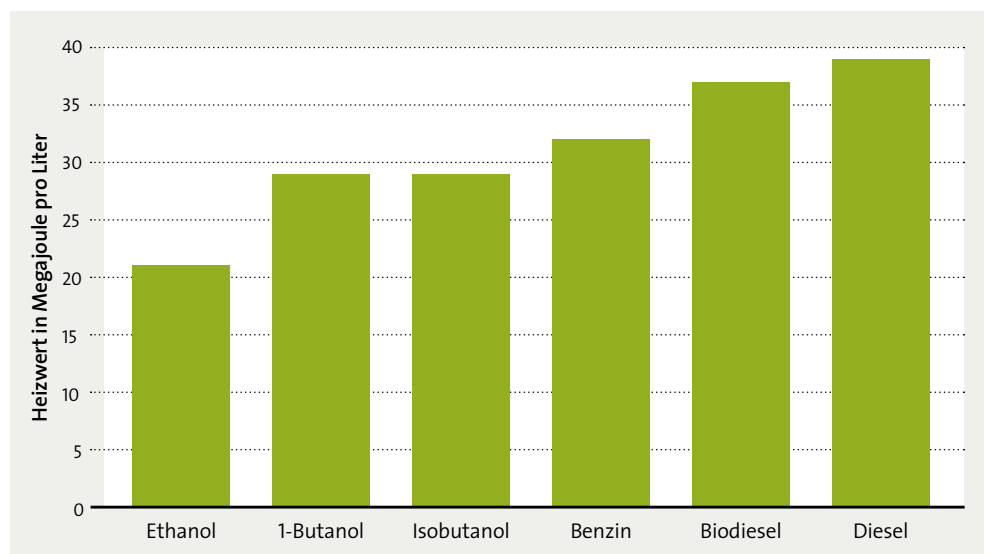
Unternehmen wie LS9 verändern mittels synthetischer Biologie den Fermentationsprozess so, dass daraus nicht Alkohole hervorgehen, sondern Kohlenwasserstoffe. Die Forscher identifizierten Gene, die Zyanobakterien befähigen, Alkane zu erzeugen – Moleküle, die nur Kohlenstoff- und Wasserstoffatome enthalten. Die kleinsten Alkane sind die brennbaren Gase Methan, Ethan, Propan und Butan, während Benzin und Diesel vorwiegend aus Alkanen mit längeren Ketten von Kohlenstoffatomen bestehen. Bei LS9 läuft seit mehr als zwei Jahren eine Pilotanlage; im Dezember 2010 gab die Firma bekannt, sie habe von Investoren 30 Millionen Dollar erhalten, um die kommerzielle Produktion vorzubereiten.

Chemie statt Biotechnik

Eine andere Methode, um aus Pflanzen Kohlenwasserstoffe zu gewinnen, geht von Ölen aus, die etwa von Ölpalmen oder Sojabohnen stammen. Ein chemischer Vorgang namens Transesterifizierung wandelt diese Öle in Biodiesel um. Doch wegen des großen Bodenbedarfs für den Anbau der Pflanzen glaubt Regalbuto nicht, dass Biodiesel die Kraftstoffnachfrage befriedigen wird. Zwar wird eifrig an Algen geforscht, die Öl zur Umwandlung in Biodiesel liefern sollen, aber bisher bleiben die Ergebnisse weit hinter den enthusiastischen Prognosen zurück.

Doch nicht jeder Ansatz zur Erzeugung von Kohlenwasserstoffen beruht auf Mikroben, die Biomasse verdauen. James Dumesic, Chemiker und Biologe an der University of Wisconsin-Madison, verwendet einen vielstufigen chemi-

Die Energiedichte unterschiedlicher Biokraftstoffe kann sich nicht mit der von herkömmlichen Erdölprodukten messen.





Die Pyrolyse verwandelt Holzstückchen (links) durch sekundenlanges Erhitzen auf über 400 Grad Celsius bei Zugabe eines Katalysators (Mitte) in »Bioöl« (rechts).

schen Prozess. Er verwandelt Biomasse in Gamma-Valerolacton, kurz GVL. Die klare Flüssigkeit lässt sich wie Ethanol dem Benzin beimischen. Und GVL hat einen wichtigen Vorzug: Man kann es zu einem Kohlenwasserstoff verarbeiten.

Um GVL zu fabrizieren, lässt Dumesic Schwefelsäure auf die Zellulose von Maisstängeln und -blättern oder Holz einwirken. Hingegen wendet man bei der Fermentation oft Enzyme an, um die Zellulose in den einfacheren, für Mikroben verdaulichen Zucker Glukose aufzuspalten. »Wir überspringen den Zucker einfach«, sagt Dumesic; außerdem ist Schwefelsäure viel billiger als Enzyme.

Dieser Schritt liefert gleiche Mengen von Ameisensäure und Lävulinsäure. Ein Katalysator aus Ruthenium und Kohlenstoff verwandelt die Lävulinsäure in GVL, das 97 Prozent der in der ursprünglichen Biomasse steckenden Energie enthält. Die Katalyse braucht kaum eine Stunde, während eine Fermentation Tage dauern würde. GVL lässt sich durch übliche Pipelines oder Tanklasten zu einer Raffinerie schaffen. Dort entsteht daraus durch Erhitzen unter hohem Druck in Gegenwart eines Zeolithkatalysators, wie er üblicherweise beim Erdölcracken eingesetzt wird, Buten plus Kohlendioxid. Die Butenmoleküle setzen sich mit Hilfe eines anderen gewöhnlichen Katalysators zu längeren Kohlenwasserstoffketten zusammen; das ergibt Diesel oder Kerosin.

Ein Problem dabei ist, dass der Schwefel der Säure den Ruthenium-Kohlenstoff-Katalysator deaktivieren kann. Darum ist Dumesic zu einem – teureren – Ruthenium-Rhenium-Katalysator übergegangen. Derzeit versucht er, Ruthenium durch ein billigeres Metall zu ersetzen.

Manche Forscher versuchen es mit gängigen Verfahren wie Vergasung und Pyrolyse. Bei der Vergasung werden kohlenstoffhaltige Substanzen unter Sauerstoff stark erhitzt. Das entstehende Gasgemisch kann als Treibstoff verbrannt oder durch die bewährte Fischer-Tropsch-Synthese in flüssigen Kraftstoff umgewandelt werden. Die Pyrolyse funktioniert ähnlich: Die Biomasse wird ohne Sauerstoff ein paar Sekunden lang auf 400 bis 600 Grad Celsius erhitzt und dann so rasch abgekühlt, dass flüssiges Bioöl entsteht. Wie Rohöl ist Bioöl ein Gemisch, das sich zu Kraftstoffen raffinieren lässt.

Bei dieser Veredelung wird dem Kohlenstoff im Öl viel Wasserstoff zugesetzt. Das kann mehr kosten als das Bioöl selbst, betont der eingangs erwähnte George Huber, der bei Dumesic studiert hat. Huber hat einen Pyrolyseprozess entwickelt, der durch Beigabe eines Katalysators nicht beim Bioöl Halt macht. Die Biomasse wird gemahlen und rasch er-

hitzt; die entstehenden Dämpfe strömen durch Zeolithe und werden dabei in Benzol, Toluol und Xylol umgewandelt. Ein Gemisch dieser aromatischen Kohlenwasserstoffe ergibt einen Kraftstoff, der für Rennwagen taugt. Der ganze Vorgang dauert nur Minuten. »Er wird wohl deutlich billiger sein als Vergasung oder Fermentierung«, meint Huber. Seine Universität hat die Lizenz für diese Technik an die New Yorker Start-up-Firma Anellotech vergeben, die der Chemieingenieur mitgegründet hat. Solange Biomasse billig bleibt, so Huber, kann der auf diese Weise gewonnene Kraftstoff durchaus mit derzeitigen Benzinpreisen konkurrieren.

Technologiemix

Huber zufolge wird sich für Biokraftstoffe künftig ein Gemisch von Technologien etablieren. »Die Bioraffinerie der Zukunft wird der heutigen Ölraffinerie ähneln«, sagt er. Kraftstoff wird weiterhin aus den gleichen Verbindungen bestehen wie heute. Es gibt keinen Grund, eine neue Flüssigkeit zu erfinden, meint George Church, Genetiker an der Harvard Medical School in Boston (Massachusetts). Benzin »ist wie eine Batterie mit 100-fach höherer Energiedichte«, sagt Church, dessen Forschung in synthetischer Biologie zur Technik bei LS9 und anderen Biosprittfirmen beigetragen hat.

Regalbuto erwartet, dass Biokraftstoff auf Kohlenwasserstoffbasis bald ganz selbstverständlich zum Alltag gehören wird. »In fünf bis sieben Jahren werden wir grünes Benzin tanken«, sagt er, »und zwar ohne viel davon zu merken.« Später werden herkömmliche, flüssigen Kraftstoff verbrennende Autos von batteriegetriebenen Fahrzeugen abgelöst werden, die den Strom aus Kernkraft und erneuerbarer Energie beziehen. Schwere Motoren für Schiffe, Flugzeuge und Lastwagen werden weiterhin mit Biokraftstoff laufen. Diese Strategie, so Regalbuto, wird die Wirtschaft von Ölimporten unabhängig machen: »Mit Strom für Autos und Biotreibstoff für schwere Vehikel sind wir in zwei Jahrzehnten autark.«

DER AUTOR



Neil Savage ist ein amerikanischer Wissenschaftsjournalist. Er lebt in Lowell (US-Bundesstaat Massachusetts).

WEBLINKS

<http://nature.com/f8yNIX>
Zahlreiche Artikelhinweise auf biotechnische Forschung zur Produktion von Biokraftstoffen (englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139696

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 474, S. 9–11, 23. Juni 2011

Selbstheilende Materialien

Wenn Werkstoffe versagen, müssen sie kostspielig ausgetauscht werden. Wäre es da nicht besser, sie könnten sich wie biologische Systeme selbst reparieren? Bei Kunststoffen ist das tatsächlich möglich und im Labor schon mit den verschiedensten Methoden gelungen.

Von Scott R. White und Benjamin J. Blaiszik

Nichts hält für die Ewigkeit. Jeder von Menschenhand geschaffene Gegenstand, sei es ein Auto oder ein Brückenpfeiler, hat nur eine begrenzte Lebensdauer und muss, damit er nicht frühzeitig seinen Dienst versagt, regelmäßig inspiziert und bei Bedarf repariert werden – meist durch Austausch beschädigter Teile.

Biologische Systeme lösen das Problem eleganter: Sie erkennen innere oder äußere Schäden im Allgemeinen automatisch und beheben sie ohne großen Aufwand durch Selbstheilung. Damit wecken sie den Neid und den Nachahmungstrieb der Werkstoffkundler. Unsere eigene Forschergruppe ist nur eine von vielen weltweit, die Polymeren, Verbundwerkstoffen und anderen synthetischen Materialien die Fähigkeit verleihen möchten, sich selbst zu reparieren, wenn sie gerissen oder gebrochen sind. Allein mit Material, das sie bereits enthalten, sollen sie ihre ursprüngliche Funktionalität wiederherstellen können. Dieser Ansatz eröffnet

ganz neue Möglichkeiten, Produkte und Komponenten sicherer und langlebiger zu gestalten.

Wie läuft die Selbstheilung bei biologischen Systemen ab? An einer verletzten Stelle entzündet sich das Gewebe, und ausgetretenes Blut gerinnt. Dann beginnen die benachbarten Zellen zu wuchern. Dabei erzeugen sie eine Gerüstsubstanz (»Matrix«) für die eigentliche Regeneration (»Reparatur«). Zum Schluss wächst durch Umbau dieser Matrix das neue Gewebe nach und füllt die Wunde aus. Der gesamte Vorgang kann sich je nach Schwere der Verletzung über längere Zeiträume hinziehen – von Wochen über Monate bis teilweise sogar Jahre.

Die bisher erprobten künstlichen Systeme ahmen diese Ereignisfolge nach, allerdings in vereinfachter und verkürzter Form. Auch hier setzt eine Schädigung den Selbstheilungsprozess in Gang. Bestimmte Substanzen bewegen sich daraufhin rasch zum Riss oder Bruch, wo sie miteinander reagieren und eine Haftverbindung zwischen den Bruchflächen bilden. Meist besteht der heilende Wirkstoff aus zwei verschiedenen flüssigen Komponenten, die nach dem Mischen erhärten. Schließlich folgt ein chemischer Ausheilungsvorgang analog zum Matrixumbau; er kann je nach System unterschiedlich lange dauern, ist jedoch meist nach wenigen Stunden bis maximal ein paar Tagen abgeschlossen. Die Geschwindigkeit der Reparatur lässt sich über die Temperatur und über die Reaktivität der Komponenten steuern. Sie sollte in jedem Fall größer sein als die Schädigungsrate, die ihrerseits stark von äußeren Faktoren wie der Dehnungsgeschwindigkeit oder der Häufigkeit und Stärke der Beanspruchung abhängt.

Die Erforschung selbstheilender Werkstoffe ist ein relativ neues Gebiet, das sich in den vergangenen zehn Jahren rasant entwickelt hat. Obwohl sich theoretisch jedes Material selbst zu reparieren vermag, sind die Erfolge bei Polymeren und Faserverbundstoffen größer als bei Keramiken, Metallen und anderen Materialien.

Unabhängig von der Werkstoffklasse lassen sich die Mechanismen der Selbstheilung grob in drei Gruppen einteilen: kapillarspezifisch, vaskulär und intrinsisch. Der Hauptunterschied besteht in der Methode, die Reaktion der Heilsubstanz erst dann

AUF EINEN BLICK

ERNEUERUNG AUS EIGENER KRAFT

1 Die Natur macht es vor: **Biologische Systeme** können Schäden oft selbst beheben. Materialforscher versuchen nun, **Werkstoffen** dieselbe Fähigkeit zu verleihen. Dazu versetzen sie diese mit Substanzen, die etwa Bruchflächen wieder fest miteinander verbinden.

2 Bei solchen Heilmitteln handelt es sich in der Regel um Flüssigkeiten, die beispielsweise in **Kapseln** oder **Kanälen** im Inneren des Werkstoffs untergebracht werden. Bei einer Beschädigung zerbrechen die Behältnisse, wodurch die **Reparaturstoffe** austreten. Sie füllen dann den Riss oder Spalt und reagieren dort miteinander oder mit dem Werkstoff zu einer festen Masse.

3 Forscher können manche Materialien auch mit der **intrinsischen Fähigkeit zur Selbstheilung** ausstatten. Zur Regeneration nutzen solche Systeme **reversible Bindungen** wie Wasserstoffbrücken oder ionische Wechselwirkungen, die nach einem Bruch beim Erwärmen selbsttätig neue Verknüpfungen bilden.

4 Versuchssysteme im Labor konnten sich nach Beschädigung bereits vollständig wiederherstellen. Unter bestimmten Bedingungen gelang die **Selbstreparatur** sogar mehrfach hintereinander an derselben Stelle. Der Weg zu praktischen Anwendungen scheint nicht mehr weit.

zu starten, wenn eine Schädigung vorliegt. Es gibt aber auch Abweichungen darin, wie schwer der zu behebbende Defekt höchstens sein darf, wie schnell die Heilung abläuft und wie oft sie am selben Ort hintereinander stattfinden kann. Insofern hat jeder Ansatz seine speziellen Vor- und Nachteile.

Bei den Kapselsystemen ist die Heilsubstanz in kugelförmigen Membranbläschen untergebracht, die im Werkstoff verteilt sind und bei einer Beschädigung zerreißen. Der freigesetzte Inhalt behebt den Defekt an Ort und Stelle. Danach ist das Reagens allerdings aufgebraucht, weshalb nur eine einmalige, örtlich begrenzte Selbstreparatur möglich ist.

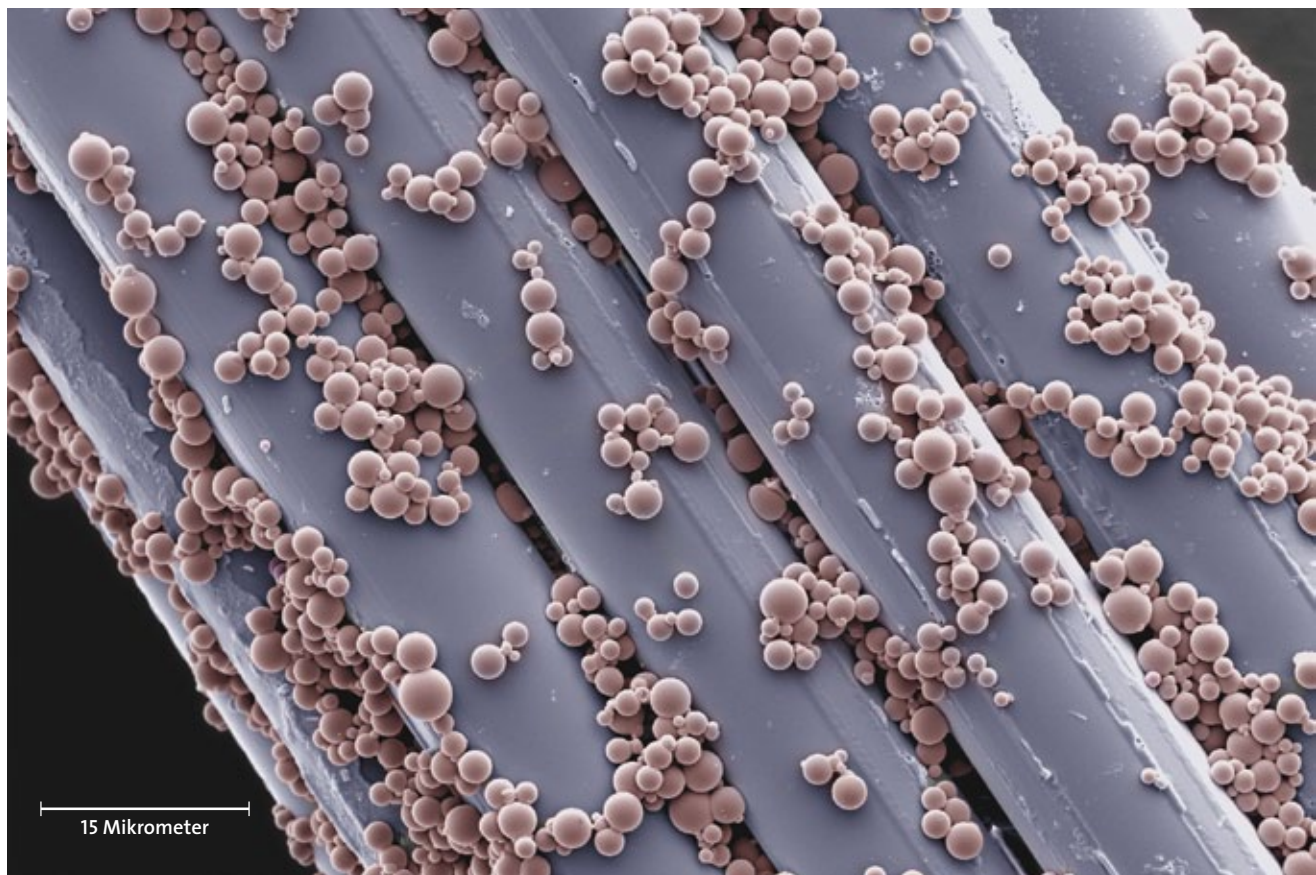
Bei vaskulären Werkstoffen befindet sich das Heilmittel in einem Kapillarnetz, das aus parallelen Einzelröhren, Schichten miteinander verbundener Röhren oder dreidimensionalen Kanalsystemen bestehen kann. Wenn das Gefäßsystem bei einer Beschädigung reißt und die Reparatursubstanz freisetzt, kann es sich aus einem äußeren Reservoir oder aus unbeschädigten Kanälen, die mit ihm verbunden sind, wieder auffüllen. Das ermöglicht eine wiederholte Selbstheilung an ein und derselben Stelle.

Werkstoffe mit intrinsischer Selbstreparatur kommen dagegen völlig ohne separate Heilsubstanzen in abgetrennten Behältnissen aus. Hier ist die Fähigkeit, Schäden zu beheben, bereits im chemischen Aufbau des Materials angelegt. Solche Werkstoffe greifen auf molekulare Mechanismen zurück, wie zum Beispiel Wasserstoffbrückenbindungen, ionische Wechselwirkungen oder die Beweglichkeit und Verflechtung von Polymerketten. Diese Vorgänge sind allesamt reversibel, was eine mehrfache Heilung ermöglicht.

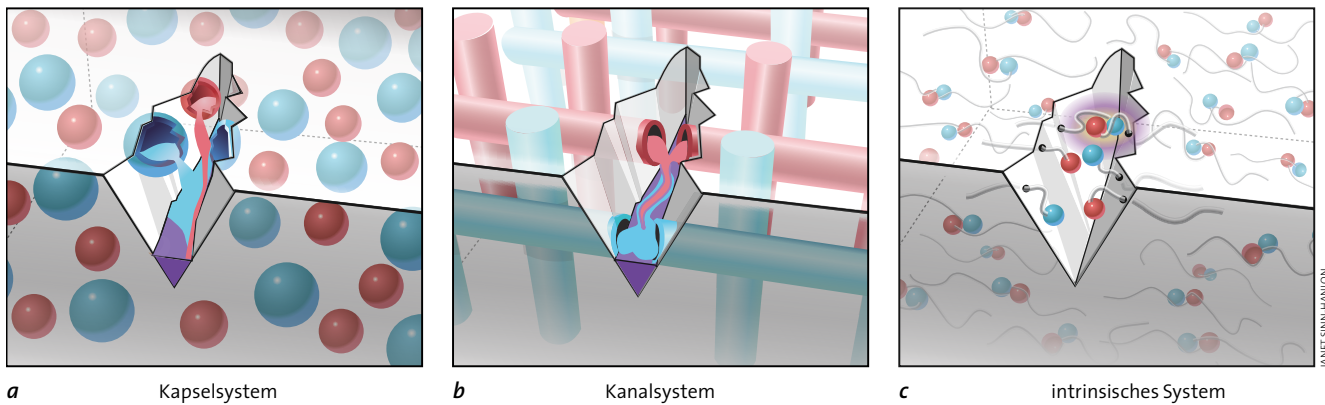
Wie lässt sich das Reagens bei Kapselsystemen in membranumhüllten Bläschen einschließen? Am einfachsten gelingt das mit einer Öl-in-Wasser-Emulsion. In diesem Fall ist die Hülle der Öltröpfchen zart und spröde wie eine Eischale und reißt bereitwillig bei Einwirkung einer äußeren Kraft. Man kann aber auch ein geschmolzenes Polymer in Wasser emulgieren, so dass sich Tropfen bilden, die beim Abkühlen oder Entfernen des Lösungsmittels härten. Dann entsteht eine dicke Schutzhülle um das Tropfeninnere.

Sobald sich die Heilsubstanz geschützt im Inneren der Kapseln befindet, gilt es, diese im Werkstoff zu verteilen. Im

Diese Kapseln auf den Verstärkungsfasern eines Polymers dienen zur Selbstreparatur. Sie enthalten ein flüssiges Reagens, das austritt, wenn sie bei einem Bruch des Materials beschädigt werden. Das Heilmittel füllt den entstandenen Riss, verfestigt sich und behebt so den Schaden. Die 15 Mikrometer dicken Glasfasern sind dünner als ein menschliches Haar und die Kapseln noch um den Faktor zehn kleiner. Solche Selbstheilungsmittel können auch über vernetzte Kanalsysteme freigesetzt werden oder integraler Bestandteil des Werkstoffs selbst sein.



BLASZIK, B. ET AL.: AUTONOMIC RECOVERY OF FIBER/MATRIX INTERFACIAL BOND STRENGTH IN A MODEL COMPOSITE. IN: ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS 20, 5, 3547-3554, 2010. ABRUCK MIT FRDL. GEN. VON WILEY-VCH

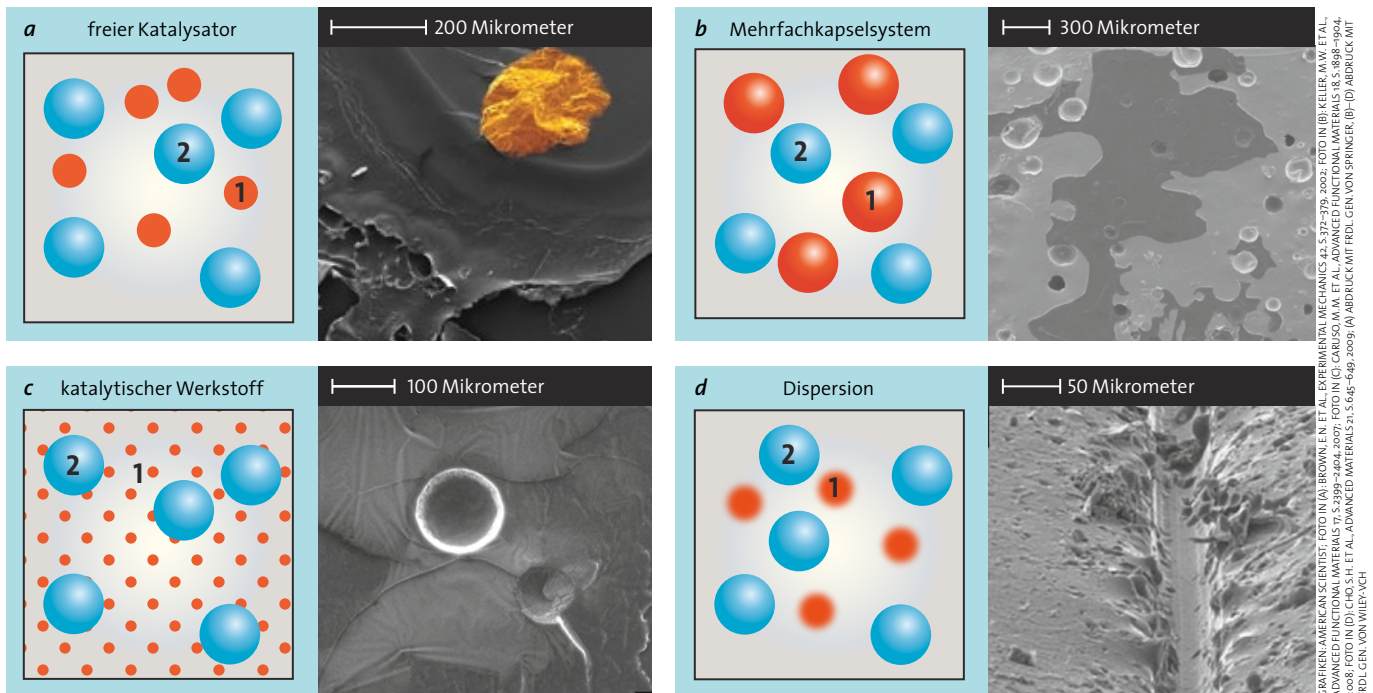


Selbsteheilungsmechanismen lassen sich grob in drei Klassen unterteilen. Kapselsysteme (a) sondern Heilsubstanzen (blau) und Polymerisatoren (rot) aus Kügelchen ab, die über den gesamten Werkstoff verteilt sind. Kanalsysteme (b) enthalten die beiden Komponenten in einem Netz aus wieder auffüllbaren Röhren. Werkstoffe mit intrinsischer Fähigkeit zur Selbstheilung (c) nutzen reversible chemische Bindungen, um Schäden auszubessern.

einfachsten Fall rührt man sie in das geschmolzene Material. Wie Versuche ergaben, überstehen die meisten Kapseln die Scherkräfte, Temperaturänderungen oder sonstigen Beanspruchungen, die beim Vermischen mit gängigen thermoplastischen Polymeren auftreten. Der so entstandene Verbundstoff muss dann eigens charakterisiert werden, weil die Kapseln das mechanische Verhalten des Grundmaterials wie

seine Festigkeit, Bruchzähigkeit und Elastizität beeinflussen können. Schließlich lässt sich mit einer Reihe bildgebender Verfahren wie Lichtmikroskopie, Infrarot- und Röntgenspektroskopie oder Rasterelektronenmikroskopie überprüfen, wie gut der Reparaturmechanismus funktioniert.

Jede Heilung erfordert mindestens zwei Stoffe: das Reagens und einen Katalysator, der es polymerisieren und da-



Selbstreparatursysteme auf Kapselbasis unterscheiden sich in der Unterbringung des Polymerisators (1), der für die Verkettung und damit Härtung der Heilsubstanz (2) sorgt. Er kann frei im Werkstoff (gelb) vorliegen (a) oder in gesonderten Kapseln eingeschlossen sein (b). In wieder anderen Systemen ist er Bestandteil des Grundmaterials selbst (c). Schließlich kann der Polymerisator auch in Form unlöslicher Tröpfchen – als Dispersion – im Werkstoff verteilt sein (d).

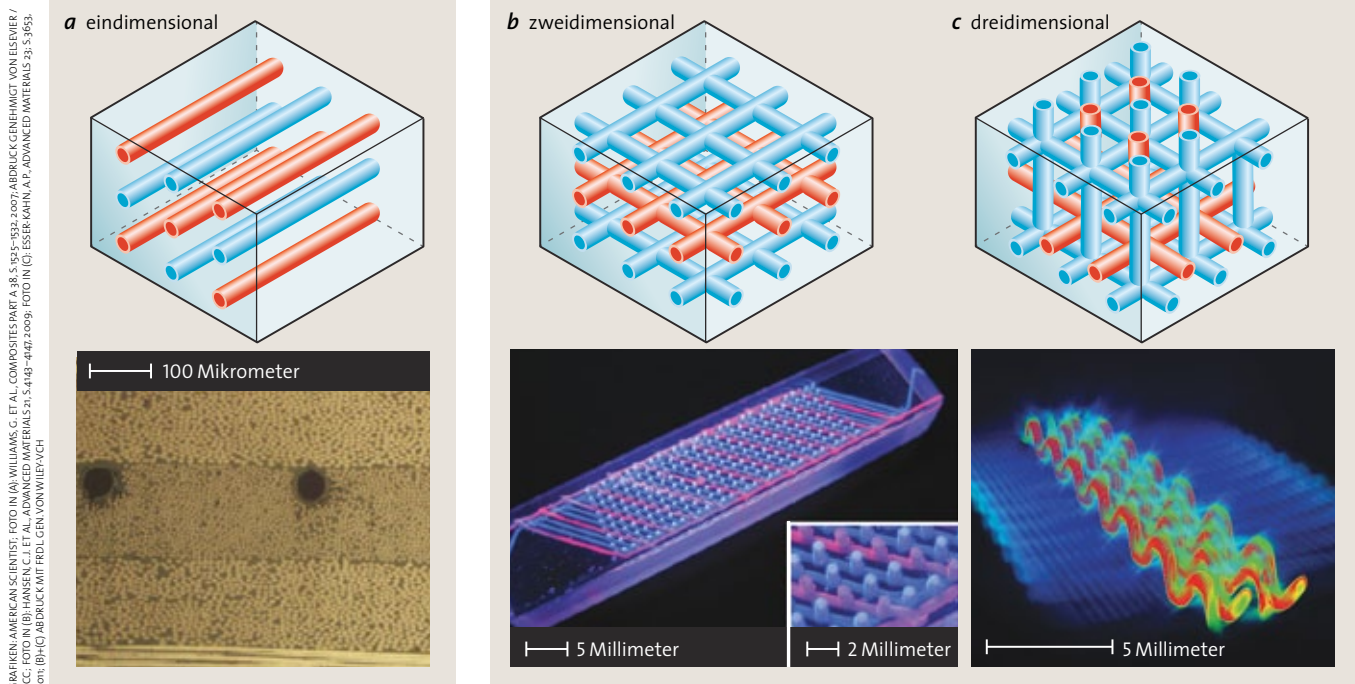
durch fest werden lässt. Beide dürfen nicht vorzeitig in Kontakt miteinander kommen. Zu diesem Zweck sind die Heilsubstanzen bei Kapselsystemen in Bläschen eingeschlossen. Der Katalysator kann dagegen frei im Grundmaterial vorliegen. Unsere Arbeitsgruppe hat dieses Verfahren bei verschiedenen Werkstoffen – darunter Epoxidharze und Faserverbundstoffe – erprobt. Generell war die Selbstheilungsrate hoch. Dadurch versagten die betreffenden Werkstoffe in Dauerbelastungstests nicht so schnell.

Besserer Korrosionsschutz durch sich regenerierende Beschichtungen

Bei einer Variante dieser Methode ist der Katalysator in inaktiver Form im Grundmaterial enthalten und wird erst durch einen Umweltreiz aktiviert, beispielsweise durch Zutritt von Sauerstoff oder Verdunstung. Man kann ihn aber auch wie die Heilsubstanz in gesonderten eigenen Kapseln unterbringen. Das empfiehlt sich vor allem, wenn mehr als zwei Komponenten für die Reparatur nötig sind. Wir haben solche Mehrkapselsysteme für ein Verfahren zum Korrosionsschutz genutzt. Dabei brachten wir in die Epoxidbeschichtung eines unedlen Metalls Membranbläschen, die entweder eine Heilsubstanz oder einen Katalysator auf Zinnbasis enthielten. Den gleichen Ansatz verfolgten wir bei einem selbstklebenden Laminat (Schichtverbundwerkstoff). Andere Arbeitsgruppen haben ähnliche Vorgehensweisen mit weiteren Reagenzien und Katalysatoren erprobt.

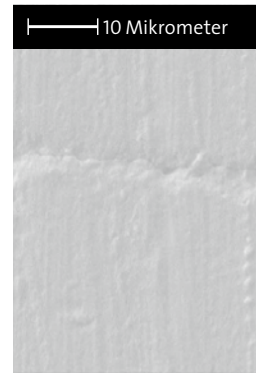
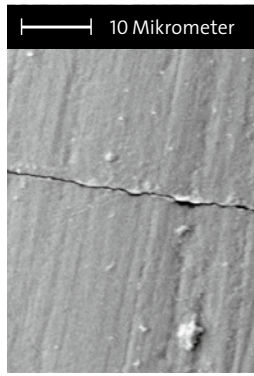
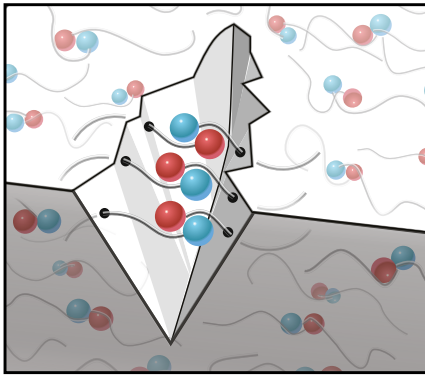
Selbsteilende Werkstoffe, die mit Kanälen arbeiten, müssen in der Regel zwei Kapillarnetze enthalten, die sich durchdringen, aber nicht in Kontakt miteinander stehen: eines für das Heilmittel und das andere für den Katalysator. Die Größe dieser Netze, ihr Anteil am Gesamtvolumen, ihre Einbettung in die Matrix, die Verteilung und Einheitlichkeit der Kanäle und die Steifigkeit ihrer Wandungen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. Das Design ähnelt in vieler Hinsicht dem von Kapselsystemen, es gibt aber auch grundlegende Unterschiede. So werden Kanalsysteme erst beladen, nachdem sie in den Werkstoff eingebaut sind – für gewöhnlich durch Anlegen eines Vakuums. Deshalb sind bei der Auswahl der Heilsubstanzen außer der chemischen Reaktivität auch Eigenschaften wie Benetzbarkeit und Viskosität zu berücksichtigen. Wenn ein Agens sehr zähflüssig ist oder die betreffende Kanaloberfläche nur schlecht benetzt, lässt sich das Kapillarnetz nicht gut damit füllen. Außerdem wird das Heilmittel dann wohl auch nicht problemlos zu einer Schadstelle transportiert und dort freigesetzt.

Die einfachsten Kanalsysteme arbeiten mit hohlen Glasfasern. Diese lassen sich leicht mit erprobten Verfahren herstellen und vertragen sich gut mit vielen Standardpolymeren. Ferner ist Glas chemisch sehr beständig und reagiert nicht mit gängigen Reparaturstoffen wie Zweikomponenten-Epoxidharzen. Überdies lassen sich Glasröhrchen leicht zusammen mit den Faserverstärkungen einbringen, die bei Verbundwerkstoffen gebräuchlich sind, da sie eine ähnliche

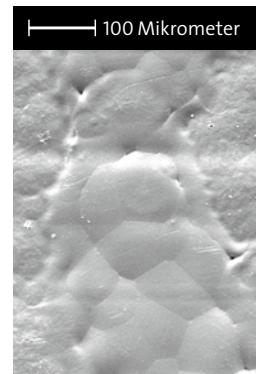
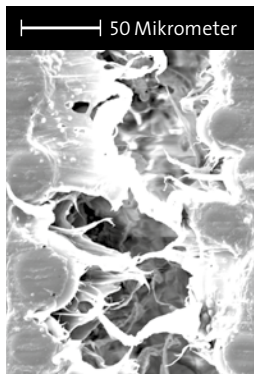
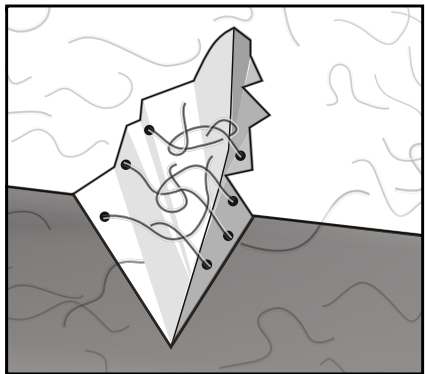


Bei selbstheilenden Kanalsystemen befinden sich Heilsubstanz (blau) und Polymerisator (rot) in verschiedenen Röhren. Eindimensionale Netzwerke (a) können aus hohlen Glasfasern hergestellt werden. Die raster-elektronenmikroskopische Aufnahme (a, unten) zeigt ein solches System im Querschnitt. Zwei- (b) und dreidimensionale (c) Netzwerke lassen sich erzeugen, indem man mit dem so genannten Direct-Ink Writing ein Gerüst erzeugt (b, unten) oder Verstärkungs- und »Opferfasern« miteinander verwebt (c, unten).

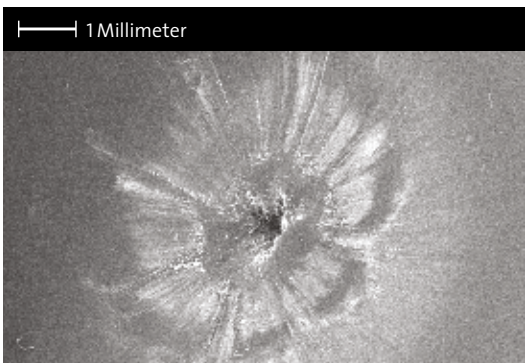
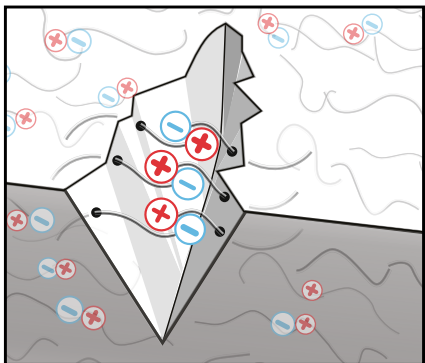
a reversible Bindungen



b neue Verflechtung der Polymerketten



c ionische Wechselwirkungen



GRAFIKEN: JANET SINN-HANLON; FOTOS IN (A): MURPHY, E. B. ET AL., MACROMOLECULES 41, S. 5203–5209, 2008; FOTOS IN (B): LIU, X. ET AL., ACS APPL. MATER. INTERFACES 1, S. 612–620, 2009; (A)-(B) ABDRUCK MIT FRDL. GEN. DER AMERICAN CHEMICAL SOCIETY; FOTO IN (C): VARLEY, R. J. ET AL., ACTA MATERIALIA 56, S. 5737–5750, 2008; ABDRUCK GENEHMIGT VON ELSEVIER / CCC

Intrinsische Systeme zur Selbstheilung greifen auf drei Mechanismen zurück. Solche mit reversiblen Bindungen (a) nutzen die Tatsache, dass ein Polymer in seine Grundbausteine (Monomere) zerfallen und sich anschließend neu bilden kann. Sind die Moleküle an den Bruchflächen beweglich, können sich freie Ketten auf beiden Seiten des Spalts ineinander verschlingen und so für neuen Zusammenhalt sorgen (b). Heilung durch ionische Wechselwirkungen (c) gelingt beispielsweise über reversible Wasserstoffbrücken oder Ionencluster, die für neue Quervernetzungen zwischen den Spaltwänden sorgen können. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (rechts) zeigen die Schadstellen vor und nach der jeweiligen Selbstreparatur.

Form und Größe haben. In den ersten Versuchen waren die Kanäle mit Durchmessern von einem Millimeter noch relativ dick; heute haben die dünnsten nur noch Querschnitte von 15 Mikrometern. Ein Nachteil von hohlen Glasfasern ist allerdings, dass sie sich nicht zu komplexeren Gefäßsystemen verbinden lassen. Das schränkt ihre Wirksamkeit ein.

Besser sind zwei- oder dreidimensionale Kapillarnetze mit Querverbindungen zwischen den Kanälen. Sie arbeiten zuverlässiger und haben auch eine höhere Speicherkapazität für Heilstoffe. Dadurch können sie größere Defekte beheben, und es ist leicht möglich, sie für erneute Einsätze wieder aufzufüllen. Zweidimensionale Netze eignen sich besonders gut für Verbundwerkstoffe mit Schichtstruktur. Sie lassen sich im Sandwichverfahren zwischen den einzelnen Schichten einbauen und beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften des Materials kaum.

Die meistverwendete Methode zur Herstellung zwei- und dreidimensionaler Kapillarnetze ist das so genannte Direct-Ink Writing (DIW). Vom Prinzip her handelt es sich um ein klassisches Wachs ausschmelzverfahren oder einen Guss mit verlorener Form, allerdings auf Nanotechnologieebene. Zunächst wird eine Gerüststruktur innerhalb einer Gussform gebaut und diese mit dem flüssigen Vorläufer des Polymers gefüllt. Nach dessen Polymerisation zum festen Kunststoff löst man das Gerüst chemisch auf, wobei ein Netzwerk aus Hohlräumen zurückbleibt. Es kann fast beliebige Formen haben.

Bei einer Variante dieses Verfahrens haben wir Fasern, die nur bis 180 Celsius beständig sind, mit den Verstärkungsfasern eines Verbundwerkstoffs verwoben. Den resultierenden Vorformling gossen wir mit einem Harz aus, das wir dann durch Erwärmung aushärten ließen. Die behelfsmäßi-

gen Fasern verdampften wir schließlich bei Temperaturen von 200 bis 240 Grad Celsius. Zurück blieb ein Netz aus Kanälen, die dort, wo sich die ehemaligen Fasern überkreuzt hatten, miteinander verbunden waren. Auf diese Weise ist es in unserer Arbeitsgruppe kürzlich gelungen, äußerst komplexe Gefäßsysteme mit bis zu einen Meter langen Kanälen anzufertigen.

Um zu verstehen, wie ein dreidimensionales Netzwerk idealerweise beschaffen sein sollte, optimierten wir Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, Gesamtvolumen und Durchmesser der Kanäle in Computersimulationen. Ferner versuchten wir mit der DIW-Methode die Struktur und Funktionsweise von Oberhautgewebe nachzuempfinden. Dazu erzeugten wir ein weiches Epoxidsubstrat mit einem dreidimensionalen Netz aus etwa 300 Mikrometer dicken Kanälchen und überzogen es mit einer spröden Epoxidschicht, die einen Polymerisator enthielt. Wenn wir durch Verbiegen Risse in der Beschichtung hervorriefen, strömte das heilende Agens aus dem darunterliegenden Gefäßsystem hinein und verschloss sie wieder.

Über 40 Eigenreparaturen am Stück

Das Netzwerk ließ sich nachfüllen, so dass sich die Proben bis zu siebenmal nacheinander selbst reparierten. Als Mitglieder unserer Arbeitsgruppe Heilstoff und Polymerisator in zwei getrennten Netzwerken unterbrachten, waren sogar 16 aufeinander folgende Reparaturen möglich. Durch Verbesserung der DIW-Methode gelang es uns schließlich, sich durchdringende, aber trotzdem voneinander isolierte Kapillarnetze zu bauen, die sogar über 40 Heilungszyklen in einer Beschichtung ermöglichten. Dank jüngster Fortschritte beim Design mehrdimensionaler Gefäßsysteme lassen sich inzwischen auch Schäden innerhalb der Matrix mehrfach reparieren.

Ein Nachteil von Kapsel- wie Kanalsystemen ist, dass bei der Heilung zusätzliches Material in den Werkstoff eingebaut wird, was dessen Volumen vergrößert. Bei einem intrinsischen Selbstreparatursystem, das auf chemischen Besonderheiten des betreffenden Werkstoffs beruht, ist das nicht

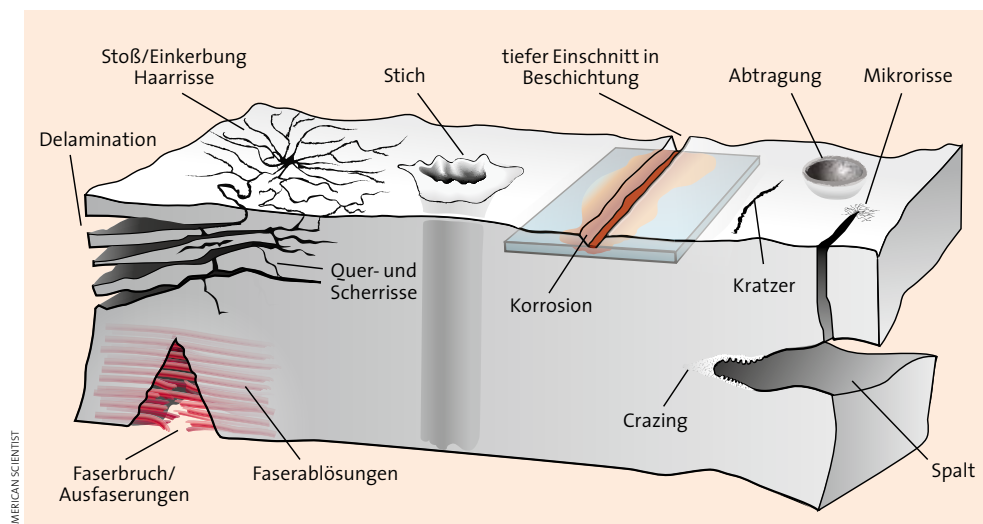
der Fall: Das Material regeneriert sich durch Knüpfen und Lösen chemischer Bindungen innerhalb der Polymermatrix. Daran können unter anderem temperaturabhängige Bindungen, Wasserstoffbrücken, Wechselwirkungen zwischen Ionen und molekulare Diffusionsvorgänge beteiligt sein.

In diesem Fall müssen keine Heilsbstanzen eingebaut oder freigesetzt werden, und es gibt keine Verträglichkeitsprobleme. Das vereinfacht das Design solcher Werkstoffe ganz erheblich. Dafür stellt sich nun allerdings das Problem, sicherzustellen, dass das Material die geforderten mechanischen, chemischen und optischen Eigenschaften aufweist. Zudem funktionieren Werkstoffe mit intrinsischer Selbstreparatur nur bei kleineren Schäden wirklich gut, weil die Risswände nahe beieinanderliegen müssen, damit sich neue chemische Verknüpfungen bilden können.

Polymere entstehen durch Verkettung einfacherer Bausteine, so genannter Monomere. Dies und die Möglichkeit, durch Energiezufuhr die Ketten wieder zu sprengen, eröffnet Wege zur intrinsischen Selbstreparatur. Wird beispielsweise ein Riss in einem Polymer stark erhitzt oder bestrahlt, kann dies einen entsprechenden Werkstoff an der Schadstelle aktivieren und mobilisieren, so dass sich neue Bindungen bilden und das Material verheilt. Mehrere Forschergruppen haben bei verschiedenen Polymeren und Verbundwerkstoffen mehrfache, durch Wärme ausgelöste Selbstreparaturzyklen nachgewiesen.

Ein anderer Ansatz besteht darin, den Werkstoff mit einem thermoplastischen Additiv zu versetzen. Wenn dieses beim Erhitzen erweicht, kann es in Risse und Spalten eindringen und nach dem Abkühlen und Aushärten die umliegende Werkstoffmatrix verkitten. Meist dehnen sich solche Additive auch beim Erwärmen aus und werden dadurch regelrecht in Hohlräume gepresst. Solche Heilvorgänge können an derselben Stelle mehrfach hintereinander ablaufen. Anschließend waren die Werkstoffe, wie Tests ergaben, wieder voll belastbar.

Manchmal enthalten bestimmte Abschnitte des Polymers auch elektrische Ladungen. Gruppen solcher Ionomere, wie



Die Schadensformen an Werkstoffen sind vielfältig und hängen vom Materialtyp sowie von der Art der Einwirkung oder Belastung ab. Die Grafik gibt eine Übersicht.

die geladenen Regionen heißen, können für reversible Quervernetzungen sorgen und so einen Spalt »vernähen«, wenn sie durch äußere Reize wie Hitze oder UV-Licht aktiviert werden. Einige Forscherteams haben derartige Ionomerenwerkstoffe mit Projektilen durchbohrt und festgestellt, dass die Reibungswärme, die das Geschoss beim Durchdringen des Werkstoffs erzeugt, ausreicht, um dessen Selbstheilung auszulösen. Das Loch schließt sich dann fast genauso schnell, wie es entstanden ist (siehe Bild rechts).

Man kann ein Polymer auch so aufbauen, dass die langen Kettenmoleküle über reversible Wasserstoffbrücken an ihren Enden und Seitenästen zusammengehalten werden. Das ergibt gummiartige Werkstoffe, in denen sich nach einer Schädigung neue Wasserstoffbrücken bilden, wenn man die Bruchflächen in engen Kontakt miteinander bringt. Desgleichen könnten sich Werkstoffe selbst reparieren, wenn die Polymermoleküle bei einem Bruch – etwa durch die damit einhergehende Erwärmung – an der Schadstelle beweglicher werden, so dass sie in die Lücke diffundieren und sich dort miteinander verflechten und verfilzen.

Im Idealfall sollte die Selbstheilung mindestens genauso schnell ablaufen wie die Schädigung. Bisher trifft das allerdings nur selten zu. Außerdem wird nicht immer der ursprüngliche Zustand komplett wieder hergestellt. Doch bei allen bisher erprobten Verfahren gibt es mindestens ein Beispiel, bei dem das der Fall ist. Veröffentlichte Werte zur Effizienz der Selbstreparatur verschiedener Werkstoffe liegen zwischen 20 und mehr als 100 Prozent; denn der verheilte Bereich kann sogar stabiler als vorher sein.

Die Ursachen für Schäden bei Polymeren und Verbundwerkstoffen sind vielfältig. Zu der langen Liste zählen Überlastung, Ermüdung, Schlag, Stich und Korrosion. Jede dieser Einwirkungen vermag eine Reihe unterschiedlicher Defekte hervorzurufen. Bei einem Schlag können beispielsweise Sprünge an der Oberfläche oder Ablösungen in den Schich-

ten darunter auftreten, aber auch Risse oder Querrisse in der Polymermatrix. Um zu ermitteln, wie gut die Selbstheilung funktioniert, schädigt man den Werkstoff durch kontrollierte Einwirkung von Stoß-, Biege-, Zug- und Scherkräften. Anschließend wird geprüft, inwieweit das Material seine ursprünglichen mechanischen Eigenschaften zurückerlangt hat.

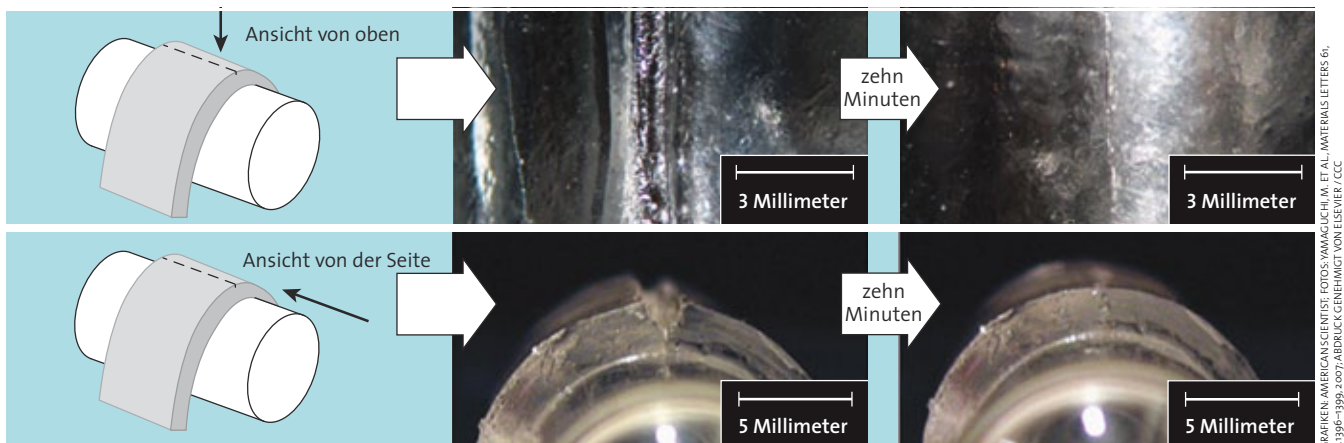
2001 gelang unserer Arbeitsgruppe erstmals eine Selbstregeneration per Kapselsystem in einem Epoxid, das nach der Heilung wieder 75 Prozent seiner ursprünglichen Festigkeit aufwies. Nebenbei machten wir eine weitere interessante Entdeckung: Die Mikrokapseln erhöhen die Bruchzähigkeit des Werkstoffs, weil sie die Energie sich ausbreitender Haarrisse absorbieren und so deren weiteres Vordringen verhindern.

Bruchstücke durch Zusammendrücken wieder verbinden

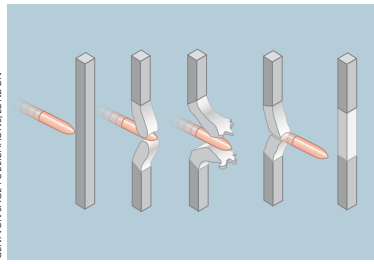
In jüngsten Versuchen hat unser Team die Kapseln direkt auf den Verstärkungsfasern aufgebracht, damit sie gezielt Schäden reparieren, die den Zusammenhalt zwischen Verstärkung und Matrix betreffen. In ersten Tests wurde gut die Hälfte der Bindungen zwischen Glasfasern und einer Epoxidmatrix wiederhergestellt. Wissenschaftler um H. Thomas Hahn von der University of California in Los Angeles (UCLA) prüften hingegen Kohlefaserverbundstoffe, die durch thermisch reversible Reaktionen über eine intrinsische Fähigkeit zur Selbstheilung verfügten. Bei künstlich erzeugten Mikrorissen betrug der Regenerationsgrad 90 Prozent, wenn das Material dreimal hintereinander für jeweils eine Minute auf 150 Grad Celsius erhitzt wurde.

Eine Methode zur Untersuchung selbstheilender Brüche besteht darin, die Oberfläche einer Polymerprobe anzuritzen und mit dem Mikroskop zu verfolgen, wie sich die Kerbe wieder schließt. In unseren Experimenten gingen wir noch weiter: Wir zerschnitten mit einer Rasierklinge Polymerproben und pressten die Teile dann 10 bis 15 Minuten lang bei Raum-

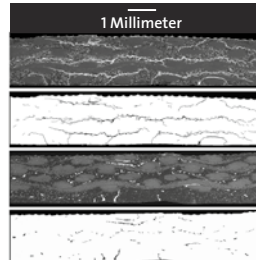
Beim Test eines Polymers mit intrinsischer Selbstheilung wurde es angeschnitten und über einen Zylinder gebogen (links). Die Fotos zeigen – jeweils von oben und von der Seite – die Schadstelle vor (Mitte) und nach der Heilung (rechts). Durch molekulare Diffusion und Verflechtung loser Polymerketten hatte sich die Kerbe nach nur zehn Minuten geschlossen.



a Ein Geschoss durchschlägt einen ionomeren Kunststoff.



b Delamination und Rissbildung in glasfaserverstärktem Polymer



Wenn ein Geschoss ein Polymer mit einem Selbstheilungssystem auf Basis von Ionomeren durchschlägt (a), schnell das durch die Reibungswärme des Projektils angeschmolzene Material in seine alte Position zurück. Die verbleibenden Risse schließen sich durch viskoses Fließen und Interdiffusion der geladenen Moleküle an den Bruchflächen. Bei einem anderen Versuch wurde ein Glasfaserverbundstoff durch Einkerben beschädigt (b). Die im Querschnitt sichtbaren Risse der Kontrollprobe (oben) sind bei einem Werkstoff mit integriertem Kapselsystem schon nach kurzer Zeit großenteils verheilt (unten).

temperatur aneinander, um sie wieder miteinander zu verbinden. Die derart reparierten Proben bogen wir schließlich oder verformten sie auf andere Art, um festzustellen, ob sie an der Schnittstelle aufbrechen würden. Einige der Proben waren schwächer als das ungeschädigte Ausgangsmaterial, aber bei vielen hielten die regenerierten Bereiche genauso gut. Analoge Ergebnisse erhielten wir, wenn wir die Proben nicht zerschnitten, sondern zerrissen.

Stöße können schwere Schäden unterschiedlichen Typs hervorrufen – beispielsweise Löcher, Ablätterungen oder verschiedene Arten von Rissen. Bisher lag der Schwerpunkt der Arbeiten zur Selbstregeneration bei Defekten, die Forscher durch langsam steigende Druckbelastung hervorriefen. Kürzlich haben Ian Bond und Richard Trask an der University of Bristol (England) jedoch ein karbonfaserverstärktes Epoxid, das ein Netzwerk aus hohlen Glasfasern mit einem Heilmittel enthielt, einem Belastungstest durch Stöße unterschiedlicher Energie bis maximal drei Joule unterzogen. Wie sich zeigte, pufferten die Kapillarnetze den Aufprall deutlich ab, da sie dabei zerbrachen. Das erhöhte die Druckfestigkeit des Materials um 13 Prozent. Beim Erwärmen verheilten die Schadstellen großenteils, wobei der Erfolg stark von einer gleichmäßigen Verteilung der Kanäle abhing.

Untersuchungen der Selbstheilung von Stoßschäden bei Werkstoffen mit Kapselsystemen lieferten uneinheitliche Resultate. Ming Qiu Zhang und Min Zhi Rong an der Universität Sun Yat-sen in Zhongshan in der chinesischen Provinz Guangzhou testeten glasfaserverstärkte Polymere mit verkapseltem Heilmittel. Bei Stoßenergien von 1,5 Joule war die Selbstregeneration fast vollständig, erreichte bei 3,5 Joule aber nur noch etwa 20 Prozent. In eigenen Versuchen mit einem ähnlichen Werkstoff erzielten wir dagegen für Stoßenergien bis 20

Joule eine 100-prozentige Heilung, obwohl dabei ausgedehnte Risse auftraten; erst bei noch heftigeren Stößen ließ der wachsende Umfang der Schäden die Erfolgsrate sinken.

Einkerbungen sind schonender und erlauben, das Schadensmaß besser zu kontrollieren. Die Arbeitsgruppe an der University of Bristol hat dieses Verfahren ausgiebig an Epoxidverbundstoffen mit hohlen Glasfasern als Kanälen angewandt, um die Freisetzung und den Transport von Heilstoffen, die mechanische Belastbarkeit und umweltbedingte Alterungsprozesse zu bestimmen.

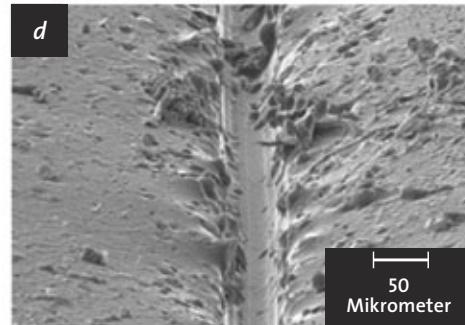
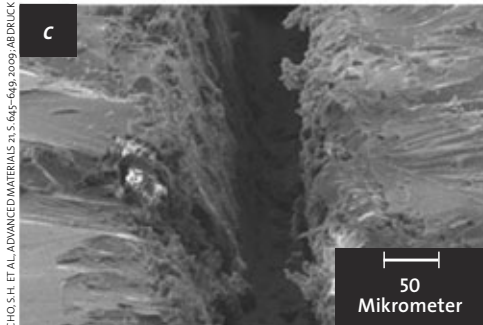
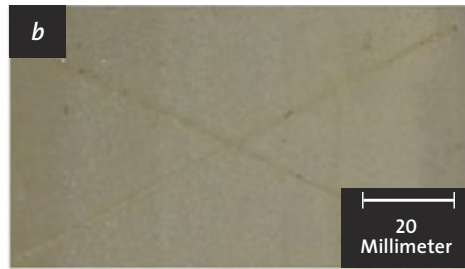
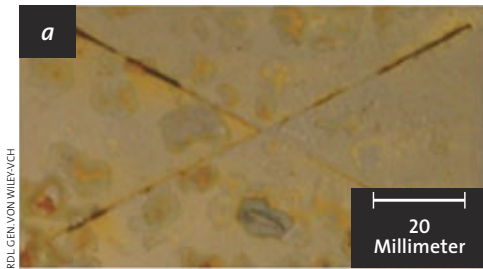
Ein Schaden kann auch bewirken, dass ein Werkstoff nicht mehr dicht ist und Gase oder Flüssigkeiten durchlässt. Dann geht etwa der Korrosionsschutz für ein damit beschichtetes Substrat verloren. Wir haben deshalb auch die Selbstheilung an dünnen Membranen und Beschichtungen untersucht. So verteilten wir Mikrokapseln zwischen zwei epoxidbeschichteten Nylonagen. Anschließend stachen wir mit einer feinen Nadel Löcher hinein und prüften nach 24 Stunden die Dichtigkeit. Wie sich zeigte, hatten sich je nach Größe und Verteilung der Mikrokapseln zwischen 40 und 100 Prozent der Löcher wieder vollständig geschlossen.

Korrosionsbeständige Beschichtungen dienen zum Schutz von Eisenteilen, die Feuchtigkeit oder Salz ausgesetzt sind. Durch Zerkratzen oder Abrieb werden sie aber schnell undicht, weshalb eine Selbstheilung hier besonders wünschenswert erscheint. In unseren Arbeitsgruppen haben wir Metallstücke mit kapselhaltigen Beschichtungen auf Epoxid- und Vinylbasis untersucht. Wir ritzen die Schutzschicht an und benetzten sie anschließend mit Salzwasser. Nach einiger Zeit prüften wir die Proben auf sichtbare Anzeichen für Korrosion oder maßen die Impedanz (den Wechselstromwiderstand) an der Oberfläche, um frei liegendes Metall zu entdecken. Dabei schnitten die Kapselsysteme deutlich besser ab als normale Beschichtungen. Noch wirksamer sind womöglich intrinsische Selbstheilungssysteme, da sie kleinere Läsionen gut und schnell reparieren. Publikationen einiger Forschergruppen zufolge können sie Korrosion sogar vollständig unterbinden.

Auf dem Weg zur Praxisreife

Das junge Gebiet der sich selbst regenerierenden Werkstoffe hat in den vergangenen Jahren beachtliche Erfolge verbuchen können, und in nächster Zeit werden sicher chemische Heilmechanismen entdeckt, die noch wirksamer sind und schneller ablaufen. Doch gibt es weiterhin viele ungeklärte technische Fragen. So muss sich erst zeigen, wie gut selbstheilende Systeme langfristig unter rauen Umweltbedingungen funktionieren. Ihr praktischer Nutzen hängt vermutlich davon ab, ob sich auch Materialermüdung und wiederholte Schädigungen damit bekämpfen lassen. Die bisherigen Untersuchungen beschränken sich weitgehend auf Brüche infolge zu hoher akuter Spannung. Wie sich ein Stoff bei Schäden durch Dauerbelastung regenerieren könnte, ist noch kaum erforscht.

Um dem Gebiet zum Durchbruch zu verhelfen, wäre es wichtig, das Potenzial der Selbstheilung möglichst bald anhand eines marktfähigen Produkts unter Beweis zu stellen.



Durch das Kapselsystem in der Epoxidbeschichtung eines Stahls schloss sich ein Kratzer so weit, dass im Gegensatz zu einer Probe ohne Selbstheilung (links) keine Korrosion auftrat (rechts). Gezeigt sind Aufnahmen im Licht- (oben) und Elektronenmikroskop (unten).

Dafür bieten sich wohl am ehesten Oberflächenbeschichtungen an, weil sie im Vergleich zu Strukturwerkstoffen nur relativ geringer mechanischer Belastung ausgesetzt sind. Außerdem spielen sie in vielen Industriezweigen eine Rolle.

Höchstwahrscheinlich werden Selbstheilungssysteme bei künftigen großtechnischen Verfahren nicht gleichmäßig im Werkstoff verteilt, sondern gezielt nur an bestimmten Stellen eingebaut. Das spart Kosten, steigert die Effizienz und beeinträchtigt die Festigkeit des Materials möglichst wenig.

Selbstregeneration muss im Übrigen nicht darauf beschränkt bleiben, einem Werkstoff seine mechanischen Eigenschaften zurückzugeben. Sie könnte beispielsweise auch seine elektrische Leitfähigkeit wiederherstellen, was in der Mikroelektronik oder auf dem Gebiet der Energiespeicherung sehr nützlich wäre. Schadhafte Computerchips müssten dann nicht mehr unbedingt ausgetauscht werden, sondern würden sich bei Erwärmung vor Ort selbst reparieren. Unsere Arbeitsgruppe hat ebenso wie einige andere Teams halbleitende metallorganische Polymere synthetisiert, bei denen das gelingt. Außerdem waren wir kürzlich mit Mikrokapselsystemen erfolgreich, die hochleitfähige Substanzen freisetzen.

Auch Störungen optischer Eigenschaften lassen sich unter Umständen mit selbstheilenden Systemen beheben. Da Risse einen anderen Brechungsindex als ihre Umgebung haben, streuen sie Licht und beeinträchtigen die Transparenz. Indem ein Kanal- oder Kapselsystem ein Polymer mit passendem Brechungsindex zum Ort des Schadens transportiert, könnte es die Trübung abschwächen oder sogar aus der Welt schaffen.

Das Prinzip der Selbstheilung verspricht erhöhte Sicherheit und längere Lebensdauer sowie geringere Wartungs- und Reparaturkosten für die verschiedensten Werkstoffe und Produkte. Sich selbst ausbessernde Autolacke und Reifen sowie ausfallsichere Elektrogeräte sind nur wenige Beispiele für die ungeahnten Möglichkeiten der neuen Techno-

logie. Vielleicht kann sie sogar mehr als nur heilen. Dabei weist die Biologie wiederum den Weg. So können sich Knochen nicht nur regenerieren, sondern als Reaktion auf besondere Beanspruchungen auch ihre Form und Struktur ändern. Gut möglich also, dass synthetische Werkstoffe, die sich heute nach einer Beschädigung lediglich reparieren, sich in Zukunft außerdem selbsttätig an die jeweiligen Belastung anpassen, um ihr besser zu widerstehen. ~

DIE AUTOREN



Scott R. White (links) ist Professor für Luftfahrttechnik an der University of Illinois in Urbana-Champaign. **Benjamin J. Blaiszik** hat ein Postdoc-Stipendium am Center for Nanoscale Materials des Argonne National Laboratory (Illinois).

QUELLEN

- Blaiszik, B.J. et al.:** Autonomic Recovery of Fiber/Matrix Interfacial Bond Strength in a Model Composite. In: *Advanced Functional Materials* 20, S. 3547–3554, 2010
- Bond, I.P. et al.:** Self-Healing Fiber-Reinforced Polymer Composites. In: *MRS Bulletin* 33, S. 770–774, 2008
- Gragert, M. et al.:** Azide/Alkyne-»Click«-Reactions of Encapsulated Reagents: Toward Self-Healing Materials. In: *Macromolecular Rapid Communications* 32, S. 419–425, 2011
- Haase, T. et al.:** Selbst heilende Polymere. In: *Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau* 6, S. 225–230, 2010
- Hager, M.D. et al.:** Self-Healing Materials. In: *Advanced Materials* 22, S. 5424–5430, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1139710

© American Scientist
www.americanscientist.org

Anzeige



Ernst Peter Fischer

Das große Buch der Elektrizität

Fackelträger, Köln 2011. 370 S., € 39,95

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Ein virtuelles Museum der Elektrizität

Ernst Peter Fischer erzählt in opulenten Bildern, wie die Kraft der ruhenden und bewegten Ladungen entdeckt, erklärt und zur omnipräsenten Dienerin unseres Alltags wurde.

»Ich meine, dass das Unbehagen an der Wissenschaft vor allem dadurch zu Stande kommt, dass dieses Unternehmen es verlernt hat, neben der logischen Erkenntnis, die sie glänzend und großartig liefert, auch die sinnliche Erkenntnis zu berücksichtigen, die es komplementär zu ihr gibt.« Dieser Satz von Ernst Peter Fischer steht als Motto auf der Medaille für Naturwissenschaftliche Publizistik, die ihm 2004 von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft verliehen wurde und die zu den vielen Ehrungen des renommierten Wissenschaftshistorikers und Bestsellerautors gehört.

»Das große Buch der Elektrizität« ist in der Tat etwas für die sinnliche Erkenntnis: Großformatig und opulent ausgestattet, bietet es einer beeindruckenden Fülle an Bildern und Texten Raum, welche die Geschichte des Elektromagnetismus anschaulich und fesselnd vor Augen führen. Die Bilder ziehen den Leser gleichsam in ein virtuelles Technikmuseum hinein; und wie es sich für ein Museum gehört, vermittelt das Buch einen ersten Eindruck von der allgemeinen kulturellen Bedeutung dieser Technik und ihrer grundlegenden Ideen. Es macht Lust auf die Wissenschaft von der Elektrizität und deren Geschichte, weil es dem Leser nicht abverlangt, sich in die physikalischen und technischen Grundlagen einzuarbeiten.

Zunächst fallen die historischen Zeichnungen ins Auge: erste Versuchsanordnungen zur Erzeugung und Messung der Elektrizität mit Bernstein, Draht, Spule und Metallplatten; verschiedene Generationen von Generatoren, Motoren, Akkumulatoren und Transformatoren; Straßenbahnen und elektrisch betriebene Autos Ende des 19. Jahrhunderts, moderne Elektronik mit Halbleitertransistoren und schließlich integrierte Schaltkreise. Zum Ende des Buchs hin ersetzen immer mehr Fotos die Zeichnungen – nicht nur, weil sie aus jüngeren Zeiten leichter verfügbar sind, sondern auch, weil kein einzelner Erfinder mehr so komplexe Anwendungen wie einen Mikrochip oder eine moderne Anlage zur Energieerzeugung zu zeichnen vermöchte.

Die leicht lesbaren und mit vielen Überraschungen aufwartenden Texte betten die Bilder in eine reflektierende und kommentierende Erzählung zur Chronologie der Ereignisse ein. Sie sind in thematische Abschnitte gegliedert, entsprechend den Darstellungsansätzen der modernen historischen Forschung. Dabei veranschaulichen die Bildunterschriften und geschickt eingestreute Zitate immer wieder neue Aspekte: Fein dosiert werden neben den historischen und kulturellen Zusammenhängen auch Funktions- oder Bauprinzipien erörtert.

Im Einleitungskapitel führt Fischer als roten Faden die »Dualität« der Anziehung und Abstoßung zwischen den elektrischen und magnetischen Polen ein, mit ideengeschichtlichen Andeutungen zur Denkweise der romantischen (Natur-)Philosophie, die – implizit – darauf hinweisen, warum in der Philosophie eines Aristoteles oder Albertus Magnus die Elektrizität des Bernsteins nicht erklärbar war.

Der Hauptteil beginnt mit den physikalischen und technischen Entwicklungen im historischen Kontext, von der Entdeckung der Eisenanziehung einiger Gesteine in der Umgebung des antiken Magnesia bis zur Erfindung des Dynamos; es folgen die verschiedenen Aspekte des Stroms der fließenden Elektronen, von der Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Arbeit bis hin zu Einsteins Erklärung des fotoelektrischen Effekts, die einen bedeutenden Beitrag zur Quantentheorie lieferte, zu den elektrischen Aktionspotenzialen in den Nervenzellen und schließlich zur Elektronik, die heute in Computern zum Einsatz kommt.

Auch fehlerhafte Experimente bringen die Wissenschaft voran

Selbst so schwierige physikalische Themen wie die maxwellschen Gleichungen werden zum Betrachten als Formeln auf einer Tafel einladend ins Bild gesetzt. »War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?« Bei diesem Zitat aus Goethes »Faust«, das die Bewunderer Maxwells umdeutend auf seine Gleichungen bezogen, darf der Leser erst einmal verschlafen, ehe es an die historische Bedeutung, die vier Formeln in der heutigen Fassung und ihre physikalische Deutung geht. Man kann in den Gleichungen Symmetrien und Asymmetrien sehen, ohne verstehen zu müssen, wie die Veränderungen des elektrischen und des magnetischen Felds in elektromagnetischen Wellen zusammenhängen und wie sich die Quellen beider Felder unterscheiden: Es gibt elektrische, aber keine magnetischen Monopole.

Für Experten sind die Abbildungen eine Fundgrube, aber die Erläuterun-

gen werden ihnen bisweilen zu oberflächlich bleiben. Pädagogen mögen bemängeln, dass die Formelsymbole etwa in den maxwellschen Gleichungen nicht vollständig erklärt sind.

Historiker könnten einwenden, dass nicht die historische, sondern die moderne Fassung dieser Gleichungen zitiert ist oder dass Fischer methodisch problematische Experimente wie Millikans Öltröpfchenversuch oder die bislang einzige Messung eines magnetischen Monopols erwähnt, ohne auf die weitere Entwicklung einzugehen. Immerhin gab es in Millikans Originaldaten gar nicht die eindeutige Verteilung der Messpunkte, mit der sich die Elementarladung verlässlich hätte bestimmen lassen, aber der amerikanische Physiker hatte die richtige Intuition, und Wiederholungen des Experiments konnten dem Mangel abhelfen. Dagegen sind alle weiteren Versuche, einen magnetischen Monopol nachzuweisen, fehlgeschlagen. Diese Experimente illustrieren, wie wissenschaftlich-technische Entwicklung auch durch methodisch ungesicherte oder gar fehlerhafte Daten fortschreitet.

Bei den historischen Abbildungen hätte man sich zusätzlich zum urheberrechtlich korrekten Verweis auf Bildagenturen eine konsequente Nennung der Quellen nach dem Standard historischer Fachbücher gewünscht. Naturwissenschaftler und Technikexperten hätten möglicherweise eine tiefer gehende Behandlung der Themen ihres Fachs bevorzugt. Und Geistes- und Sozialwissenschaftler werden sicherlich nicht jeder Deutung des Autors zustimmen.

Dieses Buch ist jedoch für den Laien geschrieben, der sich für Elektrizität interessiert, aber die physikalisch-technische Materie eher links liegen lassen will. Ihm bietet es einen lesenswerten Überblick, mit vielen überraschenden und bereichernden Einzelheiten.

Katharina Neuser-von Oettingen

Die Rezensentin ist Diplomphysikerin und Wissenschaftspublizistin. Sie hat viele Jahre als Redakteurin und Lektorin gearbeitet, zuletzt für den (wissenschaftlichen) Springer-Verlag.



“WHAT WILL HE GROW TO?”

In dieser Zeichnung aus dem Jahr 1881 fragen sich die Könige Dampf und Kohle mit sorgenumwölkter Miene, was aus dem Säugling Elektrizität wohl werden wird.



Axel Brennicke

Tödliches Geflecht. Ein biologischer Thriller

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2012. 266 S., € 19,95

Ein mutierter Getreidepilz verbreitet sich auf Europas Feldern und vernichtet die Ernten. Wer den giftigen Sporenstaub einatmet, erleidet Krämpfe und stirbt vielleicht sogar. Der junge Molekularbiologe Felix Hildhof und seine französische Kollegin Nicole Duvalle rücken – mittels Gentechnik – dem Pilz und – auf traditionellem Weg – einander zu Leibe. In beiden Fällen mit Erfolg, wie es sich für einen Roman gehört. Bis dahin muss der Leser ausführliche Schilderungen des Laboralltags und viele fachliche Details durcharbeiten; denn Axel Brennicke, Inhaber des Lehrstuhls für Molekulare Botanik an der Universität Ulm, legt Wert auf eine wissenschaftsnahen Darstellung. Wer sie nachvollziehen will, muss gute Vorkenntnisse in Molekularbiologie oder zumindest die Bereitschaft zu intensiver Arbeit mitbringen. Die zahlreichen Seitenhiebe des Autors gegen Politiker und Behörden wirken allerdings etwas platt.

FRANK SCHUBERT



Holger Dambeck

Je mehr Löcher, desto weniger Käse. Mathematik verblüffend einfach

Kiepenheuer & Witsch, Köln 2012. 240 S., € 8,99

Das Fach Mathematik spaltet »die Menschen in zwei Lager ... wie kein anderes. Die einen lieben es, die anderen bekommen Alpträume.« So Holger Dambeck, Autor der Kolumne »Numerator« bei »Spiegel online« und Träger des Journalistenpreises der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, der ohne Zweifel zum ersten Lager zählt. Die Aufgaben, die er jedem Kapitel beifügt, rufen zwar nach einer Lösung mit Schulmitteln. Aber im Übrigen bringt er – mit Hilfe klassischer Beispiele – dem Leser nahe, dass Mathematik eine kreative, geradezu künstlerische Tätigkeit ist und eben nicht das sinnentleerte Einsetzen irgendwelcher Zahlen in unverstandene Formeln. Er selbst hat zwar als Schüler an Mathematik-Olympiaden teilgenommen, aber dann doch lieber Physik studiert – aus Sorge, vor lauter Abstraktion den Kontakt zur realen Welt zu verlieren.

CHRISTOPH PÖPPE



Lone Frank

Mein wundervolles Genom. Ein Selbstversuch im Zeitalter der persönlichen Genforschung

Aus dem Englischen von Ursel Schäfer. Hanser, München 2011. 336 S., € 19,90

Das Buch ist besser, als der Titel befürchten lässt. Die dänische Biologin und ehemalige Hirnforscherin Lone Frank hat ihr eigenes Genom und das ihrer Verwandten von verschiedenen kommerziellen und medizinischen Stellen analysieren lassen und schildert freimütig ihre Erfahrungen. Das ist spannend zu lesen; zudem bieten die zahlreichen Hintergrundgespräche mit Wissenschaftlern, Ärzten und Industrievertretern neben einer Menge Information auch Kurzweil. Frank versteht es, schwierige Sachverhalte gut verständlich, in klaren Bildern und erfrischend lebendig zu beschreiben. Wer sich einen Einblick in das rasant expandierende Feld der individuellen Gen- und Genomanalysen verschaffen möchte, bekommt hier viel geboten, darunter auch typische Missverständnisse – und das Ganze ist oft mit Humor und gesunder Skepsis garniert.

ADELHEID STAHNKE



Gero Vogl

Wege des Zufalls. Tanz der Atome, Invasion neuer Arten, Ausbreitung von Seuchen und Sprachen

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2011. 208 S., € 17,95

Wenn ich eine Eisenstange an einem Ende erhitze, ist bald auch das andere Ende warm. Der französische Physiker Joseph Baptiste Fourier (1768–1830) schrieb ein grundlegendes Buch über solche Wärmeströme, obwohl man damals noch gar nicht genau wusste, was da eigentlich strömt. Dann untersuchte der deutsche Physiologe Adolf Fick (1829–1901), wie Teilchen diffundieren – und entdeckte, dass sein Ausbreitungsgesetz mit Fouriers Formel exakt übereinstimmt. Damit ist die Geschichte des Diffusionsbegriffs aber noch lange nicht zu Ende. Der österreichische Physiker Gero Vogl fand 1976 ein spezielles Gesetz dafür, wie radioaktive Teilchen durch Festkörper wandern, und erforscht seither in interdisziplinären Arbeitsgruppen die unterschiedlichsten Diffusionsphänomene – von der Ausbreitung biologischer Arten bis zu der von Seuchen, Sprachen und Kulturen. Darüber hat er ein ungemein lebendiges und überhaupt nicht diffuses Buch geschrieben.

MICHAEL SPRINGER



Josef H. Reichholf

Der Ursprung der Schönheit

Darwins größtes Dilemma

C.H.Beck, München 2011. 304 S., € 19,95

ZOOLOGIE

Prachtfedern zum Wegwerfen

Heute ist das Pfauenrad ein Mittel, um die Weiblichkeit zu beeindrucken. Aber ursprünglich entstand es zur Müllentsorgung.

Nach herkömmlicher Auffassung haben die Männchen etlicher Tierarten das Pech, sich mit einem Handicap ablagen zu müssen: sperrige Geweihe oder Gehörne, grellbuntes Gefieder, ellenlange Mähnen oder halsbrecherische Balzrituale. Den Pfauenhahn kostet sein imposantes Schwanzgefieder einen ungeheuren Aufwand an Energie, es belastet ihn auf Schritt und Tritt, macht seine Feinde auf ihn aufmerksam, behindert ihn bei der Flucht und versperrt ihm – im aufgefächerten Zustand – die Sicht nach hinten.

Nach Darwins Theorie der sexuellen Selektion haben sich solche extravaganten körperlichen Merkmale und Verhaltensweisen entwickelt, weil die Weibchen anhand dieser Eigenschaften ihren Paarungspartner wählen. Ein zufällig entstandenes derartiges Merkmal und dessen ebenso zufällige Bevorzugung durch die Weibchen hätten sich im Lauf der Evolution gegenseitig verstärkt. Im Extremfall könne eine Art durch dieses Wettrüsten der Männchen am Ende in eine evolutionäre Sackgasse geraten.

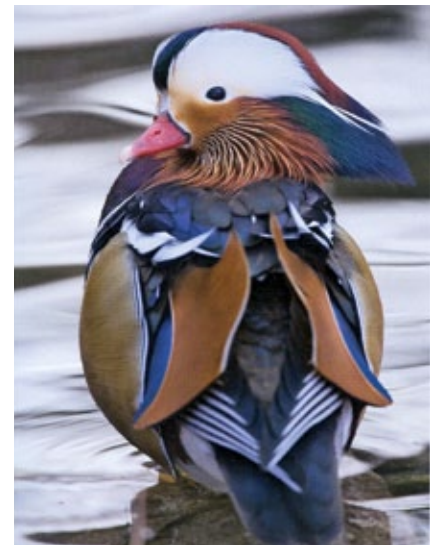
Die Handikap-Theorie der israelischen Biologen Amotz und Avishag Zahavi fügt Darwins Überlegungen ein entscheidendes Argument hinzu: Je kräftiger und widerstandsfähiger ein Männchen ist, desto eher ist es in der Lage, trotz schwerer Handikaps in einer feindlichen Umwelt zu überleben. Gerade deswegen zeigen die hinderlichen Merkmale den Weibchen zuverlässig

an, wie es um die körperliche und genetische Fitness ihrer Freier bestellt ist.

In diese Diskussion bringt der Münchner Zoologe Josef Reichholf nun eine neue, überraschende These: Das vermeintliche Handicap ist in Wirklichkeit gar keins. Während die Erpel ihr farbenprächtiges Brunftkleid tragen (Bild), werden sie nicht häufiger gefressen als im Schlichtkleid. Dem Pfauenhahn dient das luxuriöse Prachtgefieder gegen seinen einzigen ernst zu nehmenden Fressfeind, den Leoparden, als Schutzschild gegen einen Angriff von hinten. Im äußersten Notfall kann er sich seines Schmucks durch »Schreckmauser« entledigen und damit dem Leoparden statt seiner selbst einen unappetitlichen Haufen Federn zum Fraß vorwerfen. Außerdem erzeugen seine Zierfedern im Dschungel ein Flimmern und Glitzern, das seinen Feinden das Erkennen erschwert.

Der auffällige Körperschmuck hat noch eine weitere, unerwartete Funktion: Er dient als Sondermülldeponie. Tropische Vögel ernähren sich in erster Linie von Früchten, die reich an Farbstoffen sind. Da das Zeug für sie teils giftig, teils nutzlos ist, deponieren sie es in ihren Federn, wo es keinen Schaden anrichten kann. Das gilt auch für die weniger auffälligen braunen und schwarzen, melaninhaltigen Pigmente der Vögel in anderen Klimazonen.

Das sei, so vermutet Reichholf, sogar die ursprüngliche Funktion der Federn gewesen, bevor sie zum Fliegen »zweck-



Der Erpel der Mandarinente *Aix galericulata* hat von seinem Prachtkleid keine Nachteile. Seine Überlebensrate ist sogar höher als die des Weibchens.

entfremdet« wurden. »Die Feder ist ein Produkt des Stoffwechsels, und zwar entstanden aus ... Eiweißbestandteilen, die Schwefel enthalten. Würden die, wie bei Säugetieren, im Körper abgebaut werden müssen, entstünde giftiger Schwefelwasserstoff«, und zwar bei Vögeln wegen ihrer hohen Stoffwechselintensität in so großen Mengen, dass sie das Abfallproblem anders als die Säuger nicht allein durch Ausscheiden lösen könnten.

Ein Weibchen investiert einen Teil seiner Energie und seiner Stoffwechselprodukte in den Nachwuchs. Das Männchen – einigermassen vergleichbaren Stoffwechsel vorausgesetzt – muss diesen Anteil auf andere Weise loswerden. Was beispielsweise die Pfauenhenne an Proteinen für die Erzeugung von Eiern von ihrem Körper abgibt, steckt der Hahn in sein Prachtgefieder. Die Herstellung der Eier verschlingt so viel Energie wie die der langen Schwanzfedern. Und der Energieaufwand der Henne fürs Brüten entspricht dem, was der Hahn aufbringen muss, um seine Schmuckfedern zum Rad aufzustellen und sie rascheln zu lassen.

Das Prachtgeweih des Hirschbocks enthält so viel Kalziumphosphat, wie die Hirschkuh zum Aufbau der Kno-

chen ihrer Kälber investiert hat. »In der Bilanz entsprechen diese Spitzenleistungen des mütterlichen Stoffwechsels den Investitionen der Hirsche in ihr Geweih und ihr Gewicht. Männliches Brunftgehebe wäre somit geradezu ein physiologisches Abbild der weiblichen Schwangerschaft.« Und wo die Zusammensetzung der Nahrung diese Depo-niefunktion nicht erzwingt, umwerben die Männchen ihre Partnerinnen weniger durch Körperschmuck als durch akrobatische Balz oder Gesangskunst.

Reichholf gelangt am Ende zu dem Resultat, dass als »schön« schlicht die-

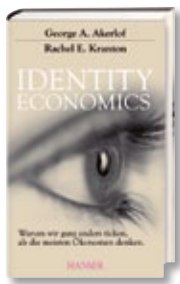
jenigen Attribute aufzufassen sind, an denen die Weibchen erkennen können, ob die Männchen gesund und mit guten Genen ausgerüstet sind und ob sie im Stande sind, genügend zur Versorgung des Nachwuchses beizutragen. Dabei ist jede Form der Symmetrie ein Anzeichen dafür, dass die körperliche Entwicklung ohne größere Störungen verlaufen ist und das Immunsystem gut funktioniert.

Das sind keine neuen Einsichten. Dafür ist umso verblüffender, was Reichholf über die verwickelten Beziehungen zwischen ökologischen Bedingungen,

Stoffwechselprozessen und den Mechanismen der sexuellen Selektion zu sagen hat. Seine gewagte, aber empirisch leicht überprüfbare Theorie kann darüber hinaus schlüssig erklären, warum die sexuelle Selektion nicht bei allen Tierarten wirkt, warum sie sich von Art zu Art unterschiedlich auswirkt und was den in der Menschenwelt geltenden Schönheitsvorstellungen zu Grunde liegt. Ein exzellentes Buch.

Frank Ufen

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Marne.



George A. Akerlof, Rachel E. Kranton

Identity Economics

**Warum wir ganz anders ticken,
als die meisten Ökonomen denken**

Aus dem Amerikanischen von Helmut Dierlamm.

Hanser, München 2011. 208 S., € 19,90

WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT

Noch ein Angriff auf den Homo oeconomicus

Wir legen in unserem Leben nicht nur Wert auf unseren Nutzen, sondern auch auf unsere »Identität«: die Zugehörigkeit zu einer sozialen Gruppe.

Der reißerische Untertitel täuscht. Dieses Buch ist eben nicht einer jener Bestseller, die eine neue, »ganz andere« Erklärung für ökonomische Phänomene versprechen, geläufige Vorurteile von der Weltfremdheit der Theoretiker bedienen und dann an Stelle konkreter Gegenentwürfe doch nur unverdautes Faktenwissen und einige Verschwörungstheorien anbieten. George A. Akerlof (Jahrgang 1940), Professor an der University of California in Berkeley, ist geradezu das Musterbeispiel eines seriösen Wirtschaftswissenschaftlers.

Bekannt wurde er vor allem durch Arbeiten über das Funktionieren von Märkten bei unvollständiger Information, die heute zum Basiswissen jedes

Ökonomen gehören. 2001 erhielt er den Wirtschaftsnobelpreis; sein Mitpreisträger Joseph Stiglitz und er gründeten 2009 das von George Soros finanzierte Institute for New Economic Thinking. Seine Fachkollegin Rachel E. Kranton, eine Generation jünger als Akerlof, ist Professorin an der Duke University und hat sich vor allem mit der Übertragung soziologischer Ansätze in die Ökonomie beschäftigt.

Genau zu diesem Thema hatte sie bereits 1995 in einer Kritik an einem Aufsatz Akerlofs ein Defizit der Forschung beklagt. Die Wirtschaftswissenschaft verfüge noch nicht über die notwendigen analytischen Mittel, um das empirische Material zu verwerten, das die soziologische Forschung in den letz-

ten Jahrzehnten bereitgestellt habe. Die Integration dieser Ergebnisse werde ein realistischeres Menschenbild liefern und damit auch zu einer erfolgreichen Gestaltung von Institutionen und von Wirtschaftspolitik verhelfen. Aus der Kritik erwuchs eine mehrjährige Zusammenarbeit; deren Ergebnisse stellt das vorliegende Buch in populärwissenschaftlicher Form dar.

Zentrale Aussage der neuen Forschungsrichtung namens »Identitätsökonomie«: Anders als in der klassischen Wirtschaftswissenschaft dargestellt, lassen sich die Menschen nicht nur von ihren individuellen Vorlieben leiten, sondern ganz wesentlich auch von den Normen des sozialen Umfelds, dem sie sich zugehörig fühlen. Diese beiden Triebkräfte treten gelegentlich in Widerspruch zueinander; dann muss der Mensch abwägen, ob ihm die Befriedigung der eigenen Bedürfnisse oder die Bestärkung seiner »Identität« durch Erfüllung der Normen wichtiger ist. Der Erklärungsansatz unterscheidet sich grundsätzlich von dem traditionellen, nach dem der Mensch eine Norm nur befolgt, weil ihm ihre Einhaltung einen Nutzen und ihre Nichteinhaltung einen negativen Nutzen – in Form von Strafe – einbringt.

Die Grundaussage der Identitätsökonomie wird niemand bestreiten wollen, auch kein hartgesottener Mainstream-Ökonom. Welchen Erkenntnisgewinn die Ökonomie damit erzielen kann, ist zwar nicht unmittelbar einsichtig; aber

die Autoren demonstrieren das durch die Anwendung auf vier verschiedene Teilgebiete. Zwei davon seien durch Beispiele aus dem Buch erläutert:

► Ökonomen pflegen in der Arbeitswelt traditionell die leistungsabhängige Bezahlung zu empfehlen. Das gestaltet sich in der Praxis häufig schwierig, zum Beispiel weil sich Leistung in Teams schwer individuell zurechnen lässt oder weil die Zielkriterien nicht der komplexen Wirklichkeit entsprechen. Die Identitätsökonomie betont stattdessen die intrinsische Motivation: Man organisiere die Arbeit so, dass die Identifikation der einzelnen Beschäftigten mit den Zielen des Unternehmens gefördert wird.

► Nach der klassischen Theorie erzielen bestimmte Schultypen bessere Lernerfolge, weil die Schüler sich von dem Abschluss ein höheres Einkommen versprechen und die Schule sich bessere Lehrer und eine bessere Ausstattung leistet. Dagegen weiß die empirische Bildungsforschung anzuführen, dass verschiedene Schulen, die in dieser Hinsicht vergleichbar sind, höchst unterschiedliche Erfolge erzielen. Nach der Identitätsökonomie kommt es auch hier zuerst darauf an, dass die Schüler (und die Lehrer!) sich mit den Zielen ihrer Schule identifizieren.

Ähnliche Antworten gibt die neue Theorie zu den Themen geschlechtliche Diskriminierung am Arbeitsmarkt und Armut bei ethnischen Minderheiten.

Noch hat die Identitätsökonomie eine Außenseiterrolle. Aber die Autoren verweisen zu Recht darauf, dass auch andere Neuerungen in der Wirtschaftswissenschaft, die zu Anfang nicht ernst genommen wurden, heute dort zum Allgemeingut gehören: Marktstrukturen jenseits von Monopol und vollständigem Wettbewerb, Marktergebnisse bei unvollständiger Information, individuelles Verhalten jenseits von reiner Rationalität. Um ihrem geistigen Kind zu einem ähnlichen Durchbruch zu verhelfen, geben sie ihm noch ein paar Ratschläge zur zukünftigen Forschung mit auf den Weg: mehr »Beobachtungen des Kleinen«, mehr Laborexperimente in der Ökonomie, wie zum Bei-

spiel Reinhard Selten in Bonn und Ernst Fehr in Zürich sie etabliert haben.

Allerdings verbinden sie dieses überzeugende Plädoyer mit einer übermäßigen Skepsis gegenüber statistisch-ökonomischen Untersuchungen: »Selbst bei einem ausgesprochen blödsinnigen Modell wird es kaum gelingen, seine Milliarden von Spezifikationen alle zu widerlegen.« Soweit damit die in den Wirtschaftswissenschaften gelegentlich anzutreffende Strategie gemeint ist, auf statistische Widerlegungen mit neuen Modellvarianten zu reagieren, kann man dem Vorwurf nur zustimmen. Allerdings schießen die Autoren damit über das Ziel hinaus, denn es muss immer beides geben: die Überprüfung theoretisch abgeleiteter Hypothesen und die Bildung von Theorien aus Fallstudien und Einzelbeobachtungen.

Fazit: Akerlof und Kranton präsentieren viele überzeugende Beispiele für die Relevanz von – häufig unausgesprochenen – Normen im sozialen Umfeld. Auf diese Weise stellen sie den überzogenen Anspruch mancher Ökonomen, auch soziale Phänomene auf ökonomische Anreize zurückführen zu können, überzeugend in Frage.

Das theoretische und empirische Material stammt überwiegend aus soziologischen Arbeiten, die bis in die 1960er Jahre zurückreichen und unter Soziologen heute vermutlich zum Allgemeinwissen gehören. Mit der Anwendung in der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur betreten die Autoren gleichwohl Neuland – und demonstrieren nebenbei, dass Ökonomen und Verhaltenswissenschaftler, gelegentlichen interdisziplinären Versuchen zum Trotz, seit Jahrzehnten viel zu wenig miteinander reden.

Alles in allem ein mit Gewinn zu lesendes Buch, das auch dem Nichtökonom nicht allzu viel an Vorkenntnissen abverlangt.

Markus Diehl

Der Rezensent ist Diplomvolkswirt und Analyst im Risikomanagement der WestLB AG; zuvor war er wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Weltwirtschaft in Kiel.

DEMNÄCHST IM KINO

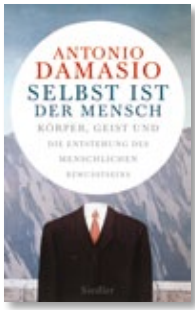


SCHILF

ALLES, WAS DENKBAR IST, EXISTIERT

Ein Film von Claudia Lehmann
NACH DEM BESTSELLER VON JULI ZEH

GEWINNEN SIE
EINE REISE ZUM CERN
MIT WITTMANN TRAVEL.
MEHR INFOS UNTER
WWW.SCHILF.X-VERLEIH.DE



Antonio Damasio
Selbst ist der Mensch
Körper, Geist und die Entstehung des menschlichen Bewusstseins
 Aus dem Amerikanischen von Sebastian Vogel.
 Siedler, München 2011, 368 S., € 24,99

NEUROWISSENSCHAFT

Geist + Selbst = Bewusstsein oder so

Antonio Damasio versucht, das menschliche Ich auf biologischer Basis zu erklären.

In seinem berühmt gewordenen Vortrag »Über die Grenzen des Naturerkennens«, die der Physiologe und Philosoph Emil Du Bois-Reymond 1872 vor der 45. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Leipzig hielt, erklärte er unter anderem, »dass nicht allein bei dem heutigen Stand unserer Kenntniss das Bewusstsein aus seinen materiellen Bedingungen nicht erklärbar ist, was wohl jeder zugiebt, sondern dass es auch der Natur der Dinge nach aus diesen Bedingungen nie erklärbar sein wird«. Er schloss seine Rede mit dem Ausspruch »Ignorabimus« – wir werden es niemals wissen.

Von diesem ungeheuer einflussreichen Diktum lässt sich Antonio Damasio nicht anfechten. Der portugiesische, heute an der University of Southern California in Los Angeles lehrende Neurowissenschaftler unternimmt den kühnen Versuch, die Entstehung des Bewusstseins vor dem Hintergrund neuer Erkenntnisse der Hirnforschung zu entschlüsseln. Auch er hält den bewussten Geist für rätselhaft, aber im Gegensatz zu Du Bois-Reymond das Rätsel für lösbar.

Nach Damasio baut sich das menschliche Bewusstsein in drei Stufen auf. Die unterste, die er »Protoselbst« nennt, ist im Hirnstamm lokalisiert; es handelt sich um eine »integrierte Ansammlung verschiedener neuronaler Muster, die in jedem Moment die stabilsten Aspekte der physischen Struktur des Organismus kartieren«: eine neuronale Blaupause der inneren Struktur des Organismus. Diese »interozeptiven Karten« geben aber nicht nur den inneren

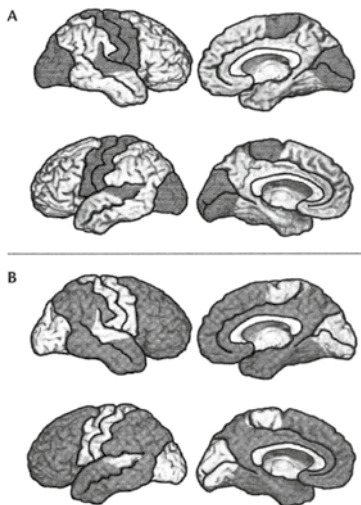
Zustand des Körpers wieder, sie erzeugen auch »ursprüngliche Gefühle«, die allen anderen Gefühlen vorausgehen sollen. Mit dieser These geht Damasio ganz nebenbei von der Vorstellung ab, das menschliche Bewusstsein habe seinen ausschließlichen Sitz in der Großhirnrinde.

Auf der nächsten Stufe entsteht das »Kern-Selbst«, das sich vom Protoselbst insofern fundamental unterscheidet, als es erstmals über einen Protagonisten und somit über Subjektivität verfügt. Es entsteht, wenn das Protoselbst »durch eine Interaktion zwischen dem Organismus und einem Objekt verändert wird«. In der Folge richten sich verstärkt Verarbeitungsressourcen auf das Objekt, was man allgemein als »Aufmerksamkeit« bezeichnet. »Das Kern-Selbst entsteht dann durch Verknüpfung des abgewandelten Protoselbst mit dem Objekt, das für die Abwandlung gesorgt hat und jetzt durch Gefühl gekennzeichnet sowie durch Aufmerksamkeit verstärkt wurde.«

Die dritte und letzte Stufe, das »autobiografische Selbst«, entsteht, indem Erinnerungen als je einzelne Objekte »das Protoselbst abwandeln und einen Impuls des Kern-Selbst auslösen«. Dabei verfügt das Gehirn über verschiedene Hilfsmittel wie Thalamus und Claustrum, um die zahlreichen Erinnerungsobjekte zu koordinieren.

Damasio erkennt den Emotionen »als automatisch ablaufende, von der Evolution gestaltete Programme für Handlungen« eine herausragende Bedeutung beim Aufbau des Bewusstseins zu. Mit dieser bemerkenswerten These verschiebt er nicht nur den Ursprung des Bewusstseins auf physiologische Prozesse der Lebenssteuerung; er übernimmt auch, zumindest im Ansatz, die bahnbrechende Kognitionstheorie der chilenischen Neurobiologen und Konstruktivisten Humberto Maturana und Francisco Varela und bewegt sich so am Rande eines panpsychistischen Ansatzes mit all seinen verwickelten philosophischen Implikationen, die er aber nicht weiterverfolgt.

Leider sieht er das Gehirn, als Zentrum des »Lebensmanagements«, ledig-



Der Bilderraum (dunkel schattiert in Teil A) besteht aus Gehirnteilen, die Bilder erzeugen oder auch mit Bewegungen zu tun haben. Sie wirken wie Inseln im Dispositionsraum (dunkel schattiert in Teil B). Dieser lenkt die Bild-erzeugung, ist aber nicht selbst daran beteiligt.

lich als Produkt der Evolution mit der Funktion, die Chancen im Kampf ums Überleben zu maximieren. Dabei übersieht er, dass das Gehirn in Wahrheit ein »Luxusorgan« (Arthur Koestler) ist, wo doch die Evolution bekanntlich keinen Luxus, sondern lediglich Effizienz kennt. Er ignoriert somit auch all die Irrationalitäten, die mit dem Aufkommen des Bewusstseins einhergehen und im Kampf ums Überleben eher kontraproduktiv sind.

Darüber hinaus kann auch Damasio nicht im Ansatz die Frage beantworten – und hat nie ernsthaft für sich in Anspruch genommen, sie beantworten zu können –, die der australische Philosoph David Chalmers als »hard problem of consciousness« bezeichnet: Wie kann etwas Immaterielles wie Bewusstsein aus etwas Unbewusstem wie Materie entstanden sein?

Das Buch enthält zweifellos einige interessante Aspekte zur Entstehung

des menschlichen Bewusstseins, ist aber auf weiten Strecken äußerst schwammig bis unwissenschaftlich formuliert (»Gefühle sind spontan gefühlte Bilder«). Hier zeigt sich einmal mehr, dass die Hirnforschung im Ganzen unter zwei fundamentalen Problemen leidet. Zum einen verfügt sie über eine äußerst beschränkte Methode, da sie lediglich zeigen kann, welche Gehirnregionen bei gewissen Handlungen aktiv sind, und keinerlei wirklichen Einblicke in ihr Untersuchungsobjekt hat. Zum anderen wird sie so lange an der Frage nach dem Ursprung des Bewusstseins scheitern, solange sie, wie auch Damasio, eine rein biologische Erklärung dieses Phänomens auf Basis eines materialistischen Reduktionismus ohne Einbeziehung systemischer Ansätze für möglich hält.

Du Bois-Reymond, der neben dem Bewusstsein auch die Frage nach dem ontologischen Status von Kraft und

Materie für unlösbar hielt, war da bereits weiter, indem er den Gedanken äußerte, »ob die beiden Grenzen unseres Naturerkennens nicht vielleicht die nämlichen seien, d. h., ob, wenn wir das Wesen von Materie und Kraft begriffen, wir nicht auch verständen, wie die ihnen zu Grunde liegende Substanz unter bestimmten Bedingungen empfindet, begehrt und denkt«. In die Gegenwart projiziert: Ohne eine ontologische Neuausrichtung, welche die Materie so beschreibt, wie die Physik das seit fast 100 Jahren tut, nämlich als reine Beziehungsstruktur ohne materiellen Träger, wird die Modewissenschaft Hirnforschung sehr bald an ihre Grenzen stoßen, wenn sie diese nicht schon erreicht hat.

Eckart Löhr

Der Rezensent hat Philosophie und Literatur studiert; er ist Musiker und schreibt für diverse Onlinemagazine.



Stephen L. Macknik, Susana Martinez-Conde,
Sandra Blakeslee

Die Tricks unseres Gehirns

Wie die Hirnforschung

von den großen Zauberern lernt

Aus dem amerikanischen Englisch

von Maren Klostermann. Kreuz, Freiburg 2011.

320 S., € 24,95. Videos zum Buch auf

www.sleightsofmind.com/media/ (englisch)

HIRNFORSCHUNG

Die junge wilde Wissenschaft von der Zauberei

Zwei Neurowissenschaftler wissen spannende Neuigkeiten über die Illusionen mitzuteilen, die unser Gehirn erzeugt. Nur mit dem Aufschreiben hätten sie sich etwas mehr Zeit lassen sollen.

Unser Gehirn lässt sich unter bestimmten Bedingungen nicht nur relativ leicht täuschen; es erzeugt auch selbst ständig Illusionen, die von seinem Besitzer unbemerkt bleiben. Das beginnt beim sprichwörtlichen blinden Fleck in unserem Auge: Wir sehen nicht,

dass wir an dieser Stelle der Netzhaut nichts sehen (können), da das Gehirn die Informationen der dort fehlenden Rezeptoren einfach auffüllt. Andere Täuschungen betreffen die höheren, kognitiven Ebenen des Denkens und des Bewusstseins.

Hirnforscher versuchen mit Hilfe dieser Mechanismen einen Blick hinter die neuronalen Kulissen unseres Denkorgans zu werfen; Zauberkünstler nutzen sie für ihre eigenen Zwecke. Da liegt es nahe, durch die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Zauberkunst, von Dopamin und Merlin, nach neuen Erkenntnissen über die Funktionsweise des Gehirns zu streben.

Das ist das erklärte Ziel von Stephen L. Macknik, Chef des Laboratory of Behavioral Neurophysiology am Barrow Neurological Institute in Phoenix (Arizona), und seiner Ehefrau Susana Martinez-Conde, die das Laboratory of Visual Neuroscience am selben Institut leitet (siehe auch deren Artikel in Spektrum der Wissenschaft 12/2007, S. 54, und 6/2009, S. 44). Für das vorliegende Buch haben sie die Hilfe der Wissenschaftsjournalistin Sandra Blakeslee in Anspruch genommen.

Zahlreiche Anekdoten und Berichte von Besuchen bei Zauberkongressen, persönliche Interviews mit einigen der weltbesten Zauberkünstler und – als roter Faden – die einjährige Vorbereitung auf die Aufnahmeprüfung für

den renommierten Zauberclub des Magic Castle in Hollywood, die »Academy of Magical Arts and Sciences«, bilden das erzählerische Gerüst für das eigentliche Thema: die tricktechnischen und psychologischen Prinzipien der Zauberkunst sowie deren Verknüpfung mit dem Wissen der Forscher über die neuronalen und kognitiven Mechanismen unseres Gehirns.

Ein Beispiel: Das Phänomen der Aufmerksamkeitsblindheit ist in den letzten zehn Jahren vor allem durch das »Basketballexperiment« der Psychologen Daniel Simons und Christopher Chabris zu großer Popularität gelangt (Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 96) und hat mittlerweile unzählige weitere Studien inspiriert. Mehr als die Hälfte aller Versuchspersonen übersehen beim Betrachten eines kurzen Videoclips von sechs Basketball spielenden Studenten einen weiteren Menschen, der in einem Gorillakostüm mitten durch das Bild geht – und zwar langsam. Dem vorinformierten Beobachter scheint es geradezu unglaublich, dass eine so große, auffällige Figur einfach unbemerkt bleibt – auch wenn ihm selbst wenige Minuten zuvor genau das passiert ist.

Das Wesentliche ist nicht die Geschwindigkeit, sondern zum einen die korrekte Choreografie der Spieler und zum anderen die verbale Anweisung des Versuchsleiters (»Zählen Sie bitte die Pässe der weiß bekleideten Mannschaft!«). Das ist für Zauberkünstler nichts Neues: Sie setzen den begleitenden Vortrag als eines der Hauptmittel ein, um die Aufmerksamkeit des Publikums von den notwendigen Trickhandlungen abzulenken.

Ein weiteres Kapitel bringt neurowissenschaftliche Erkenntnisse über die Wirkung von Gesten, Blickrichtung und Augenbewegungen zur Steuerung der Aufmerksamkeit und erläutert, wie ein Zauberkünstler sie einsetzt, wenn er scheinbar eine Münze oder gar einen ganzen Ball aus seiner Hand verschwinden lässt.

Hier bewegen sich die Autoren auf experimentell gesichertem Terrain, da sie die Ergebnisse der (noch spärlichen)

Studien referieren, die Zauberkunst im Labor untersucht haben. Merkwürdigerweise haben sie selbst jedoch noch kein einziges Experiment auf dem – von ihnen laut Klappentext angeblich begründeten – Gebiet der »Neuromagie« veröffentlicht. Fast alle Zauberkunstexperimente stammen von dem Psychologen und Amateurzauberkünstler Gustav Kuhn von der Brunel University in London. Seit 2005 untersucht er Zauberkunststücke im Labor durch Messung der Augenbewegungen (»eye-tracking«) und mit Hilfe der funktionellen Kernspintomografie (fMRI). Zudem haben bereits vor über 100 Jahren die Psychologen Norman Triplett und Joseph Jastrow eine Doktorarbeit beziehungsweise Theorieaufsätze über die Psychologie der Zauberkunst in Fachjournalen veröffentlicht.

Im weiteren Verlauf des Buchs diskutieren Macknik und Martinez-Conde hauptsächlich weitere Erkenntnisse der Hirnforschung und interessante Verbindungen zu den Methoden der Zauberkunst – darunter das Phänomen der falschen Erinnerungen, die Neigung unseres Gehirns zu impliziten Annahmen und kognitiven Verzerrungen sowie die Mitte der 1990er Jahre bei Experimenten mit Affen entdeckten Spiegelneurone, deren Existenz beim Menschen in der Fachwelt allerdings noch umstritten ist.

Auf die übliche Frage »Wozu ist das nützlich?« führen die Autoren die Aussicht auf einen Früherkennungstest für Autismus an, der auf Zauberkunst beruht. Dem liegt die Hypothese zu Grunde, autistisch veranlagte Menschen seien auf Grund ihrer Defizite in der zwischenmenschlichen Kommunikation weniger empfänglich für die Ablenkungsmethoden der Zauberkünstler und müssten daher viel leichter deren Tricks durchschauen. Das klingt plausibel, nur ist bei einer ersten Studie dazu – ebenfalls von Gustav Kuhn – das genaue Gegenteil herausgekommen, was die Autoren mit keinem Wort erwähnen: Die autistischen Kinder waren leichter abzulenken und durchschauten das Kunststück weniger oft als ihre gesunden Altersgenossen.

Da es auf diesem jungen Gebiet erst sehr wenige echte Experimente gibt, bleiben viele Vermutungen hochspekulativ. Noch weiß niemand, ob der Mensch unter der Wirkung des Bindungshormons Oxytozin leichter ablenkbar ist oder ob er dank seiner Spiegelneurone eine Zaubervorstellung besser genießen kann, wenn er zuvor einige wenige Tricks erlernt hat.

Simons und Chabris haben ihr Buch erst zehn Jahre nach ihrer Basketballstudie geschrieben. Der ebenfalls zitierte Daniel Kahneman, gemeinsam mit Amos Tversky Begründer der Verhaltensökonomie, hat sich seit seinen bahnbrechenden Forschungen (Spektrum der Wissenschaft 3/1982, S. 89) immerhin 30 Jahre Zeit gelassen, bis er jüngst seine Erkenntnisse in dem populärwissenschaftlichen Buch »Thinking, Fast and Slow« niederlegte. Auch das vorliegende Buch wäre vielleicht besser zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht worden, mit weniger Anekdoten, dafür aber mehr inhaltlicher Stringenz und wissenschaftlicher Substanz. Außerdem hätte der deutschen Ausgabe das Gegenlesen durch einen Zauberkünstler gutgetan, um zahlreiche sinnentstellende Übersetzungsfehler von Fachbegriffen aus der Zauberkunst zu vermeiden.

Auf Grund seiner amorphen Mischung aus wissenschaftlichen Erklärungen, persönlichen Anekdoten und Lebensratschlägen ist das Buch nur bedingt empfehlenswert. Darüber hinaus sind die Behauptungen über die psychologischen und neuronalen Grundlagen von Zauberkunst mit Vorsicht zu genießen.

Es wäre schon eine seltsame, selbstbezügliche Ironie, wenn der Leser eines Buchs über wissenschaftliche Erklärungen von Illusionen selbst einer solchen erliegen würde.

Thomas Fraps

Der Autor ist Diplomphysiker und stellt als professioneller Zauberkünstler seit 17 Jahren erfolgreich (fast) alle Naturgesetze auf den Kopf, die er im Studium erlernt hat. Eine Kostprobe seiner Kunst finden Sie unter: www.spektrum.de/zauberei



Claudia Lehmann (Regie)

Schilf

Alles, was denkbar ist, existiert

Nach dem Roman »Schilf« von Juli Zeh

Mit Stipe Erceg, Mark Waschke
und Bernadette Heerwagen

X-Verleih, Berlin. 90 Minuten,

Kinostart: 8. März 2012

PHYSIKERSPIELFILM

Konfusion in parallelen Welten

Ein Krimi lebt davon, die Frage »Wer war's?« möglichst schwierig zu stellen und kunstvoll zu lösen. Im Multiversum sind alle Fragen noch viel schwieriger – aber der Krimi ist dadurch nicht besser geworden.

Der Spielfilm »Schilf« wagt es, zwei Physiker zu präsentieren, die darüber streiten, wie man die Quantenphysik verstehen soll. Sebastian vertritt in seinen Vorlesungen an der Universität Jena die Vielweltheorie, wonach alles quantenmechanisch Mögliche in Parallelwelten realisiert ist. Oskar arbeitet am CERN bei Genf und hält überhaupt nichts von den Spekulationen seines Freundes – unter anderem mit dem ziemlich komischen moralischen Einwand, im Multiversum wäre jedes Verbrechen erlaubt, weil es nur in einer einzigen unter unzähligen Welten begangen würde.

Die Regisseurin Claudia Lehmann kennt die im Film gezeigte Arbeitswelt; sie hat am Deutschen Elektronensynchrotron (DESY) promoviert und ist erst danach übers Theater zum Film gelangt. Das Drehbuch beruht auf einem Roman von Juli Zeh; deren Namensgleichheit mit dem Theoretiker H. Dieter Zeh, einem prominenten Verfechter der Vielweltheorie, ist allerdings purer Zufall.

Roman wie Film wollen eine extra spannende Story erzählen und pflöpfen darum der Physikerdebatte eine Krimihandlung auf: Das Kind des einen

Physikers wird entführt, und er begeht einen Mord – oder doch nicht? Wer ist der alte Mann, der plötzlich auftaucht? Ist er am Ende gar der CERN-Physiker, dem es gelungen ist, durch ein Wurmloch aus der Zukunft in die frühere Parallelwelt zurückzukehren und die Tat des Freundes ungeschehen zu machen?

Das ist natürlich reichlich abstrus. Wie im Film selbst einmal gesagt wird, bezieht sich das Vielweltenkonzept auf die Mikrophysik; im Alltag tänzeln wir nicht durch parallele Wirklichkeiten. Für eine Krimihandlung, die ja immer nach der Alltagslogik der Tat sucht, ist

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

ein plötzlicher Weltentausch ebenso störend wie ein Deus ex Machina, der mit göttlicher Macht ins Geschehen pfluscht. Die mit wackelnder Handkamera konventionell aufgebaute Spannung verpufft. Der Zuschauer fühlt sich düpiert.

Das Resultat ist ein Zwitter: halb ein Film über Physiker, halb ein Whodunit ohne Auflösung. Hätte die Regisseurin nur den Mut gehabt, von Physikern zu erzählen, die sich über die Paradoxien der Quantenmechanik den Kopf zerbrechen! Auch solche Leute haben ein Privatleben. Sie wollen Karriere machen, vielleicht intrigieren sie, vielleicht manipulieren sie Daten, verlieben sich in die Frau des Freundes, begehen meinetwegen ein Gewaltverbrechen. Das wäre mir spannend genug, ganz ohne die Konfusion mit vielen Welten.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Maike (Bernadette Heerwagen) und der gemeinsame Sohn Nick (Nicolas Treichel) verlassen Sebastian.

Millionen Jahre alte Bakterien?

»Aus Zechsteinsalze(n), wie sie bergmännisch oder mit Hilfe von Tiefbohrungen gewonnen werden, gelang es, lebende Bakterien zu isolieren. Es wäre durchaus denkbar, daß die Bakterien beim Eintrocknen des Zechsteinmeeres in einem wasserfreien Zustand in dem Salz eingeschlossen wurden und daß sie sich auf diese Weise ihre Lebensfähigkeit bis heute bewahren konnten. Stimmen diese Überlegungen, dann müßte es auch gelingen, lebende Bakterien aus Salzen zu isolieren, die noch älter sind als die vor 180 Millionen Jahren entstandenen Zechsteinsalze.« Kosmos, März 1962, S. 130

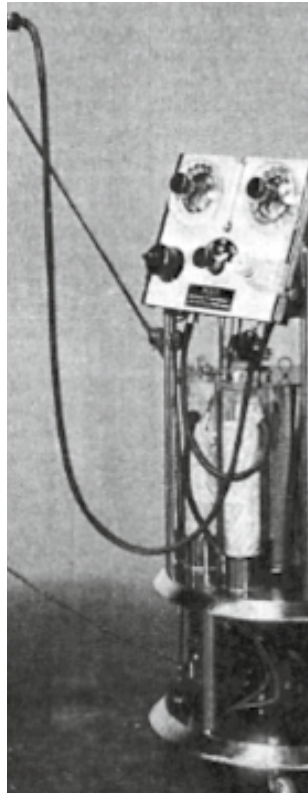
Warnung vor Tsunamis

»Ein Fernmeldekabel zwischen Hawaii und dem amerikanischen Festland soll jetzt vor Tsunamis warnen. Vor zwei Jahren kamen bei einer solchen Naturkatastrophe auf Hilo neunzig Personen ums Leben. Das über 6.000 km lange Tiefseekabel wird mit Druckmessern versehen, danach wieder abgelassen. Die Messgeräte stellen die Wellenhöhe durch die Druckänderung unter der Meeresoberfläche fest.« Populäre Mechanik, März 1962, S. 9



Vom Wetter und Gemüt

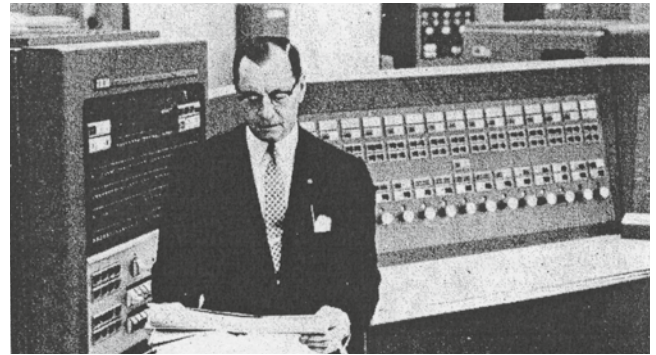
»Allgemein herrscht die Ansicht, daß das Wetter einen Einfluß auf den Organismus ausübt. Prof. W. Trabert von der Wiener Meteorologischen Zentralanstalt hat über diese Fragen exakte wissenschaftliche Untersuchungen angestellt. Es zeigt sich, daß jene Tage physiologisch als schlecht empfunden werden, an denen ein Tiefdruckgebiet die Situation beherrschte oder im Anrücken begriffen war. Als gut werden Tage berechnet, an denen hoher Druck über dem Gebiet lagerte oder das Barometer stieg.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik, März 1912, S. 230



Die Referatmaschine



»Viele Autoren empfinden es als schwieriger, ein 20-Zeilen-Referat ihrer Arbeit zu machen, als die Arbeit selbst zu schreiben. Die IBM 704 ist darauf eingestellt, die am meisten vorkommenden Worte aufzufinden, die Sätze festzustellen, in denen diese Worte am öftesten und am nächsten beieinander vorkommen, und schließlich diese Sätze zu extrahieren.« Elektronik, März 1962, S. 65



Die IBM 704 verarbeitete wissenschaftliche Artikel.

Heilsame Brise

»Wie schnell in den Tropen auch die bösesten Wunden heilen, ist allgemein bekannt. Der wirksame Faktor kann nur die grosse Trockenheit sein, und wirklich lehrt die Erfahrung, dass wenige Bakterien in trockener Luft leben können. Professor Dr. R. Kutner, der Leiter des Kaiserin-Friedrich-Hauses in Berlin, hat nun eine Vorrichtung angegeben und in seiner Praxis benutzt. Der Apparat enthält einen Elektromotor, der einen Ventilator betreibt. Der angesaugte Luftstrom geht in die oben angebrachte Batterie von Trockenflaschen. Die erste enthält flüssiges Paraffin zwecks Reinigung der angesaugten Luft, die zweite und dritte geglühten und mit Schwefelsäure getränkten Bimsstein und die vierte und fünfte Ätzkalk oder Ätznatron. Der Platz für eine sechste Flasche gewährt die Möglichkeit, durch Verdampfung medikamentöser Stoffe einen therapeutischen Effekt zu erteilen. Für Haut- und Wundbehandlung kommen duschenartige Düsen zur Anwendung, während Inhalationen mit Hilfe von Masken und Glasansätzen ausgeführt werden können.«

Prometheus 1170, März 1912, S. 407

Lufttrockner für die Wundheilung

Der erste Frühling der Elektromobilität



BEIDE FOTOS: DEUTSCHES MUSEUM

Dieser Baker Electric »Queen Victoria« wurde in den 1980er Jahren aufwändig restauriert. Dabei erhielt er als Dekor das Wappen des Königs von Siam, der einst ebenfalls ein solches Fahrzeug besaß.

Eine Imageanzeige des Unternehmens von 1912 präsentierte den Baker Electric Coupé als respektables Fahrzeug für jedermann. Elektrowagen galten gemäß gängiger Rollenmuster sogar als für Frauen besonders geeignet.



Elektroautos sind keine Erfindung unserer Tage. Um 1900 galten sie insbesondere in den USA als viel versprechende Option für den Individualverkehr. Dort wurden in jenem Jahr etwa 4200 davon gebaut, knapp ein Drittel aller Fahrzeuge besaßen einen elektrischen Antrieb. Als »The standard of electric vehicles« und »The automobile without repair bill« bewarb die 1899 in Cleveland, Ohio, gegründete Baker Motor Vehicle Company ihre Produkte. Die Wagen seien einfach und zuverlässig, leise und abgasfrei.

Aus dem Jahr 1908 stammt auch der Baker Electric »Queen Victoria« (siehe Foto) mit so genannter Phaetonkarosserie – ähnlich einer offenen Kutsche. Der Zweisitzer wurde von einem Gleichstrommotor mit einer Kilowatt Leistung angetrieben; er befand sich unter dem Wagenkasten beziehungsweise dem Karosserieaufbau. Den Strom lieferten je vier Batterien mit insgesamt 48 Volt, die paarweise vorn und hinten montiert waren. Die Batterien konnten an der hauseigenen Ladestation oder in einer Servicegarage aufgeladen werden. Zur Steuerung diente ein Lenkhebel; sechs verschiedene Geschwindigkeiten ließen sich über einen weiteren Hebel links neben dem Fahrersitz anwählen. Die Bremsen betätigte der Fahrer über Fußpedale. Laut Firmenwerbung sollte eine Batterieladung für eine Reichweite von 80 bis 100 Kilometer sorgen, tatsächlich waren es nur etwa 50 Kilometer.

Doch das genügte den Bedürfnissen vieler Käufer, die dafür ein leicht zu bedienendes, emissionsarmes Auto erhielten – ein Vorteil gegenüber den lärmenden und mitunter komplizierten Benzinwagen, die damals noch angekurbelt werden mussten. Je nach Ansprüchen gab es noch andere Modelle, wie zum Beispiel das Baker Electric Coupé von 1912 (siehe Anzeige oben rechts). Elektroautos fanden auch in den gehobenen Gesellschaftsschichten Freunde. Ein »Queen Vic-

toria« gehörte um 1905 beispielsweise zum Fuhrpark des amerikanischen Präsidenten. Einer der ersten Käufer der Baker-Wagen war Thomas Alva Edison, der große Hoffnungen auf die Automobilbranche als Abnehmer von Elektroprodukten setzte. So brachte er 1904 eine Nickel-Eisen-Batterie auf den Markt, die besser zu handhaben, vor allem aber leichter war als die bis dahin übliche Bleibatterie.

Solche Batterien wurden auch in den Baker-Fahrzeugen verbaut. Die Motoren bezog das Unternehmen zunächst von der auf elektrische Antriebe spezialisierten Firma Elwell-Parker in Cleveland, dann von General Electric, jenem Elektoriesen, der 1892 aus einer Fusion der Edison General Electric Company mit ihrem größten Konkurrenten, der Thomson-Houston Electric Company, hervorgegangen war.

Die Hoffnungen der Elektrobranche erfüllten sich jedoch nicht. Die Batterien waren zu schwer, ihre Kapazitäten jedoch zu gering. Dagegen waren Benzinere immer zuverlässiger und komfortabler. Ab 1909 eroberte Fords Model T den amerikanischen Markt, das erste am Fließband gefertigte und für breite Bevölkerungsschichten erschwingliche Automobil mit Verbrennungsmotor. Zudem entstand eine automobile Kultur, die sich insbesondere in Europa bald am Ideal von »Abenteuermaschinen« und »Rennreiselimousinen« orientierte. Der erste Boom der Elektroautos im Pkw-Sektor endete, kaum dass er begonnen hatte. Um 1909 sollen etwa 4000 solcher Fahrzeuge in den USA verkauft worden sein – gegenüber geschätzten 80000 Benzinern. Eine Nische fanden elektrische Antriebe immerhin noch eine Weile bei Nutzfahrzeugen.

Die promovierte Historikerin **Bettina Gundler** ist Kuratorin für den Straßenverkehr im Deutschen Museum.

Wege zur Quantengravitation

Sie ist die letzte große Lücke im Gebäude der modernen Physik: eine Theorie, die Quantenphysik mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vereint. Claus Kiefer von der Universität Köln zeigt die Wege, wie Forscher das Problem lösen wollen, die Mikrowelt mit der Schwerkraft zu verschmelzen



MPL FÜR GRAVITATIONSPHYSIK / MILDE SCIENCE COMMUNICATION

Sprache formt das Denken

Nicht nur die Orientierung im Raum und in der Zeit hängt von der verwendeten Sprache ab – auch Verwandtschaft, Zahlenangaben und woran wir uns wie genau erinnern. Sogar Vorurteile einer Person variieren je nachdem, ob diese etwa arabisch oder hebräisch spricht

Zukunft der Stromspeicher

Wenn das Öl zur Neige gegangen ist, wird Mobilität nur noch mit nichtfossilen Speichern möglich sein. Hochleistungsakkus, wie wir sie heute schon in Laptops und Handys einsetzen, sollen in den kommenden Jahren auch Hybrid- und Elektrofahrzeuge bewegen. »Spektrum« wirft einen Blick auf die weitere Entwicklung dieser Technik



GUYER/ALINDAY

Smart Cities

Die Zukunftsvision zweier Städteplaner: Kommunikations- und Sensornetze ermöglichen neue Formen der Gesselligkeit und fördern das innovative Potenzial der Einwohner



CLAUDIA HINZ

Leuchtende Heiligenscheine

Glorien zählen zu den schönsten atmosphärischen Phänomenen – und sie haben eine überraschend komplexe Erklärung. Indem sie die »Heiligenscheine« erforschen, lernen Wissenschaftler auch immer mehr über den Einfluss von Wolken auf den Klimawandel

SPEKTRUM-NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter