

Max Planck FORSCHUNG

Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft 2.2017



Die Wurzeln des Menschen

SOZIALPOLITIK

Eine Regel für
die Rente

OPTIK

Regenbogen in
der Glasfaser

3D-DRUCK

Mit Licht
gebaut

KLIMAFORSCHUNG

Hart am
Wind

jugend forscht 2018

schüler experimentieren



Spring!



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bis 30.11.2017 anmelden
auf www.jugend-forscht.de



Foto: Valérie Schwab-Lavrič

Am Ende der Welt

Staubig, windig, einsam – als „ein Ende, das man nicht sehen will“, beschreibt der argentinische Schriftsteller Mempo Giardinelli die Mesetas Patagoniens. Und doch haben Gerd Gleixner und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie diese Gegend ganz gezielt für eine ihrer Forschungsexpeditionen ausgewählt. Denn die riesigen, grasbewachsenen Hochplateaus vulkanischen Ursprungs bieten Bedingungen, die anderswo auf der Welt nur schwer zu finden sind.

Die steilen Hänge der Anden sorgen dafür, dass die Wolken, die mit den Westwinden vom Pazifik kommen, auf der chilenischen Seite der Bergkette abregnen. Doch auch die Wolken, die aus dem Osten herangetragen werden, überqueren die flachen Hochebenen; nennenswerte Niederschläge gibt es hier erst in der Nähe der Berge. Diese besonderen geografischen Gegebenheiten machen es möglich, in den Mesetas Boden- und Sedimentproben entlang einer mehrere Tausend Kilometer langen Nord-Süd-Linie mit immer gleichen Niederschlagsbedingungen zu entnehmen – und so in einzigartiger Weise den Einfluss der Temperatur auf den Kohlenstoffumsatz im Boden, isoliert vom Einfluss der Niederschlagsmenge, zu untersuchen.

Gleixners Forschungsgruppe interessiert besonders, wie sich Ökosysteme beim Klimawandel verhalten. Indem die Wissenschaftler widerstandsfähige Biomoleküle identifizieren und als Biomarker etablieren, können sie Böden und Seesedimente der argentinischen Mesetas als Klimaarchiv nutzen. Die Forscher rekonstruieren Klimaereignisse der vergangenen 10 000 bis 20 000 Jahre – und schließen so auf die Anpassungsfähigkeit von Organismen und Ökosystemen an Klimaveränderungen in der Zukunft.

Der alte Kühltisch in der Bildmitte, der in der Weite des Graslands von Unbekannten entsorgt wurde, erschien den Forschern geradezu als Sinnbild für die Notwendigkeit, Parameter zu finden, die dazu beitragen können, die Klimasysteme unseres Planeten wieder abzukühlen.



Inhalt



10 Im Ruhestand: Der Rentenbeginn ist einer der Hauptstreitpunkte in der politischen Diskussion.

PERSPEKTIVEN

- 06** Neue Wege in der Talentförderung
- 06** Die Blume aus dem Wasserstrahl
- 07** „Das Projekt Euro ist gescheitert“
- 08** Global bewegt für die Wissenschaft
- 08** Pionier der Weltraumsimulation ausgezeichnet
- 09** Zentrum für Systembiologie eröffnet
- 09** Ins Netz gegangen

ZUR SACHE

- 10 Eine Regel für die Rente**
Kaum ein anderes sozialpolitisches Thema nährt die Sorgen und Ängste der Menschen so sehr wie die finanzielle Absicherung im Alter. Um die Rente wirklich sicher zu machen, ist die gefühlte Wahrheit jedoch eine schlechte Grundlage.

FOKUS

- 18** Aug in Aug mit dem Neandertaler
- 26** Der Wandel, der vom Acker kam
- 34** Umweltsünden aus der Urzeit

18 DIE WURZELN DES MENSCHEN

18 Aug in Aug mit dem Neandertaler

Mehrere Tausend Jahre müssen Neandertaler und moderner Mensch gleichzeitig in Europa gelebt haben. Wie sich Begegnungen zwischen ihnen abspielten und wie sich beide gegenseitig beeinflussten, ist eine spannende Frage. Antworten darauf suchen Forscher des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie.

26 Der Wandel, der vom Acker kam

Der Übergang zur Landwirtschaft hat menschliche Gesellschaften so drastisch umgestaltet wie kaum eine andere Innovation. Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte untersuchen diesen Umbruch aus ganz unterschiedlichen Richtungen.

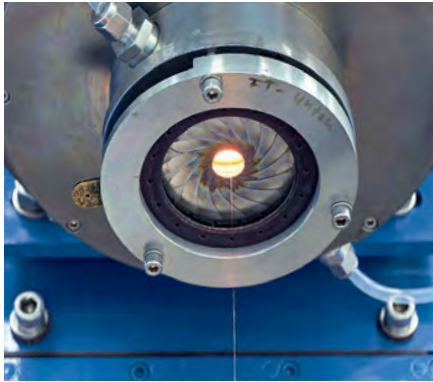
34 Umweltsünden aus der Urzeit

Der Mensch verändert die Erde derzeit in nie da gewesenem Ausmaß. Doch wann begann die Verwandlung unseres Planeten – und somit das Zeitalter des Menschen, das Anthropozän? Mit neuen Methoden suchen Forscher am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte nach den frühesten Spuren des menschlichen Wirkens.

ZUM TITEL „Wo kommen wir her?“, lautet eine der grundlegenden Fragen der Menschheit. Archäologen, Anthropologen und Genetiker finden immer neue Hinweise, woher die ersten Menschen stammten, wie sie sich weltweit ausbreiteten und wie sie gelebt haben.

TECHMAX

Echte Knochenarbeit – wie Forscher die Tricks der Natur entschlüsseln



48 Im Ofen: So dünn wie ein menschliches Haar sind die aus der Schmelze gezogenen Kristallfasern.



54 Im Akkord: Pipettierroboter analysieren vollautomatisch Zigtausende von Proteomen.



68 Im Hafen: An Bord der *Maria S. Merian* wartet der Geologe Ralf Schiebel auf die nächste Ausfahrt.

SPEKTRUM

- 42** Kernspintomograf für einzelne Proteine
- 42** Der *Homo sapiens* ist älter als gedacht
- 42** Neutrinos treiben Supernovae an
- 43** Ein Fingerzeig für die Elektronik
- 44** Lesenlernen verändert Gehirn auch bei Erwachsenen
- 44** Mit dem Griff des Geckos
- 45** Jungbrunnen im Darm
- 45** Gravitationswellen gehen zum dritten Mal in die Falle
- 46** Urmenschen-Erbgut im Höhlenboden entdeckt
- 46** Das kosmische Netz wird durchleuchtet
- 47** Übergewicht steigert Alzheimerisiko
- 47** Im Labor vermehrte Zikaviren
- 47** Krebsdiagnose über den Atem

PHYSIK & ASTRONOMIE

- 48** **Regenbogen in der Glasfaser**
Aus Glas gezogene Fasern können mehr, als Licht fast verlustfrei leiten. Mit photonischen Kristallfasern manipulieren Physiker die Eigenschaften von Laserlicht, und sie entwickeln aus den Fasern Sensoren für Medizin und Technik.

BIOLOGIE & MEDIZIN

- 54** **Das Protein-Puzzle**
Der menschliche Körper besteht aus Abertausenden Proteinen, die in unterschiedlichen Varianten vorkommen. Wissenschaftler wollen mit schlaun Algorithmen und viel Rechenkraft das menschliche Proteom entschlüsseln und für die Medizin nutzbar machen.

MATERIAL & TECHNIK

- 60** **Mit Licht gebaut**
Dem 3D-Druck gehört die Zukunft. Aber noch lässt sich aus den dafür verwendeten Werkstoffen und den Fertigungsprozessen nicht das Optimum herausholen. Forscher helfen dem neuen Verfahren aus den Kinderschuhen.

UMWELT & KLIMA

- 68** **Hart am Wind**
Zur Person: Ralf Schiebel

RUBRIKEN

- 03** **Orte der Forschung**
- 16** **Post aus – Massachusetts, USA**
Faszinierende Schwarmintelligenz
- 76** **Rückblende**
Das alte Haus und das Meer
- 78** **Neu erschienen**
- 78 Andrea Wulf, Alexander von Humboldt und die Erfindung der Natur
- 79 Rhodri Evans, Juwelen des Universums
- 80 Wolfgang Wickler, Wissenschaft auf Safari
- 81 Jürgen Teichmann, Der Geheimcode der Sterne
- 82 Michael Quetting, Plötzlich Gänsevater
- 83** **Standorte**
- 83** **Impressum**

Neue Wege in der Talentförderung

Die Jahresversammlung der Max-Planck-Gesellschaft im Zeichen des wissenschaftlichen Nachwuchses



Feierlicher Rahmen: Max-Planck-Präsident Martin Stratmann während der Festversammlung im Kaisersaal in Erfurt.

Um international die besten Talente zu gewinnen, brauche man attraktive Angebote und eine starke Sichtbarkeit, sagte Max-Planck-Präsident Martin Stratmann zum Abschluss der 68. Jahresversammlung, die Ende Juni in Erfurt, Jena und Weimar stattfand. Ein zentraler Beitrag

seien die neuen Max Planck Schools: überregionale Forschungs- und Ausbildungsnetzwerke, die in Kooperation mit der Hochschulrektorenkonferenz und weiteren Partnern entstehen. Georg Schütte, Staatssekretär im Bundesforschungsministerium, bekräftigte in sei-

ner Ansprache, dass sein Ministerium dafür eine Förderung bereitstellen will.

Das Jahrestreffen hatte mit der Verleihung des Wissenschaftspreises des Stifterverbandes begonnen. Peter H. Seeberger, Direktor am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, erhielt für seine Pionierleistungen zur automatisierten Zuckersynthese den mit 50 000 Euro dotierten Preis. Zudem wurden herausragende Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler ausgezeichnet, unter anderem mit der Otto-Hahn-Medaille, die besondere Forschungsleistungen in der Promotion würdigt.

Der Max-Planck-Senat bestätigte in seiner Sitzung Rüdiger Willems als neuen Generalsekretär der Gesellschaft. Der Jurist hatte das Amt seit Februar 2017 kommissarisch inne und war zuvor mehr als zehn Jahre stellvertretender Generalsekretär.

Die Blume aus dem Wasserstrahl

„Jugend forscht“ – die Max-Planck-Gesellschaft gratuliert

Deutschlands beste „Jugend forscht“-Teilnehmer sind im Mai in Erlangen ausgezeichnet worden. Den Preis in der Kategorie Physik stiftet seit geraumer Zeit die Max-Planck-Gesellschaft. Gerd Leuchs, Direktor am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, überreichte den ersten Preis im Bundeswettbewerb dieses Jahr an drei Gymnasiasten aus Berlin. Matthias Grützner, Julian Egbert und Arne Geipel sind einem überraschenden Phänomen auf die Spur gekommen: Trifft ein Wasserstrahl auf eine raue Oberfläche, etwa ein Holzbrett, können sich regelmäßige spiralförmige Muster bilden, die an das Innere einer Sonnenblume erinnern. Die 16-Jährigen fanden eine Erklärung in den winzigen Erhebungen der rauen Oberfläche. An diesen bricht sich das fließende Wasser und bildet in der Folge die Muster. Die drei überprüften ihre Theorie anhand eines Experiments, bei dem sie einen Nagel von Wasser umströmen ließen und die Abläufe mit einer Kamera aufzeichneten. Das Ergebnis bestätigte ihren Erklärungsansatz. Die Jury würdigte die einfallsreiche und intelligente Weise, mit der die Jungforscher das von ihnen entdeckte Phänomen untersuchten – und die Tatsache, dass sie selbstständig zu einer theoretischen Beschreibung gelangten.



Stolze Gewinner: Matthias Grützner, Julian Egbert und Arne Geipel (von links) erhielten ihre „Jugend forscht“-Urkunden von Max-Planck-Direktor Gerd Leuchs.

„Das Projekt Euro ist gescheitert“

Fritz W. Scharpf, emeritierter Direktor am Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung in Köln, übt fundamentale Kritik an der Währungsunion

Herr Scharpf, Ihre Kritik an der Europäischen Währungsunion ist fundamental. Ist das Projekt Euro fehlgeschlagen?

Fritz W. Scharpf: In seiner derzeitigen Form: ja. Man hat ein technisches System aufgebaut, in dem die Währungen egalisiert wurden. Für eine politische Identifikation der Bürger mit der Währungsunion aber wurde nichts unternommen.

Ist das Problem dabei, dass es keine europäische Identität gibt? Oder dass wir am falschen Ende begonnen haben?

Dass wir am falschen Ende begonnen haben. Die Währungsunion ist der Fall einer ökonomischen Überintegration. Eine europäische Identität kann sich entwickeln, wenn Europa etwas tut, was die Mitglieder und ihre Wähler gemeinsam wollen. Oder wenn Druck von außen kommt, siehe Trump, die Ukraine oder der Nahe Osten. Wir haben uns nach dem Zweiten Weltkrieg entschlossen, dass wir nie mehr gegeneinander ins Feld ziehen werden. Sondern dieses wunderbare Europa in seiner Vielfalt stärken und gestalten wollen.

Welche Rolle spielt die Bevölkerung?

In Griechenland, Portugal oder Italien gibt es derzeit eine unterdrückte Rebellion gegen die Zwänge der Währungsunion. Und in den Ländern des ökonomischen Nordens ist zumindest ein Teil der Bevölkerung frustriert über die Risiken der Rettungskredite, über Undankbarkeit oder Unzuverlässigkeit der Länder, die gerettet werden sollen. Der Konflikt kann aber nicht ausgetragen werden, weil es auf der europäischen Ebene gar nicht die demokratische Basis gibt, diese Themen zu behandeln.

Es gibt ja Zeichen für Fortschritte. Aber ist es überhaupt legitim, Länder von Grund auf umzupolen?

In Griechenland ist die Wirtschaft um ein Viertel geschrumpft, aber gleichzeitig ist der Exportanteil der Wirtschaft um mehr als ein Drittel gestiegen. Das war der Plan. Und wenn am Ende eine Umstrukturierung gelingt, so ist die Hoffnung, können alle in der gleichen Weise exportorientiert wachsen. Insofern, Punkt zwei Ihrer Frage, ist es

zwar ein vermessenes Experiment des Social Engineering, das hier veranstaltet wird, aber es lässt sich begründen.

Gibt es überhaupt noch Verhaltensoptionen? Wäre es eine Option zu sagen: Okay, dieser oder jener muss raus aus dem Euro?

Tatsächlich wäre es die ökonomisch sinnvollste Option, dass Deutschland aus dem Euro austritt. Weil es die größte und wettbewerbsstärkste Ökonomie in Europa ist und weil die Ursachen dafür insbesondere nach der Wende in einer historisch und geografisch einmaligen Situation liegen. In einer Währungsunion ohne diese übermächtige Volkswirtschaft wären die Probleme leichter zu bewältigen. Aber natürlich ist gerade Deutschland das allerletzte Land, das die Loyalität gegenüber einer europäischen Integration einseitig aufkündigen könnte. Das verkraftet Europa nicht.

Was bleibt?

Ich halte es für sinnvoll, jetzt Regeln einzuführen, mit denen einvernehmlich ein Zwei-Stufen-Währungssystem zustande kommen könnte – rechtzeitig und ohne akuten Druck, damit im Bedarfsfall nicht nur die Chaosoption bleibt, sondern ein geregelter Übergang in eine bessere Struktur möglich ist.

Wie könnte die aussehen?

Die eine Struktur wären Länder, die in der jetzigen Währungsunion gemeinsam mit Deutschland ein hoch wettbewerbsfähiges Wirtschaftssystem bilden. Dazu gehört der alte „D-Mark-Block“, den es vor der Währungsunion gegeben hat, also Deutschland, Österreich, die Niederlande, Dänemark und Finnland. Inzwischen sind die baltischen Mitgliedsstaaten dazugekommen. Das wäre ein Hartwährungsteil nach deutschem Vorbild, der sich sehr viel besser integrieren könnte und auch sehr viel besser funktionieren würde. Für den anderen Teil ist heute schon eine Auffangstruktur vorhanden: Das ist der Wechselkursmechanismus II...

...hervorgegangen aus dem Europäischen Währungssystem, das Helmut Schmidt und



Fritz W. Scharpf

Giscard d'Estaing im Jahr 1979 geschaffen haben. Heute noch zeitgemäß?

Es existiert noch. Die Mitgliedsstaaten kooperierten bei der Definition ihrer Wechselkurse, unterstützten einander, wenn sie international unter Druck gerieten. Und wenn sich dauerhafte Unterschiede in der Leistungsfähigkeit auftraten, dann konnten die Währungen auf- oder abgewertet werden. Heute käme der Europäischen Zentralbank die Entscheidung über Unterstützung auf den Devisenmärkten zu.

Die Starken begeben sich in das Korsett der Gemeinsamkeit, mit allen Chancen und Wohltaten. Und die weniger Starken genießen die Flexibilität von Wechselkursen. Ein Europa der zwei Geschwindigkeiten – oder der zwei Klassen? Die Mitglieder eines Wechselkursmechanismus II genießen nicht nur die Flexibilität, sondern auch Schutz gegen Spekulation auf den Kapitalmärkten oder die Gefahr von Inflations- oder Abwertungsspiralen. Aber die Identifikation mit Europa wäre in beiden Ländergruppen institutionell unterstützt: Sie wären in der EU. Und auf den globalen Finanzmärkten hätte dieser Block einen starken gemeinsamen Auftritt. Das Gewicht Europas in der Welt würde also eher größer – denn auch Norwegen oder die Schweiz könnten über einen Beitritt nachdenken. Tatsächlich könnte ganz Europa in einem weiter gefassten Währungsverbund seinen Platz finden.

Interview: Martin Tschechne

Global bewegt für die Wissenschaft

An mehr als 600 Orten weltweit gingen Menschen beim „March for Science“ auf die Straße

Mit dem „March for Science“ am 22. April demonstrierten Forscher, Studenten und Bürger weltweit für die Wissenschaft und ihre Rolle in Politik und Gesellschaft. Bei den

Kundgebungen in Deutschland stand im Fokus, für den „Wert von Wissenschaft, Fakten und Evidenzbasiertheit in Zeiten von alternativen Fakten“ einzutreten – so die Initiatoren. Auch Max-Planck-Wissenschaftler beteiligten sich: bei der Planung in den Organisationsteams ebenso wie beim Verteilen von Flyern, als Redner oder Teilnehmer. In Deutschland gab es in mehr als 20 Städten Kundgebungen, vielfach mit aktiver Beteiligung der Max-Planck-Institute vor Ort. So hatten sich führende Max-Planck-Wissenschaftler, unter ihnen auch Nobelpreisträger, für den „March for Science“ in Berlin ausgesprochen.

In München wies Max-Planck-Präsident Martin Stratmann in seiner Ansprache darauf hin, dass die Freiheit der Wissenschaft international immer stärker unter Druck kommt: „Wir können nicht akzeptieren, dass in Zeiten, in denen der Mensch diesen Planeten verändert wie nie zuvor in der Geschichte, Entscheidungen getroffen werden, ohne auf wissenschaftliche Fakten zurückzugreifen. Wir dürfen uns nicht dümmer stellen, als wir sind.“

Kreativer Protest: Beim „March for Science“ in München warben Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Ornithologie mit einem „Let it Brain“-Schirm für geistvolles Handeln.



Pionier der Weltraumsimulation ausgezeichnet

Max-Planck-Direktor Simon D. M. White erhält den Shaw Prize für Astronomie 2017

Vor 13,8 Milliarden Jahren soll das All auf die Welt gekommen sein – mit dem sogenannten Urknall. Wie sich aus dieser gigantischen Explosion Galaxien unterschiedlicher Größen und Formen entwickeln konnten, gehört zu den großen Rätseln des Universums. Simon D. M. White, Direktor am Max-Planck-Institut für Astrophysik, ist diesem Geheimnis seit Langem auf der Spur. Nach einer Hypothese, die er und sein Kollege Martin Rees im Jahr 1978 aufstellten, trennten sich riesige Materiewolken von der Expansion und stürzten aufgrund der Schwerkraft in sich zusammen. Galaxien entstanden, als das Gas in den Zentren von immens großen Halos aus der mysteriösen Dunklen Materie abkühlte und sich verdichtete. Vier

Jahrzehnte lang simulierte White dieses Szenario mit seinen Studenten und Kollegen in immer besserer Realitätstreue. Die Rechnungen zeigen, wie sich aus den einfachen, sehr gleichförmigen Bedingungen im frühen Universum komplexe Strukturen entwickelten.

Für seine Arbeiten wird Simon White nun mit dem Shaw-Preis für Astronomie ausgezeichnet. Der Preis wird seit 2004 jährlich von der Shaw Prize Foundation in Mathematik und Astronomie sowie in den Lebenswissenschaften vergeben und ist mit 1,2 Millionen US-Dollar dotiert.

Hohe Ehre: Simon D. M. White vom Max-Planck-Institut für Astrophysik erhält den Shaw-Preis 2017.



Fotos: Amac Garbe/MPC (oben), A. Arnolds/MPA (unten)

Zentrum für Systembiologie eröffnet

Gemeinsames Projekt der Max-Planck-Gesellschaft und der Technischen Universität Dresden
ergründet Abläufe in Zellen

Es ist ein sensibles Gleichgewicht: Moleküle organisieren sich miteinander zu Zellen, Zellen vernetzen sich untereinander zu Geweben, Gewebe bilden Organe. Das funktioniert nur in einer korrekten räumlichen Anordnung und zeitlichen Abfolge. Im Zentrum für Systembiologie Dresden, an dem die Max-Planck-Institute für molekulare Zellbiologie und Genetik sowie für Physik komplexer Systeme und die Technische Universität Dresden beteiligt sind, wollen die Forscher verstehen, wie sich Zellen untereinander abstimmen, um ein Gewebe einer bestimmten Form, Größe und Funktion zu bilden.

Zur Eröffnung Ende Mai sprachen unter anderem der sächsische Ministerpräsident Stanislaw Tillich und Max-Planck-Präsident Martin Stratmann. Ehrengast war Craig Venter, US-amerikanischer Biochemiker und Unternehmer, der maßgeblich an der Entschlüsselung des menschlichen Erbguts beteiligt war. Das Dresdner Zentrum für Systembiologie bringt Theoretiker und Praktiker an einem Ort zusammen. Nach der Aufbauphase werden rund 120 Wissenschaftler dort forschen. Geleitet wird es von den Max-Planck-Direktoren Gene Myers und Frank Jülicher sowie von Ivo Sbalzarini von der TU Dresden.



Prominenter Gast: Biotech-Pionier Craig Venter bei der Eröffnung des Dresdner Zentrums für Systembiologie.

Ins Netz gegangen



Wissenschaft an Bord

Von Bonn nach Straubing: Das Ausstellungsschiff *MS Wissenschaft* ist wieder unterwegs. Nachdem es im vergangenen Jahr in mehr als 30 Städten im nördlichen Teil Deutschlands vor Anker ging, führt die Route nun über Flüsse und Kanäle durch den Süden der Republik und nach Österreich. Im Laderaum des Schiffs können die Besucher noch deutlich weitere Reisen unternehmen: ins Wattenmeer, in tropische Korallenriffe, die Tiefsee und das Eismeer. Die Ausstellung mit mehr als 30 Exponaten zum Mitmachen bietet Einblicke in aktuelle Forschungsprojekte, unter anderem aus drei Max-Planck-Instituten. <http://ms-wissenschaft.de>

Wie weit ist die Kernfusion?

Der Fusionsreaktor ITER wird voraussichtlich im Jahr 2035 in Betrieb gehen. Doch schon jetzt, im Mai 2017, wurde die erste riesige Magnetspule in La Spezia in Italien fertiggestellt. An Forschungsanlagen weltweit wird bereits seit Langem wissenschaftliche Vorarbeit geleistet. Aus diesem Anlass besuchte der deutsch-französische Fernsehsender Arte die Fusions-Versuchsanlage am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching. Entstanden ist ein Filmbeitrag, der die Prinzipien erklärt, wie wir nach dem Vorbild der Sonne auf der Erde Energie erzeugen können. <http://info.arte.tv/de/iter-wie-weit-ist-die-kernfusion>

Treffpunkt Summer School

Den Sommer für eine Fortbildung nutzen? In rund 15 Kursen an Max-Planck-Instituten können 900 junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler – vom Masterstudenten bis zum Postdoc – über den eigenen Tellerrand blicken. Die Angebote von Hamburg bis Florenz richten sich explizit an externe Teilnehmerinnen und Teilnehmer unterschiedlicher Disziplinen. Einen Überblick über alle Kurse finden Sie auf unserer Webseite. www.mpg.de/summerschool

Eine Regel für die Rente

Kaum ein anderes sozialpolitisches Thema nährt die Sorgen und Ängste der Menschen so sehr wie die finanzielle Absicherung im Alter. Kaum ein anderes Thema lässt sich so gut im Wahlkampf ausschachten. Um die Rente wirklich sicher zu machen, ist die gefühlte Wahrheit eine schlechte Grundlage, meint unser Autor und erläutert stattdessen die Fakten und die daraus folgenden Konsequenzen.

TEXT **AXEL BÖRSCH-SUPAN**

Etwa 30 Prozent der Erwerbstätigen aller Altersstufen gaben im Jahr 2015 an, dass sie nur noch eine Rente in der Höhe der Grundsicherung – also der Sozialhilfe im Alter – erwarten. Im vergangenen Jahr ging dann durch die Presse, dass man gar mit einer Altersarmut von 50 Prozent rechnen müsse. Und dieses Jahr spricht die zuständige Ministerin von einer „Rutschbahn“, auf

sicherung erwarten, hatten bereits die Hälfte einen Rentenanspruch, der deutlich darüber lag – nur wussten sie es nicht. Und die Prognose einer Altersarmut von 50 Prozent lag an zwei kapitalen Denkfehlern. Zum einen wurde fälschlich angenommen, dass junge Leute, die derzeit wenig oder gar nichts verdienen (wie Auszubildende und Studierende) auch im Alter arm sind. Als ebenso arm wurden zweitens diejenigen Menschen eingestuft, die keine gesetzliche Rente erhalten (etwa Beamte und Hausfrauen), auch wenn diese tatsächlich vor allem im Haushaltskontext großzügige Einkünfte beziehen. Nach der Berichtigung dieser Fehler fiel die Prognose auf etwa fünf Prozent.

Kann man also die Aufregung, die mit dem Reizthema Rente immer wieder aufflammt, wissenschaftlich basiert und nüchtern-analytisch dämpfen? Versuchen wir es.

Die gesetzliche Rente wird im Umlageverfahren erwirtschaftet, das heißt, die Jüngeren zahlen Beiträge ein, die sofort wieder an die Älteren ausgezahlt werden. Abgesehen von einer relativ geringen Reserve von höchstens eineinhalb Monatsausgaben ist die Vorstellung einer Rentenkasse, die gut gefüllt sein muss, also abwegig. Die Ausgaben sind immer gleich den Einnahmen; nichts bleibt übrig. Das ist der erste

Im Dienst oder im Ruhestand: Ab wann Menschen nicht mehr arbeiten müssen, ist einer der Hauptstreitpunkte in der Rentenpolitik.

Die Fehlprognose von 50 Prozent Altersarmut fußte auf zwei kapitalen Denkfehlern

der das Rentenniveau ungebremst nach unten gleite, sodass man es mit einer Haltelinie zum Stehen bringen müsse. Natürlich weckt das alles Emotionen.

Dabei ist gerade das deutsche Rentensystem sehr regelgebunden und eigentlich eine sehr trockene Materie. Zudem verändern sich die Faktoren, welche die langfristige Entwicklung der Renten bestimmen, in der Regel nur langsam und stetig, sodass sich die zukünftige Rente recht gut prognostizieren lässt. Von den etwa 30 Prozent der Erwerbstätigen, die 2015 angaben, dass sie nur noch eine Rente in der Höhe der Grund-



wichtige Mechanismus des deutschen gesetzlichen Rentensystems. Und ein problematischer, denn wenn es durch den demografischen Wandel immer mehr ältere und immer weniger jüngere Menschen gibt, dann steigen die Ausgaben bei abnehmenden Einnahmen. Aber dazu später.

Der zweite wichtige Mechanismus besteht darin, wie Einnahmen und Ausgaben sich auf die einzelnen Menschen aufteilen. Hier gilt in Deutschland, dass die Beiträge bis zu einer Obergrenze (der sogenannten Beitragsbemessungsgrenze) strikt proportional zum Arbeitseinkommen und die ausgezahlten Renten wiederum strikt proportional zu den im Leben eingezahlten Beiträgen sind. Auch dieser zweite fundamentale Mechanismus des deutschen Rentensystems ist nicht

Der Ansturm junger Flüchtlinge wird das Geburtendefizit nicht ausgleichen

unproblematisch, denn wer im Erwerbsleben wenig verdient, wird auch im Alter wenig Rente bekommen.

Die Teilhabe des Einzelnen an den von der Rentenkasse ausgezahlten Geldern entspricht also dem Anteil, den er durchschnittlich während seines Erwerbslebens eingezahlt hat. Diese sogenannte Teilhabeäquivalenz steht im Gegensatz zur progressiven Einkommensteuer und zu den vielen anderen Umverteilungsmechanismen unseres Steuer- und Transfersystems. In anderen Ländern, etwa in der Schweiz und in den USA, gilt diese Proportionalität nicht. Dort bekommen Ärmere eine überproportional hohe und Reichere eine nur unterproportionale Rente. Dafür wird jedoch in den genannten beiden Ländern weit weniger über die Einkommensteuer umverteilt.

Damit müssen wir also gleich zwei große Fässer aufmachen, welche die Sorgen und Ängste der Menschen beim Thema Rente begründen: die drohende Altersarmut und ebenso der demografische Wandel. Wenden wir uns zunächst Letzterem zu.

Wie schon beschrieben, ändert sich die Altersstruktur Deutschlands derzeit sehr stark: Es wird immer mehr ältere und immer weniger jüngere Menschen geben. Dies hat drei Ursachen. Erstens wurden in den 1960er-Jahren deutlich mehr Menschen pro Jahr geboren als in der Zeit davor und danach. Diese bevölkerungsstarken Jahrgänge des Babybooms beeinflussen sehr stark die durchschnittlichen Merkmale und Eigenschaften unseres Landes, von Spar- und Konsumgewohnheiten bis ganz banal zum Alter. Da die Menschen der Babyboom-Generation altern, altert der Durchschnitt der deutschen Bevölkerung mit.

Die zweite Ursache liegt darin, dass wir dank besserer Gesundheit immer länger leben. 1960 betrug die Lebenserwartung 69 Jahre, 50 Jahre später war sie auf 80 Jahre gestiegen, das sind mehr als zwei Jahre Zuwachs pro Jahrzehnt. Dies liegt teils am medizinischen Fortschritt, aber auch an den besseren Arbeitsbedingungen, der Abnahme schädlicher Umwelteinflüsse und – jedenfalls bisher – an gesünderer Ernährung.

Die dritte Ursache ist die seit den 1970er-Jahren niedrige Geburtenrate. Da Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten weit weniger Geburten hatte, als nötig gewesen wären, um die Einwohnerzahl konstant zu halten, fehlt uns zur Rentenfinanzierung ungefähr ein Drittel junger Menschen relativ zur Vorgeneration.

Zwei Punkte sind beachtenswert. Zum einen ist die Vorhersage der Anzahl junger Menschen, die in den nächsten, sagen wir, 25 bis 30 Jahren unsere Rente finanzieren müssen, eine recht sichere Prognose, denn diese Menschen sind bereits geboren. Auch ist nichts trivialer, als das zukünftige Alter eines gegebenen Jahrgangs zu prognostizieren. Änderungen der Geburten- und Sterberaten berühren dagegen nur eine begrenzte Anzahl von Jahrgängen. Die demografische Entwicklung bis 2045, also etwa eine Generation im Voraus, beruht daher weitgehend auf Fakten, an denen sich nichts mehr ändern lässt. Erst bei sehr langfristigen Prognosen wird die Unschärfe groß. Zum Zweiten wird auch der jüngste Ansturm junger Flüchtlinge das Geburtendefizit nur geringfügig verringern, weil selbst diese großen Migrantenströme im Vergleich zum Fehlen eines Drittels der jüngeren Generation klein sind.



Wie kann man die Belastung der gesetzlichen Rentenversicherung durch die Bevölkerungsalterung auffangen? Wegen des Umfangs der demografischen Herausforderung wäre es unklug, auf sie mit einer einzigen sozialpolitischen Gegenmaßnahme zu reagieren. Stattdessen benötigt man ein Paket mehrerer Maßnahmen, welche sich an den einzelnen Ursachen orientieren. Genau dies meine ich mit der anfangs angesprochenen wissenschaftlichen und analytisch-nüchternen Herangehensweise.

An der ersten Ursache kann man nichts mehr ändern. Die schnelle Abfolge von Babyboom zu Pillenknick ist historisch vorgegeben. Wir müssen also die Konsequenzen tragen und zugleich dafür sorgen, dass diese keinen allzu großen Schaden anrichten. Das geschieht durch den 2005 eingeführten Nachhaltigkeitsfaktor, der die demografische Last gleichmäßig zwischen der älteren und der jüngeren Generation aufteilt, indem um etwa den gleichen Prozentsatz der Beitragssatz steigt und das Rentenniveau sinkt, wenn die demografische Last zunimmt. Hier bestand die Weisheit darin, dies regelgebunden zu machen und damit den wechselnden Launen und wahlbedingten Panikattacken der Politiker zu entziehen.

Der Nachhaltigkeitsfaktor hat die Rentenberechnung in Deutschland allerdings komplizierter und das ganze System daher intransparenter gemacht. Während wohl jeder versteht, was es bedeutet, wenn der Beitragssatz ansteigt, herrscht großes Unwissen darüber, was es heißt, wenn das Rentenniveau sinkt. Dies liegt am missverständlichen Ausdruck „Rentenniveau“, das eben gerade kein Niveau definiert, sondern eine Quote – nämlich die durchschnittliche Rente geteilt durch das durchschnittliche sozialversicherungspflichtige Arbeitseinkommen.

Der Nachhaltigkeitsfaktor wird das Rentenniveau bis 2045 um etwa einen halben Prozentpunkt pro Jahr senken. Die Renten steigen also um einen halben Prozentpunkt weniger als die Löhne. Da die Löhne aber im langfristigen Durchschnitt um etwa 1,5 Prozent pro Jahr kaufkraftbereinigt ansteigen, bleibt immer noch ein ganzes Prozent Kaufkraftsteigerung pro Jahr für die Rente übrig. Der Teil des demografischen Wandels, der durch die Abfolge von Babyboom zu Pillenknick ver-

ursacht wird, lässt sich also aus dem Wachstum finanzieren, während die Substanz der Rente nicht angegriffen werden muss. Ganz im Gegenteil kann diese Substanz weiterhin mit ungefähr einem Prozent pro Jahr

Seit 1957 hat sich die Rentenbezugszeit mehr als verdoppelt

wachsen. Die durchschnittliche Inflation eingerechnet, werden die Renten also nicht mehr um drei Prozent, aber immer noch in jedem durchschnittlichen Jahr um etwa 2,5 Prozent ansteigen.

An der zweiten Ursache will man nichts ändern. Es ist ja ein großes Geschenk, wenn wir länger gesund sind und länger leben. Bisher schlug sich die längere Lebenszeit fast ausschließlich in einer längeren Rentenbezugszeit nieder, und zwar in einer erheblich längeren: Seit der Einführung des Umlageverfahrens im Jahr 1957 hat sich die Rentenbezugszeit von neun Jahren auf mittlerweile 20 Jahre mehr als verdoppelt. Sie würde bei einem unveränderten Renteneintrittsalter bis zum Jahr 2045 um weitere sieben Jahre ansteigen. Stabil wäre die umlagefinanzierte Rente aber nur, wenn die Proportionen zwischen Lebensarbeitszeit und Rentenbezugszeit unverändert blieben.

Einen ersten Schritt dazu soll die graduelle Erhöhung des Regelrenteneintrittsalters von 65 auf 67 Jahre leisten, die noch 13 Jahre andauert. Beachtenswert ist, dass diese Erhöhung um ein Jahr geringer ist als die für diese Zeitspanne erwartete Erhöhung der Lebenserwartung. Die Rente mit 67 bedeutet daher auch eine um ein Jahr verlängerte Rentenbezugszeit. Hinter der Zwei-zu-eins-Aufteilung – zwei Jahre Verschiebung des Rentenalters, ein Jahr zusätzlicher Rentenbezug – steckt die Weisheit, die Proportionen des Lebens zu wahren. Gegenwärtig besteht ein Durchschnittsleben aus etwa 40 Jahren Arbeit und 20 Jahren Rentenbezug. Genauso muss ein zusätzliches Jahr Rente durch zwei Jahre Arbeit finanziert werden. >



Diese Proportionen gilt es auch nach dem Jahr 2030 zu wahren – am besten nach festen Regeln, damit sie nicht zum Spielball für Klientelpolitik werden. Die passende nüchtern-analytische Maßnahme ist daher, nach 2030 eine dynamische Zwei-zu-eins-Regel einzuführen, nach der entweder die Zuwächse der Lebenserwartung in regelmäßigen Abständen in zwei Anteile längerer Arbeitszeit und einen Anteil längerer Rentenbezugszeit aufgeteilt werden – oder, was wir nicht hoffen, Abnahmen der Lebenserwartung ebenso automatisch mit einer Zwei-zu-eins-Verkürzung von Arbeits- und Rentenbezugszeit ausgeglichen werden.

Ein solches dynamisches Rentenalter ist das noch fehlende Gegenstück zur 1957 eingeführten dynamischen Lohnanpassung und zur 2005 eingeführten dynamischen Anpassung an den Altersquotienten durch den Nachhaltigkeitsfaktor. Bis 2030 ist es noch einige Zeit hin; unmittelbarer Handlungsbedarf besteht daher nicht. Aber Änderungen im Rentenrecht müssen den Menschen frühzeitig mitgeteilt werden, damit sich diese in ihrer Lebensplanung darauf einstellen können.

Einzig die dritte Ursache des demografischen Wandels lässt sich zumindest theoretisch an der Wurzel packen. In der praktischen Politik ist die oft herbeigewünschte höhere Geburtenrate jedoch bisher nicht Wirklichkeit geworden. Trotz vielfältiger familienpolitischer Maßnahmen mit einem Finanzvolumen, das pro Kopf der Bevölkerung fast ebenso hoch ist wie im in dieser Hinsicht viel gerühmten Frankreich, stagniert die Geburtenrate seit Jahrzehnten. Ob sich der jüngste und immer noch sehr bescheidene Anstieg zum langfristigen Trend mausern wird, ist derzeit unklar. Aber selbst ein langfristiger Anstieg kann die Rente frühestens in etwa 20 Jahren beeinflussen, wenn die ersten dieser Kinder ins Erwerbsleben eintreten.

Die Wissenschaft steht mit ziemlich leeren Händen da, welche Maßnahmen sie den Politikern empfehlen soll, damit in Deutschland die Geburtenrate ansteigt. Zu jeder in einem Land gut funktionierenden Maßnahme gibt es in anderen Ländern Gegenbeispiele. Die Wissenschaft ist sich aber einig, dass – wenn man schon die Quantität der Kinder nicht effektiv erhöhen kann – man wenigstens in die Qualität der Bildung investieren muss, damit die wenigen Kinder umso innovativer und produktiver sein können.

Und hier liegen wir in Deutschland, wie diverse Bildungstests zeigen, international nur im Mittelmaß.

Das zweite große Fass der Rentendebatte ist die drohende Altersarmut. Derzeit beträgt die Altersarmut – definiert als der Anteil der über 65-Jährigen, die Grundsicherung im Alter beziehen – bei etwa drei Prozent. Jeder einzelne Mensch davon ist zu viel, si-

Der demografische Wandel lässt sich aus Wachstum finanzieren

cher. Aber der Anteil ist deutlich niedriger als in der Gesamtbevölkerung (etwa neun Prozent) oder gar bei Alleinerziehenden (fast 25 Prozent).

Die Furcht vor der Altersarmut fußt auf zwei Entwicklungen, welche die Höhe der ausbezahlten Renten in Gefahr bringen. Dies sind zum einen die Rentenreformen, mit denen das deutsche Rentensystem stabilisiert werden soll, die aber – wie oben beschrieben – das Rentenniveau senken und das Renteneintrittsalter erhöhen. Zum anderen ist die Zahl der Menschen gestiegen, deren Beschäftigungsverhältnisse keine oder nur sehr geringe Beiträge in die gesetzliche Rentenversicherung mit sich bringen.

Dass die Senkung des Rentenniveaus die Altersarmut erhöht, beruht auf dem bereits beschriebenen Missverständnis, was das „Rentenniveau“ bedeutet. Auch weiterhin wird die Kaufkraft der Renten steigen, die Altersarmut also eher weniger werden.

Einschneidender ist vielmehr die Erhöhung des Rentenalters. Es ist unter Sozialwissenschaftlern und Epidemiologen unumstritten, dass die Gesundheit stark mit dem Einkommen korreliert; umstritten ist höchstens das Gewicht, das den vielfältigen Gründen dafür zukommt. Menschen, die im Erwerbsleben wenig verdienen und daher altersarmutsgefährdet sind, haben oft auch körperlich anstrengendere Berufe und eine deutlich schlechtere Gesundheit. Viele von ihnen werden nicht bis zu einem immer höheren Regelrentenalter arbeiten können.

Dies korreliert leider auch mit der zweiten Entwicklung, was das Altersarmutsproblem verschärfen

wird, weil diese Menschen oft prekäre Arbeitsverhältnisse mit geringen Rentenansprüchen haben. Die Daten zeigen hier recht klare Muster, denen zielgenaue Gegenmaßnahmen zugrunde gelegt werden können. So verlangt ein Rentenalter, das sich dynamisch mit der durchschnittlichen Lebenserwartung erhöht, klare Ausnahmen für die, deren Erwerbsfähigkeit gesundheitlich gemindert ist. Dazu reicht die derzeitige Erwerbsminderungsrente noch nicht aus. Langzeitarbeitslose fallen momentan aus der Rentenversicherung heraus und sind daher altersarmutsgefährdet.

Eine dritte wohldefinierte Gruppe Altersarmutsgefährdeter sind die Kleinstselbstständigen, die derzeit ebenfalls keine soziale Absicherung haben, aber nach einer gewissen Karenzzeit in das soziale Netz eingebunden werden sollten.

Das Thema Rente kann man also wissenschaftlich fundiert betrachten. Ursachen und Probleme können auseinanderdividiert und einzeln analysiert werden. Der demografische Wandel passiert zum Glück im Schnecken tempo, und er geht, ebenso zum Glück, mit mehr Gesundheit und einem längeren Leben einher. Er lässt sich daher weitgehend aus dem Wachstum finanzieren – aus dem Produktivitäts- und daher Lohnwachstum ebenso wie aus dem Wachstum unserer Lebenszeit. Aus den in Deutschland vorhandenen sozioökonomischen Individualdaten lassen sich zudem die Problemgruppen recht gut identifizieren und daher gezielte Gegenmaßnahmen entwickeln, ohne dass man zur Gießkanne unspezifischer Maßnahmen wie etwa einer generellen Erhöhung des Rentenniveaus greifen müsste.

Der gesellschaftliche Wert sozialpolitischer Forschung liegt in der Empirie, das heißt der Erhebung sozioökonomischer und epidemiologischer Daten, die zum Beispiel die Korrelationsmuster zwischen Reichtum und Gesundheit, Armut und geringer Lebenserwartung aufzeigen, viele ihrer Ursachen identifizieren lassen und es damit erlauben, nüchtern und analytisch der Politik Problembereiche aufzuzeigen sowie passende Gegenmaßnahmen zu empfehlen – auch in Wahlkampfzeiten. ◀

Eine Kurzfassung des Textes erschien als Samstagsessay in der SÜDDEUTSCHEN ZEITUNG am 1./2. Juli 2017.



DER AUTOR

Axel Börsch-Supan, Jahrgang 1954, studierte Volkswirtschaftslehre und Mathematik, bevor er im Jahr 1984 am MIT in Cambridge (USA) promovierte. Bis 1987 war er Assistant Professor an der Harvard University. Zurück in Deutschland lehrte er zunächst an den Universitäten Dortmund und Mannheim. Seit Januar 2011 ist Börsch-Supan Direktor am Max-Planck-Institut für Sozialrecht und Sozialpolitik und leitet dort das Munich Center for the Economics of Aging. Börsch-Supan koordiniert zudem den *Survey of Health, Ageing and Retirement in Europe*, ein europaweites interdisziplinäres Umfrageprojekt zum Thema Altern. Seit 2011 ist er Mitglied der Expertenkommission Demografischer Wandel der Bundesregierung.



Faszinierende Schwarmintelligenz

Max-Planck-Wissenschaftler kooperieren mit Partnern in rund 120 Ländern dieser Erde. Hier schreiben sie über persönliche Erlebnisse und Eindrücke.

Die Materialwissenschaftlerin Jiali Zhang vom Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf verbrachte im Rahmen ihrer Postdoc-Zeit neun Monate am US-amerikanischen Massachusetts Institute of Technology. Sie war von der am Institut herrschenden Schwarmintelligenz fasziniert.

Ich bin im ländlichen China aufgewachsen, in einem bevölkerungsreichen Staat und mit einer dementsprechend großen Konkurrenz, an einer der sehr guten Universitäten aufgenommen zu werden. Im Gegensatz zu anderen chinesischen Familien haben mich meine Eltern ermuntert, komplett meinen Interessen nachzugehen und nicht unbedingt Ärztin oder Rechtsanwältin zu werden – und so habe ich meine wahre Leidenschaft in Metallen und deren Nachhaltigkeit gefunden.

Die Herstellung neuer metallischer Bauteile geht mit einem hohen Ausstoß an Kohlenstoffdioxid einher. Um dies zu vermeiden und die Umwelt zu schonen, ist es daher sinnvoll, die Lebensdauer metallischer Bauteile zu verlängern und somit deren ständigen Austausch zu vermeiden. Dies klappt, indem die Bauteile sich selbst heilen. In der Tat gibt es bereits eine Menge selbstheilender Materialien. Am Max-Planck-Institut möchten wir kleinste Partikel in ein Metall einschleusen und so Risse in dem Moment heilen, in dem sie auf der kleinsten Mikrostrukturebene entstehen. Diese Partikel bestehen aus einer Formgedächtnislegierung – einem Metallgemisch, das bei einer bestimmten Temperatur wieder seine ursprüngliche Form annimmt, und zwar trotz vorheriger Verformung.



Jiali Zhang, 28, studierte Metallurgie an der University of Science & Technology Beijing sowie an der Universität Aachen, bevor sie im Jahr 2011 in die Abteilung für Mikrostrukturphysik und Legierungsdesign von Dierk Raabe ans Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf kam. Dort schrieb sie zunächst ihre Masterarbeit. Später promovierte sie über selbstheilende Materialien auf Titanium-basierten Legierungen. Seit 2016 forscht Jiali Zhang als Postdoc am Düsseldorfer Max-Planck-Institut und verbrachte neun Monate in der neuen MIT-Gruppe von Cem Tasan, der vorher Gruppenleiter am Düsseldorfer Institut war.

Inzwischen bin ich schon sechs Jahre am Max-Planck-Institut für Eisenforschung. Daher weiß ich genau, wo ich hinmuss, mit wem ich sprechen muss – meine Arbeit hier ist sehr strukturiert und folgt einer bestimmten Ordnung. Im Gegensatz dazu steht die Atmosphäre am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Als Universität vereint das MIT viele Menschen mit komplett verschiedenen Projekten. Hier haben alle einen völlig unterschiedlichen Arbeitsstil. Um mich zurechtzufinden, musste ich diese Schwarmintelligenz anzapfen. Ich mag beide Arbeitsweisen. Die sehr fokussierte am Max-Planck-Institut, wo ich mich nur mit Materialwissenschaften beschäftige und einer gewissen Struktur folgen kann. Und im Gegensatz dazu eben die beschriebene vielfältige Schwarmintelligenz am MIT.

Gerade die Unterhaltungen mit den technischen Assistenten faszinierten mich, weil sie ein und dasselbe Gerät für so unterschiedliche Projekte und Experimente nutzen. Und da kann es passieren, dass Proben einer Gruppe analysiert werden, die sich mit dem Einfluss der Temperatur auf Schokolade beschäftigt: wie diese schmilzt und wie der Geschmack sich verändert – genauso wie mich die Temperatur bei den selbstheilenden Legierungen interessiert. Das war natürlich echt spannend für mich, und auch hier gab es ein langes Gespräch mit der Technikerin. Allein die Vorstellung, welche neuen Geschmacksrichtungen so entstehen könnten ...

Aber es gibt auch innovative Dinge, die ich nur am MIT vorgefunden habe. Zum Beispiel hat die Bibliothek ihr eigenes Online-Chatting-System. Während der Öffnungszeiten kann man bei den Angestellten schriftlich nachfragen, ob eine gewisse Publikation verfügbar ist – und sie antworten in Echtzeit. Das fand ich sehr effizient und bequem.

Außerdem war es interessant, die Ergebnisse der Präsidentschaftswahlen live am Campus zu verfolgen und zu sehen, wie die Studierenden darauf reagierten. Sie sind sehr aktiv und wenden sich sofort an die Leitung, wenn sie Hilfe brauchen. Tatsächlich hat das MIT eine Reihe von Richtlinien entworfen, welche die internationalen Studierenden und Angestellten vor dem *muslim ban* schützen, sodass diese sich auf ihre Forschung konzentrieren können.



Aug in Aug mit dem Neandertaler

Mehrere Tausend Jahre müssen Neandertaler und moderner Mensch gleichzeitig in Europa gelebt haben. Wie sich Begegnungen zwischen ihnen abspielten und wie sich beide gegenseitig beeinflussten, ist eine spannende Frage. Antworten darauf suchen **Jean-Jacques Hublin** und sein Team am **Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie** in Leipzig. Dabei haben sie Hinweise gefunden, was die Neandertaler vom *Homo sapiens* gelernt haben – und was nicht.



Beeindruckender Anblick: Max-Planck-Direktor Jean-Jacques Hublin, der sich seit Langem mit Neandertalern befasst, flößt deren Physiognomie noch immer Respekt ein.

TEXT **KLAUS WILHELM**

Woran das Baby starb, weiß niemand. Durch eine Infektion? Den Angriff eines Raubtiers? An einer angeborenen Erkrankung? Vielleicht. Die Eltern jedenfalls ließen das Kind in einer Höhle in Zentralfrankreich zurück, die Prähistoriker heute als Grotte du Renne bezeichnen. Möglich, dass die Eltern ihr Baby sogar in Trauer begraben haben.

Zeitreise: In Leipzig, am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie, befasst sich die Abteilung Humanevolution mit Jean-Jacques Hublin an der Spitze mit der Erforschung der mensch-

lichen Vorgeschichte, der Paläoanthropologie. Postdoktorand Frido Welker bereitet Knochenfragmente, teilweise Splitter, aus der Grotte du Renne auf. Bisher waren solche Bruchstücke allen Experten nutzlos erschienen. Genauer gesagt, hatten Paläoanthropologen wie Welker kein Verfahren, um derart lädierten Zeugnissen der Prähistorie Erkenntnisse abzuringen.

Das hat sich geändert dank der sogenannten Paläoproteomik. Diese Methode kann selbst kleinste Spuren von Proteinen in uraltem Knochenmaterial nachweisen und Aufschluss geben über die Identität des einst dahinterstehen-

den Lebewesens – eine „ziemlich revolutionäre Methode“, wie Jean-Jacques Hublin meint. Proteine überdauern in uraltem Knochenmaterial zehnmal länger als DNA. Die Untersuchung des Erbguts galt bisher als Königsweg, um einen Knochen einem bestimmten Lebewesen zuzuordnen. Die Paläoproteomik könnte der DNA-Analyse diesen Ruf streitig machen. „Die Proteine der steinzeitlichen Knochen“, erklärt Welker, „bergen wertvolle Informationen zur Stammesgeschichte und den Lebensvorgängen dieser Menschen.“

So kam heraus: Das Baby aus der Grotte du Renne war eine kleine Nean-



Unterschätzte Künstler: Lange dachte man, Neandertaler könnten keinen Schmuck herstellen. Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie konnten zweifelsfrei belegen, dass diese Schmuckstücke aus Geweih, Knochen und Muscheln von Neandertalern verwendet wurden.

dertalerin, nicht einmal abgestillt, vielleicht sechs Monate bis zwei Jahre alt am Tag ihres Todes vor 44 000 bis 40 000 Jahren. Ihre spärlichen Überreste bringen mehr Klarheit als je zuvor in einen Jahrzehnte währenden Disput in der paläoanthropologischen Expertenwelt. Teils heftige Debatten kennzeichnen dieses Genre der Forschung. Etwa zur Frage, wie sich Neandertaler und „moderner Mensch“ – also wir – vor rund 45 000 Jahren in Europa begegneten. „Es gab einen kulturellen Transfer zwischen beiden Menschenformen“, ist sich Jean-Jacques Hublin nach den jüngsten Hightech-Untersuchungen seines Teams sicher: „Erst als der *Homo sapiens* kam, haben die Neandertaler plötzlich Dinge gemacht, die sie niemals zuvor getan hatten.“

Der Leipziger Wissenschaftler geht davon aus, dass es für den Austausch „keinen besonders intensiven Kontakt brauchte“. Geschweige denn ein Liebesverhältnis zwischen *Homo sapiens* und *Homo neanderthalensis*, wie es in den vergangenen Jahren allenthalben kolportiert wurde. „Da werden zu viele Geschichten hineingedichtet“, meint

der Franzose ganz profan: „Die Wahrheit war höchstwahrscheinlich alles andere als romantisch.“

Die Zeugnisse aus der Jahrtausende bis Jahrmillionen alten Vergangenheit – Knochen, Zähne und Kulturgegenstände wie Werkzeuge oder Schmuck – sind begrenzt. Daraus resultieren oft verbissene Diskussionen. „Das stört mich natürlich“, sagt Hublin, „wir sind gut beraten, zwischen Fakten und Fiktion zu unterscheiden.“

IN DER STEINZEIT WAR DIE WELT FAST MENSCHENLEER

Betrachten wir also in diesem Licht die Causa Sapiens–Neandertaler, eines der Spezialgebiete des Max-Planck-Wissenschaftlers. Seit 1856 im Neandertal bei Düsseldorf erstmals Knochen dieses Menschentypus entdeckt wurden, ranken sich Legenden um seine Existenz. Vordergründig schon deswegen, weil er so anders aussieht als der moderne Mensch.

Mit seinen maximal 1,70 Metern war er nicht besonders groß, aber von Statur robust und kräftig, mit weit aus-

ladender Brust, die Männer bis zu 90 Kilo schwer. „Sehr eindrucksvoll“, sagt Jean-Jacques Hublin und betrachtet die Skulptur eines Neandertalerkopfes in seinem Büro. Sie wurde bereits Anfang des 20. Jahrhunderts gefertigt, entspricht aber im Wesentlichen noch heutigem Wissen. Das heißt: Das Gesicht ist groß und lang gezogen, markante Wülste liegen über den Augenbrauen, die Nase ist üppig, der Kiefer massiv, das Kinn eher fliehend. „Träfen Sie in der Straßenbahn einen Neandertaler“, erklärt der Paläoanthropologe, „würden Sie das Abteil wechseln.“

Auch vor rund 45 000 Jahren muss es ein höchst seltsames Ereignis gewesen sein, als sich Exemplare des modernen Menschen *Homo sapiens* und Vertreter des *Homo neanderthalensis* erstmals in den Wäldern und Auen Europas begegneten. „Für beide Parteien“, sagt Hublin lachend. Der Neandertaler hatte da neuen Studienergebnissen zufolge schon mindestens 400 000 Jahre auf dem Kontinent hinter sich – in einem Gebiet von Spanien bis zum russischen Altai-Gebirge und bis etwa zur geographischen Höhe von Norddeutschland.



Als Jäger und Sammler durchstreiften seine höchstens 50 bis 60 Frauen und Männer zählenden Gruppen wahrscheinlich viele Tausend Quadratkilometer große Landstriche. Sie erlegten effizient selbst großes Wild wie Bisons und Pferde. Weitaus mehr als gedacht verzehrten sie auch pflanzliche Kost. Und der Neandertaler lebte wohl in schnellerem Tempo. Das Hublin-Team hat aus hauchdünnen Schichten des Zahnschmelzes das Alter eines Neandertalerkindes ermittelt. Dabei kam heraus: Die Kinder dieses Menschentypus reiften ein bis zwei Jahre früher als der Nachwuchs moderner Menschen.

Garstig und lang waren ihre Winter. „Wahrscheinlich starben viele ihrer kleinen Gruppen in langen Hungerphasen einfach aus und wurden durch neue Kohorten ersetzt. Selbst in Zeiten ihrer größten Verbreitung dürfte es nicht mehr als geschätzte 10000 „Neandertal-Europäer“ gegeben haben. „Die Steinzeit war eine leere Welt“, sagt Hublin. Der Neandertaler ging nach jüngsten Studien mit fast so ausgefeilten geistigen Fähigkeiten durch dieses einsame Dasein wie sein Vetter und (künftig)

Widersacher. „Er war komplexer, als wir lange Zeit annahmen“, räumt der Forscher ein. Und weiter: „Die beiden Menschentypen sind, kognitiv gesehen, in dieser Zeit fast gleich, definitiv nicht affenähnlich, aber auch nicht wie wir.“

DER HOMO SAPIENS BRACHTE EINEN ÜBERLEGENEN GEIST MIT

Technisch war der Neandertaler durchaus versiert, das belegen die filigranen Speere, die er schon in seiner Frühzeit fertigte. Vor etwa 120000 Jahren entwickelte er sogar eine Werkzeugkultur – oder „Industrie“, wie Paläoanthropologen sagen –, die eine Epoche prägte: das Moustérien. In dieser Zeit produzierte er Werkzeuge wie Pfeilspitzen, Schaber, Kratzer oder Klingen, die auf charakteristische Weise von Steinen abgeschlagen wurden. Artefakte dieser Kultur fanden Forscher in etlichen archäologischen Stätten – etwa in der erwähnten Grotte du Renne im Burgund.

So kam der Neandertaler mit den widrigen Bedingungen in Europa recht gut klar. Vermutlich hätte er noch Zehn-

Frühe Siedler: Neandertaler – hier eine durchaus realistische Büste aus den 1910er-Jahren – lebten schätzungsweise 400000 Jahre in Europa, bevor der moderne Mensch vor rund 45000 Jahren einwanderte. Die Grotte du Renne (rechts) nutzten beide.

tausende Jahre überlebt, wenn nicht vor 45000 Jahren plötzlich eine andere Spezies Europa aufgewirbelt hätte: der moderne Mensch. Die Neuankömmlinge waren viel graziler gebaut als die Altingesessenen. Vor allem aber brachten sie einen letztlich doch überlegenen Geist mit. Der *Homo sapiens* verarbeitete nicht nur Steine, sondern er konstruierte Angeln aus Fischgräten, fertigte aus Knochen, Schnecken und Eierschalen Schmuck, und er baute Spitzen für Pfeile und Harpunen. Kaum in Europa eingetroffen, schuf er seine ganz eigene Industrie – diese Epoche wird Aurignacien genannt. Typisch dafür: Projektilspitzen aus Elfenbein und Knochen, damals Jagdtechnologie vom Feinsten.

Seine ältesten Knochenzeugnisse finden sich in Norditalien, und bald schon durchkämmten die modernen



Auf den Zahn geföhlt: Aus dem Zahnschmelz – hier im digitalen 3-D-Modell – lässt sich ablesen, wie schnell Neandertalerkinder sich entwickelten. Demnach reiften sie ein bis zwei Jahre früher als Kinder moderner Menschen.

Menschen Gebiete östlich des Rheins in Baden-Württemberg, nicht weit entfernt von der Grotte du Renne. Deren Dach ist vor rund 20000 Jahren zusammengebrochen und hat alles unter sich begraben. Ein Glücksfall für Archäologen, die aus den verschiedenen Schichten der zugeschütteten Höhle seit Jahrzehnten reiche Funde bergen. Denn die Höhle war während der Steinzeit ein offenbar beliebtes Refugium. Immer wieder kehrten hier Menschen ein. Neben den Moustérien-Artefakten in den tieferen, älteren Grabungsschichten stießen die For-

scher in oberen, jüngeren Lagen auf Reste der Aurignacien-Industrie.

In einer Zwischenschicht aber fanden sich in der Grotte du Renne – und in weiteren Ablagerungsstätten – Relikte der Kultur des Châtelperronien (CP). Bereits in den 1950er-Jahren wurden etliche Ringe, Anhänger und Spangen aus Elfenbein, Geweih und anderen Materialien gefunden. Ohrgehänge, durchbohrte, mit Rillen versehene Zähne als Schmuckanhänger, Fossilien und so weiter. Ganz typisch sind auch Spitzen oder Messer mit gebogenem, abgestumpftem Rücken. Die elaborierten

Utensilien erinnern mithin deutlich an die nachfolgende Aurignacien-Industrie des *Homo sapiens*. Und nicht an den Neandertaler.

Zugleich aber lagerten in der CP-Schicht der Grotte du Renne gut identifizierbare Knochenreste und Zähne – von Neandertalern, wie eine Studie aus den 1990er-Jahren nahelegte. Doch dann kamen wieder Debatten auf. Britische Forscher wiesen im Jahr 2010 ihrer Ansicht nach Altersunterschiede zwischen den verschiedenen Fundstücken aus der Châtelperronien-Schicht nach. Ihre Deutung: Die Schmuckstücke stammten von modernen Menschen und wurden erst nachträglich, durch das Aufwühlen des Untergrunds, mit den Neandertaler-Relikten vermischt.

Jean-Jacques Hublin mochte das nicht glauben und startete gemeinsam mit internationalen Partnern eine jahrelange Versuchsserie. Zunächst wählte sein Team 40 gut erhaltene Knochenproben aus der Grotte du Renne aus – meist aus Bereichen, die CP-Schmuck oder Überreste von Neandertalern enthielten, seltener aus Schichten des Moustérien oder des Aurignacien. Darüber hinaus untersuchten die Forscher den Schienbeinknochen eines Neandertalers einer anderen berühmten französischen Fundstätte aus Saint-Césaire.

Aus den Knochenproben extrahierten die Wissenschaftler Kollagen, einen organischen Bestandteil des Bindegewebes, bestehend aus Proteinketten. Nun schlug die Stunde der modernen Analysemaschinen. „Ich bin ein Technikbesessener“, erklärt Hublin und lächelt. So stehen in seiner Abteilung ein

Probenbohrung: Aus Proteinen in Knochenfragmenten lässt sich bestimmen, von welchem Lebewesen die Überreste stammen. Dazu werden zunächst kleine Mengen Knochenmaterial aus dem Fund herausgebohrt.



halbes Dutzend sogenannte Massenspektrometer neuesten Zuschnitts – zum einen Hightech-Waagen, welche die Masse von Atomen und Molekülen messen, zum anderen Beschleuniger-Massenspektrometer, die über den Zerfall verschiedener Kohlenstoffisotope in Molekülen das exakte Alter etwa von Knochen ermitteln können.

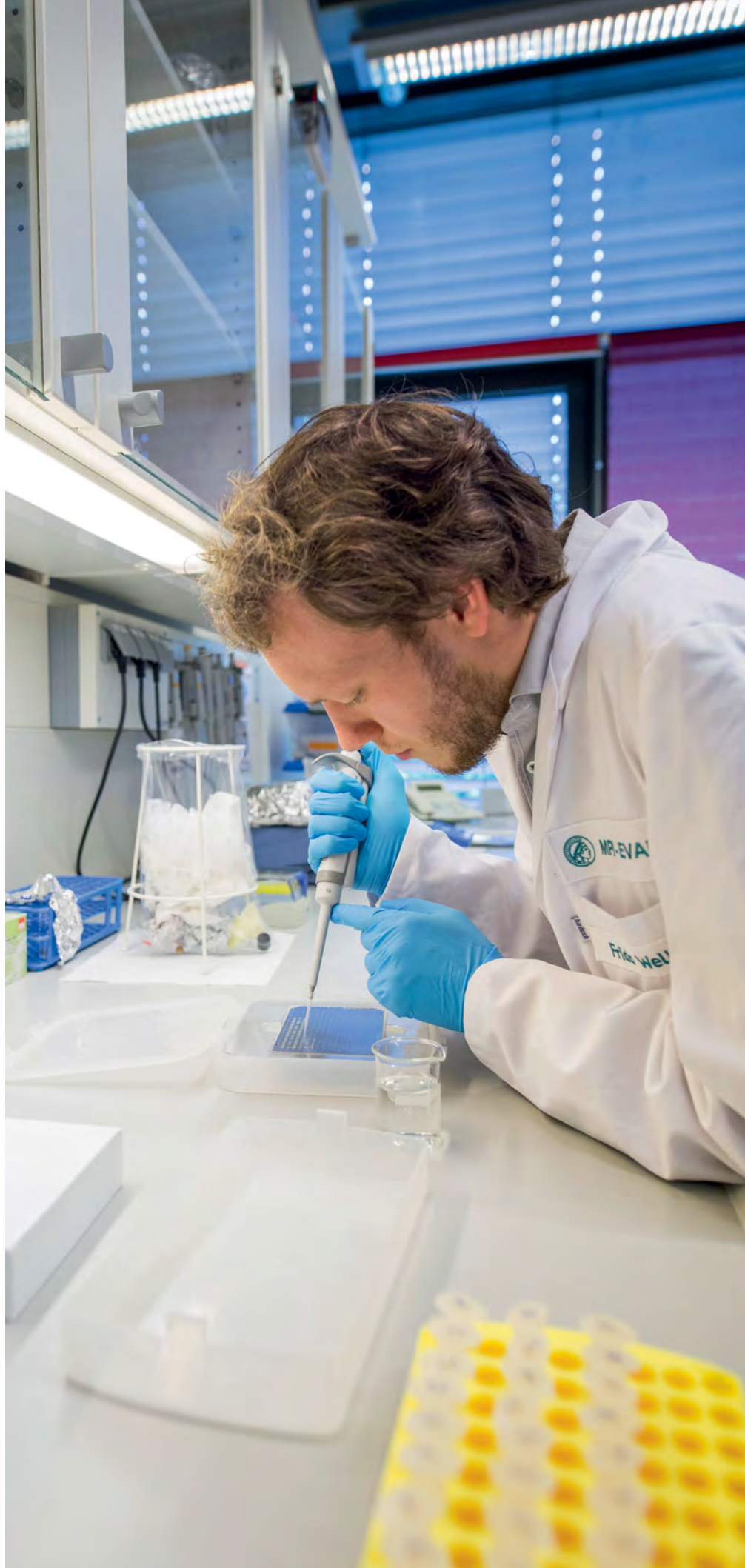
NEANDERTALER ÜBERNAHMEN MANCHE INNOVATIONEN

Ergebnis der umfangreichen Analysen: Die Proben aus den Châtelperronien-Schichten sind zwischen 41 000 und 35 500 Jahre alt und damit tatsächlich dieser Kultur zuzuordnen. Zudem überschneidet sich das Alter der Châtelperronien-Stücke nicht mit den Funden aus den übrigen Schichten – eine Durchmischung der Sedimente ist damit ausgeschlossen. Mit einem Alter von 41 500 Jahren passt das Neandertalerskelett aus Saint-Césaire ebenfalls prima ins Bild.

So könnte auch der Neandertaler die CP-Industrien in Frankreich geschaffen haben. Könnte! Noch aber fehlte der eindeutige Beweis, dass die Knochen aus der CP-Schicht der Grotte du Renne einst zu Neandertalern gehörten – und nicht zum modernen Menschen.

So wendete das Team um Hublin in seiner Studie erstmals völlig neuartige Verfahren an: *Peptide Mass Fingerprinting* und *Shotgun Proteomics*, zwei spezielle Methoden der Proteomik. Mit diesem Verfahren lässt sich ermitteln, ob ein Kollagen vom Knochen eines Neandertalers oder von dem eines modernen Menschen stammt. Dafür, und das ist entscheidend und neu, genügen schon winzige Knochenproben. Genau deshalb konnten die Wissen-

In einer massenspektroskopischen Untersuchung kann das Knochenmaterial auf seine Ursprünge hin analysiert werden. Dazu bereitet Frido Welker die Proben im Labor auf.





schaftler erstmals 28 Knochenfragmente aus einer dem Châtelperronien zugeordneten Sedimentschicht molekular analysieren.

„Sie stammen von Neandertalern“, sagt Frido Welker. Durch die Kombination mit anderen proteomischen Methoden – etwa der Analyse der Sequenz der Aminosäuren eines Eiweißes – und der Paläogenetik stand schließlich fest: Die Knochenfragmente gehörten zu einem Säugling aus dem Châtelperronien. „Unsere Studie belegt, dass es allein mit Paläoproteomik möglich ist, zwischen verschiedenen jungsteinzeitlichen Gruppen innerhalb unserer Gattung *Homo* zu unterscheiden“, so Welker.

Über den Studien thront die große Frage: Wie hielten sie es miteinander, der *Homo sapiens* und der *Homo neanderthalensis*? Die neuen Befunde lassen sich unterschiedlich interpretieren. Man könnte es so deuten, dass der Neandertaler, just als sich der *Homo sapiens* in Europa ausbreitete, von sich aus einen ungeahnten Entwicklungssprung gemacht hat. „Das würde allerdings an ein Wunder grenzen“, meint Jean-Jacques Hublin. Für ihn ist weitaus wahrscheinlicher, „dass die beiden Menschenformen in Kontakt traten, und der Neandertaler manche Innovationen des modernen Menschen übernahm“.

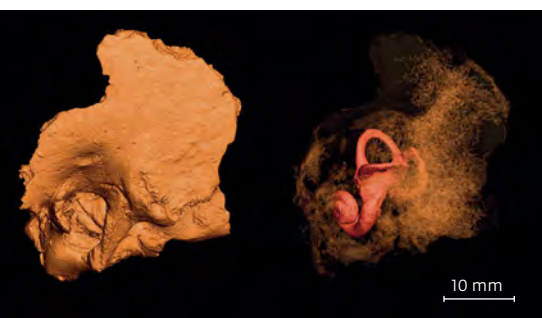
Vielleicht haben die Neandertaler Werkzeuge und Schmuck des *Homo sapiens* gefunden – und dann nachgemacht und bei Gelegenheit in benachbarte Gruppen getragen. Den dafür nötigen Verstand hatten sie wohl. Vielleicht hat ihnen ein wohlmeinender moderner Mensch gezeigt, wie man die tollen Dinge fertigt. Vielleicht kam es gar zu Tauschgeschäften. Wer wüsste

es? Schon bewegen wir uns wieder im Feld der Geschichten, die wir so lieben. Und schon muss Jean-Jacques Hublin wieder bremsen.

ZWEI PROZENT UNSERER DNA STAMMEN VOM NEANDERTALER

Für den Transfer kultureller Innovation brauchte es keine ständige Begegnung und schon gar keine dicke Freundschaft. Auch der moderne Mensch musste das harsche Leben der Jäger und Sammler meistern und konkurrierte mit dem Zeitgenossen der anderen Art um Territorien und Nahrung. Auch wenn es nur Dutzende bis wenige Hundert Gruppen gab, die sich selten trafen in der leeren Welt der Steinzeit, dürften die meisten Begegnungen der Zeitgenossen eher unfreundlich gewesen sein, wenn nicht gar feindselig, aggressiv und gewalttätig.

Dafür gibt es zwar keine handfesten Belege. Allerdings weiß man, dass Begegnungen konkurrierender Stäm-



Auch wenn Innenohr und Mittelohrgehörknöchelchen des Neandertalers anders gebaut sind als unsere, funktionieren beide ähnlich. Das deutet auf Ähnlichkeiten beim Gleichgewichtssinn und bei der Lautkommunikation hin.

Links Im futuristischen Ambiente die Fakten im Blick: Jean-Jacques Hublin sieht es kritisch, wenn sich Forschung mit Fiktion mischt – etwa in der Behauptung, zwischen modernen Menschen und Neandertalern habe es Liebesbeziehungen gegeben. Hublin vermutet eher unfreundliche Begegnungen zwischen beiden.

me in der Menschheitsgeschichte selten sanft verliefen. Daher spricht viel dafür, dass es im Falle des Aufeinander-treffens von *Homo sapiens* und Neandertaler ähnlich war.

Dabei wurden möglicherweise auch Frauen des Konkurrenten geraubt. So könnten es keine feurigen Romanzen gewesen sein, die zu Sex zwischen den Kontrahenten führten, sondern Gewaltakte. Sie haben bis heute nachweislich Spuren hinterlassen, wie Forscher seit Jahren wissen. Etwa zwei Prozent der DNA in unserem heutigen Erbgut rühren vom Neandertaler her – ein zwar begrenztes, aber langlebiges Erbe dieser längst ausgestorbenen Menschenform.

Zeugnisse der letzten Neandertaler hat die Erde in Schichten freigegeben, die 40000, vielleicht 38000 Jahre alt sind. Irgendwann in dieser Zeit verschwand der Letzte ihrer Art. „Wegen uns“, wie Jean-Jacques Hublin lapidar sagt. Rein molekular betrachtet, sind die Unterschiede zwischen modernen Menschen und Neandertalern gering: Gerade einmal 87 Proteine trennen die beiden Arten. Viele davon sind allerdings für die Funktion und die Entwicklung des Gehirns wichtig.

Irgendetwas im modernen Menschen war anders. Womöglich ging er aggressiver zu Werke als sein verwandter Widersacher, wahrscheinlich arbeitete er in größeren Teams und in mehreren Gruppen effektiver zusammen, dort auch mit mehr Empathie und Rücksicht aufeinander.

Dafür haben die Experten einige Hinweise gefunden. Erstens: Schon in ihrer frühen Zeit in Europa haben die modernen Menschen offenbar getauscht. Man findet etwa Muscheln aus dem Mittelmeerraum in Deutschland. „Das deutet auf Netzwerke über größere Räume hin“, meint Hublin, „die Leute wussten, dass jenseits der Berge

Artgenossen leben.“ Und sie tragen Schmuck, Deko am Körper, als Zeichen ihrer Zugehörigkeit zu einer größeren Gemeinschaft aus Hunderten, vielleicht Tausenden. Menschen, die solidarisch handeln, auch wenn sie sich nicht täglich sehen. In der Welt der Neandertaler fehlt dergleichen.

DER HOMO SAPIENS MALTE BILDER AUS DER FANTASIE

Zweitens: Ebenfalls schon in seinem frühen europäischen Dasein malte der *Homo sapiens* an Höhlenwände, und zwar auch Dinge, die real nicht existierten, sondern nur in seiner Fantasie. Zum Beispiel Männer mit Löwenköp-

fen. Das bedeutet: Der moderne Mensch erkannte Geschichten hinter den Dingen, mythische Elemente und Glauben. „Das ist ein ganz starker Faktor, den der Neandertaler offenbar nicht im Sinn hatte“, sagt Hublin.

Derlei Dinge seien „schwierig zu erforschen“, nicht einmal mit dem Gerätepark im Max-Planck-Institut in Leipzig. Man merkt, wie sehr das den Technikfreak wurmt. Aber wer weiß? Vor 40 Jahren, als er seine Karriere als junger Student begann, glaubte Hublin, dass schon alles Wesentliche der Menschheitsgeschichte erforscht sei und die Methodik keine wesentlichen Fortschritte mehr machen würde: „Mein Irrtum hätte nicht größer sein können.“ ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Der Neandertaler hatte ähnliche kognitive Fähigkeiten wie der *Homo sapiens* in der Steinzeit.
- So übernahmen Neandertaler Werkzeugtechniken der zugewanderten modernen Menschen.
- Die Überlegenheit des *Homo sapiens* bestand vermutlich darin, Netzwerke über größere Entfernungen zu bilden sowie künstlerische und mythische Elemente zur Festigung der Gruppe zu nutzen.

GLOSSAR

Paläoproteomik: Bestimmung urgeschichtlicher Funde mittels Proteinanalysen, beispielsweise in Knochenfragmenten.

(Werkzeug-)Industrien: Kulturen der Steinzeit, die durch bestimmte Werkzeuge – zum Teil auch Schmuck und Kunstwerke – und die verwendeten Herstellungstechniken charakterisiert sind.

Moustérien: Werkzeugkultur der Neandertaler, gekennzeichnet durch Pfeilspitzen, Schaber und Klingen, die auf charakteristische Art von Steinen abgeschlagen wurden.

Aurignacien: Kultur, die sich zeitgleich mit dem Auftreten des modernen Menschen in Europa findet. Typisch sind Projektilspitzen aus Knochen und Elfenbein, lange, schmale Feuersteinklingen sowie erste Kleinkunstwerke.

Châtelperronien: Letzte Kultur, die mit dem Neandertaler verbunden ist. Überschneidet sich zeitlich mit dem älteren Aurignacien und ist durch Knochen-, Geweih- und Elfenbeinwerkzeuge sowie Schmuck gekennzeichnet.

Die Milch macht's: Die Entwicklung von Viehzucht und Ackerbau sorgte für eine einfache und sichere Verfügbarkeit von Fleisch und Getreide. Als besonders wertvoll erwies es sich, auch die Milch von Rindern, Schafen und Ziegen zu nutzen.



Der Wandel, der vom Acker kam

Der Übergang zur Landwirtschaft hat menschliche Gesellschaften so drastisch verändert wie kaum eine andere Innovation. Wissenschaftler am **Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte** in Jena untersuchen diesen Umbruch aus ganz unterschiedlichen Richtungen.

TEXT **CLAUDIA DOYLE**

Landwirt. Das heißt: früh aufstehen und spät ins Bett gehen, nie Urlaub machen, immer für den Hof da sein. Leben am Limit und am Ursprung. Bereits seit mehr als 10000 Jahren widmen sich Menschen der Landwirtschaft. Einst waren wir alle Bauern. Doch bevor unsere Vorfahren den Ackerbau für sich entdeckten, zogen sie als Jäger und Sammler durchs Land. Sie lebten in kleinen Gruppen beisammen. Für kriegerische Konflikte gab es keinen Anlass, sozialer Status war ihnen fremd, Besitztümer wurden geteilt. Viele Dinge, die wir als selbstverständlich betrachten, hatten im Alltag unserer Ur-ahnen keinen Platz.

Der Anthropologe Robert Spengler, der im Herbst 2017 von der New York University an das Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte nach Jena wechseln wird, nennt den Wandel zur landwirtschaftlichen Lebensweise „einen Schneeball, der nicht aufzuhalten war“. Der Ackerbau eröffnete die Möglichkeit, Getreide zu lagern und damit größere Familien zu ernähren. In der Folge wuchs die Bevölkerung rapide an.

Für die landwirtschaftliche Arbeit wurden nicht alle Mitglieder der Gemeinschaft gebraucht, sodass sich einige von ihnen geistig, spirituell oder künstlerisch betätigen konnten – aber auch begannen, Kriege zu führen. Mit der Ausprägung von Berufen wurden die menschlichen Gemeinschaften zunehmend komplexer, und Veränderungen nahmen exponentiell zu. Wie genau dieser Schneeball ins Rollen kam, wissen wir bisher allerdings nicht. Am Jenaer Institut gehen die Forscher mit ganz unterschiedlichen Ansätzen dieser Frage nach.

LANDWIRTSCHAFT BRACHTE MEHR PFLANZLICHE NAHRUNG

Der Übergang von der nomadischen Lebensweise der Jäger und Sammler zum sesshaften Lebensstil der Ackerbauern ist fließend. Es gab und gibt reine Jäger- und-Sammler-Kulturen, die weder Nutztiere halten noch Felder bewirtschaften. Daneben existieren Völker, die mit ihren Herden durchs Land streifen und nebenbei in geringem Umfang Ackerbau betreiben. Dazu kommen noch die

Ackerbauern – die sesshafteste der Gruppen –, die aber trotzdem noch fischen und jagen. Klar ist, dass im Laufe der Jahrtausende in vielen Weltregionen die sesshafte bäuerliche Lebensweise nach und nach jene der Jäger, Sammler und Nomaden immer weiter zurückgedrängt hat.

Wer diesen Übergang und den dadurch bedingten kulturellen Wandel erforscht, der stößt immer wieder auf eine Besonderheit. Überall auf der Welt war es die Landwirtschaft, die umfassende gesellschaftliche Veränderungen angestoßen hat. Mit Ausnahme des Gebiets der heutigen Mongolei, des westlichen China und des östlichen Russland: Die Lehrbuchmeinung seit den 1930er-Jahren lautet, dass die Menschen dort die Innovationen der Landwirtschaft ignorierten, weiterhin als nomadische Viehhirten lebten und trotzdem eine komplexe Gesellschaftsform entwickelten.

Seit etwa zehn Jahren erhält dieses Weltbild Risse. Unruhestifter im positiven Sinne ist Robert Spengler. Er schloss sich archäologischen Ausgrabungsgruppen in Zentralasien an und suchte nach Beweisen für frühe landwirtschaftliche



Oben Bei Grabungen in Tasbas, Kasachstan, fand Robert Spengler die bisher frühesten Nachweise für Getreideanbau im nördlichen Zentralasien. Lange hatte man die frühen Bewohner der Region ausschließlich für Nomaden gehalten.

Unten Nutzpflanzen verbreiteten sich mit Kaufleuten und Einwanderern – etwa über die legendäre Seidenstraße. Davon zeugen Kichererbsen aus der Zeit um 1100 nach Christus, die bei Ausgrabungen in Usbekistan gefunden wurden.



Aktivitäten. Während um ihn herum alle Leute auf die Skelette starrten, kratzte er Asche aus 5000 Jahre alten Feuerstellen und fand darin verkohlte Pflanzensamen.

Unter dem Mikroskop kann Spengler allein an ihrem Aussehen erkennen, zu welcher Pflanze sie gehören. Der Wissenschaftler fand unterschiedliche Weizenarten, Hirse, Gerste, Erbsen, Linsen und Bohnen. Alles Pflanzen, die eher auf Feldern angebaut als in der Wildnis gesammelt werden. „Die Gesellschaften dort sind also keine Ausnahme von der Regel, sie haben zwar gejagt, gefischt und Pflanzen gesammelt, aber definitiv auch Ackerbau betrieben“, sagt Spengler. „Bisher hat das einfach niemand erforscht.“

Eine der tief greifenden Veränderungen, die der Übergang zur Landwirtschaft mit sich brachte, war das Nahrungsangebot. Nomadische Völker begeben sich täglich auf die Suche nach etwas Essbarem, laufen immer den Herden hinterher, so weit die Füße tragen. Auf ihrem Speiseplan stehen neben dem Fleisch ihrer Tiere auch Wurzeln, Früchte, Rinde und andere essbare Pflanzenteile, jedoch nur in geringem Umfang. Die Ernährung änderte sich wesentlich, als die Nomaden vor mehr als 10000 Jahren im Gebiet des sogenannten fruchtbaren Halbmonds, der

sich vom heutigen Irak bis nach Syrien erstreckt, den Ackerbau für sich entdeckten. Pflanzliche Nahrung nahm langsam, aber sicher einen viel höheren Stellenwert ein.

Christina Warinner, Forschungsgruppenleiterin am Jenaer Institut, interessiert sich schon lange für die Ernährung unserer steinzeitlichen Vorfahren. Sie will ganz genau herausfinden, an welchen Kostlichkeiten sich die Menschen damals gelabt und woher sie den Großteil ihrer Kalorien bezogen haben.

ISOTOPE IN KNOCHEN VERRATEN ESSGEWOHNHEITEN

Eine gute Möglichkeit, etwas über die Ernährung unserer Vorfahren herauszufinden, ist die Analyse von Isotopen in Knochen oder Zähnen. Stickstoffisotope geben Auskunft darüber, ob ein Mensch viel Fleisch oder eher pflanzliche Nahrung zu sich genommen hat. Das Verhältnis der verschiedenen Kohlenstoffisotope erzählt davon, ob vorwiegend sogenannte C_3 -Pflanzen – Weizen, Reis und Kartoffeln – oder C_4 -Pflanzen wie Mais und Hirse auf dem Speiseplan standen. Genauere Informationen darüber, welche C_3 - oder C_4 -Pflanzen wichtig für die Ernährung waren, liefert die Isotopenanalyse jedoch nicht. Um an diese Informatio-

nen zu gelangen, müssen Archäologen auf andere Methoden zurückgreifen.

Das größte Problem für Warinners Forschungsarbeit war lange Zeit, dass Pflanzen zu schnell verrotten. In archäologischen Grabungsstätten finden sich zwar massenweise Tierknochen, Überreste von pflanzlichen Mahlzeiten hingegen fehlen meist. Ein Knochenfund sagt zudem kaum etwas darüber aus, zu welchem Zweck die Menschen diese Tiere einst domestiziert haben. Spannten sie die Kuh vor den Pflug, molken sie ihre Milch, oder waren sie nur auf ihr Fleisch aus?

Im Jahr 2010, damals noch in Zürich, begann Christina Warinner damit, sich diesen Fragen mit einer ganz neuen Methode zu nähern. Ihr Forschungsobjekt: Zahnstein. Diese versteinerte Plaque, die Zahnärzte uns heutzutage routinemäßig von den Zähnen kratzen, besteht aus verschiedenen Calciumphosphat-Verbindungen. Aber stecken darin vielleicht noch mehr Informationen? Sind Bakterien darin eingeschlossen, Pollen oder Proteine? Warinner glaubte genau das. Sie begann, den Zahnstein auf den Zähnen unserer Vorfahren wissenschaftlich zu untersuchen.

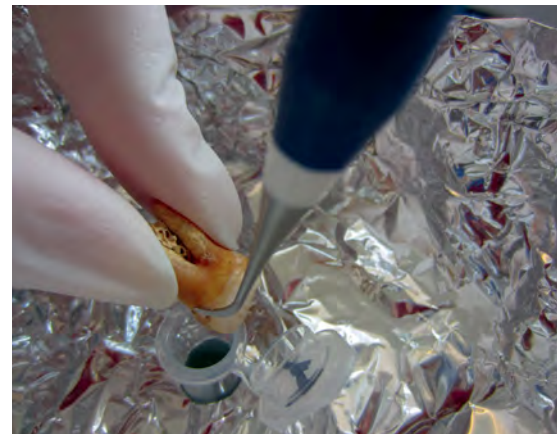
Ihre Kollegen konnten mit dieser Idee zunächst nicht viel anfangen. Was sollte in Zahnstein schon vorhanden sein? „Das hat mich ziemlich entmutigt“, erzählt die Forscherin. Doch aufgegeben hat sie nicht. Sie besorgte sich Schädel von archäologischen Ausgrabungen und ein paar Zahnarztinstrumente. Damit schabte sie vorsichtig den Zahnstein von den Zähnen. Mithilfe eines Fluorometers testete sie, ob DNA darin enthalten war. Ihr Messgerät zeigte zunächst eine Fehlermeldung an. Allerdings nicht, weil keine DNA zu finden war, sondern weil die Probe zu viel DNA beinhaltete. „Ich wusste gar nicht, dass das ein Problem sein könnte“, erinnert sich Warinner lachend.

Das Erbgut stammt zum überwiegenden Teil von Bakterien. Egal, wie gründlich man sich die Zähne putzt, in unserer Mundhöhle tummeln sich Milliarden davon. Warinner nennt diese Lebensgemeinschaft das „orale Mikrobiom“. Genau wie das Mikrobiom im Darm hat es bei jedem Menschen eine einzigartige Zusammensetzung. Nur ist es bisher viel weniger erforscht. Gerade analysiert Christina Warinner Bakterienpopulationen aus dem Zahnstein von Steinzeitskeletten. Erkenntnisse über Krankheiten hat sie so schon gewonnen. Nun erhofft sie sich auch Aufschluss über die Ernährungsweise unserer Vorfahren.

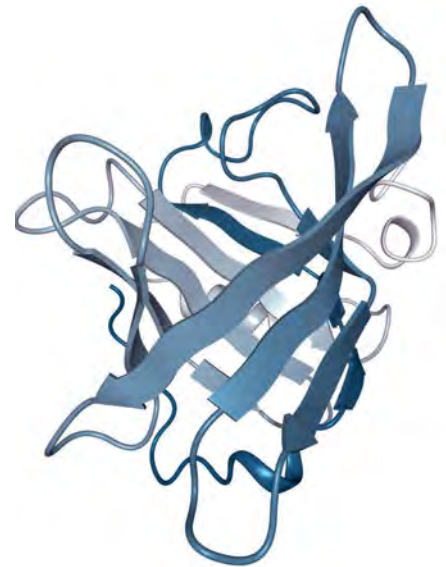
MILCH IST EINE ART SAUBERES WASSER

Über ein anderes Geheimnis hat Warinner aus dem Zahnstein schon mehr erfahren. Ihre Frage war: Wann und wo haben die Menschen mit der Milchwirtschaft begonnen? Seit mindestens 8500 Jahren nutzen Menschen die Milch von Tieren als Nahrungsmittel. Beweise dafür sind Proteine, die eingeschlossen im Zahnbelag Jahrtausende überdauert haben. Ein Protein zeigte sich in besonders vielen Zahnsteinproben: -Lactoglobulin (BLG), das in der Milch von Kühen, Schafen und Ziegen vorkommt, nicht jedoch in Muttermilch. BLG ist nahezu unzerstörbar. Während andere Proteine unter Einwirkung von Hitze oder Säure kollabieren, übersteht BLG das unbeschadet.

Was für Warinners Analysen noch wichtiger ist: Bei jedem Tier hat BLG eine andere Aminosäuresequenz. Die Forscherin kann daher genau erkennen, welche Art von Milch in einer bestimmten Kultur konsumiert wurde und wann Menschen überhaupt damit begonnen haben, weit über das Kleinkindalter hinaus Milch oder Milchprodukte zu sich zu nehmen. >



Nützliche Ablagerungen: Zahnstein enthält wertvolle Informationen über Krankheiten und Ernährungsweisen vergangener Epochen, und er bleibt über Jahrhunderte auf den Zähnen erhalten. Um Proben zu entnehmen, nutzen Forscher normale Zahnarztwerkzeuge (unten).



Geschichtsforschung mittels Mikrobiologie: Christina Warinner untersucht an fossilen Skeletten, ob Menschen früher Milchprodukte zu sich genommen haben. Das β -Lactoglobulin (rechts), ein Protein, das sich im Zahnstein erhalten hat, verrät sogar, von welchem Tier die Milch stammt.

Der Mensch bildet beim Milchkonsum eine Ausnahme. Alle anderen Säugetiere vertragen zwar in jungen Jahren Milch, verlieren diese Fähigkeit jedoch im Alter. Nach der Stillzeit stellt der Körper die Produktion des Enzyms Lactase ein. Fehlt Lactase, können wir Milchzucker nicht verdauen. Bei einigen Menschen ist eine Genmutation dafür verantwortlich, dass Lactase auch nach der Säuglingszeit weiterproduziert wird. Besonders in Europa können daher auch viele Erwachsene problemlos Milch trinken.

Milch liefert Proteine, Fette, Vitamine, Mineralstoffe und ist auch eine Art „sauberes Wasser“. Kamele beispielsweise können für Menschen ungenießbares, salzhaltiges Wasser trinken und die Flüssigkeit in Form von Milch an den Menschen weitergeben. Die Annahme ist: Milchtrinker hatten einen evolutionären Vorteil. Wer Milch verdauen konnte, wurde kräftiger, lebte länger und zeugte mehr Nachkommen. Die Mutation setzte sich durch.

Mindestens fünfmal entstand die sogenannte Lactasepersistenz unabhängig voneinander. Am weitesten verbreitet

ist sie heute in Skandinavien. Dort können etwa 80 Prozent der Menschen auch im Erwachsenenalter problemlos Milch trinken. Christina Warinner will mehr darüber herausfinden, wie Populationen ohne Lactasepersistenz Milch genutzt haben. Heutige Viehhalter in der Mongolei, die lactosehaltige Milch meist nicht vertragen, verarbeiten Milch zum Beispiel ganz anders als Europäer. Sie haben sich auf Herstellungsprozesse spezialisiert, bei denen der Milchzucker abgebaut wird.

FRÜHE ACKERBAUERN WAREN DIE ERSTEN WEISSEN EUROPÄER

Der Beginn des Ackerbaus brachte den Europäern noch eine weitere sichtbare Veränderung, die bis heute Bestand hat: ihre ungewöhnlich helle Hautfarbe. Unsere Vorfahren und deren nächste Verwandte, vom Neandertaler bis zum Denisova-Menschen, waren alle dunkelhäutig. „Leider hat sich diese Erkenntnis noch nicht bis in die Museen herumgesprochen“, sagt Johannes Krause, Direktor der Abteilung Archäogenetik am Max-Planck-Institut für Mensch-

heitsgeschichte. „Dort sind Neandertaler und Steinzeitmenschen immer mit blasser Haut und roten Haaren dargestellt.“ Auch Jäger und Sammler sowie die ersten Ackerbauern im fruchtbaren Halbmond trugen vorwiegend Gene für dunkle Haut.

Mutationen in diesen Genen, die eine hellere Hautfarbe bewirken, fanden Forscher erstmals in den Skeletten früher Ackerbauern in Europa. Zunächst traten diese Mutationen nur vereinzelt auf, dann setzten sie sich durch. Heute sind sie bei 99 Prozent der Bevölkerung in Zentraleuropa fixiert. Man nimmt an, dass die Europäer ohne diese Anpassung an starkem Vitamin-D-Mangel leiden würden. Denn um an dieses Vitamin zu kommen, haben wir Menschen zwei Möglichkeiten. Einerseits können wir es über die Nahrung aufnehmen, Fleisch und Fisch liefern viel Vitamin D. Andererseits kann unser Körper es in der Haut mithilfe von Sonnenlicht selbst bilden.

Die dunkelhäutigen Ackerbauern konnten keine dieser Quellen effizient anzapfen. Sie aßen nur noch wenig Fleisch, das weiß man aus Isotopenana-

lysen ihrer Knochen. Und sie hatten sich weit in die nördlichen Breitengrade vorgewagt, wo die Sonne viel schwächer strahlt als am Äquator. Helle Haut war ihre Rettung. Sie lässt wesentlich mehr Sonnenlicht eindringen, sodass bei weniger intensiver Sonnenstrahlung trotzdem noch Vitamin D produziert werden kann.

TIERHALTUNG FÜHRTE ZU NEUEN KRANKHEITEN

Als die Menschen begannen, Felder zu bewirtschaften, wurden sie sesshaft. Damit fingen sie auch an, in viel enger Nachbarschaft mit Tieren zu leben. Nutztiere wie Schweine, Rinder, Ziegen und Schafe lebten auf Weiden und in Ställen direkt neben den Wohnhäusern. Dieser „Kuschelkurs“ hatte einen großen Gewinner. Es waren jedoch weder die Menschen noch die Tiere – son-

dern Krankheitserreger. Pathogene lieben es, wenn Individuen in engen Gemeinschaften zusammenleben. Viren und Bakterien brauchen Wirte, also Menschen oder Tiere, um sich zu vermehren. Je mehr Wirte sie infizieren können, umso besser für sie.

„Es ist eine anerkannte Theorie, aber bisher fehlen uns die Beweise dafür, dass die frühen Ackerbauern tatsächlich mehr Krankheitserregern ausgesetzt waren als die Jäger und Sammler“, sagt Johannes Krause. „Die Krankheitserreger haben uns leider keine direkten Fossilien hinterlassen.“ Es gibt allerdings deutliche Hinweise, die diese Theorie stützen. So befallen viele der mit Masern, Pocken und Keuchhusten verwandten Erreger unsere Nutztiere und sind vermutlich von dort auf den Menschen übergegangen. Eine Ausnahme bildet die Tuberkulose. Mit diesem Bakterium hat der Mensch seine Rin-

derherden infiziert. Unbekannt ist bisher, wer die Tuberkulose auf den Menschen übertragen hat.

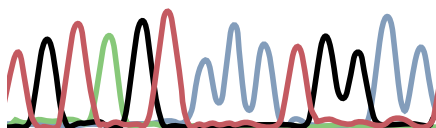
Johannes Krause erforscht die Evolution von Krankheitserregern. Er will herausfinden, wo sie erstmalig entstanden sind, wie sie sich verbreitet und an neue Bedingungen angepasst haben. Dafür braucht er zuallererst genetisches Material der historischen Keime. Eine Fundgrube dafür sind Massengräber, in denen die Opfer von Epidemien begraben wurden. Aus den Knochen und Zähnen dieser alten Skelette lässt sich die DNA der Krankheitserreger isolieren.

Allerdings ist ihr Erbgut bei Weitem nicht intakt, sondern in winzige Bruchstücke von nur etwa 50 Basenpaaren zerfallen. Um in all der menschlichen DNA überhaupt die Pathogen-DNA zu finden, hat Krause eine so simple wie effektive Methode entwickelt. Er nutzt einzelsträngige DNA moderner Krankheits-

Rechts Mongolische Hirten verarbeiten Milch so, dass Lactose weitgehend abgebaut wird. Zur Haltbarmachung werden Milchprodukte auf Jurten-dächern getrocknet.

Unten Ob Erwachsene Milch verdauen können, bestimmt der DNA-Baustein Thymin an einer bestimmten Stelle des Genoms (hervorgehobenes T). Steht dort ein Cytosin (C), besteht Lactoseunverträglichkeit.

TGTAG**T**CCCTGGCC



Schwindelerregende Suche: In einer Höhle in der Nähe des Toten Meeres fanden Wissenschaftler 6000 Jahre alte Gerstenkörner. Der Höhleneingang liegt in einer fast senkrecht aufragenden Felswand rund vier Meter oberhalb eines Pfades. Dank der Trockenheit in der Wüstenregion sind die Körner so gut erhalten, dass ihr Genom rekonstruiert werden kann.



erreger als Köder und angelte damit die Erbgutfetzen der alten Pathogene aus den Proben. Dann wäscht er alle DNA ab, die nicht an den Angelhaken hängt und somit nicht vom Pathogen stammt, sondern vom menschlichen Wirt selbst oder von Bodenorganismen. Mit dieser Methode konnte der Forscher unter anderem DNA des Pesterregers *Yersinia pestis* in einer bislang ungekannten Genauigkeit rekonstruieren. Die Knochen stammten von einem Friedhof in London, wo im 14. Jahrhundert ausschließlich Pestopfer begraben wurden.

Die ältesten untersuchten Pesterreger sind jedoch wesentlich älter. Wissenschaftler von der Universität Kopenhagen entdeckten sie in 5200 Jahre alten Skeletten aus der zentralasiatischen Steppe. Dort könnte die Krankheit ihren Ursprung haben. Möglich wäre, dass sie sich gemeinsam mit den sehr mobilen Steppenbewohnern von Zentralasien in alle Himmelsrichtungen ausgebreitet hat.

Dass es zu dieser Zeit eine massive Einwanderung aus der zentralasiatischen Steppe nach Zentraleuropa ge-

geben hat, das entdeckten Johannes Krause und seine Kollegen ebenfalls bei der Untersuchung alter Skelette. Genauer gesagt, war es wieder einmal deren DNA, die die Forscher auf die Spur brachte. Eine Analyse des Erbguts von mehr als 250 Skeletten aus verschiedenen Ausgrabungsstätten in Europa beweist, dass es zwei große Bevölkerungs-umbrüche gegeben hat.

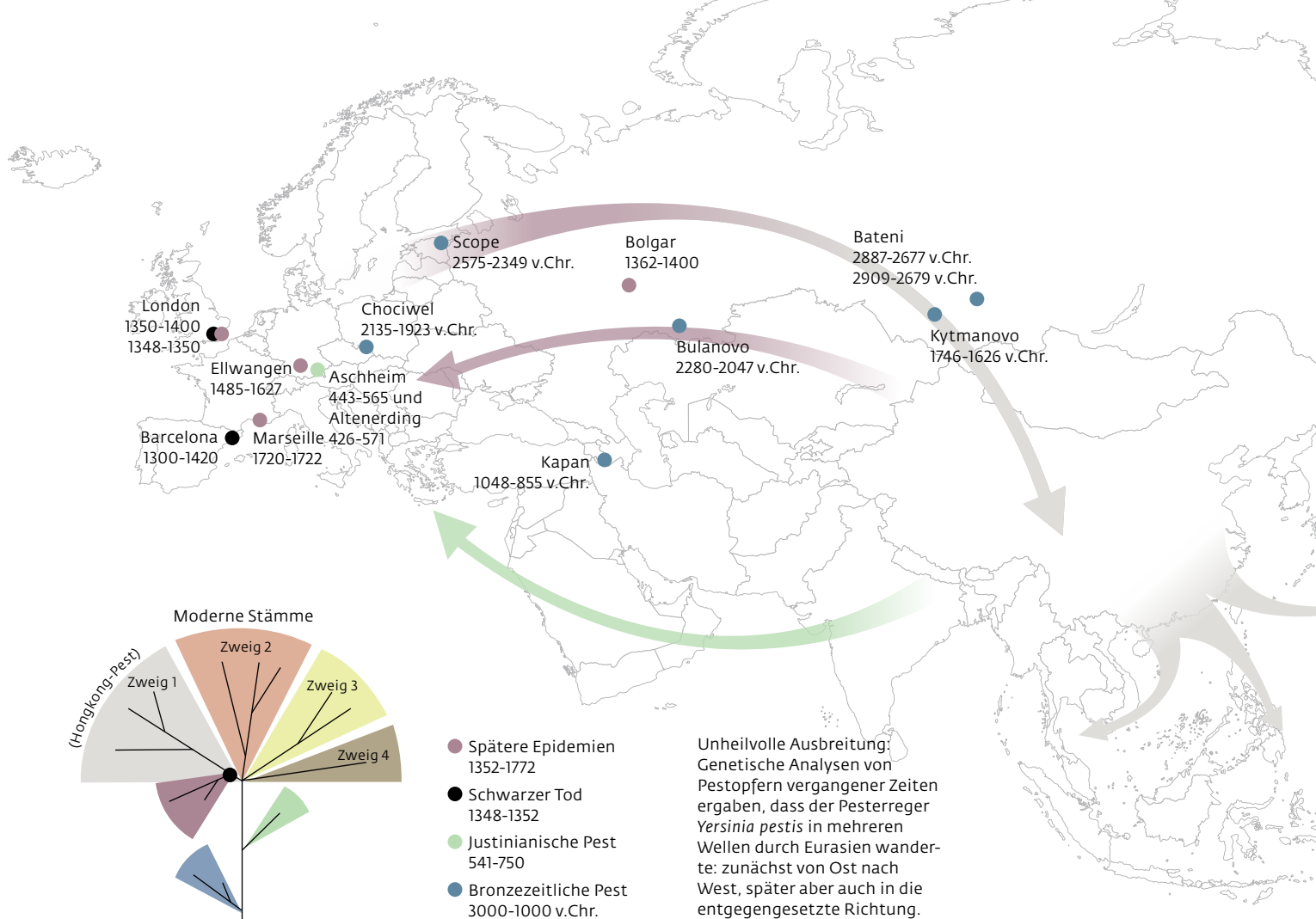
Die ältere Einwanderungswelle begann damit, dass die ersten Ackerbauern aus dem Gebiet des fruchtbaren Halbmonds äußerst erfolgreich waren. Sie fuhren gute Ernten ein, hatten immer reichlich zu essen, die Bevölkerung wuchs, langsam entwickelten sich erste Berufe. „Erst durch Landwirtschaft hatten die Menschen Zeit für spezialisiertes Handwerk, standardisierte Massenproduktion und kriegerische Auseinandersetzungen“, sagt Krause.

Auf der Suche nach fruchtbaren Böden wanderten einige Ackerbauern nach Westen und besiedelten vor etwa 7500 Jahren Mittel- und Westeuropa, von Bulgarien bis Spanien. In diesen Gebieten verdrängten sie die Jäger-und-

Sammler-Gesellschaften nicht. Vielmehr existierten die beiden Gruppen nebeneinander, bis die Jäger und Sammler allmählich bäuerliche Lebensweisen übernahmen und sich mit den Eingewanderten vermischten. Andere frühe Ackerbauern verließen den fruchtbaren Halbmond in Richtung Osten und besiedelten die asiatischen Steppegebiete. Sie sollten später in einer zweiten Einwanderungswelle nach Europa gelangen.

EINWANDERUNGSWELLE AUS DER ASIATISCHEN STEPPE

Diese begann vor etwa 4800 Jahren. Auf einen Schlag drängten unglaublich viele Menschen aus der westlichen asiatischen Steppe nach Europa. Die Einwanderer ersetzten die lokale Bevölkerung nahezu komplett. Das fanden die Jenaer Wissenschaftler gemeinsam mit einem internationalen Team heraus. Dieses Mal konnten die Landwirtschaft und das dadurch bedingte Bevölkerungswachstum nicht der Auslöser dafür gewesen sein, denn beide Populatio-



nen betrieben Landwirtschaft. Was aber war dann der Grund dafür?

„Das ist genau die Frage, die wir uns stellen“, sagt Johannes Krause. „Wie kommt es dazu, dass eine Population so erfolgreich ist?“ Eine Theorie wäre, dass die Einwanderer den Pesterreger nach Europa schleppten, gegen den sie selbst bereits Resistenzen entwickelt hatten. Indem die Forscher frühe Krankheitsausbrüche und die Evolution der Keime besser erforschen, erhoffen sie sich auch ein besseres Verständnis für die Gefährlichkeit dieser Erreger und die Möglichkeiten, sie zu bekämpfen.

Die Landwirtschaft hat die Welt in vielerlei Hinsicht verändert. Sie hat den Menschen Nahrung in großer Menge und Vielfalt, aber auch neue Krankheitserreger beschert, sie hat Migrationswellen ausgelöst, Kunst und Kultur zum Erblühen gebracht, aber auch Kriege befördert. Mit der Erforschung dieser umfassenden Veränderungen gewinnen die Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte immer tiefere Einblicke in die Entstehung unserer heutigen Gesellschaften. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Mit der Einführung des Ackerbaus änderte sich die Ernährung: Menschen begannen mehr pflanzliche Lebensmittel und weniger Fleisch zu essen.
- Dadurch war weniger Vitamin D in der Nahrung. In der Folge setzten sich bei den ursprünglich dunkelhäutigen Europäern Gene für helle Haut durch. So kann der Körper mithilfe von Sonnenlicht selbst Vitamin D produzieren.
- Auch Gene, die bewirken, dass Erwachsene Milch verdauen können, erwiesen sich als vorteilhaft; die Bauern hielten zunehmend Milchvieh.
- Die Haltung von Nutztieren brachte die Menschen in engen Kontakt mit Krankheitserregern, ihr Immunsystem musste sich anpassen.
- Mehr und bessere Nahrung führte zu Bevölkerungswachstum und Migration.

GLOSSAR

Isotopenanalyse: Von fast jedem Element gibt es verschiedene Isotope, das heißt, ihre Atomkerne enthalten unterschiedlich viele Neutronen. Dies kann man mittels Massenspektrometrie messen. Aus dem Anteil der Isotope lassen sich Informationen wie Alter oder Herkunft der Proben entnehmen. In historischen Skelettfunden geben Isotope Aufschluss über die Ernährung. Stickstoffisotope deuten auf viel fleischliche Nahrung hin, das Verhältnis verschiedener Kohlenstoffisotope auf den Verzehr bestimmter Pflanzen.

Lactasepersistenz: Um den in Milch enthaltenen Milchzucker Lactose zu verdauen, braucht der Körper das Enzym Lactase, das im Erwachsenenalter normalerweise nicht gebildet wird. Genetische Veränderungen führten bei bäuerlichen Siedlern in Europa dazu, dass ihr Körper weiterhin Lactase produziert. Diese sogenannte Lactasepersistenz ist das Gegenteil von Lactoseintoleranz, der Unverträglichkeit von Milch.

Umweltsünden aus der Urzeit

Der Mensch verändert die Erde derzeit in nie da gewesenem Ausmaß. Doch wann begann die Verwandlung unseres Planeten – und somit das Zeitalter des Menschen, das Anthropozän? Für Archäologen ist klar: Schon seit Zehntausenden von Jahren greift die Menschheit in Ökosysteme weltweit ein. Mit neuen Methoden sucht das Team um **Nicole Boivin** am **Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte** in Jena nach den frühesten Spuren des menschlichen Wirkens – und mischt sich in aktuelle Debatten ein.

TEXT UTE KEHSE

Die Narben in der Landschaft sind selbst auf Satellitenbildern zu erkennen. Steinbrüche, mitten im Zentrum der Arabischen Halbinsel. Fast in industriellem Maßstab müssen die dunklen, vulkanischen Felsen einst abgetragen worden sein – und das zu einer Zeit, als die Art *Homo sapiens* noch gar nicht auf der Erde erschienen war. Bereits vor Hunderttausenden von Jahren stellten Urmenschen der Art *Homo erectus* aus dem harten Vulkangestein einfache Werkzeuge her, sogenannte Handäxte. „Diese Leute veränderten die geologischen Aufschlüsse in einem riesigen Gebiet, einem Streifen von mehr als 150 Kilometern Länge“, berichtet Michael Petraglia. „Sie nahmen große Felsbrocken und zerbrachen sie. Man findet dort Zehntausende von Splittern“, so der Professor für mensch-

Überall menschliche Spuren:
Auch im tropischen Regenwald
von Sri Lanka lebten bereits
vor 36000 Jahren Menschen, wie
Funde in der Batadombalena-
Höhle belegen. Diese frühen
Bewohner verwendeten aus-
geklügelte Methoden zum
Jagen und Fallenstellen, um in
der unwirtlichen Umgebung
zu überleben.





Die Wüste lebte: Die Arabische Halbinsel war in den vergangenen 500 000 Jahren mehrfach feucht und fruchtbar. Faustkeile zeugen noch heute von menschlichem Leben. Michael Petraglia (rechts) untersucht mit seinem Team, wie schon Fröhmenschen die Umwelt dort prägten.

liche Evolution und Vorgeschichte am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena.

Schon mit dem Aufkommen der ersten Steinwerkzeuge vor mehr als drei Millionen Jahren begannen Menschen also, die Geologie zu verändern, sagt Petraglia: „Bereits die Vorfahren des modernen Menschen haben ihre Umwelt gestaltet.“ Allerdings sind die frühen Spuren dieses Wandels oft nicht leicht zu erkennen. Am Jenaer Max-Planck-Institut haben es sich die Forscherinnen und Forscher der Abteilung für Archäologie zur Aufgabe gemacht, diese Veränderungen aufzuspüren.

Um den Einfluss des Menschen detailliert nachweisen zu können, arbeiten sie eng mit Kollegen aus den Umweltwissenschaften zusammen, unter anderem vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie, das ebenfalls in Jena beheimatet ist. Gemeinsam wollen Archäologen und Umweltwissenschaftler verstehen, auf welche Weise die Aus-

breitung des Menschen Landschaften wie den tropischen Regenwald verändert, sich auf Tier- und Pflanzenarten ausgewirkt und sogar völlig neue Ökosysteme geschaffen hat.

DEFINITION DES ANTHROPOZÄNS SORGT FÜR UNMUT

„Archäologen sind sich dessen bewusst, dass selbst diejenigen Landschaften durch den Menschen verändert wurden, die uns heute als ursprünglich erscheinen“, sagt Nicole Boivin, Leiterin der im vergangenen Jahr neu gegründeten Abteilung für Archäologie am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte. „In anderen Disziplinen ist dieses Bewusstsein allerdings wesentlich schwächer ausgeprägt“, fügt sie hinzu. Sie bezieht sich damit auf eine Debatte, die vor Kurzem in den Geowissenschaften entbrannt ist.

Im August 2016 hatte eine Arbeitsgruppe der Internationalen Kommissi-

on für Stratigraphie angekündigt, innerhalb der nächsten drei Jahre eine neue geologische Epoche zu definieren – das Anthropozän. Der Mensch sei mittlerweile eine „geologische Supermacht“ und beeinflusse die geologischen, biologischen und atmosphärischen Prozesse auf der Erde so stark, dass man dafür ein neues Zeitalter brauche.

Doch wann begann das Anthropozän? Die Mehrheit der Wissenschaftler in der Arbeitsgruppe ist der Meinung, der Beginn des neuen Zeitalters solle auf das Jahr 1950 gelegt werden. Neue Technologien, die Mitte des 20. Jahrhunderts aufkamen, hinterließen von diesem Zeitpunkt an charakteristische Spuren. So entstanden bei Atombombentests künstliche Radionuklide, außerdem gelangten erstmals Plastik- und Aluminiumpartikel in die Umwelt, die sich in geologischen Ablagerungen gut nachweisen lassen. Weitere Vorschläge für den Beginn des Anthropozäns sind unter anderem das Jahr 1800 (der Be-



Pionierarbeit in der Einöde: Während die Frühgeschichte in Europa schon seit Längerem intensiv erforscht wird, betreten die Max-Planck-Wissenschaftler in Saudi-Arabien echtes Neuland. Mithilfe von Satellitendaten graben sie gezielt an Orten, wo es einst Flüsse und Seen gab.

ginn der Industrialisierung) oder das Jahr 1610 (damals begann der globale Austausch von Tieren und Pflanzen).

Allerdings fehlt in der Diskussion die Stimme der Sozialwissenschaften, bemängelte Nicole Boivin zusammen mit drei Kollegen im Dezember 2016 in einem Kommentar in der Zeitschrift NATURE. Insbesondere die Archäologie, die sich schließlich schon lange mit dem Einfluss des Menschen auf die Umwelt beschäftigt, kommt nach Meinung der Autoren in der Debatte zu kurz. Die Formalisierung des Anthropozäns müsse das Ergebnis einer transparenten, interdisziplinären Diskussion sein, an der auch Sozial- und Geisteswissenschaften beteiligt sein sollten, heißt es in dem Artikel.

Nach Meinung der Autoren ist es nicht sinnvoll, sich bei der Definition auf ein einziges globales Ereignis wie den Beginn oberirdischer Atomtests zu beziehen. Stattdessen sollte auch die Bedeutung weitreichender sozialer und

ökologischer Umwälzungen geprüft werden. „Es ist klar, dass die Veränderungen heute ein weitaus größeres Ausmaß erreichen als jemals zuvor“, sagt Nicole Boivin. „Aber auch schon früher haben Menschen das Aussterben von Arten verursacht oder Landschaften tief greifend geprägt.“

DER MENSCH VERÄNDERTE DEN PLANETEN IN VIER PHASEN

Die Steinbrüche des *Homo erectus* auf der Arabischen Halbinsel sprechen dafür, dass bereits diese Urmenschen ihre Umwelt – damals eine mit Seen übersäte Savanne – prägten. Im interdisziplinären EU-Projekt „Palaeodeserts“, das Michael Petraglia leitet, untersuchen Forscherinnen und Forscher aus Jena, von der University of Oxford und von weiteren Instituten seit 2012, wie sich die Umweltbedingungen in der Arabischen Wüste genau verändert haben – und wie sich die Wechsel zwischen tro-

cken und feuchten Bedingungen auf die menschliche Besiedlung auswirkten. Umgekehrt dürften die Menschen der Umwelt ebenfalls ihren Stempel aufgedrückt haben – etwa indem sie große Tiere wie Elefanten, Nilpferde oder Antilopen jagten. „Sie scheinen sie nicht ausgerottet zu haben“, sagt Petraglia. „Aber auch wenn eine Population durch die Jagd nur dezimiert wird, verändert sich ein Ökosystem.“

Dennoch blieben die Veränderungen zunächst eher subtil – und lassen sich heute nur schwer nachweisen. Mit dem Erscheinen des modernen Menschen, des *Homo sapiens*, nahm die Transformation des Planeten allerdings Fahrt auf. Nach Meinung von Nicole Boivin verlief dieser Prozess in vier Phasen: Zunächst führte die Ausbreitung des modernen Menschen im Jungpaläolithikum zum Aussterben vieler Arten; als Nächstes folgte die Entwicklung von Ackerbau und Viehzucht, wodurch teilweise völlig neue Ökosysteme entstan-



Frühgeschichtliches Artensterben: Wie das Mammut starben weltweit viele Großtiere nach der letzten Eiszeit aus. Ihr Verschwinden fällt mit der globalen Ausbreitung des Menschen zusammen.

Boivin ist es, eine interdisziplinäre Gruppe zu versammeln, in der die komplexe Frage mit neuen Methoden in mehreren Schlüsselgebieten untersucht werden kann. So wäre es beispielsweise wichtig, einzelne Ereignisse genauer zu datieren, alte DNA und Proteine zu analysieren, Computermodelle zu erstellen und paläoökologische Studien durchzuführen. Als besonders hilfreich für die Archäologie hat sich in jüngster Zeit eine Methode namens ZooMS (Zooarchaeology by Mass Spectrometry) erwiesen, mit der sich selbst angenagte, gekochte oder zersplitterte Knochenreste anhand von Kollagenproteinen bestimmten Arten zuordnen lassen.

„Die Megafauna ist deswegen so wichtig, weil ihr Verschwinden einschneidende Folgen nach sich gezogen hat“, erläutert Nicole Boivin. Große Pflanzenfresser wie Mammuts gelten als sogenannte Schlüsselarten, die ein Ökosystem entscheidend prägen. Sie verteilen Nährstoffe und Samen über weite Strecken und sorgen dafür, dass der Bewuchs niedrig bleibt. „Wenn eine solche Art ausstirbt, kann aus einer offenen Landschaft ein Wald werden. Im Extremfall, wenn viele größere Tierarten verschwinden und Wälder auf weiten Flächen nachwachsen, kann das sogar das globale Klima beeinflussen, weil Kohlendioxid aus der Atmosphäre verschwindet“, sagt die Max-Planck-Wissenschaftlerin.

den. In der dritten Phase besiedelte der Mensch auch entlegene Inseln, wo er oft besonders weitreichende Veränderungen verursachte. Die vierte Phase bestand im Wachstum von Städten und im Ausbau von Handelsnetzen, wodurch sich Landwirtschaft und Artenaustausch noch einmal intensivierten.

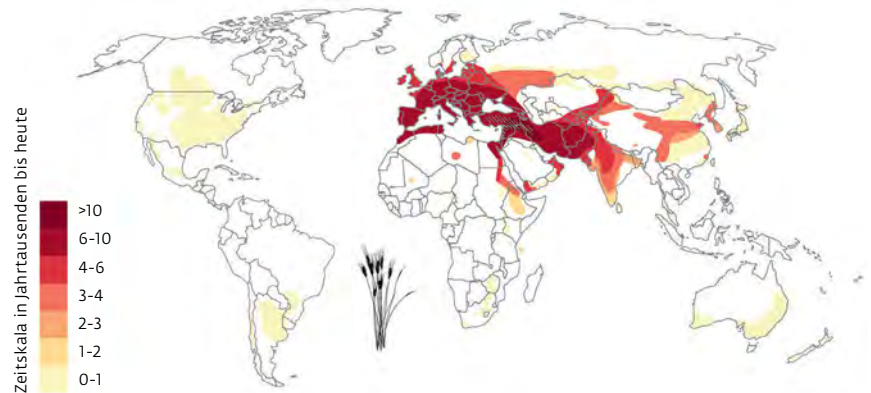
EINWANDERER SCHUFEN SICH ÖKOLOGISCHE NISCHEN

Der *Homo sapiens* war vor gut 195 000 Jahren in Ostafrika aufgetaucht und hatte vor etwa 12 000 Jahren selbst die letzten Winkel von Eurasien, Australien und Amerika erreicht. Diese Ausbreitung und das damit einhergehende Bevölkerungswachstum veränderten die Welt: Nach der Ankunft der Menschen wurden manche Tierarten ausgerottet, andere in neue Gebiete eingeschleppt, und die Siedler richteten sich eigene ökologische Nischen ein, die ihren Bedürfnissen entgegenkamen. So begannen die Menschen auf Neuguinea und Borneo, mit Feuer Lücken in den Regenwald zu reißen, damit dort stärkerwuchsende Pflanzen wachsen konnten. In Australien und Amerika zündeten Jäger

die Vegetation an, um Wild zu den jungen, nachwachsenden Pflanzen zu locken. Oder sie führten potenzielle Jagdtiere in Gegenden ein, wo zuvor kaum etwas zu fangen war. Der Graue Kuskus etwa, ein kleines Beuteltier aus Neuguinea, gelangte zusammen mit den ersten Siedlern vor etwa 23 000 Jahren auch nach Indonesien, auf die Salomonen und den Bismarck-Archipel.

Eine spannende Frage betrifft das Aussterben größerer Tierarten, der sogenannten Megafauna. Im Jungpaläolithikum, also im Zeitraum von 50 000 bis 10 000 Jahren vor unserer Zeit, verschwanden mehr als 100 von 150 Gattungen von der Erde – alles Tiere, deren Gewicht über 44 Kilogramm liegt, etwa der Höhlenbär, das Mammut oder sämtliche Riesenfaultiere. „Ob der Mensch eine Rolle dabei spielte oder ob Klima, Krankheiten oder vielleicht sogar Meteoriteneinschläge wichtiger waren, wird schon seit Jahrzehnten diskutiert“, sagt Boivin.

Im Februar 2017 fand am Jenaer Max-Planck-Institut ein zweitägiger Workshop statt mit dem Ziel, ein großes Forschungsprojekt zu dieser Frage in die Wege zu leiten. Die Absicht von

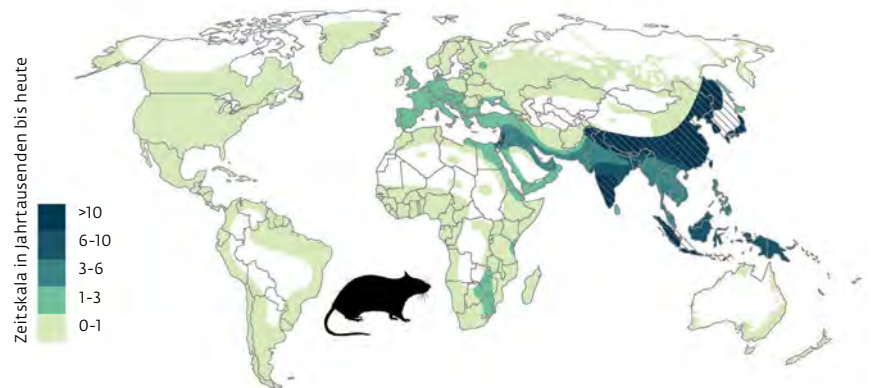
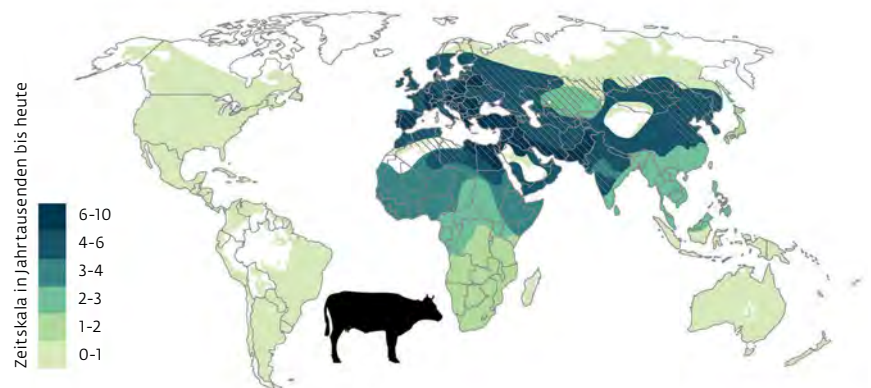


Bisher gebe es noch nicht genug Belege, um zu entscheiden, wie groß der Einfluss des Menschen war, sagt Boivin. Zudem waren die Einflussfaktoren je nach Kontinent und Breitengrad wahrscheinlich unterschiedlich. Für die Jenaer Archäologin ist es jedoch frapierend, dass umso mehr Arten ausstarben, je später der Mensch ein Gebiet erreichte. „In Afrika oder auch Indien hatten die Tiere teils Millionen von Jahren Zeit, sich gemeinsam mit den zunehmenden Fähigkeiten der Menschen zu entwickeln“, meint sie. Als die ersten Siedler Australien oder Südamerika erreichten, hatten sie indessen schon fortschrittliche Jagdtechniken und bessere Waffen im Gepäck.

IN NEU BESIEDELTEN GEBIETEN WAR DIE TIERWELT „NAIV“

Die Tierwelt war dagegen wahrscheinlich noch „naiv“ – ohne Angst vor dem Menschen und nicht in der Lage, sich schnell an die neuen, gefährlichen Feinde anzupassen. Das Verschwinden der Megafauna, das vor etwa 50 000 Jahren begann, könnte als erster weithin spürbarer Einfluss des Menschen nach Meinung von Boivin durchaus den Startpunkt des Anthropozäns markieren.

Etwa gleichzeitig begann der Mensch neuesten Erkenntnissen zufolge, in den Regenwald vorzudringen, vor allem in Südostasien. „Lange Zeit haben Archäologen angenommen, dass der tropische Regenwald eine Barriere für frühe Menschen war, weil es dort zu dunkel, zu unübersichtlich und zu gefährlich war und zudem zu wenig Nahrung gab“, sagt Patrick Roberts, Leiter der Gruppe



Pflanzliche und tierische Weggefährten: Mit dem *Homo sapiens* verbreiteten sich – teils absichtlich, teils zufällig – einzelne Arten in großer Zahl weltweit. Dazu gehören Nutzpflanzen wie Weizen (oben), domestizierte Tierarten wie Rinder (Mitte), aber auch Kulturfolger wie Ratten, die von Menschen gestaltete Lebensräume bevorzugen (unten).

„Stabile Isotope“ am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte. Doch inzwischen ist die Präsenz der ersten Jäger und Sammler in diesen Ökosystemen bereits vor gut 45 000 Jahren nachgewiesen, etwa auf Borneo, Sri Lanka und Neuguinea.

Die steinzeitlichen Gruppen jagten unterschiedlichste Tiere und ergänzten ihre Ernährung durch das Sammeln von Süßwasserschnecken, Nüssen, Früchten und Wurzeln. Dass sich Menschen in Sri Lanka schon vor vielen Jahrtausenden auf den Regenwald als Nahrungs-



Oben An einer Ausgrabungsstätte auf der Insel Unguja, die zum Sansibar-Archipel vor der ostafrikanischen Küste gehört, werden historische Pflanzenreste geborgen.

Unten Auf der benachbarten Insel Pemba fand das Team von Nicole Boivin im vergangenen Jahr Überreste einer ausgestorbenen oder ausgerotteten Krokodilart.



ressource verließen, hat Roberts kürzlich belegt, indem er Zahnschmelz von menschlichen Fossilien untersuchte. Er bestimmte dafür das Verhältnis verschiedener Kohlenstoffisotope in den Zähnen, die von unterschiedlichen Fundstellen in Sri Lanka stammten – und konnte so auf die Bedeutung des Waldes als Nahrungsquelle schließen.

Schon diese frühen Bewohner veränderten die tropischen Wälder grundlegend. Etwa indem sie Feuer legten und das Wachstum bestimmter Pflanzen förderten. In weiten Teilen des Amazonas dominieren heute Baumarten wie die Paranuss, der Kakaobaum oder die Kohlpalme – offenbar, weil präkolumbianische Völker sie schon vor vielen Tausend Jahren gezielt anbauten und ihre Samen verbreiteten. Das ergab eine im März 2017 in der Zeitschrift *SCIENCE* veröffentlichte Studie, an der auch Florian Wittmann vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz beteiligt war. Die lang gehegte Vorstellung, Regenwälder wie der Ama-

zonas seien unberührte, uralte Ökosysteme, ist damit nicht mehr aktuell. „Im Amazonas griff der Mensch eindeutig schon vor der europäischen Kolonisation in die Ökosysteme des Regenwalds ein. Es existierten sogar schon Städte dort“, sagt Patrick Roberts.

BESONDERS DEUTLICH SIND DIE EINGRIFFE AUF INSELN

Einfacher als in schwer zugänglichen Dschungelgebieten können Archäologen die Folgen der menschlichen Besiedlung auf Inseln nachweisen. Auf entlegenen Archipelen im Indischen oder Pazifischen Ozean trafen die ersten Siedler erst vor einigen Tausend Jahren ein – oft mit verheerenden Konsequenzen. „Wir sehen bedeutende Auswirkungen, wo auch immer wir genauer hinschauen“, sagt Nicole Boivin. „Auf Neuseeland etwa dauerte es nur Jahrzehnte, bis sich die Waldbedeckung nach der Ankunft des Menschen stark reduzierte“, so die Max-Planck-Forsche-

rin. „Scheinbar ursprüngliche tropische Inseln waren also schon drastisch umgestaltet, als die Europäer ankamen.“

In mehreren Projekten beschäftigen sich die Jenaer Archäologen mit Inseln vor der ostafrikanischen Küste: mit dem Sansibar-Archipel und den Komoren. Ausgrabungen in den vergangenen Jahren zeigten beispielsweise in einer Höhle auf Sansibar, dass Tiere wie Zebra, Büffel, Wasserbock und Gazelle verschwanden, nachdem Sansibar zur Insel geworden war. Der Landzipfel war während der Eiszeit mit dem Festland verbunden und wurde erst vor etwa 10000 Jahren abgetrennt, als der Meeresspiegel anstieg. Noch ist unklar, ob der verkleinerte Lebensraum oder die menschliche Jagd dafür sorgte, dass die großen Tiere ausstarben.

„Es gibt Hinweise darauf, dass die Tiere gejagt wurden, wir haben etwa Projektilspitzen gefunden und Schnittspuren an einigen Knochen“, berichtet Nicole Boivin. Sie und ihre Kolleginnen und Kollegen sind nun dabei, die ökologische Geschichte der Inseln in dieser Region genauer zu erforschen – ein Vorhaben, entstanden aus dem von Boivin geleiteten EU-Projekt „Sealinks“, das den frühesten Austausch zwischen den Kulturen an den verschiedenen Küsten des Indischen Ozeans zum Thema hatte.

Auch Pemba, die zweitgrößte Insel des Sansibar-Archipels, ist für die Jenaer Forscher in diesem Zusammenhang interessant. Sie ist schon seit Millionen Jahren vom afrikanischen Festland getrennt. Die ersten Anzeichen für eine menschliche Besiedlung stammen aus dem siebten Jahrhundert nach Christus. Im vergangenen Jahr haben Boivin und Kollegen dort Ausgrabungen in einer Höhle begonnen und ein Umweltarchiv erschlossen, das 5000 Jahre in

die Vergangenheit reicht. Mithilfe molekularbiologischer Methoden konnten sie nachweisen, dass es dort Krokodile und riesige Ratten gab, die heute ausgestorben sind. Inwieweit die Menschen auch hier die Inselwelt veränderten, untersucht das Team derzeit.

Einen Schluss solle man aus ihrer Forschung allerdings nicht ziehen, sagen die Archäologen übereinstimmend: dass Umwelt-, Klima- und Artenschutz überflüssig seien, da der Mensch die Erde ja ohnehin schon seit Urzeiten geprägt hat. „Auch wenn es wahrscheinlich nirgendwo auf der Welt mehr eine völlig unberührte Landschaft gibt, ist die Bewahrung der Umwelt wichtig“, betont Michael Petraglia. „Wir müssen lernen, eine Balance zwischen den menschlichen Bedürfnissen und denen der Natur zu finden, ohne die Natur zu sehr zu beeinträchtigen.“ ◀



Vielseitige Forscherin: Nicole Boivin ist in biologischen Themen ebenso bewandert wie in Archäologie. In ihrer Arbeit schlägt sie den Bogen von der Urgeschichte bis in die Gegenwart.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Bereits vor der Entstehung des *Homo sapiens* hinterließen Frühhmenschen bleibende Spuren auf unserem Planeten.
- Mit der Ausbreitung des modernen Menschen starben Mammuts, Höhlenbären und eine Vielzahl anderer Großtierarten aus.
- Durch Ackerbau und Viehzucht schuf der Mensch völlig neue Ökosysteme und verbreitete Nutztiere und -pflanzen weltweit.
- Selbst in scheinbar unberührten Landschaften wie dem Amazonasregenwald hat der *Homo sapiens* seit Jahrtausenden Spuren hinterlassen.

GLOSSAR

Anthropozän: Vorschlag zur Benennung einer neuen erdgeschichtlichen Epoche, die durch den menschlichen Einfluss auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Prozesse auf unserem Planeten gekennzeichnet ist.

Mega fauna: Tierarten mit mehr als 44 Kilogramm Gewicht.

Paläoökologische Studien: Wissenschaftliche Untersuchungen von Ökosystemen der erdgeschichtlichen Vergangenheit.

Kernspintomograf für einzelne Proteine

Kernspintomografen, wie man sie aus dem Krankenhaus kennt, werden extrem feinfühlig. Ein Quantensensor, den ein Team um Jörg Wrachtrup, Professor an der Universität Stuttgart und Forscher des Stuttgarter Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung, entwickelt hat, ermöglicht es, mit der Kernspinteknik die Struktur einzelner Proteine Atom für Atom zu untersuchen. Der Sensor, den die Forscher bereits 2013 vorstellten, besteht aus einem Stickstoffatom in einem winzigen Diamanten und nimmt magnetische Signale der Atome in einer Probe wahr. Die Wissenschaftler haben seine Auflösung nun so verbessert, dass sie die Signale verschiedener Atomsorten unterscheiden können. Das Verfahren könnte künftig helfen, Krankheiten im Frühstadium zu diagnostizieren, indem es erste defekte Proteine detektiert. Fehlerhafte Eiweißmoleküle lösen unter anderem die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit aus. (www.mpg.de/11371513)

Der *Homo sapiens* ist älter als gedacht

In Marokko lebte der moderne Mensch schon vor 300 000 Jahren

Nach diesem Fund muss die Frühgeschichte des Menschen neu geschrieben werden: In Jebel Irhoud, ungefähr 100 Kilometer nordwestlich von Marrakesch, hat ein internationales Forscherteam unter der Leitung von Jean-Jacques Hublin vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig und Abdelouaded Ben-Nacer vom Nationalen Institut für Archäologie in Rabat, Marokko, Überreste des *Homo sapiens* sowie Tierknochen und Steinwerkzeuge entdeckt. Die Funde sind rund 300 000 Jahre alt und damit die ältesten sicher datierten fossilen Belege unserer eigenen Art.

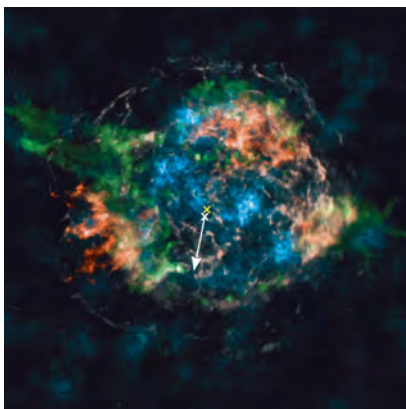
Die ältesten bisher bekannten *Homo sapiens*-Fossilien stammen aus Äthiopien und sind rund 100 000 Jahre

jünger. Die meisten Forscher gingen deshalb davon aus, dass alle heute lebenden Menschen von einer Population abstammen, die vor etwa 200 000 Jahren in Ostafrika lebte. Die Fossilien aus Marokko zeigen hingegen, dass sich der *Homo sapiens* bereits vor rund 300 000 Jahren über ganz Afrika ausgebreitet hatte – lange bevor er neue Kontinente besiedelte.

Die Fundstelle Jebel Irhoud ist bereits seit den 1960er-Jahren für menschliche Fossilien und Steinwerkzeuge bekannt. Die Interpretation dieser Funde war jedoch wegen der unsicheren Datierung schwierig. Neue Ausgrabungen seit dem Jahr 2004 brachten weitere Skelettreste des *Homo sapiens* ans Licht. Insgesamt liegen 22 versteinerte Überreste von

Neutrinos treiben Supernovae an

Die Verteilung radioaktiver Elemente im Überrest Cassiopeia A gibt Einblick in die Explosion



Auffällige Asymmetrie: Titan (blau) und Eisen (weiß, rot) im Supernovaüberrest Cassiopeia A. Das gelbe Kreuz kennzeichnet das geometrische Zentrum der Explosion, ein weißes Kreuz und ein Pfeil geben die momentane Position und die Bewegungsrichtung des Neutronensterns an. Ein solches Szenario liefern auch Computermodelle.

Supernovae sind eine wichtige Quelle chemischer Elemente im All. Bei diesen Sternexplosionen entstehen im heißen Innern radioaktive Atomkerne, die über die unsichtbaren Vorgänge Aufschluss liefern können, welche zur Explosion führen. Mit aufwendigen Computerberechnungen gelang es Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Astrophysik und am RIKEN-Forschungszentrum in Japan, die jüngst gemessene räumliche Verteilung von radioaktivem Titan und Nickel in dem rund 340 Jahre alten Supernovaüber-

rest Cassiopeia A zu erklären. Das theoretische Szenario: Diese Elemente entstehen in dem heißen Auswurfmaterial nahe am Kern. Weil es im Stern brodelte, beginnt die von sogenannten Neutrinos getriebene Explosion asphärisch, und die Supernova schleudert die Materie stark richtungsabhängig aus. Im Fall von Cassiopeia A sollte daher der übrig gebliebene, kompakte Neutronenstern in die südliche Hemisphäre rasen, während sich die größten und hellsten Titanstrukturen mit der meisten Materie in der nördlichen Hälfte des Überrests finden. Und genau das wird im Einklang mit den Modellen in Cassiopeia A beobachtet. (www.mpg.de/11338259)

Die Ersten unserer Art: Zwei Ansichten einer zusammengesetzten Rekonstruktion der frühesten bekannten *Homo sapiens*-Fossilien. Die Form der Gesichtsschädel fällt in die Variation von heute lebenden Menschen. Der archaisch aussehende Gehirnschädel (blau) zeigt hingegen, dass sich die Gehirnsform und möglicherweise die Gehirnfunktion innerhalb der *Homo sapiens*-Linie entwickelt haben.



Schädeln, Unterkiefern, Zähnen und Langknochen vor, die zu mindestens fünf Individuen gehören.

Die Fossilien dokumentieren eine frühe Phase der menschlichen Evolution. Das Team um den Geochronologie-Experten Daniel Richter vom Leipziger Max-Planck-Institut bestimmte das Alter der Fundschichten mithilfe der Thermolumineszenzmethode. Die Forscher verwendeten dafür die in den Schichten vorkommenden erhitzten Feuersteine. Das Verfahren macht sich

die natürliche Radioaktivität zunutze und misst, wie viel Zeit seit dem Erhitzen vergangen ist.

Anatomisch ähnelten die frühen *Homo sapiens* bereits heutigen Menschen: Wie die Forscher anhand der Computertomografie (micro-CT) mehrerer Originalfossilien herausfanden, hatten sie moderne Gesichtsschädel und eine moderne Zahnform. Die Gehirnschädel waren dagegen eher länglich und nicht rund wie bei heute lebenden Menschen. Dies deutet darauf hin, dass

sich die Form der Gesichtsknochen bereits zu Beginn der Evolution des *Homo sapiens* herausgebildet hat, während sich die Form und möglicherweise auch die Funktion des Gehirns erst innerhalb unserer Art entwickelten.

Die jüngsten Erkenntnisse führen nun auch zu einer Neubewertung umstrittener früherer Funde: Wissenschaftler ordnen ein etwa 260 000 Jahre altes Schädelfragment aus Florisbad in Südafrika nun ebenfalls dem *Homo sapiens* zu. (www.mpg.de/11322546)

Ein Fingerzeig für die Elektronik

Digitale Geräte lassen sich durch Gesten über dem Handrücken steuern

Smartwatches können ähnlich viel wie Smartphones, sind aber auch nicht gerade einfacher zu bedienen. Wer schon Schwierigkeiten hat, auf dem Bildschirm seines Handys etwa einen Punkt in einer Karte anzusteuern, dürfte es auf dem Display einer Uhr nicht einfacher haben. Ein internationales Team um Forscher des Max-Planck-Instituts für Informatik schafft da jetzt Abhilfe. Es präsentiert WatchSense – eine Eingabemethode, die Fingerbewegungen auf und über dem Handrücken in Steuersignale für eine Smartwatch, ein Tablet oder auch einen PC umwandelt. Zu diesem Zweck verfolgt ein am Unterarm befestigter Tiefensensor die Kuppen von Daumen und Zeigefinger, während diese über den Handrücken wandern. Die Positionen der Finger werden auf das elektronische Gerät übertragen. Auf dessen Display kann der Nutzer seine Eingabe direkt verfolgen. Wie die Forscher feststellten, lassen sich auf diese Weise etwa in einem Musikprogramm schneller ein neues Musikstück auswählen oder die Lautstärke regeln, als es über die herkömmliche Eingabe möglich ist.



Eine neue Form der Fernbedienung: WatchSense erlaubt es, elektronische Geräte wie etwa eine Smartwatch durch Fingerbewegungen auf und über dem Handrücken zu steuern, indem die Kuppen von Daumen und Zeigefinger verfolgt werden.

Lesenlernen verändert Gehirn auch bei Erwachsenen

Studie mit Analphabetinnen gibt Hinweise auf Ursache der Lese-Rechtschreib-Schwäche



Tief greifender Wandel: In Indien lernten Analphabetinnen in ihrer Muttersprache Hindi lesen. Dabei veränderten sich Gehirnareale, die bis dahin anderen Fähigkeiten zugeordnet waren.

Die Zeit seit der Erfindung der Schrift ist, evolutionär gesehen, ein Wimpernschlag. Im Gehirn konnte sich deshalb noch kein eigenes Lesearéal entwickeln. Stattdessen werden beim Lesenlernen Hirnregionen umfunktioniert, die ursprünglich für die Erkennung komplexer Objekte wie etwa Gesichter konzipiert waren. Dass sich das Gehirn dabei weit mehr verändert als bisher angenommen, haben Forscher der Max-Planck-Institute für Kognitions- und Neurowissenschaften und für Psycholinguistik in einer Studie mit erwachsenen Analphabetinnen gezeigt. Während diese Frauen lesen und schreiben lernten, registrierten die Wissenschaftler Veränderungen, die bis in die entwicklungsgeschichtlich alten Regionen Thalamus und Hirnstamm hineinreichten. Bisher wurden angeborene Fehlfunktionen des Thalamus als mögliche Ursache der Lese-Rechtschreib-Schwäche diskutiert. Da sich jetzt gezeigt hat, dass sich diese Hirnregion bereits durch wenige Monate Lesetraining grundlegend verändern kann, scheint dies aber fraglich. (www.mpg.de/11312776)

Mit dem Griff des Geckos

Ein Greifer, der einem Saugnapf ähnelt und mit mikroskopischen Noppen versehen ist, packt verschiedene Gegenstände

Roboter dürften künftig besseren Halt finden, wenn sie einen Gegenstand fassen wollen: Ein Greifer, den Forscher des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in Stuttgart entwickelt haben, passt sich flexibel an unterschiedlich geformte Objekte an und hält diese auch zuverlässig fest, weil seine Oberfläche mit winzigen Noppen versehen ist. Solche Kontaktflächen, die von den extrem gut haftenden Härchen auf der Sohle eines Geckofußes inspiriert sind, gibt es zwar

bereits, bisher aber nur in Form starrer Materialien. Diese haften nicht an beliebig geformten Gegenständen. Der münzgroße Greifer der Stuttgarter Materialwissenschaftler ähnelt einem Saugnapf. Er schmiegt sich mithilfe eines Unterdrucks an verschiedene Formen an und kann etwa ein 300 Gramm schweres Glasgefäß halten, das mit einer Flüssigkeit gefüllt ist. (www.mpg.de/11315370)

Tasse und Tomaten – der Greifer der Stuttgarter Forscher fasst verschiedene Gegenstände und hält sie auch fest.



Jungbrunnen im Darm

Mikroorganismen junger Fische verlängern die Lebenserwartung älterer Artgenossen

Er verliert seine Pigmente, baut motorisch und mental ab, bekommt Krebs – der Türkise Killifisch kämpft mit ähnlichen Alterserscheinungen wie viele andere Lebewesen. Dabei ist der aus Afrika stammende Fisch erst wenige Monate alt, wenn der körperliche Verfall ein-

setzt. Mit dem Alter verändert sich, ähnlich wie beim Menschen, die Zusammensetzung der Bakteriengemeinschaft im Darm der Fische: Während in der Jugend viele verschiedene Bakterienarten für einen gesunden Verdauungstrakt sorgen, nimmt diese Diversität mit dem

Älterwerden ab, während der Anteil an Krankheitserregern steigt. Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Biologie des Alterns in Köln haben nun

die Mikroorganismen junger Killifische auf Tiere mittleren Alters übertragen. Mit der verjüngten Darmflora leben die Fische rund 40 Prozent länger. Zudem sind sie im greisen Alter von vier Monaten noch so agil wie junge Fische. Erhalten junge Fische die Mikroben aus dem Darm älterer Tiere, sinkt ihre Lebenserwartung dagegen nicht. Wie genau die Mikroben die Lebensdauer beeinflussen, ist noch unklar. Möglicherweise unterstützt die Darmflora aus einem jungen Organismus das Immunsystem und verhindert so, dass im Laufe des Lebens Krankheitserreger überhandnehmen. (www.mpg.de/11235969)



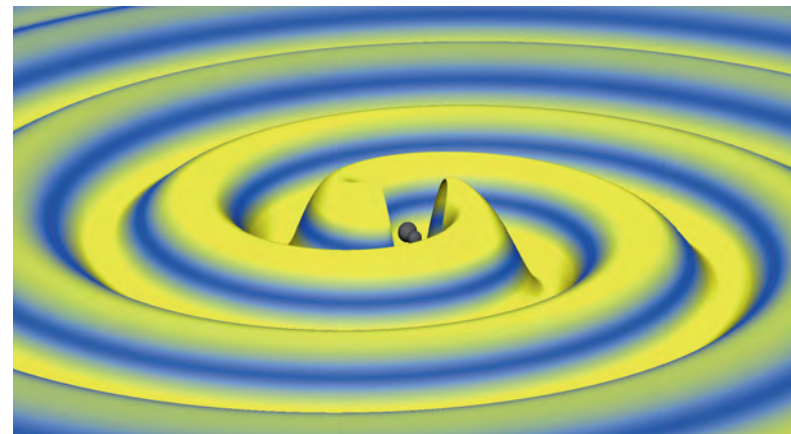
Schon nach wenigen Monaten beginnen die in der Jugend leuchtenden Farben des Türkisen Killifischs zu verblassen. Der rapide körperliche Verfall des Fisches im Alter hat weltweit das Interesse von Altersforschern geweckt.

Gravitationswellen gehen zum dritten Mal in die Falle

Die LIGO-Detektoren beobachten ein Signal, das erneut am Albert-Einstein-Institut in Hannover entdeckt wird

Zum dritten Mal haben Forscher die von Albert Einstein vor 100 Jahren vorausgesagten Gravitationswellen nachgewiesen. Die beiden LIGO-Detektoren in den USA hatten am 4. Januar 2017 um 11:11:58,6 MEZ angeschlagen. Die Gravitationswelle mit der Bezeichnung GW170104 erreichte den Hanford-Detektor drei Millisekunden früher als den in Livingston – ein durch die Himmelsposition der Quelle bedingter Effekt. Zwei schwarze Löcher mit 31 und 19 Sonnenmassen waren zu einem einzigen mit 49 Sonnenmassen verschmolzen. Das Signal wurde zuerst am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Hannover gesehen. Dort untersuchte Alexander Nitz einige Kandidaten, die ein von ihm entwickeltes Analysesystem nahezu in Echtzeit identifizierte. Dabei stieß der Forscher zunächst auf ein vielversprechendes Signal in den Daten des Livingston-Detektors, da-

nach auch in jenen des Hanford-Instruments. Die jetzt beobachtete Gravitationsfalle füllt mit ihren 49 Sonnenmassen die Lücke zwischen den beiden zuvor von LIGO beobachteten verschmolzenen schwarzen Löchern und weist auf eine neue Klasse dieser Objekte hin. (www.mpg.de/11322709)



Die Quelle der Welle: Das Bild stammt aus einer numerischen Simulation des Gravitationswellen-Ereignisses GW170104, das durch die Verschmelzung zweier schwarzer Löcher erzeugt wurde. Die Stärke der Gravitationswelle wird sowohl durch die Höhe als auch durch die Farbe angezeigt; Blau steht für schwache, Gelb für starke Felder. Die schwarzen Löcher wurden um den Faktor zwei vergrößert, um die Sichtbarkeit zu verbessern.

Urmenschen-Erbgut im Höhlenboden entdeckt

Forscher können mit neuer Methode jahrtausendealte DNA aus Höhlensedimenten nachweisen

An vielen prähistorischen Fundstätten wurden Werkzeuge und andere von Urmenschen hergestellte Gegenstände zutage gefördert. Wer genau die Schöpfer waren, bleibt aber häufig offen, denn selten finden Archäologen menschliche Fossilien wie Knochen oder Zähne in den zu den Funden gehörenden Sedimentschichten. Doch Forschern des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig ist es gelungen, aus zwischen 14000 und mehr als 550000 Jahre alten Bodenproben winzige Erbgut-Bruchstücke zu fischen. Die Wissenschaftler konnten die DNA-Fragmente Neandertalern, Denisova- und modernen Menschen sowie verschiedenen ausgestorbenen Säugetieren zuordnen. Anhand der Erbgutspuren im Boden können Forscher also künftig die Anwesenheit von Urmenschen und anderen Säugetieren auch an Fundorten nachweisen, an denen keine auffälligeren Überreste gefunden wurden. (www.mpg.de/11246709)

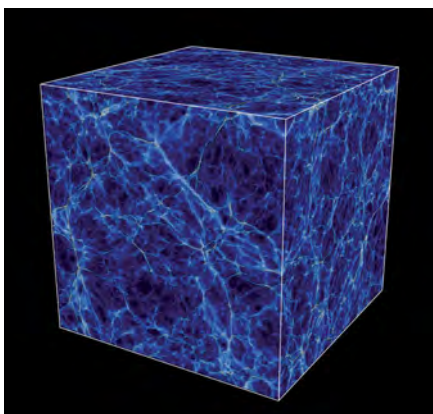


In der Höhle El Sidrón in Spanien haben Forscher DNA-Spuren im Boden gefunden. Während der Ausgrabungen tragen sie Schutzkleidung, um ihre Funde nicht mit eigener DNA zu verunreinigen.

Das kosmische Netz wird durchleuchtet

Astronomen vermessen mit dem Licht von Zwillingquasaren die Struktur des Universums

Die Materie im Raum zwischen den Galaxien bildet ein gewaltiges Netzwerk aus miteinander verbundenen Filamenten. Fast alle Atome im Universum sind Teil dieses kosmischen Netzes, die meis-



ten davon direkte Überbleibsel aus der Geburtsphase des Alls. Jetzt hat ein Team unter Leitung von Forschern des Max-Planck-Instituts für Astronomie die Feinstruktur des Netzwerks rund zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall vermessen – mit einer neuen Methode, die das All mithilfe von Paaren sehr heller, nahe beieinanderstehender ferner Quasare durchleuchtet. Quasare sind die aktiven Kerne junger Galaxien. Mit der Untersuchung gelang es den Wissenschaftlern, in den kartierten, mehr als elf Milliarden Lichtjahre von uns entfernten Regionen noch Strukturun-

terschiede auf Größenskalen von nur einigen Hunderttausend Lichtjahren zu identifizieren – vergleichbar der Größe einzelner Galaxien. Dabei half das Licht von zwei Quellen (Quasaren), diese Unterschiede quantitativ zu beschreiben. Die Astronomen verglichen ihre Ergebnisse dann mit Supercomputer-Rechnungen, welche die Entwicklung kosmischer Strukturen vom Urknall bis zur Gegenwart nachstellen. Zur Freude der Forscher liefern diese Simulationen ein Universum, das ziemlich gut mit den Beobachtungsdaten übereinstimmt. (www.mpg.de/11255500)

Schnappschuss: Bild aus einer Supercomputer-Simulation des kosmischen Netzwerks vor 11,5 Milliarden Jahren. Die Forscher haben mehrere solcher Modelle erzeugt und sie anschließend mit den Quasarbeobachtungen verglichen, um Rückschlüsse auf die Eigenschaften des jungen Universums zu ziehen. Die Seitenlänge des gezeigten würfelförmigen Ausschnitts beträgt 24 Millionen Lichtjahre.

Übergewicht steigert Alzheimerisiko

Adipositas geht mit verringerter Vernetzung zwischen Hirnregionen einher

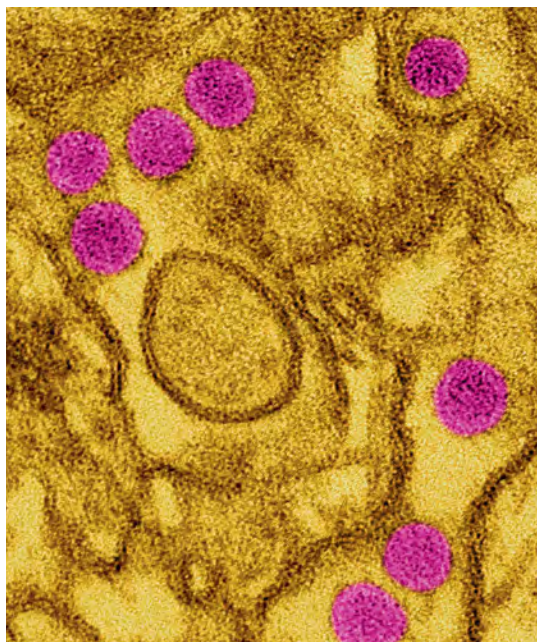
Starkes Übergewicht oder Adipositas steigert nicht nur das Risiko für Diabetes, Herzschwäche oder Arteriosklerose, sondern gefährdet offenbar auch das Gehirn. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig zufolge sind bei stark Übergewichtigen im Alter zwischen 60 und 80 Jahren manche Gehirngebiete schwächer miteinander verbunden. Dadurch können einzelne Regionen im sogenannten Default-Mode-Netzwerk schlechter zusammenarbeiten. Dieses Netzwerk wird aktiv, wenn wir

unseren Gedanken freien Lauf lassen, aber auch wenn wir beispielsweise eine Handlung planen oder uns erinnern. Eine geringere Verknüpfung innerhalb des Netzwerks ist wiederum ein früher Hinweis auf eine drohende Demenzerkrankung. Ältere, stark übergewichtige Menschen könnten also ein höheres Risiko für Alzheimer besitzen. Die Forscher wollen nun untersuchen, wie sich eine Umstellung der Ernährung auf das Netzwerk im Gehirn und die geistige Leistungsfähigkeit generell auswirkt. (www.mpg.de/11305130)

Im Labor vermehrte Zikaviren

Wissenschaftler schaffen wichtige Voraussetzung für die Produktion von Impfstoffen

In den letzten zehn Jahren hat sich das von der Ägyptischen Tigermücke übertragene Zikavirus von Afrika ausgebreitet und kommt inzwischen in rund 60 Ländern vor. Traurige Berühmtheit erlangte der Erreger kurz vor den Olympischen Spielen 2016 in Brasilien, als bekannt wurde, dass eine Infektion während der Schwangerschaft Neugeborene schädigen kann. Menschen außerhalb Afrikas besitzen keine natürliche Immunität. Wissenschaftler arbeiten deshalb an Impfstoffen gegen den Erreger. Forscher am Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme in Magdeburg haben nun gemeinsam mit einem Forscherteam in Brasilien erstmals Zikaviren in größeren Mengen im Labor vermehrt. Sie haben dazu Hamsterzellen an das Wachstum in einem flüssigen Nährmedium angepasst und mit Viren aus Brasilien infiziert. Nach knapp zwei Wochen konnten die Wissenschaftler aus Hochdichte-Zellkulturen fast 40 Millionen infektiöse Viren pro Milliliter ernten. Dank der Erkenntnisse können Forscher nun weitere Studien zum Zikavirus durchführen. (www.mpg.de/11257964)



Angefärbte Elektronenmikroskopie-Aufnahme von Zikaviren (violett) in Nierenzellen: Die Viren werden von Mücken auf den Menschen übertragen, sie können aber auch sexuell übertragen werden. Bekommen Schwangere das sogenannte Zika-Fieber, können ihre Babys nach der Geburt Wachstumsstörungen des Gehirns (Mikrozephalie) aufweisen.

Krebsdiagnose über den Atem

Tief einatmen und wieder ausatmen – so könnte ein Test auf Lungenkrebs in Zukunft aussehen. Heute sterben noch die meisten Lungenkrebspatienten innerhalb von fünf Jahren nach der Diagnose. Einer der Hauptgründe dafür ist, dass die Erkrankung erst zu spät bemerkt wird. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Herz- und Lungenforschung in Bad Nauheim haben daher ein Verfahren entwickelt, das die Erkrankung bereits im frühen Stadium erkennen kann. Dazu haben sie Atemproben auf Spuren von RNA-Varianten des GATA6- und NKX2-Gens untersucht, die in entarteten und gesunden Zellen in unterschiedlichen Mengen entstehen. Mit einer neu entwickelten Methode können sie die im Atem in Spuren und zerstückelt vorkommenden RNA-Moleküle isolieren. In einer Untersuchung an gesunden Probanden und Krebspatienten bestimmte der Atemtest den Gesundheitsstatus von 98 Prozent der Teilnehmer korrekt. Damit hat die Methode eine derart hohe Trefferquote, dass sie im Klinikalltag zur Früherkennung angewendet werden und die herkömmlichen Verfahren ergänzen könnte. Mit Unterstützung der Technologietransferorganisation Max-Planck-Innovation suchen die Forscher nun Lizenzpartner, die den Atemtest zur Marktreife weiterentwickeln und vermarkten. (www.mpg.de/112369350)

Regenbogen in der Glasfaser

In ihrer herkömmlichen Form sind sie die Garanten des schnellen Internets. Doch aus Glas gezogene Fasern können mehr, als Licht fast verlustfrei leiten. Mit photonischen Kristallfasern manipulieren **Philip Russell**, Direktor am **Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts** in Erlangen, und seine Mitarbeiter die Eigenschaften von Laserlicht, und sie entwickeln aus den Fasern Sensoren für Medizin und Technik.

TEXT **ROLAND WENGENMAYR**

Können Sie die Faser sehen?“, fragt Johannes Köhler. Da ist sie: Eine hauchzarte Linie überspannt eine Handbreit Raum. Die Glasfaser hat einen Durchmesser von nur gut hundert Mikrometern, ungefähr wie ein kräftiges Haar. Trotzdem hat sie es in sich. Wie solche Fasern Laserlicht verändern können, hätte noch vor 25 Jahren als unmöglich gegolten. In ihnen treten Effekte der nichtlinearen Optik auf, die nicht nur Grundlagenforschern reichlich Stoff bietet, sondern auch praktische Anwendungen verheißt. Die herkömmliche Glasfaser hat ihre Verheißung erfüllt – das globale Glasfasernetz ist heute das Rückgrat unserer Informationsgesellschaft. Doch die etablierten Glasfasern nehmen sich im Vergleich zu den Erlanger Filigranfasern so primi-

tiv aus wie ein Abakus neben einem modernen Tablet.

Um mikro- und nanotechnologisch hochgezüchtete Glasfasern dreht sich die Forschung der Abteilung am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, die Philip Russell als Direktor leitet. Johannes Köhler ist ein Doktorand, und wir stehen in seinem Labor vor einem optischen Tisch, auf dem mit einem kraftvollen Laser, Linsen, Spiegeln und anderen optischen Elementen eine Rennstrecke für Licht installiert ist. Das unsichtbare Infrarotlicht des Lasers muss dabei die zwölf Zentimeter lange Glasfaser passieren, auf die Köhler deutet. Sie ist innen hohl, und quer durch den Hohlraum spannen sich über ihre gesamte Länge zwei dicht beieinanderstehende parallele Membranen.

Die Membranen sind so hauchzart, dass das Laserlicht, dessen Photonen eine schwache mechanische Kraft ausüben, sie zum Schwingen bringen kann. Die optoakustische Schwingung verändert wiederum das Licht. Was dabei geschieht, untersucht Köhlers Team. In den benachbarten Labors laufen Experimente mit anderen Fasern, die verschiedene Strukturen aus Nano- und Mikrohohlräumen enthalten. Jede verändert das Laserlicht auf andere Weise. So verdankt Theodor Hänsch, Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, solchen Glasfasern den Nobelpreis für Physik. 2005 erhielt er ihn zusammen mit den Amerikanern John Hall und Roy Glauber.

Philip Russell, der in Belfast geborene britische Physiker, ist Pionier und Mastermind der Erlanger Faserwelt. Dort

Eine Quelle für weißes Licht: Speziell präparierte photonische Kristallfasern erzeugen aus einfarbigen Laserpulsen ein breites Spektrum an Licht, das am Ende der Faser von einem Prisma aufgefächert wird. Am rechten Rand wird ultraviolettes Licht als weißes Leuchten sichtbar gemacht.

leitet er die 40-köpfige Abteilung Photonic Crystal Fibre Science. „Es geht um die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie“, skizziert er das Leitmotiv seiner Forschung. Geduldig erklärt er den fundamentalen Unterschied zu herkömmlichen Glasfasern, ohne die das schnelle Internet nicht denkbar wäre. Mit britisch schwarzem Humor bemerkt er, dass die Glasfaser auch die Verbreitung von Fake-News viel effizienter gemacht habe. Ganz offensichtlich ist er froh, dass seine Forschung nicht der Kommunikationstechnik dient.

„Telekommunikations-Glasfasern funktionieren im Prinzip wie lang gezogene, fast perfekte Spiegel“, erklärt er. Diese Fasern besitzen einen Kern und einen Mantel aus zwei Glassorten mit unterschiedlichen Brechungsindices. Die Grenzfläche zwischen ihnen wirkt

daher als Spiegel, der die Laserstrahlen in der Faser hin und her reflektiert. Das funktioniert ungefähr wie ein Flummi-ball, den man schräg in ein Rohr wirft, in das er immer tiefer hineindotzt.

GLASFASER UND PHOTONISCHER KRISTALL HEIRATEN

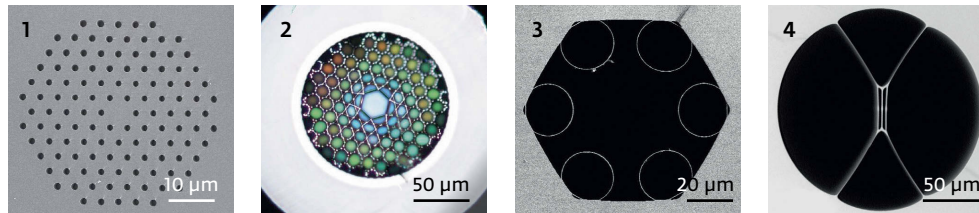
Herkömmliche Glasfasern basieren also auf der Fähigkeit des Lichts, sich als geradlinige Strahlen auszubreiten. Im Gegensatz dazu nutzen Russells Fasern die Tatsache, dass Licht sich wie eine Welle verhalten kann.

Was das bedeutet, vermittelt ein Blick in eines von Russells Regalen. In einem Glaskasten schillert ein Blauer Morphofalter, den der Physiker vor vielen Jahren im Shop eines französischen Naturkundemuseums gekauft hat. Die

leuchtenden Farben des Schmetterlings entstehen nicht durch Farbpigmente, sondern durch winzige Nanostrukturen, die das Licht bei der Reflexion verändern. Die Strukturen müssen dafür gerade so bemessen sein, dass sie zur Wellenlänge sichtbaren Lichts passen. Das sind einige Hundert Nanometer (millionstel Millimeter).

In dieser Größenordnung liegt auch die Architektur künstlicher photonischer Kristalle. In eindimensionaler Form haben solche Materialien inzwischen auch Einzug in den Alltag gehalten, als dünne Antireflexbeschichtung auf Spiegeln, Fenstern oder Linsen von Brillen und Kameraobjektiven.

Anfang der 1990er-Jahre fragte sich Philip Russell, was dabei herauskäme, wenn er eine Glasfaser mit einem zweidimensionalen photonischen Kristall



Oben Zunächst stellten die Forscher um Philip Russell Fasern mit solidem Glaskern (1) her, die elektromagnetische Wellen genau einer Wellenlänge auf unendlichen Strecken schmal gebündelt leiten. Inzwischen haben sie auch Fasern mit hohlem Kern entwickelt, darunter eine mit Kagomé-Struktur (2), die von japanischen Shinto-Schreinen inspiriert ist und ultraviolette Licht erzeugt. Manche Hohlkernfasern (3) erzeugen aus einfarbigem Licht ein breites Spektrum elektromagnetischer Wellen. Fasern, die über ihre ganze Länge von senkrechten Membranen durchzogen werden (4), dienen zu optoakustischen Experimenten. Dabei regt das Licht die Membran zum Schwingen an.

Rechte Seite Michael Frosz, Xin Jiang und Philip Russell (von links) verfolgen im Reinraum, wie die Vorform einer Glasfaser in einem Ofen geschmolzen und zu ihrer endgültigen Stärke ausgezogen wird.

verheiratet würde. Dabei sollte eine Glasfaser entstehen, die der Länge nach von regelmäßig angeordneten hohlen Kanälen durchzogen würde, sodass der Querschnitt der Faser ein periodisches Muster von Löchern zeigt. Die Kanäle würden Sprünge in den Materialeigenschaften, genauer: im Brechungsindex, bewirken, wenn ihre Abstände zur Wellenlänge des verwendeten Laserlichts passten. Ein solcher photonischer Kristall würde vor allem die Anteile des Laserlichts manipulieren, welche die Faser seitlich verlassen wollen.

Das war Russells Idee. Doch der Weg zur Realisierung der ersten photonischen Kristallfaser war steinig. „Da hast du diesen Traum“, erzählt Russell, „aber angesichts der Schwierigkeiten sinkt dein Mut.“ Er musste eine Möglichkeit finden, die ohnehin schon haarfeinen Fasern mit noch winzigeren Kanälen zu versehen, die alle eine bestimmte Breite haben und über die gesamte Länge der Faser einen fixen Abstand zueinander einhalten. „Die meisten Kollegen hielten mich für verrückt“, berichtet Russell.

Das waren keine guten Voraussetzungen für den jungen Wissenschaftler,

der damals an der Universität Southampton forschte. Nach vielen Fehlschlägen gelang seinem kleinen Team schließlich der Durchbruch mit einer Technik, die der Herstellung von Zuckerwatte ähnelt. Sie nutzt aus, dass sich Quarzglas bei Temperaturen um die 1850 Grad Celsius wie geschmolzener Zucker verhält. So lässt es sich zu einem extrem dünnen Faden auseinanderziehen, ohne zu reißen. Genauso wichtig: Enthält das Glas ein inneres Lochmuster, dann schrumpft dieses beim Ziehen mit, ohne sich in seinen Proportionen zu verändern.

FASERN MIT VÖLLIG NEUEN OPTISCHEN EIGENSCHAFTEN

Nach vergeblichen Versuchen, einen dickeren Glasblock mit Millimeterbohrungen zu versehen und auseinanderzuziehen, kam Russells Team schließlich auf die entscheidende Idee. Die Physiker legten einen Stapel aus Quarzglasröhren im gewünschten Muster zusammen. Dann erhitzen sie diesen Stapel in einem Ofen und zogen ihn zu einer dünnen Faser auseinander. So

entstand die erste funktionierende photonische Kristallfaser.

1996 stellte Russell die erste photonische Kristallfaser vor und hat die Stapel- und zieh-Methode seither perfektioniert. Die völlig neuen optischen Eigenschaften der Fasern fanden gleich viel Aufmerksamkeit in der Laserszene. Viele Forschungsgruppen stürzten sich darauf, besonders erfolgreich war eine Gruppe an den US-amerikanischen Bell Labs in Holmdel, New Jersey. Sie lieferte jene Fasern, die John Hall und Theodor Hänsch zur nobelpreisgekrönten Erfindung des Frequenzkamms führten. Damit lassen sich die Farben von Licht in nie da gewesener Präzision messen und optische Atomuhren konstruieren, die tausendmal genauer gehen als herkömmliche Atomuhren. Das erlaubt zum Beispiel in Zukunft eine noch präzisere Satellitennavigation. „Wir waren selbst knapp dran“, seufzt Russell, „haben aber diese Möglichkeit nicht verfolgt.“

Was mit dem Licht in solchen Fasern passiert, hängt von der Struktur der Faser ab. Einfach gesagt, reagieren die Fasern wie Instrumente mit Resonanzkörpern auf die Lichtwellen. Rus-



sell, selbst ein versierter Pianist, nimmt die Pauke als Beispiel. Ein Schlag versetzt das Paukenfell in eine Grundschwingung, die den tiefsten Ton des Instruments trägt, und viele schnellere Oberschwingungen. So ähnlich ist es mit dem Laserlicht in der photonischen Kristallfaser. Das Urmodell mit einem Dreiecksmuster der Kanäle ist ein ausgezeichneter Filter. Es wirkt sozusagen wie eine Pauke, die alle Obertöne hinauswirft und nur in der Grundschwingung vibriert.

Den Schwingungen eines Tons entsprechen die Moden des Laserlichts, das durch die Faser läuft. Sie unterscheiden sich darin, wie sich die Lichtintensität über den Strahlquerschnitt verteilt. In der Grundmode bildet sie ein einziges Maximum in der Mitte der Faser, in den höheren Moden entstehen immer kompliziertere Muster. „Auf die Grundmode des Laserlichts wirkt das Lochgitter wie die Gitterstäbe eines Kerkers“, erklärt Russell: „Sie bleibt eingesperrt.“ Die höheren Moden, also quasi die Obertöne, können dagegen durch die Gitterstäbe entkommen. Die Folge: Licht, das auf den photonischen Kris-

tall abgestimmt ist, läuft anders als ein Laserstrahl in der Luft oder im Vakuum des Weltalls durch die gesamte Glasfaser schmal gebündelt. „Diese endlose Einzelmodenführung war eine unerwartete Entdeckung“, sagt Russell.

In den vergangenen 20 Jahren hat Russells Teams vielfältige Glasfaserstrukturen entwickelt, seit 2009 am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts. Im Institut führt Xin Jiang zum Allerheiligsten, dem mehrere Stockwerke hohen Reinraum, in dem die Faserziehtürme stehen. Da die Faserrohlinge empfindlich gegen Staub sind, können wir nur durch ein Fenster hineinschauen.

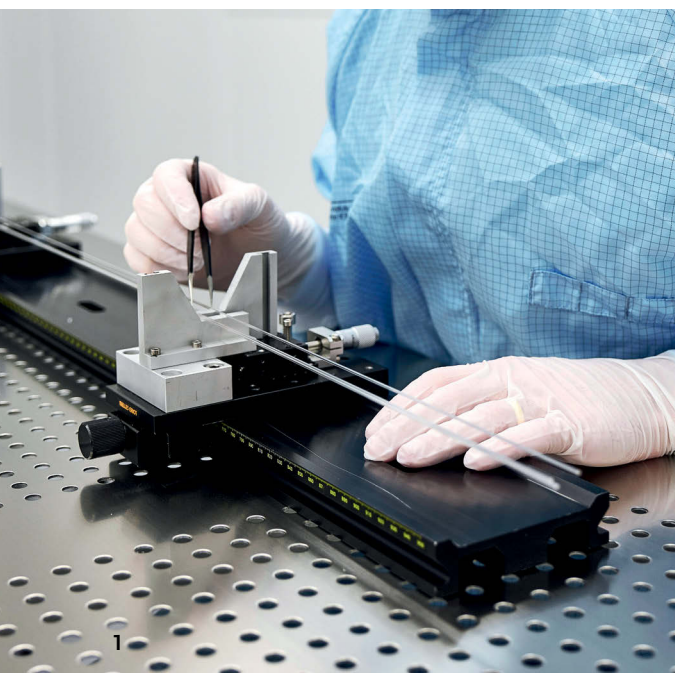
EINE METHODE FUNKTIONIERT WIE EINE PASTA-MASCHINE

Die Erlanger Forscher stellen ihre Glasfasern in zwei Schritten her, erklärt Michael Frosz, der Leiter des dafür zuständigen Teams. Zunächst legen sie einen Stapel vorgefertigter Glasröhren im gewünschten Muster zusammen, erhitzen den Stapel und ziehen ihn zu einer einige Millimeter dicken Vorform auseinander. Diese Vorform spannen sie dann

oben im Faserziehturm ein, der für Quarzglas eine Höhe von etwa acht Metern erreicht. Dort sitzt ein kompakter, rohrförmiger Graphitofen, der die Vorform schmilzt. Dann wird ihr unteres Ende zu einer haarfeinen Faser gezogen, mit schützendem Kunststoff ummantelt und unten auf einer Trommel aufgerollt.

Neben diesem Standardverfahren hat Russells Team eine zweite Methode entwickelt, das Extrudieren. „Im Prinzip funktioniert das wie eine Pasta-Maschine“, sagt Xin Jiang, der Leiter des sogenannten Glasstudios. Eine Pasta-Maschine presst den Teig durch eine Scheibe mit Löchern. Ganz ähnlich wird in Erlangen die heiße Glasmasse durch Lochscheiben gedrückt. Diese geben dem Faserrohling, der anschließend zu einer dünnen Faser gezogen wird, ein nahezu beliebig geformtes Innenleben mit. „Das gibt uns mehr Freiheit im Design“, erklärt Russell.

Es lassen sich drei Grundtypen von Glasfasern unterscheiden. Ein Typ besitzt Strukturen wie zum Beispiel die dünnen Glasmembranen, der andere hat einen mit Glas gefüllten Kern, der von den winzigen Kanälen des photo-



nischen Kristalls eingefasst wird und durch den das Licht läuft. Der Kern des dritten Typs ist dagegen hohl.

Die Hohlkernfasern verwenden die Erlanger Forscher etwa, um darin Mikropartikel mit Laserlicht zu manipulieren. „Ähnlich wie sogenannte optische Pinzetten verwenden wir hierzu Lichtkräfte“, erklärt der Postdoktorand Shangran Xie. Er entwickelt mit seinem Team eine Technik, die einen mit Licht gehaltenen Partikel als Sensor für elektrische Felder verwendet. Kollegen vom Forschungszentrum Jülich sind an dem Fasersensor interessiert. Sie wollen ihn zur Feldmessung in einer Hochspannungsanlage einsetzen, die Menschen bei Betrieb nicht betreten dürfen.

Dass die Sensoren auf Basis meterlanger photonischer Kristallfasern sich dort einsetzen lassen, wo Menschen sich nicht aufhalten dürfen, könnte auch in Kernkraftwerken hilfreich sein. Denn die Sensoren können auch radioaktive Strahlung messen und lassen sich sogar zwischen verschiedenen Strahlungen umschalten.

Inzwischen verfolgen die Erlanger Physiker eine neue Idee, denn sogar lebende Zellen lassen sich in den durchsichtigen Hohlkernfasern sehr gut untersuchen. Man könnte zum Beispiel eine einzelne Krebszelle in der Faser mit Licht

fangen. Dann könnte man eine Flüssigkeit mit einem neuen Wirkstoff durch die Faser pumpen und testen, wie die Zelle reagiert. Das böte einen innovativen Ansatz für die Pharmaforschung.

Das Hauptgebiet der Erlanger Forschung ist aber die nichtlineare Optik, genauer: die nichtlineare Wellenlängenkonversion. Dieses Gebiet nutzt die Fähigkeit photonischer Kristallfasern, Laserlicht von einer Wellenlänge in ganz andere Wellenlängen zu übersetzen. So erzeugt beispielsweise eine Vollkernfaser den berühmten Frequenzkamm. In der Erlanger Forschung spielen derzeit gasgefüllte Hohlkernfasern eine zentrale Rolle. In solche Fasern schießen die Forscher sehr starke, extrem kurze Laserlichtblitze hinein. Am anderen Ende kommt Licht mit verwandelten Eigenschaften heraus.

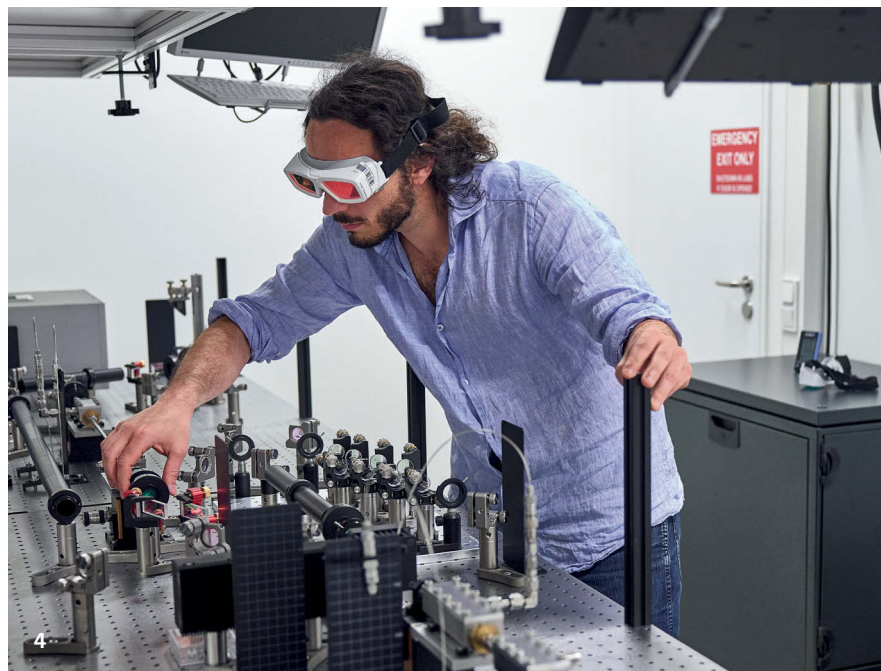
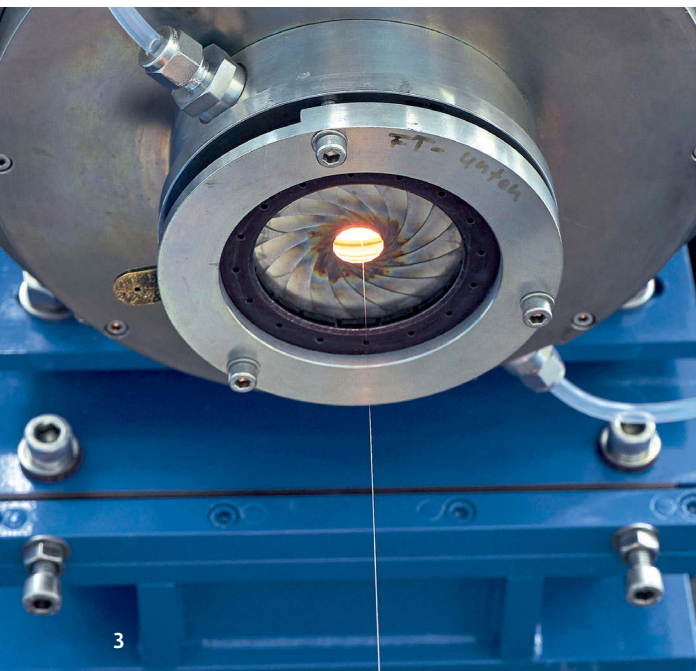
BESONDERS INTERESSANT: ULTRAVIOLETTES LASERLICHT

Das komplexe Geschehen in der Faser vergleicht Russell mit dem, was in der Rockmusik der Verstärker aus dem Signal einer E-Gitarre macht. Solange der Verstärker nur moderat aufgedreht ist, macht er die Welle kräftiger, ohne sie zu verformen. Eine solche Verstärkung ist linear. Ein Rockgitarrist reißt aber den

Verstärker so weit auf, dass er verzerrt. Das erzeugt Obertöne, die der Rockgitarre ihren typischen Klang geben. Eine solche Verstärkung ist nichtlinear, weil sie die Wellenform verändert.

Ungefähr so funktionieren photonische Kristallfasern. Das Team des italienischen Postdoktoranden Francesco Tani zum Beispiel treibt diese Nichtlinearität auf die Spitze. Seine Fasern sind mit einem Edelgas gefüllt, etwa Argon oder Neon. Das Licht starker Infrarotlaserpulse wird so wie bei einem Regenbogen aufgefächert und lässt sich über den Gasdruck in der Faser zwischen verschiedenen Frequenzbereichen durchstimmen: Die Lichtfarbe wird steuerbar. Für zahlreiche Anwendungen in Forschung und Technik ist besonders interessant, dass sich so Laserlicht im Ultraviolettbereich erzeugen lässt.

Tatsächlich kann man starkes ultraviolette Licht mit photonischen Kristallfasern schon so zuverlässig erzeugen, dass eine Start-up-Firma am Institut das Verfahren kommerzialisieren will. 2016 wurde das Unternehmen ultralumina in Erlangen gegründet. Sechs Leute arbeiten hier zurzeit, und interessierte Kunden haben sie auch schon. Unternehmen aus der Halbleiterindustrie wollen das Ultraviolettlicht in ihren Inspektionsanlagen einsetzen. Damit



prüfen die Produzenten elektronischer Chips die Qualität der Strukturen auf den Silicium-Wafern. „Dazu braucht es sehr helles, kurzwelliges Licht“, sagt der technische Leiter Patrick Uebel. Auch für die Mikroskopie gibt es Interesse an der neuen Lichtquelle. „Das erste Geschäftsjahr lief recht gut“, berichtet sein Kollege Sebastian Bauerschmidt.

Sogar kompakte Quellen für Röntgenlaserlicht könnten photonische Kristallfasern ermöglichen. Röntgenlaser sind bislang riesige, teure Teilchenbeschleuniger, die sogenannten Freie-Elektronen-Laser. Die Glasfasern könnten der Schlüssel zu kleinen Tischanlagen für Materialforschung, Medizin und Technik sein.

Um den vielfältigen Aktivitäten in Erlangen gerecht zu werden, müsste man ein Buch schreiben – gewissermaßen als Bibel der photonischen Kristallfaserwelt. Zumindest laut Google würden die Fasern auch den spirituellen Anspruch erfüllen, der damit verbunden ist. Denn die Suchmaschine kennt Russells Fasern auch als heilig. Bei seinen ersten Präsentationen betonte der Physiker die Löchrigkeit der Fasern mit dem Begriff *Holey Fiber*. Amüsiert erzählt Russell, wie daraus im Netz durch einen Vertipper auch *Holy Fibers*, also heilige Fasern, wurden.

Von der Herstellung zum Experiment: Zunächst stapeln die Erlanger Forscher die hohlen Vorformen zu dem Muster, das die Kanäle in den photonischen Kristallfasern aufweisen sollen (1). Die Idee für die Fertigung der Fasern entwickelte Philip Russell (2) in den 1990er-Jahren. Dabei werden die Vorformen in einem Ofen geschmolzen und zu Fasern gezogen, die etwa so dünn sind wie ein menschliches Haar (3). Mit einer Faser, die einen hohlen Kern besitzt, erzeugt Francesco Tani aus infraroten Laserpulsen ein breites Spektrum an Farben (4). Zu diesem Zweck regelt er die Leistung des Lasers, der in die Faser strahlt.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Mit photonischen Kristallfasern hat Philip Russell Glasfasern entwickelt, die der Länge nach von einem photonischen Kristall durchzogen werden.
- Die Grundmode des Laserlichts, deren Intensitätsmaximum in der Strahlmitte liegt, leiten die Fasern auch auf unendlich langen Strecken schmal gebündelt.
- Photonische Kristallfasern können die spektralen Eigenschaften des geführten Laserlichts dank nichtlinearer optischer Effekte in vielfältiger Weise manipulieren: Manche konvertieren die Wellenlänge des Lichtstrahls, der durch sie hindurchläuft, in andere Wellenlängen, sogar bis in den ultravioletten Bereich. Andere Fasern eignen sich, um Sensoren für elektrische Felder und unterschiedliche Strahlungsarten zu entwickeln.

GLOSSAR

Photonischer Kristall heißt eine periodische Struktur etwa von Kanälen in Glas, deren Geometrie die optischen Eigenschaften bestimmt. An dieser Struktur kann Licht selektiv nach seiner Farbe (Wellenlänge) reflektiert werden, was das Schillern mancher Schmetterlingsflügel erklärt.

Photonische Kristallfaser: Eine Glasfaser, um deren Zentrum regelmäßig gas- oder flüssigkeitsgefüllte Kanäle, die bis zu wenigen Mikrometern breit sein können, angeordnet sind. Diese Struktur beeinflusst das Licht, das durch die Faser geleitet wird.

Fasernmoden heißen die Lichtstrahlen mit bestimmten, unterschiedlichen Verteilungen der Lichtintensität, die sich in einer photonischen Kristallfaser ausbreiten können. Die Grundmode beispielsweise besitzt ihr Intensitätsmaximum in der Strahlmitte.

Das Protein-Puzzle

Der menschliche Körper besteht aus Zigtausenden Proteinen. Diese kommen in unterschiedlichen Varianten vor, zudem kann sich ihre Konzentration im Organismus mit der Zeit ändern.

Matthias Mann vom **Max-Planck-Institut für Biochemie** in Martinsried braucht deshalb schlaue Algorithmen und viel Rechenkraft für seine Forschung. Schließlich will er das menschliche Proteom, also die Gesamtheit der Proteine des Menschen, entschlüsseln und für die Medizin nutzbar machen.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

In den Martinsrieder Labors von Matthias Mann ist es so aufgeräumt wie auf der Intensivstation eines Krankenhauses. Wände und Türen aus Glas bieten freie Sicht, in den Räumen stehen mehrere identisch aussehende Arbeitsstationen. An jeder Station hängt ein Roboterarm von der Decke, der kleine Plättchen mit Proben greift und in die Geräte steckt. Diese Apparate enthalten die technische Essenz dessen, was Matthias Mann über die Jahre entwickelt hat: Maschinen, mit denen sich Proteine aufbereiten und in atemberaubender Geschwindigkeit analysieren und bestimmen lassen.

Mann interessiert sich für diese Biomoleküle, weil sie an fast allen Stoffwechselvorgängen eines Organismus beteiligt sind. Proteine bestehen aus einer Kette von Aminosäure-Molekülen, die sich in komplizierten Mustern dreidimensional auffaltet. Manche – wie das Keratin in Haut- und Haarzellen – dienen als Stützsubstanz. Andere Proteine, die sogenannten Enzyme, beschleunigen Stoffwechselreaktionen: Sie wandeln beispielsweise Fette in Energie um oder machen den Sauerstoff

als Energiequelle für die Zellen nutzbar. Zieht man den Wasseranteil am Körpergewicht ab, besteht ein Lebewesen zur Hälfte aus Proteinen. Kurz: Ohne Proteine gäbe es auf der Erde kein Leben.

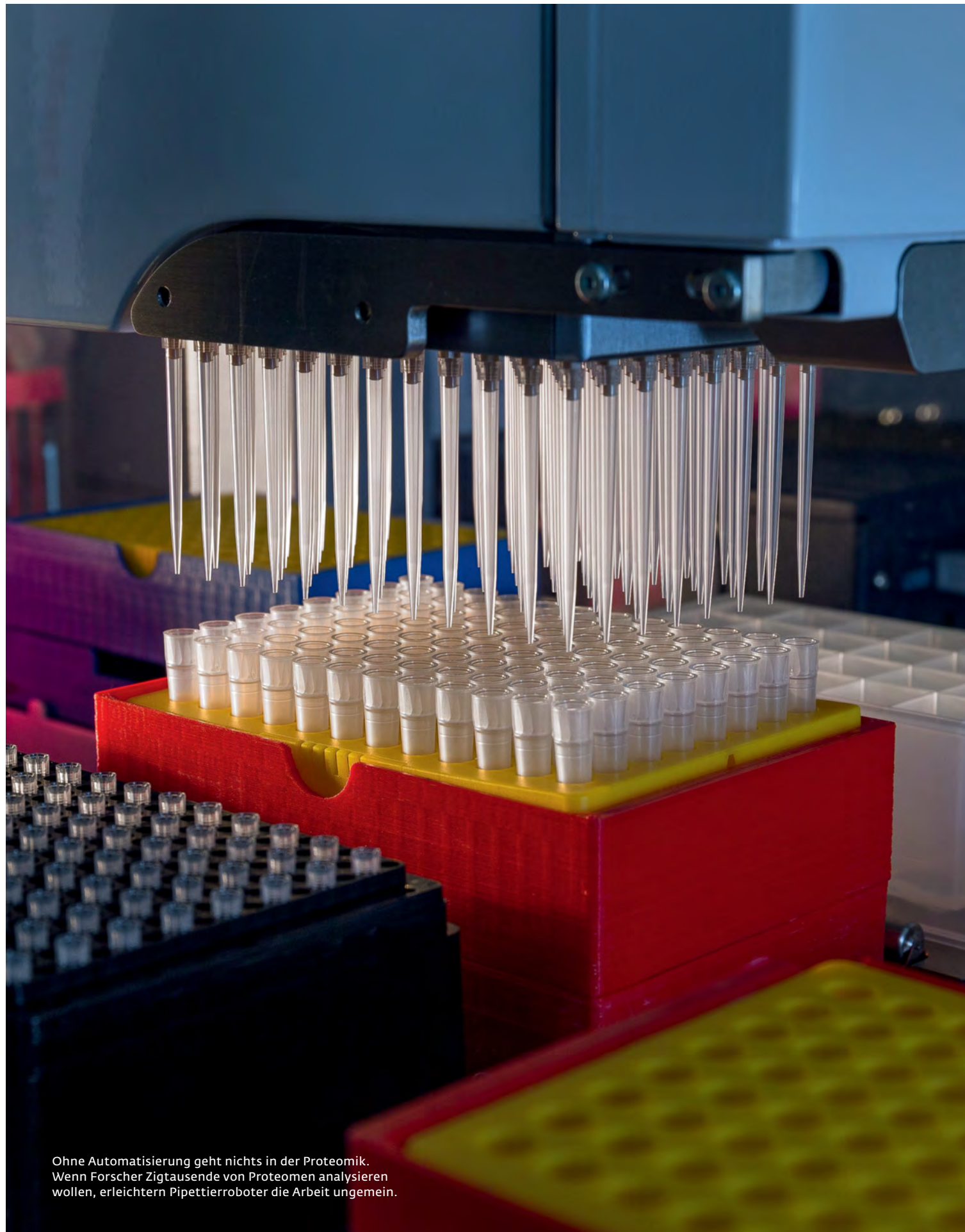
ANWENDUNGSREIFE TECHNIK

Matthias Mann hat zunächst Physik und Mathematik studiert und erforscht die Welt der Proteine seit den 1980er-Jahren. „Zwei Jahrzehnte hat es gedauert, die Technik so weiterzuentwickeln, dass man Proteine überhaupt vernünftig analysieren kann“, sagt er. „Inzwischen sind wir so weit, dass wir die Technik auch wirklich anwenden können – und jetzt wird es richtig spannend!“ Wie komplex die Analyse der Proteine ist, wurde vor allem nach der Entschlüsselung des Erbguts des Menschen im Jahr 2001 deutlich. Die Wissenschaftler des Human Genome Project identifizierten damals etwa 20000 Gene, welche die Baupläne für etwa ebenso viele Proteine enthalten.

Erst nach und nach wurde klar, dass es eine Fülle von Varianten dieser Proteine gibt. So können nach dem Ablesen

eines Gens Teile aus der so entstandenen Boten-RNA herausgeschnitten werden, sodass die unterschiedlich langen RNA-Moleküle in jeweils unterschiedliche Proteine übersetzt werden. Viele Proteine wiederum müssen als fertige Moleküle erst noch zurechtgeschnitten werden, bevor sie einsatzbereit sind. Andere werden mit chemischen Anhängseln versehen. Alles in allem gibt es Hunderttausende von Proteinvarianten, die in einer fein abgestimmten Choreografie zusammenwirken.

Dazu kommt: Während ein Organismus zeit seines Lebens dieselben Gene besitzt, schwankt die Proteinzusammensetzung je nach Zelltyp. Manche Proteine kommen in großen Mengen und in jeder Zelle vor – andere nur in kleinen Dosen und nur in bestimmten Geweben. Je nachdem, welche Aufgaben der Stoffwechsel gerade erledigt, sind unterschiedliche Proteine aktiv. „Wenn wir wissen wollen, wie der Stoffwechsel arbeitet oder in welchem Zustand er sich befindet, dann müssen wir die Proteine in einem Gewebe mit all ihren Veränderungen analysieren können“, sagt Mann. >



Ohne Automatisierung geht nichts in der Proteomik.
Wenn Forscher Zigtausende von Proteomen analysieren
wollen, erleichtern Pipettierroboter die Arbeit ungemein.



Unter der Aufsicht von Heiner Koch, Florian Meier und Scarlet Beck (von links) analysieren allein in diesem Labor von Matthias Mann (ganz rechts) sechs Massenspektrometer Proteinproben.

Nach und nach wurde klar, wie wichtig die Proteine für die Vorgänge im Körper sind. Immer mehr Wissenschaftler interessierten sich nun für die Gesamtheit aller Proteine eines Organismus. So entstand schließlich der heute als Proteomik bezeichnete Forschungszweig. Bei der Analyse der Proteinzusammensetzung eines Lebewesens fallen jedoch riesige Datenmengen an. Auch für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse müssen unzählige Informationen zusammengeführt werden. Eine ausgeklügelte Datenverarbeitung ist deshalb die Grundlage für die Proteomik.

Ein großes Problem bei der Analyse von Proteinen besteht darin, dass sie so empfindlich sind. Wie jeder weiß, der schon einmal ein Ei gekocht oder geschlagen hat, bricht der dreidimensionale Aufbau von Proteinen zusammen, wenn man diese zu sehr erhitzt oder mechanisch strapaziert – sie verklumpen. Deshalb ließen sie sich zunächst nicht mit der klassischen Massenspektrometrie analysieren. Solche Massen-

spektrometer werden genutzt, um Proben mit unbekannten Inhaltsstoffen zu untersuchen – um etwa Giftstoffe in Gewebeproben aufzuspüren.

FLUGBAHN IM ELEKTRISCHEN FELD

Bevor sich die Substanzen im Massenspektrometer untersuchen lassen, müssen sie in geladene Teilchen verwandelt werden – zum Beispiel, indem sie mit Elektronen oder anderen geladenen Teilchen beschossen und dadurch selbst in elektrisch geladene Ionen umgewandelt werden. Denn nur wenn Moleküle selbst elektrisch geladen sind, werden sie von ihrer Bahn durch das elektrische Feld des Massenspektrometers abgelenkt – je nach Ladungsstärke und Molekulargewicht unterschiedlich stark. So können die Wissenschaftler auf die Identität eines Moleküls schließen.

Für die empfindlichen Proteine aber war die klassische Massenspektrometrie mitsamt der Ionisierung zu hart. Im Labor seines Doktorvaters John B. Fenn an der Universität in Yale entwickelte

Matthias Mann zusammen mit anderen Kollegen Anfang der 1980er-Jahre eine sanftere Lösung. Dabei zerlegten die Forscher die Proteine mithilfe des Verdauungsenzyms Trypsin in etwa zehn Aminosäuren lange Bruchstücke, sogenannte Peptide. Diese versprühten sie durch ein feines Röhrchen wie ein Spray und versahen sie so mit einer elektrischen Ladung. Mit dieser Elektrospray-Ionisation konnten die Wissenschaftler erstmals empfindliche Peptide in einem Massenspektrometer analysieren – ein Verfahren, für das Fenn im Jahr 2002 den Chemie-Nobelpreis erhielt.

Nun schlug die Stunde der Informatiker, denn für einen Menschen ist es schier unmöglich, aus dem Peptidmix auf die ursprünglichen Proteine zu schließen. Zusammen mit seinem Kollegen Jürgen Cox entwickelte Mann deshalb eine Analysesoftware namens MaxQuant, die viele Tausend Peptidbruchstücke mit internationalen Datenbanken abgleichen kann. Die Datenbanken enthalten neben den Gewichtsangaben für alle möglichen Peptide



Ausschnitt aus dem Proteinspektrum einer Krebszelle: Die Proteine werden zunächst in Peptide mit unterschiedlichen Massen zerlegt (dargestellt in verschiedenen Farben), in Chromatografie-Säulen voneinander getrennt und anschließend im Massenspektrometer nachgewiesen.

auch die Information, zu welchem Protein ein Bruchstück gehört. MaxQuant gleicht die Daten aus dem Massenspektrometer mit den Datenbanken ab und rekonstruiert aus den Ergebnissen die in einer Probe enthaltenen Proteine.

CHROMATOGRAPHIE IM MINIATURFORMAT

Noch konnten Elektrospray-Ionisation und MaxQuant gemeinsam aber nicht alle Hindernisse der Proteinanalyse überwinden. Sie erfassten etwa keine Proteine, die nur in geringen Mengen in einer Probe vorhanden sind. Das lag daran, dass die Forscher im Verhältnis große Flüssigkeitsmengen benötigten, um die Proteine vor der Analyse im Massenspektrometer mittels Chromatografie von den restlichen Bestandteilen einer Probe abzutrennen. Dadurch wurden die seltenen Proteine zu stark verdünnt und waren nicht mehr nachzuweisen.

Mann miniaturisierte die bei dieser Form der Chromatografie benutzten Röhren so weit, dass sie nur noch einen Durchmesser von wenigen milliardstel

Metern aufwiesen. Für diese Röhren benötigt er lediglich winzige Probenmengen: „Mit unserer Nano-Chromatografie können wir auch die Proteine in ausreichend hoher Konzentration auffangen, die nur in ganz geringen Mengen vorliegen.“

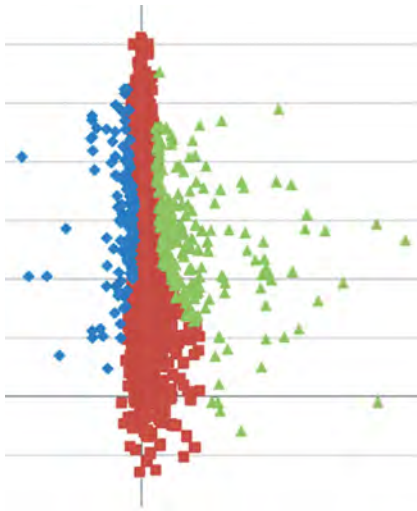
Mit der Kombination aus Elektrospray-Ionisation, MaxQuant und Nano-chromatografie ist Mann gelungen, was zuvor unmöglich schien: das vollständige Proteom eines Organismus zu entschlüsseln. Im Jahr 2008 hat der Forscher so das Proteom eines ganzen Organismus vollständig analysiert und die 4399 Proteine eines Hefepilzes bestimmt. Der

jüngste Coup gelang ihm und seinem Max-Planck-Kollegen Frank Schnorrer 2016 mit der Entschlüsselung des Fruchtfliegen-Proteoms: Rund 10000 Proteine besitzt das winzige Insekt. „Zum Vergleich: Allein im Gehirn einer Maus kommen etwa 13000 Proteine vor“, erklärt Mann. Nur zehn Prozent sind auf bestimmte Zelltypen beschränkt.

Manns Methode hat sich heute weltweit in Proteomiklabors als Standard durchgesetzt. Ohne entsprechende Computerunterstützung ist sie nach wie vor undenkbar. Cox und Mann haben die MaxQuant-Software so weiterentwickelt, dass sie inzwischen



Damit die elektrisch neutralen und in kleinere Peptidfragmente zerstückelten Proteine vom elektrischen Feld des Massenspektrometers auf unterschiedliche Flugbahnen geschickt werden können, müssen sie selbst elektrisch geladen sein. Die Peptide werden deshalb mit dem Elektrospray-Verfahren ionisiert. Dabei werden sie in einer Metallkapillare mit elektrischer Ladung versehen und an der Spitze der Kapillare versprüht.



Die Bäckerhefe war der erste Organismus, dessen Proteom analysiert wurde. Der einzellige Organismus kann sich sowohl geschlechtlich als auch ungeschlechtlich vermehren. Die Grafik zeigt das Mengenverhältnis von Proteinen in beiden Wachstumsphasen: Manche Proteine werden verstärkt während sexueller Vermehrung gebildet (blau), zum Beispiel Lockstoffproteine, die die Zellen für die Paarung benötigen. Einige werden vor allem bei der ungeschlechtlichen Vermehrung produziert (grün). Auf andere wiederum wirkt sich die Art der Vermehrung nicht aus (rot). Obwohl Zellen identische Gene haben, können sie für ihre unterschiedliche Lebensweise ein völlig verschiedenes Proteinrepertoire nutzen.

auch die Menge der in einer Probe enthaltenen Proteine ermitteln kann. So lassen sich mehrere Proben eines Patienten miteinander vergleichen und bestimmen, wie sich die Konzentration eines Proteins mit der Zeit verändert.

Bevor die Proteomik aber in die Krankenhäuser einziehen kann, müssen die Verfahren noch schneller werden. „Im Moment optimieren wir den Arbeitsablauf unserer Anlage, damit wir möglichst viele Proben untersuchen können. In einem Jahr werden wir vermutlich so weit sein, dass wir 100 Proteome pro Tag analysieren können“, sagt Matthias Mann. Dann wer-

den die Forscher etwa untersuchen können, wie sich die Proteinkonzentrationen eines Patienten im Laufe eines Tages oder mit fortschreitender Erkrankung verändert.

Schon jetzt können die Wissenschaftler Gruppen von Menschen miteinander vergleichen, um die Unterschiede im Stoffwechsel kranker und gesunder Patienten zu bestimmen. Zu diesem Zweck hat Mann zusammen mit Medizinern der Klinik der Universität Kopenhagen untersucht, wie sich die Proteine von Menschen mit Fettleibigkeit ändern, wenn diese acht Wochen lang Diät halten.

NICHT JEDER SPRICHT GLEICH AUF EINE DIÄT AN

Auf Übergewicht reagiert der Körper wie auf eine Entzündung und produziert verstärkt Proteine, die für Entzündungsreaktionen typisch sind. Die Forscher wollten nun wissen, ob während der Diät die Menge der Entzündungsproteine bei allen Patienten gleichermaßen abnimmt. Mann und seine Kollegen analysierten dazu mehr als 1000 Proteome und bestimmten mit der MaxQuant-Software die Menge der Entzündungsproteine. Es zeigte sich, dass diese während einer Diät nicht bei allen Menschen sinkt. Nicht jeder spricht also gleichermaßen darauf an.

Erschwert wird die Proteomanalyse bis heute durch die vielen Varianten, in denen Proteine vorliegen können. An altersschwache oder defekte Proteine etwa dockt das Protein Ubiquitin an. Dieses Andocken setzt einen Abbauprozess in Gang, in dem das Protein nach und nach demontiert wird. Viele Proteine werden zudem aktiviert, indem ihnen ein Phosphatmolekül angehängt wird. Dieser Prozess wird Phosphorylierung genannt.

So konnte Mann nachweisen, dass von diesem Phosphorylierungszustand der Tag-Nacht-Rhythmus eines Lebewe-

sens ganz entscheidend abhängt. „Es gibt ungeheuer viele Proteinvarianten, deren Bedeutung wir erst noch verstehen müssen. Ganze Gruppen von Proteinen können zudem unterschiedliche Zustände einnehmen. Für die Behandlung von Krankheiten sind aber gerade solche Veränderungen des Proteoms eines Menschen entscheidend“, erklärt der Wissenschaftler – der deshalb wenig von manchen der heutigen Tests zur Krankheitsdiagnose hält.

Als Beispiel nennt er den sogenannten PSA-Wert, der ein Hinweis auf Prostatakrebs sein kann, aber wegen seiner Unsicherheit umstritten ist. „Mit solchen Tests weist man die Anwesenheit oder Menge eines einzigen Proteins nach. Nach allem, was wir inzwischen wissen, reicht das aber nicht aus. Man wird künftig viel stärker auf das Proteom eines Menschen setzen, um einen Überblick über den Gesundheitsstatus zu bekommen“, sagt Mann.

Dabei soll ihm eine weitere Software seines Kollegen Jürgen Cox helfen: „Perseus“ nutzt die statistisch aufbereiteten Proteindaten von MaxQuant und führt damit eine Big-Data-Analyse durch. Die Software greift unter anderem auch auf internationale Datenbanken zu, in denen das gesammelte Wissen über Proteine gespeichert ist – zum Beispiel, wo manche Proteine vorkommen oder was es bedeutet, wenn der Stoffwechsel bestimmte Proteine vermehrt produziert. Auch die vorhandenen Erkenntnisse über Krankheiten fließen in die Analysen von Perseus mit ein.

Die Proteom-basierte Diagnose und Behandlung von Krankheiten stehen zwar noch ganz am Anfang. So wäre es extrem schwer, im Proteom frühzeitige Hinweise auf einen bösartigen Hautkrebs zu finden, denn der Tumor ist im Anfangsstadium noch sehr klein und die von ihm abgegebenen Proteinmengen entsprechend gering. Selbst mit der Nanochromatografie lassen sich so kleine Mengen nicht sicher aufspüren.



Datenanalyse am Computer (von links vorne im Uhrzeigersinn): Jan Rudolph, Jürgen Cox, Camila Duitama, Pavel Sinitcyn und Art Carlson – und dazwischen ein Schachspiel zur Entspannung.

Deutlich weiter als zu Beginn dieses Jahrtausends ist die Proteomik jedoch allemal. Nach der Entschlüsselung des menschlichen Erbguts 2001 gründeten sich viele Start-up-Unternehmen, die die Proteomanalyse als Dienstleistung für die klinische Forschung anboten. Angesichts von Methoden wie Nanochromatografie und Elektrospray-Ionisation ist offensichtlich, dass die Technik von damals völlig unzureichend war.

Entsprechend waren die Ergebnisse für den klinischen Alltag nicht zu gebrauchen. Der Katzenjammer folgte auf dem Fuß: Viele Start-ups verschwanden von der Bildfläche, der Begriff Proteomik verkam zum bloßen Modewort. „Mit unseren neuen Verfahren sind wir einen großen Schritt weiter – im Grunde geht es erst jetzt so richtig los“, sagt Matthias Mann. Wie gut, dass er im Studium nicht ausschließlich auf Informatik und Physik gesetzt und sich schon frühzeitig für die biologischen Fragestellungen interessiert hat, die seine Forschung aufwerfen. So kann er heute dazu beitragen, das Potenzial der Proteomik für die Biologie und Medizin zu nutzen. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Für eine Proteomanalyse müssen die Proteine zunächst in Peptide zerlegt werden. Nur ausgeklügelte Computer-Algorithmen können aus den dabei anfallenden riesigen Datenmengen wieder die ursprünglichen Proteine rekonstruieren.
- Das Programm MaxQuant greift dafür auf Datenbanken zu, in denen das Wissen über die Peptide und Proteine gesammelt wird.
- Mit der Software Perseus werten die Wissenschaftler Informationen aus Datenbanken zu Vorkommen und Funktion von Proteinen aus. So lässt sich die Rolle einzelner Proteine bei Erkrankungen aufdecken.

GLOSSAR

Proteinmodifikationen: Die Zahl der Proteine eines Organismus kann um ein Vielfaches höher sein als die seiner Gene. Die enorme Vielfalt entsteht durch Veränderungen nach dem Ablesen (Transkription) eines Gens oder der Übersetzung der Boten-RNA in ein Protein (Translation). Beim sogenannten alternativen Spleißen werden etwa Abschnitte der Boten-RNA herausgeschnitten oder umgruppiert, sodass unterschiedliche Genprodukte entstehen. Kleine Anhängsel wie Phosphat- oder Zuckerreste verändern dann nachträglich die Funktion von Proteinen. Wenn in einem Gen die Information für mehrere Proteine enthalten ist oder wenn eine Aminosäurekette nachträglich in mehrere Proteine gespalten wird, entstehen aus einem Gen zudem mehrere Proteine. Beim Menschen können so bis zu zehn verschiedene Proteine auf ein einzelnes Gen zurückgehen.

Proteom: Die Zahl der Proteine im menschlichen Körper wird heute auf 80 000 bis 400 000 geschätzt. Diese werden jedoch nicht von allen Zellen und zu jeder Zeit gebildet. Je nach Zelltyp besitzt eine Zelle ein anderes Proteom. Bei rund 250 verschiedenen Zelltypen des menschlichen Körpers gibt es also mindestens ebenso viele Proteome. Das Proteom hängt von vielen Faktoren ab. So kann ein Organismus je nach Alter, Ernährung oder Gesundheitszustand unterschiedliche Proteine bilden. Auch Umwelteinflüsse wie Medikamente oder Schadstoffe beeinflussen die Proteinzusammensetzung.



Der Aachener Dom in Miniatur:
Mit dem 3D-Druck lassen sich sehr
filigrane Strukturen erzeugen.

Mit Licht gebaut

Dem 3D-Druck gehört die Zukunft. Aber noch lässt sich aus den dafür verwendeten Werkstoffen und den Fertigungsprozessen nicht das Optimum herausholen. Daher arbeiten Wissenschaftler des **Max-Planck-Instituts für Eisenforschung** in Düsseldorf gemeinsam mit Kollegen des Aachener **Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT** daran, dem neuen Verfahren aus den Kinderschuhen zu helfen.

TEXT **ALEXANDER STIRN**

Der gleißend helle Lichtpunkt tänzelt hin und her, von rechts nach links, von links nach rechts. Er sprüht Funken. Er macht Pausen, nur um sich kurz darauf erneut in Bewegung zu setzen. Er ist unermüdlich und äußerst produktiv.

Der gleißend helle Lichtpunkt, der in einem Labor in Aachen vor sich hin wirbelt, verfolgt ein großes Ziel: Er soll die Materialforschung umkrempeln. Sein Licht ist das Ergebnis eines leistungsstarken Lasers, seine Funken sind unvermeidliche Begleiterscheinungen. Sie sind Zeugen dafür, dass der Laser fortwährend Metallpulver schmilzt, das dann auf einer Oberfläche erstarrt – Punkt für Punkt, Schicht für Schicht, wie bei einer Legokonstruktion mit winzigen metallischen Bauklötzchen.

3D-Druck heißt das Verfahren, in das die Produktionstechniker große Hoffnungen setzen. Es verspricht hochkomplexe Bauteile zu vergleichsweise geringen Kosten, mit wenig Abfall und kurzen Wartezeiten. Trotz vieler Fortschritte ist die Methode, Wissenschaftler nennen

sie „additive Fertigung“, allerdings noch lange nicht ausgereizt. Vor allem aufseiten der Werkstoffe steckt der 3D-Druck in den Kinderschuhen.

„Die Materialien, die man heute bei der additiven Fertigung einsetzt, sind für dieses Verfahren einfach nicht optimiert“, sagt Eric Jägle, Arbeitsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf. Weder sind die Stoffe dafür gemacht, sich beim Drucken besonders gutmütig zu verhalten, noch sind die Druckprozesse dafür optimiert, das Beste aus bestehenden Materialien herauszuholen. Die Werkstoffe nützen die neuartigen Herstellungsmethoden noch nicht völlig aus – obwohl gerade dadurch, wie die Vergangenheit zeigte, immense Fortschritte möglich wären.

„Als das Gießen einst entstanden ist, hat man die Werkstoffe auch angepasst und Legierungen entwickelt, die perfekt für das neue Verfahren geeignet waren“, sagt Andreas Weisheit, Arbeitsgruppenleiter am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen. „Ihr volles Potenzial wird die additive Fertigung folglich nur ausspielen, wenn



auch dafür die passenden Werkstoffe entwickelt und gleichzeitig die Prozesse an die neuen Materialien angepasst werden.“ Die Forscher experimentieren dabei auch mit altbekannten Stoffen, die sie schrittweise verbessern.

Genau deshalb tänzelt der gleißend helle Lichtpunkt in immer wilderen Mustern übers Metall. Genau deshalb versprüht er Funken aus immer komplexeren Werkstoffen: Der Laser ist Teil einer Forschungsanlage, mit der Jäggle und Weisheit gemeinsam untersuchen, welche Materialien sich für den 3D-Druck eignen und wie die Produktionsprozesse optimiert werden können, damit etwa die Eigenschaften bekannter Legierungen verbessert und Stähle durch die Laserbehandlung zum Beispiel besonders fest werden. AProLAM (Advanced Alloys and Process Design for Laser Additive Manufacturing of Metals) heißt das Forschungsvorhaben. Vor zwei Jahren ist das Kooperationsprojekt der beiden Institute gestartet, jetzt liegt der Zwischenbericht vor – mit vielversprechenden Ergebnissen.

Hoch sind allerdings auch die Erwartungen. 3D-Druck gilt als großer Hoffnungsträger im Produktionsprozess: Bisher müssen bei so gut wie jeder Fertigung zunächst spezielle Werkzeuge geschaffen werden, Gussformen etwa oder Pressfor-

men. „Das ist enorm teuer und rechnet sich erst, wenn sehr große Stückzahlen hergestellt werden müssen“, sagt Eric Jäggle. Die additive Fertigung benötigt hingegen – abgesehen vom teuren 3D-Drucker – keine besonderen Werkzeuge.

VÖLLIG NEUE ANSÄTZE, UM STÄHLE ZU OPTIMIEREN

Auch ohne hohe Einmalkosten können somit Kleinserien oder Einzelteile gefertigt werden wie Prototypen, individuelle Gelenkprothesen oder Ersatzteile für Flugzeuge. Die könnten künftig direkt vor Ort aus dem Drucker kommen – ohne teure Logistik und ohne zeitraubenden Versand.

Zudem ermöglicht die additive Fertigung hochkomplexe Bauteile. „Normalerweise ist man fertigungstechnisch beschränkt: Man fräst ein Metall, man dreht es, man nimmt ein Blech, biegt und schweißt es, und wenn das nicht ausreicht, muss man die Teile zusammenfügen“, sagt Jäggle. Beim 3D-Druck sind dagegen – wie bei einer Legokonstruktion – auch abenteuerliche Entwürfe mit Hohlräumen möglich. Zudem entstehen die oftmals filigranen Bauteile in einem Rutsch, ganz ohne Verschraubungen und ohne Abfälle durch Fräsen oder Drehmaschinen.

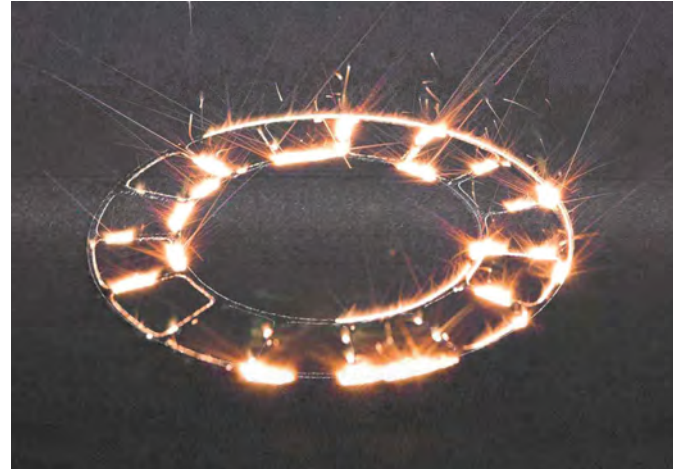
„Falls gewünscht, lassen sich komplette Baugruppen, die ursprünglich aus 20 oder 30 Einzelteilen bestanden, in einem Zug drucken“, meint Jäggle. Für die Materialwissenschaft eröffnet der 3D-Druck zudem völlig neue Ansätze, um Stähle und andere Legierungen zu optimieren.

Zwei Druckverfahren stehen derzeit im Fokus. Beide verwenden Laser, beide verwenden Metallpulver. Eric Jäggle holt ein Röhrchen mit einer grauen Substanz vom Fenstersims und schüttelt es leicht. Das Pulver ist so fein, dass es in seinem Behälter hin und her zu schwappen scheint. Lediglich 20 bis 40 Mikrometer (tausendstel Millimeter) messen die einzelnen Partikel, etwa ein Fünftel des Durchmessers eines menschlichen Haares.

Derart feines Pulver wird vor allem für die erste der beiden Methoden benötigt. Beim selektiven Laserschmelzen (Selective Laser Melting, kurz SLM) verteilt ein Schieber eine hauchdünne, nur 50 bis 100 Mikrometer starke Pulverschicht auf einer Trägerplatte. Ein Laserstrahl, der sich über Spiegel steuern lässt, wird darauf abgefeuert. Er schreibt Konturen in die pulvrige Schicht, schraffiert Flächen, belichtet einzelne Punkte. Wo er auftrifft, schmilzt das Metall.

Links Forscher des Aachener Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT beobachten den Prozess des selektiven Laserschmelzens. Dabei formt ein Laserstrahl, der als heller Fleck zu erkennen ist, Strukturen aus sehr feinem Metallpulver, das zuvor auf einem Träger verteilt wurde.

Rechts Um zwei Verfahren des 3D-Metall-drucks geht es im AProLAM-Projekt: das Laserauftragschweißen (links), bei dem Metallpulver in den Laserfokus auf einer Metallplatte gesprüht wird, und das selektive Laserschmelzen.



Kurze Zeit später erstarrt es wieder und verbindet sich mit der darunterliegenden Schicht. Ist eine Ebene gedruckt, wird die Platte um 50 bis 100 Mikrometer abgesenkt, der Schieber verteilt die nächste Pulverschicht, der Laser macht sich erneut an die Arbeit. Hunderte oder Tausende Schichten entstehen. Sie sind so fein, dass sie später, im fertigen Produkt, gar nicht mehr auffallen.

Das andere Verfahren, welches die AProLAM-Forscher als Erstes angepackt haben, ist etwas grober. Es heißt Laserauftragschweißen (oder Laser Metal Deposition, LMD), erzeugt dickere Metallklötzchen als der SLM-Prozess und verbirgt sich in Aachen hinter schweren, blickdichten Schiebetüren. Ist es in Betrieb, dann verwehrt eine rote Warnleuchte den Eintritt. Markus Benjamin Wilms, Mitarbeiter des AProLAM-Projekts am ILT, schiebt die Tür zur Seite. Dahinter kommt eine senkrecht montierte „Laserkanone“ zum Vorschein – nicht so schick und nicht so glänzend, wie sie Goldfinger oder andere James-Bond-Bösewichte verwenden, aber ähnlich leistungstark.

Gelbe Kabel mit einem Lichtleiter, fast so dick wie ein Gartenschlauch, führen zur eigentlichen Laserquelle, einem schrankgroßen Kasten. Dort entsteht infrarotes – und damit für das menschl-

che Auge unsichtbares – Laserlicht mit einer Leistung von bis zu zwei Kilowatt. Es wird am anderen Ende des gelben Kabels so fokussiert, dass der Strahl mit maximaler Intensität auf eine Metallplatte trifft. Das Material wird flüssig und beginnt gleißend hell zu leuchten.

METALL-ZUSAMMENSETZUNG UND PROZESS IM WECHSELSPIEL

„Wir wollen das Metall allerdings nicht nur schmelzen, wir wollen auch etwas aufbauen“, sagt Wilms. In der Spitze der vermeintlichen Laserkanone, um den Strahl gruppiert, sitzen daher drei Düsen. Angetrieben vom Edelgas Argon schleudern sie Metallpulver in den fokussierten Laserstrahl – und damit in das kleine Schmelzbad auf der Oberfläche. Das Pulver schmilzt, versprüht den ein oder anderen Funken und erstarrt schlagartig, sobald der tänzelnde Laser weiterzieht. Übrig bleibt ein fest verschweißtes Legoklötzchen.

In der Vergangenheit, vor dem Start des AProLAM-Projekts, haben Materialforscher vor allem versucht, die Bedingungen des Laserprozesses zu optimieren, sodass mit altbewährten Legierungen brauchbare Produkte ohne Poren und ohne Risse entstanden. Oder sie haben sich Gedanken gemacht, welche

neuen Werkstoffe besonders gut für den 3D-Druck geeignet sein könnten.

Für Eric Jäggle sind die beiden Ansätze untrennbar miteinander verbunden. „Erst das Wechselspiel aus der Zusammensetzung von Metallen und aus einem ganz bestimmten Prozessweg führt zu Mikrostrukturen mit den von uns gewünschten Eigenschaften“, sagt der Max-Planck-Forscher.

Egal ob Festigkeit, Zähigkeit oder Widerstandskraft gegen Risse und Korrosion – nicht nur die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Bestandteile einer Legierung sind entscheidend, sondern auch die Art und Weise, wie diese nach dem Erstarren räumlich angeordnet sind. „Mit der additiven Fertigung haben wir nun einen neuen, interessanten Prozess – und damit die Chance, völlig neue Eigenschaften zu erzeugen“, sagt Jäggle.

Da sind etwa die sogenannten Maraging-Stähle – ein Kunstwort aus „Martensit“, dem Namen der Mikrostruktur, und „Aging“, dem englischen Begriff für Alterung. Solche Stähle, die Eric Jäggle und seine Kollegen für den 3D-Druck optimieren und weiterentwickeln, enthalten neben Eisen unter anderem Aluminium und Titan. Beide Metalle können winzige Ausscheidungen bilden. >

Diese Ausscheidungen verhindern, dass sich Versetzungen im Gefüge des Stahls frei bewegen können. Das Material verformt sich nicht so leicht, es wird deutlich fester. Allerdings: Um die Ausscheidungen zu erzeugen, ist normalerweise ein großer Aufwand nötig. Das Material muss zunächst stark erhitzt werden, damit sich die fremden Stoffe lösen. Dann wird es abgeschreckt und zum Schluss bei hohen Temperaturen für längere Zeit gehärtet, sodass sich die Ausscheidungen bilden können.

„Interessanterweise finden sich all diese Schritte auch bei der additiven

Fertigung“, sagt Eric Jägle. Dort heizt ein Laser das Material zunächst stark auf. Das Schmelzbad ist allerdings winzig, kleiner als die Spitze einer Stecknadel. Deshalb kühlt es umgehend wieder ab, sobald sich der Laser zum nächsten Punkt bewegt. Kommt er zurück und drückt haarscharf daneben eine Nachbarreihe, wird das ursprüngliche Klötzchen nochmals erhitzt. Der Effekt wiederholt sich bei der übernächsten Reihe, fällt aber etwas schwächer aus. Mit zunehmender Entfernung werden die Temperaturspitzen kleiner und kleiner.

Wird hingegen direkt über dem Klötzchen die nächste Lage aufgebracht, erhitzt sich der Metallklumpen nochmals so stark, dass Teile des Materials schmelzen. „Wir haben hier einen enorm komplexen, ganz wilden Temperaturverlauf“, sagt Philipp Kürnsteiner, AProLAM-Mitarbeiter am Düsseldorfer Max-Planck-Institut. „Genau das könnte uns helfen, in Zukunft ausscheidungsgehärtete Materialien direkt aus der Maschine zu bekommen – ganz ohne nachgeschaltete Wärmebehandlung.“

Um das zu testen, hat ILT-Forscher Markus Benjamin Wilms in den vergan-

Foto: Frank Vinken



genen Monaten ein ums andere Mal seine grün getönte Schutzbrille aufgesetzt sowie eine Atemmaske übergestülpt, die seine Lunge vor Metallstaub schützen soll. Er hat den Lichtpunkt tänzeln lassen und Quader aus einer Eisen-Nickel-Legierung gedruckt – unten, in den ersten Schichten, ganz ohne Aluminium; dann mit einem immer höheren Anteil, bis der Aluminiumgehalt in den obersten Schichten schließlich 25 Prozent erreichte.

„Da es uns ums Material geht, drücken wir in der Regel kleine Klötze, das ist die einfachste Geometrie, die man

sich vorstellen kann“, sagt Wilms. Die Proben werden anschließend, sofern sie keine Risse aufweisen, durchgesägt und poliert – mit einer zunehmend feineren Politur, deren Kügelchen zum Schluss nur noch einen Durchmesser von 0,04 Mikrometern (oder 40 Nanometern) aufweisen. Die glatten Proben werden angeätzt und unterm Lichtmikroskop begutachtet. Sie werden erneut poliert und landen in einem Elektronenmikroskop. Das liefert Aufschluss über die Feinstruktur des Materials.

EINE 3D-GRAFIK ZEIGT DIE GENAUE ZUSAMMENSETZUNG

Der wirkliche Härtestest wartet auf die gedruckten Stahlklötzchen allerdings im Parterre des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung. Dort steht, Wand an Wand mit historischen Schmiedehämmern, eines der modernsten Analyseinstrumente für metallische Strukturen: eine 3D-Atomsonde. Silbrig glänzt ihr Gewirr aus Edelstahlröhren, ein blauer Zierstreifen leuchtet oben an der Steuereinheit, im Hintergrund hämmert das Stakkato einer Heliumpumpe, die das Innere der Apparatur auf minus 220 Grad Celsius abkühlt.

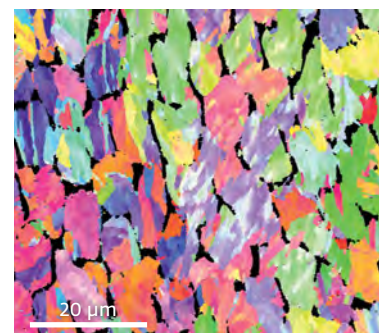
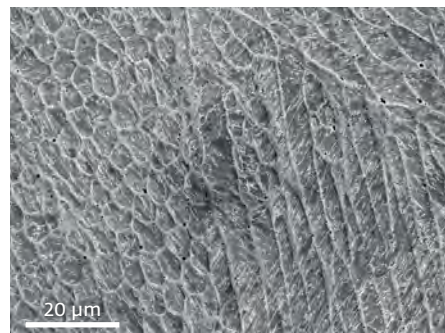
Dort, im Hochvakuum, platzieren die Materialforscher eine winzige Nadel mit einem Radius von weniger als 50 Nanometern. Ein Strahl aus Galliumionen hat sie zuvor aus dem gedruckten Material geschnitten und dann wie einen Bleistift mit immer engeren Kreisbewegungen angespitzt. Die Nadel landet unter einem Detektorsystem, an das Hochspannung angelegt wird – etwa 5000 Volt. Zusätzlich malträtirt ein pulsierender Laserstrahl die Probe.

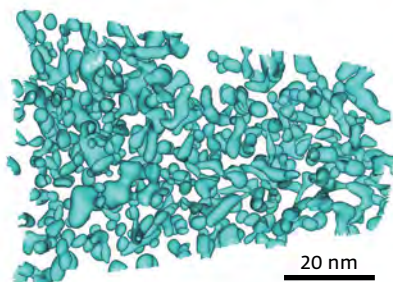
„Ziel dieser Tortur ist, dass sich bei jedem Puls ein einzelnes Atom aus dem Material löst“, sagt Eric Jäggle. Da es positiv geladen ist, wandert dieses Ion entlang der elektrischen Feldlinien zum Detektor, der den genauen Ort und die genaue Zeit des Einschlags registriert. Aus diesen Daten lässt sich zurückrechnen, von welchem Punkt der Nadel das Teilchen auf die Reise geschickt wurde, wie schwer und wie stark es geladen war. Am Ende erstellt das Gerät eine dreidimensionale Grafik. Sie zeigt detailliert, wie sich die Nadelspitze zusammensetzt.

Mit ein paar Mausklicks holt Jäggle in seinem Büro hinter den Backsteinmauern des Düsseldorfer Max-Planck-Instituts eines der Messergebnisse auf den Monitor. Die Eisenatome, grau dar-

Links Philipp Kürnsteiner (im Hintergrund) und Eric Jäggle überprüfen Messungen eines Geräts, das als Rasterionenmikroskop und auch als Rasterelektronenmikroskop dienen kann. Mit Ersterem schneiden sie Proben für Atomsonden-Untersuchungen.

Unten Die Aufnahme des Rasterelektronenmikroskops (links) zeigt die zellenartige Struktur einer Stahlprobe, die zunächst poliert und dann angeätzt wurde. Die gleichen Zellen werden in einer Aufnahme der Elektronenrückstreubeugung (rechts) durch die schwarzen Bereiche voneinander abgegrenzt. Die Farben zeigen die Orientierung einzelner Kristalle.





Diese Seite Eric Jäggle schleust eine neue Probe in die 3D-Atomsonde, die Atom für Atom misst, wie sich verschiedene Metalle in einem Material verteilen (oben). In der Aufnahme links sind, türkis gefärbt, die Gebiete in der Probe eines Maraging-Stahls zu erkennen, die mehr als 20 Prozent Aluminium enthalten. Die Struktur mit der hohen Dichte an aluminiumreichen Ausscheidungen hat sich bei der additiven Fertigung gebildet – genau das wollten die Max-Planck-Forscher erreichen, um den Stahl fester zu machen.

Rechte Seite Eric Jäggle versucht im AProLAM-Projekt die Eigenschaften von Stählen und Legierungen mithilfe des 3D-Metalldrucks zu optimieren.

gestellt, sind gleichmäßig in der Nadel anzutreffen. An vielen Stellen finden sich aber fein verteilte, wenige Nanometer große, aluminiumreiche Ausscheidungen, am Bildschirm türkisfarben dargestellt. Sie stammen direkt aus dem 3D-Drucker, genau das, was die AProLAM-Forscher gesucht haben.

Damit sie auftauchen, auch das haben die Experimente gezeigt, muss der Aluminiumgehalt bei mindestens fünf Prozent liegen. Mehr als 14 Prozent darf er jedoch nicht erreichen, weil sonst die gewünschte Grundstruktur des Stahls verloren geht. Ein Aluminiumanteil von neun Prozent hat sich laut Jäggle als idealer Wert erwiesen. Und: Verglichen mit einer reinen Eisen-Nickel-Legierung liefert ein Stahl mit Aluminium-Ausscheidungen fast doppelt so hohe Härtewerte.

Als Nächstes wollen die AProLAM-Forscher die gleichen Versuche mit Ti-

tan als stärkender Beigabe wiederholen. Anschließend mit einer Kombination aus Titan und Aluminium. Auch andere Werkstoffe sollen künftig studiert werden, darunter Aluminiumlegierungen, die mit dem seltenen Metall Scandium verstärkt werden und im Flugzeugbau sehr beliebt sind. Oder Stahl, in dem eingelagerte Oxide selbst bei hohen Temperaturen enorme Stabilitätswerte versprechen.

DAS ZIEL: WERKSTOFFE MIT BESSEREN EIGENSCHAFTEN

Gleichzeitig schrauben die Forscher an den Druckprozessen – in der Hoffnung, die optimalen Bedingungen für besonders wirksame Ausscheidungen zu finden. „Die große Herausforderung besteht dabei darin, weder zu viel noch zu wenig Wärme ins Material zu bringen“, sagt Philipp Kürnsteiner. Hinter den

schweren Schiebetüren im Aachener Labor stehen den Forschern dafür viele Stellschrauben zur Verfügung. Markus Benjamin Wilms kann den Durchmesser des fokussierten Laserstrahls verändern – von 0,6 bis 1,8 Millimeter. Ein derart dicker Lichtpunkt führt zu einem großen Schmelzbad; umso länger dauert es dann, bis das Material abkühlt.

Auch das Tempo, mit dem der Laser übers Metall tänzelt und neues Material ablager, beeinflusst die Ausscheidungen. Am meisten Spielraum bietet aber das Muster, mit dem die einzelnen Schichten gedruckt werden. Der Lichtpunkt kann immer von rechts nach links übers Metall huschen. Er kann rechteckförmig mäandern. Er kann nach jeder Schicht eine Pause einlegen, sodass das Material Zeit zum Abkühlen hat. Er kann sogar zwischen zwei Lagen die Druckrichtung um 90 Grad drehen.



All das hat Auswirkungen darauf, wie jedes einzelne Klötzchen des großen Metall-Legos erhitzt, abgekühlt und erneut erwärmt wird. Der Temperaturverlauf wiederum ist dafür verantwortlich, wie leicht sich die Aluminiuminseln während des Druckvorgangs bilden, wie groß sie werden und wie sie sich im Stahl verteilen.

„Um die jeweils passenden Parameter zu finden, braucht man viel Erfahrung“, sagt Wilms. Meist klappt es dennoch nicht beim ersten Mal. Um das zu erkennen, reicht ein schneller Blick auf den gleißenden Lichtpunkt: „Manchmal leuchtet es dort wie bei einem Gewitter, dann weiß man, dass der Prozess unruhig läuft und der Laser langsamer fahren muss.“

Letztlich hilft, allen Erfahrungswerten zum Trotz, nur ein iterativer Prozess: An einer der vielen Stellschrauben muss Wilms so lange drehen, bis die gedruckten Klötzchen nicht mehr besser werden. Der Wert wird eingefroren, die nächste Stellschraube wird bearbeitet – bis schließlich ein Material entsteht, das all seine Vorgänger in den Schatten stellt.

Denn das ist das große Ziel der AProLAM-Forscher, egal ob hinter den Düsseldorfer Backsteinmauern oder den Schiebetüren in Aachen. Sie wollen neue Werkstoffe möglich machen, die sich nicht nur leichter und ohne auf-

wendige Wärmebehandlung herstellen lassen, sondern die mit ihren verbesserten Eigenschaften konventionelle Materialien übertreffen. „Die ganze Technologie wird sich erst dann so richtig

durchsetzen, wenn die Leute eines erkennen“, sagt ILT-Forscher Andreas Weisheit: „Wollen sie solch einen neuartigen Werkstoff, dann geht das nur mit additiver Fertigung.“ ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Der zukunftsweisende 3D-Druck – additive Fertigung genannt – bietet viele Vorteile, ist aber noch längst nicht ausgereizt, vor allem hinsichtlich der Werkstoffe.
- Im Projekt AProLAM (Advanced Alloys and Process Design for Laser Additive Manufacturing of Metals) verfolgen Max-Planck- und Fraunhofer-Forscher gemeinsam zwei Ziele: Sie wollen erstens herausfinden, welche Werkstoffe sich für den 3D-Druck eignen, und zweitens die Produktionsprozesse optimieren, um die Eigenschaften bekannter Legierungen zu verbessern.
- Zwei Druckverfahren kommen vor allem zum Einsatz: Das selektive Laserschmelzen arbeitet mit einer nur 50 bis 100 Mikrometer starken Pulverschicht auf einer Trägerplatte; beim Laserauftragschweißen werden dickere Metallklötzchen erzeugt.
- Zu den Werkstoffen, welche die Forscher für den 3D-Druck optimieren und weiterentwickeln, gehören etwa Maraging-Stähle. Sie enthalten neben Eisen unter anderem Aluminium und Titan und verformen sich nicht so leicht.

GLOSSAR

Laser: Das Wort ist ein Akronym für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung) und meint sowohl den physikalischen Effekt als auch das Gerät. Laserstrahlen sind scharf gebündelt, haben eine hohe Intensität und in der Regel einen sehr engen Frequenzbereich. Sie können auch extrem kurze und intensive Strahlpulse erzeugen. In der Fertigung werden sie als Schneide- und Schweißwerkzeuge eingesetzt.

Legierung: Ein metallischer Werkstoff, der aus zwei oder mehr Elementen besteht. Mindestens eines davon muss ein Metall sein.



Hart am Wind

Mehr als 30 Forschungsfahrten hat **Ralf Schiebel** bereits unternommen. Seit Herbst 2015 leitet der Geologe die Arbeitsgruppe Mikropaläontologie am **Max-Planck-Institut für Chemie** in Mainz. Von jeder Fahrt bleiben Plankton- und Sedimentproben sowie Aktenordner voller Messdaten und Protokolle – aber auch Erinnerungen an Abenteuer, die der Forscher noch seinen Enkeln erzählen wird.

TEXT **CATARINA PIETSCHMANN**

Raus mit dem Netz und nichts wie weg!“ Während Ralf Schiebel noch schnell seine Proben verstaut, macht die Schiffsbesatzung alle Schotten dicht: Raue See im Nordatlantik ist zwar nicht ungewöhnlich, schon gar nicht im Winter. Windstärke acht ist aber erst der Anfang, denn auf 47 Grad Nord, 20 Grad West mitten im Ozean zieht ein Wirbelsturm von 200 Kilometern Durchmesser heran. Keine Chance für das Forschungsschiff *Meteor*, jetzt noch auszuweichen.

Bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 230 Kilometern pro Stunde hält das Schiff tapfer gegen die Wellen, die sich bis zu 20 Meter hoch auftürmen. „Wir tranken Wasser und aßen Schokoriegel“, erinnert sich Schiebel. Ganz plötzlich flaut der Wind ab. Die *Meteor* ist jetzt im Auge des Sturms, kurz darauf tobt dieser unvermindert weiter.

Brenzlige Situationen wie diese gibt es zum Glück selten, aber die Fahrt im Januar 1994 – Schiebel war damals 28 Jahre alt – wird er nie vergessen: „Als wir endlich wieder an Deck konnten,

herrschte ein großes Durcheinander.“ Schiebels Planktonproben sollten die einzige wissenschaftliche Ausbeute dieser Forschungsfahrt sein, denn sie lagerten unter Deck.

HEIMISCH INMITTEN DES NORDATLANTIKS

Im vergangenen Herbst kehrte der Geologe erstmals wieder zu jenem Ort im Atlantik zurück, der in den 1990er-Jahren fast sein Wohnzimmer gewesen war. Alles in allem verbrachte er auf 47 Grad Nord, 20 Grad West knapp zwei Jahre. Er untersuchte dort zusammen mit Kollegen an einer verankerten Planktonfalle mit Strömungsmesser, Temperatur- und Salzsonde über mehrere Jahre hinweg den Kohlenstoffaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre. „Es war sehr aufschlussreich, nach mehr als 20 Jahren an dieser Stelle erneut Plankton zu sammeln. Schließlich sind die Meere durch den Kohlendioxidanstieg in der Atmosphäre saurer geworden, und der pH-Wert ist mittlerweile von 8,2 auf 8,1 gesunken“, sagt der Forscher. >



In die Ferne schweifen: Den Geologen Ralf Schiebel, hier an Bord des Forschungsschiffs *Maria S. Merian*, zieht es immer wieder hinaus aufs Meer. Dort sammeln er und seine Kollegen Plankton- und Sedimentproben mit kalkschaligen Einzellern, die sie als Klimaindikatoren nutzen.



Oben Seefest auf allen Ozeanen: Ralf Schiebel hat schon mehr als 30 Forschungsfahrten in die verschiedensten Gegenden der Welt unternommen.

Unten Die Satellitenaufnahme zeigt den Wirbelsturm aus dem Jahr 1994, der die *Meteor* im Nordatlantik fast zum Kentern gebracht hätte.



Ralf Schiebel untersucht Klimaveränderungen anhand von Foraminiferen – winzigen Einzellern, deren kalkige Schalen von kugelig über lang gestreckt bis spiralig gewunden verschiedenste Formen haben können. Sie leben je nach Art und Breitengrad massenhaft in verschiedenen Stockwerken der Wassersäule, manche Arten auch auf dem oder im Sediment.

Foraminiferen – auch Kammerlinge genannt – sind im Grunde Amöben, nur mit Gehäuse. Durch feinste Poren können sie fingerförmige Scheinfüßchen ausstülpfen. „Bodenlebende Formen robben damit regelrecht auf dem Untergrund“, sagt Schiebel. An den Enden der „Füßchen“ sitzen klebrige Verdickungen, mit denen die Foraminiferen Nahrung zu sich heranziehen. Manch eine schnappt sich damit sogar Häppchen, die deutlich größer sind als sie selbst, etwa kleine Ruderfußkrebse.

Weil sie schon früh in der Erdgeschichte entstanden und ihre Kalkschalen sehr dauerhaft sind, dienen Forami-

niferen und Fossilien anderer kalkiger Einzeller wie etwa Coccolithen den Geologen als Leitfossilien. Sterben die Winzlinge ab, sinken sie zu Boden und werden Teil des Sediments. Wenn die Forscher ihre Stechrohre in den Meeresboden rammen und Proben aus der Tiefe hochziehen, bringen sie damit quasi das Klimaarchiv der Erde ans Licht.

EIN KLIMAARCHIV AUS FOSSILEN SCHALEN

Die Daten werden mit denen heute in den Ozeanen lebender Foraminiferen abgeglichen. Anhand der Kalkschalendicke und -zusammensetzung in den Sedimentschichten lässt sich so das Klima einer Region über Eis- und Warmzeiten hinweg rekonstruieren.

Manche dieser Wesen bevorzugten den Wasserbereich zwischen Oberfläche und 30 Meter Tiefe. Andere treiben zwischen 60 und 100 Metern, wieder andere leben erst unterhalb von 100 und bis in 2000 Meter Tiefe. Es gibt sogar Ar-

» Die Natur wird sich an den Klimawandel anpassen. Die Frage ist, ob das der Mensch mit seinen Gewohnheiten auch kann.

ten, die zwischen den Etagen wechseln: Zur Fortpflanzung lassen sie sich in tiefere Schichten absinken, und die neue Generation steigt wieder empor.

Mit Multinetzen, die sich beim Herausziehen in bestimmten Wassertiefen automatisch verschließen, ziehen die Forscher Wasserproben aus den gewünschten Stockwerken. Unter dem Mikroskop werden die Organismen erst mit Formalin behandelt, nach Art sortiert und dann vermessen. „Sonst würden die Größeren die Kleinen noch fressen, und die Momentaufnahme wäre verfälscht“, erklärt Schiebel.

So winzig Foraminiferen auch sind: Sie sind gerade noch groß genug, damit ein Laser kleinste Löcher in ihre Schale schießen kann. Die ionisierten Trümmer fliegen dann durch ein Massenspektrometer, welches die chemischen Elemente und Isotopenverhältnisse bestimmt. „Das Verhältnis von Magnesium zu Calcium in den Schalen zum Beispiel hat die Temperaturverhältnisse längst vergangener Zeiten konserviert: Je wärmer es war, desto mehr Magnesium haben die Foraminiferen in ihr Gehäuse eingebaut. Wurde es kälter, dominierte Calcium“, sagt Ralf Schiebel.

Am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz kann der Forscher als Teil der neuen Abteilung für Klimageochemie zusammen mit seinen Kollegen jetzt gezielt Foraminiferen und andere Klimaindikatoren analysieren und als Indikatoren weiterentwickeln und kalibrieren. Die neuen Labore für organische und anorganische Geochemie sind mit modernster Technologie ausgerüstet und bieten Kapazität für große Messreihen.

„Die Zusammenarbeit mit den anderen Gruppen und Abteilungen am Institut ist extrem motivierend und produktiv. Und die Unterstützung durch die Verwaltung ist ein Traum“, sagt Schiebel. Zusammen mit den deutschen und internationalen Partnern werden die Probenentnahmen in den verschiedenen Ozeanbecken über 30 Jahre hinweg fortgesetzt. Auch technologisch besteht ein stetiger Austausch auf allen Ebenen.

WIRD KALKHALTIGES PLANKTON VERSCHWINDEN?

Ralf Schiebel hegt die Hoffnung, dass die Grenzen auch in Zukunft so offen bleiben wie bisher und Forscherinnen und Forscher mit international vereinten Kräften an einem besseren Verständnis unserer Umwelt weiterarbeiten können: „Nur so lässt sich ein größtmöglicher Erfolg zum Erhalt unserer Lebensqualität erzielen.“

Bisher nehmen die Ozeane durch die Kalkbildung zahlloser Meeresbewohner viel Kohlendioxid auf. Doch wenn der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre weiter ansteigt, versauern die Ozeane so stark, dass dieser Puffer versagen könnte. Wird kalkhaltiges Plankton eines Tages also ganz verschwinden?

„Noch haben wir keinen eindeutigen Rückgang gemessen. Wir rechnen aber damit, dass die Schalen dünner werden. Laborexperimente mit Coccolithophoriden – einzellige Algen mit Kalkgehäuse – haben gezeigt, dass von sechs Klonen fünf bei saurerem Wasser die Kalkproduktion einstellen. Die sechste Gruppe produziert dagegen

ganz prächtig Kalk“, so Schiebel. Die Artenzusammensetzung der Ozeane wird sich also massiv verändern – und damit das ganze Ökosystem.

Geologen denken bekanntlich in langen Zeiträumen. Warmzeiten gab es schon viele, was unterscheidet die aktuelle von früheren? Schließlich lag der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre vor 90 Millionen Jahren fünfmal so hoch wie heute, trotzdem gab es zu dieser Zeit Coccolithen. Damals konnten Ozeane und Landökosysteme viel Kohlendioxid aufnehmen, weil der Prozess sehr, sehr langsam ablief. Außerdem kamen zu dieser Zeit die Blütenpflanzen auf und beschleunigten die Bodenbildung, was der Atmosphäre ebenfalls Kohlendioxid entzog.

Vorhersagen sind folglich außerordentlich schwierig, auch weil es zur aktuellen Klimaveränderung durch den Menschen in der gesamten Geschichte des Planeten kein Pendant gibt. Wagt Schiebel trotzdem einen Blick in die Zukunft? „Die Natur wird sich an den Klimawandel anpassen. Die Frage ist, ob das der Mensch mit seinen Gewohnheiten auch kann.“ Etwa mit seiner Vorliebe, an den Küsten zu leben. Diese werden nämlich am stärksten vom Anstieg des Meeresspiegels betroffen sein.

Ähnlich wie in früheren Warmzeiten kann der Kohlendioxidanstieg in der Atmosphäre aber auch vereinzelt positive Effekte haben. Manche Pflanzen werden, nach den Worten des Wissenschaftlers, sicher mehr Biomasse erzeugen. Außerdem kann wärmere Luft mehr Feuchtigkeit binden, deshalb wird etwa die Sahelzone grüner werden. >



Oben In der Kühlkammer nimmt die Geologin Janne Repschläger einen Sedimentkern aus dem Regal. Die Kerne lagern bei vier Grad Celsius – der Temperatur des marinen Bodenwassers. So werden eine Volumenänderung und chemische Prozesse verhindert. Die Aufnahme rechts zeigt verschiedene Arten von kalkigem Mikroplankton, darunter Foraminiferen.

Rechte Seite Ralf Schiebel nutzt Foraminiferen als Klimaindikatoren. Die neuen Labore am Mainzer Max-Planck-Institut sind für die Analysen mit der modernsten Technologie ausgestattet und bieten Kapazität für große Messreihen. In den Regalen lagern Tausende Objektträger mit Proben von den Schiffsreisen (rechts).

Dass er einmal Geologe werden will, weiß Ralf Schiebel schon als Kind. Der Beruf des Vaters ist daran nicht ganz unschuldig. „Er war Vermessungstechniker, und als ich klein war, ging ich viel mit ins Gelände und hab die Messlatte gehalten.“ Atlas und Bertelsmann-Lexika sind seine Lieblingslektüren. Wenn der Junge malt, dann meist Forscher, die in Jeeps durch die Wüste fahren. Er spielt leidenschaftlich gern Handball, schließlich lebt er in der deutschen Handball-Hochburg Lemgo. Wegen diverser Verletzungen verbringt er viel Zeit beim Orthopäden und interessiert sich dadurch für ein Medizinstudium.

Mit 19 Jahren zieht er ins ebenfalls handballverrückte Kiel. „Ich wollte mehr Handball spielen. Während ich auf den Medizinstudienplatz wartete, schrieb ich mich für Geologie ein.“ 70 Kilogramm Körpergewicht, verteilt auf 1,92 Meter, sind jedoch für eine Sportlerkarriere zu wenig, und die Medizinpläne sind auch schnell vergessen.

„Das Geologiestudium war der Hammer! Ich hab sofort mit dem Leistungssport aufgehört, mein Surfbrett verkauft und nur noch studiert.“ Am Fachbereich lernt er seine Frau kennen und wird mit 22 Jahren Vater. „Von da an hatte ich ein Ziel: Ich wollte schnell mit dem Studium fertig werden.“

DEN QUALLEN BEIM GRASEN ZUSCHAUEN

Während des Grundstudiums macht Ralf Schiebel eine Ausbildung zum Forschungstaucher. Zwei Sommer lang kartiert er im Auftrag der Universität Kiel das Seegras im Flachwasser der Eckernförder Bucht. Eine vergleichsweise angenehme Aufgabe, denn für ein anderes Projekt taucht er im Winter bei zwei Grad Wassertemperatur stundenlang vor Sylt. Er soll Lage und Zustand eines künstlichen Riffs aus Sandsäcken vor Westerland untersuchen. „Hinterher mussten wir rausgezogen werden, weil

wir uns vor Kälte nicht mehr bewegen konnten“, erinnert er sich. „War das Mundstück endlich draußen, behielt der Mund weiter dessen Form und stand offen. Wir konnten zunächst weder trinken noch essen.“

Aber die schönen Momente überwogen bei Weitem. „Wenn man im Sommer in der Ostsee unterhalb der Temperatursprungschicht driftet und mit dem Blick nach oben den Quallen beim Grasen zuschaut, dann kommen einem viele Ideen zu den Austauschprozessen im Ozean. Oder wenn die Strömung im Fehmarnbelt an einem zerzt, dann spürt man am eigenen Körper, was dort den Sand transportiert.“

Ralf Schiebel betreut Studenten bei Praktika und kommt dabei mit seinem heutigen Forschungsgebiet in Kontakt: der Mikropaläontologie. So werden bodenlebende Foraminiferen schließlich zum Thema seiner Doktorarbeit.

Die Forschung führt Schiebel bald an viele Ecken der Welt. Jede Exkursion



» Ich habe einen wirklich coolen Job. Und wenn es einmal kracht, dann muss man eben wieder aufstehen.

ist anders und birgt neue Überraschungen. Er zieht vor Mexiko ebenso Proben wie im radioaktiv verseuchten Wasser vor Fukushima. Bei einer Fahrt durch die Ägäis gerät sein Schiff in einen Schneesturm und muss drei Tage hinter einer Insel abwettern.

Manchmal heuern Schiebel und seine Kollegen auf großen Frachtschiffen an, etwa für die Untersuchung der ökologischen Auswirkungen von Ölplattformen vor der Küste der Republik Kongo. „Aus Platzgründen musste ich die Kabine mit den kongolesischen Seeleuten teilen. Tagsüber starke Bären – aber nachts musste das Licht anbleiben, und der Bootsmann erzählte Geschichten, um die bösen Geister zu vertreiben“, erinnert sich Schiebel lächelnd. „Wenn man abends von Deck aus in die Runde schaute, sah man Hunderte Lichter von den Bohr- und Produktionsplattformen.“

Nicht immer lief alles wie geplant in seinem Leben, denn das Schicksal hat

dem Geologen mehr als einmal Steine in den Weg gelegt. Im Alter von 17 Jahren verliert er bei einer Silvesterparty fast das Augenlicht, weil Freunde dicht neben ihm einen gefährlichen Böller zünden. Glassplitter zerstören eine Augenlinse. Sie kann durch eine künstliche ersetzt werden, die ihm die volle Sehkraft zurückgibt.

VON DER KAJÜTE BIS AN DECK MIT GESCHLOSSENEN AUGEN

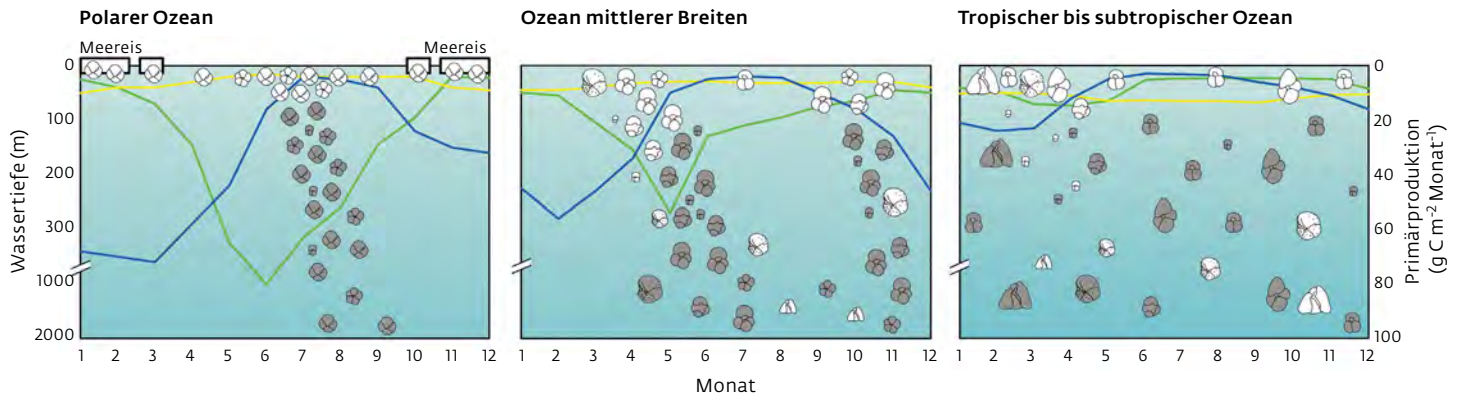
„Damals habe ich mir angewöhnt, Schritte zu zählen. Egal, wo ich hin komme, zähle ich noch heute bei jeder Treppe die Stufen.“ Wenn Ralf Schiebel zum ersten Mal ein Forschungsschiff betritt, schreitet er immer mehrfach den Weg von der Kajüte bis an Deck mit geschlossenen Augen ab. Damit will er sicherstellen, dass er im Notfall auch im Dunkeln an Deck findet.

Privat wird es steinig, denn die wochenlangen Expeditionen an Bord diver-

ser Forschungsschiffe sind zwar gut für die Wissenschaft, nicht aber für die Beziehung... Nach acht Jahren als Postdoc in Tübingen, teilweise mit Vierteljahresverträgen, wechselt der Wissenschaftler für fünf Jahre an die ETH Zürich.

Im Jahr 2008, als seine Karriere schon längst richtig Fahrt aufgenommen hat und er an der Universität von Southampton forscht, rutscht bei Arbeiten an der Fassade seines Hauses die Leiter weg, und Schiebel landet unsanft am Boden. Offene Brüche an beiden Knöcheln sind das schmerzhafteste Ergebnis. „Die Füße werden wir wohl amputieren müssen – das war das Letzte, was ich hörte, ehe die Narkose wirkte“, erinnert er sich. Doch die zerstörten Knochen können mit Titan ausgebessert werden.

Es sind Erfahrungen, die Spuren hinterlassen haben. Ernst wirkt Ralf Schiebel nur auf den ersten Blick. Doch im Gespräch merkt man schnell, dass er ein sehr offener und zugewandter Mensch ist.



oben Jahreszeiten bestimmen maßgeblich die Produktivität der Ozeane in mittleren und hohen Breiten. In den subtropischen und tropischen Gebieten treten verschiedene Arten von Foraminiferen im Plankton gleichmäßiger über das Jahr verteilt auf als in höheren Breitengraden. Im polaren und subpolaren Ozean leben die planktischen Foraminiferen (weiße Symbole) ausschließlich in den oberen Wasserschichten, in gemäßigten bis tropischen Meeren auch in tieferen Regionen von mehr als 1000 Meter Wassertiefe. Nach der Fortpflanzung sterben die Einzeller ab. Ihre leeren Gehäuse (grau) sinken auf den Meeresboden und können dann von Wissenschaftlern als Klimaarchiv der vergangenen 100 Millionen Jahre genutzt werden. Grüne Linie: Primärproduktion; blaue Linie: Durchmischungstiefe; gelbe Linie: Ein-Prozent-Grenze des Sonnenlichts. Schema hier für die Nordhemisphäre.

links Einzeller unter der Lupe: Mit bis zu einem halben Millimeter Größe lässt sich *Globigerina bulloides* gerade noch mit bloßem Auge erkennen. Die kugeligen Gehäuse dieser Foraminifere finden sich weltweit in den Sedimenten der Ozeane. Durch chemische Analyse der Gehäuse können Forscher das Erdklima vergangener Epochen rekonstruieren.

Entmutigt haben die Erlebnisse ihn nicht, sondern herausgefordert. Vielleicht auch gelassener gemacht. „Ich habe einen wirklich coolen Job. Und wenn es mal kracht, dann muss man eben wieder aufstehen. In kritischen Situationen gerate ich deshalb nicht in Panik, sondern werde ruhiger, je ernster es wird.“

PAPIERKRAM BREMST DIE FORSCHUNG AUS

Noch etwas unsicher auf den Beinen nach Monaten des Liegens, tritt er damals seine Professur an der Universität Angers im Westen Frankreichs an. Auf

Krücken unternimmt er seinen ersten Kartierkurs mit den Geologiestudenten in den Bergen der Haute-Provence. Forschung und Lehre machen ihm Freude, aber die Bürokratie bestimmt seinen Arbeitsalltag immer mehr: „Wenn es nach mir gegangen wäre – ich wäre immer Postdoc geblieben! Aber das schafft wohl niemand.“

Vielleicht doch? Als Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Chemie scheint er nun den richtigen Hafen gefunden zu haben. Vom nervenden Papierkram weitgehend befreit, kann Schiebel sich wieder voll auf die Forschung konzentrieren. Inzwischen hat

er auch wieder eine junge Familie. „Obwohl ich eher gedacht hätte, Opa zu werden als noch mal Papa“, sagt er schmunzelnd. „Ich bin sehr froh, abends nach Hause zu kommen, um mein Baby füttern und ins Bett bringen zu können – wunderbar!“

Wenn Ralf Schiebel künftig in See sticht, wird es meist auf dem Forschungssegelboot des Max-Planck-Instituts für Chemie sein. Der Mailänder Architekt Lorenzo Argento entwarf die futuristische 22-Meter-Yacht. Wenn sie Ende 2017 fertiggestellt ist, eröffnet sie den Wissenschaftlern des Mainzer Instituts ganz neue Möglichkeiten. „Auf

großen Forschungsschiffen steht man immer unter enormem Zeitdruck. Jetzt können wir uns mal eine Woche treiben lassen und die Netze 20-mal am Tag herunterlassen, um etwa die Tagesrhythmen des Planktons zu verstehen“, sagt Schiebel.

Auch die Planktonblüte in der Arktis im Frühjahr könnte ein Ziel sein. Die Winterstürme bringen dort Nährstoffe an die Oberfläche, die den Mikroorganismen als Nahrungsgrundlage dienen. Dadurch verändern sich die Flora und Fauna der Ozeane. Außerdem wollen die Wissenschaftler von den Kanaren zu den Strömungswirbeln in den Subtropen fahren und den Wechsel von nährstoffreichen zu nährstoffarmen Gewässern dokumentieren.

Ideen haben Ralf Schiebel und seine Kollegen also mehr als genug. Nach

der Erprobungsfahrt in der Ostsee geht es 2018 auf den ersten großen Törn: Kanaren, Kapverden, dann vielleicht hoch

nach Reykjavik. Die genaue Route steht noch nicht fest. Aber eines ist sicher: Nordatlantik im Winter? Nie wieder! ◀

GLOSSAR

Foraminiferen: Meist im Meer lebende Einzeller, die eine ein- oder mehrkammrige kalkhaltige Schale bilden. Die meisten sind mikroskopisch klein, einzelne können aber auch eine Größe von bis zu fünf Zentimetern erreichen. Abgestorbene Tiere sinken auf den Meeresgrund und bilden dort mitunter mächtige Sedimentschichten. Diese enthalten je nach Entstehungszeit unterschiedliche Artengemeinschaften. Foraminiferen dienen Wissenschaftlern daher als Leitfossilien für die verschiedenen Erdzeitalter.

Versauerung der Ozeane: Kohlenstoffdioxid aus der Luft kann sich im Meerwasser lösen und liegt dann in Form verschiedener Verbindungen vor, darunter zu einem geringen Prozentsatz als Kohlensäure. Wenn sich die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre bis zum Jahr 2100 verdoppelt, steigt die Menge an Kohlensäure im Wasser. Der pH-Wert – ein Maß für den sauren oder basischen Charakter einer wässrigen Lösung – würde dann von heute 8,1 auf 7,8 sinken. Dies wird sich auf kalkbildende Organismen auswirken, da sich Gehäuse und Schalen aus Calciumcarbonat leichter unter basischen Bedingungen bilden. Betroffen sind vor allem kalkbildendes Plankton und Korallen.



Taylor & Francis
OPEN

Taylor & Francis
**OPEN
SELECT**



cogent oa



Sind Sie **Wissenschaftler** an einem der **Max-Planck-Institute?**

Veröffentlichen Sie Ihre Artikel **Open Access** in einer der 2390 Taylor & Francis Fachzeitschriften und **profitieren Sie von unserem Vertragsmodell mit der Max-Planck-Gesellschaft**, die für corresponding authors die Kosten der Article Publishing Charge (APC) übernimmt.

Für weitere Informationen
besuchen Sie bitte: bit.ly/MP_author



Taylor & Francis Group
an informa business

Das alte Haus und das Meer

Ein grüner Garten, Blick auf die Adria – idyllischer als an der **Zoologischen Station Rovigno** in Istrien ließ es sich kaum forschen. Das vor mehr als 125 Jahren gegründete Institut war ursprünglich eine Außenstelle des Berliner Aquariums. 1911 wurde es von der neu etablierten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft angekauft und damit zu deren erster Forschungsstätte.

TEXT **ELKE MAIER**

Es war gegen Mitte des 19. Jahrhunderts, als das Meer in die Häuser kam. Das Aquarium war erfunden und begeisterte die Menschen. Große Schauaquarien ermöglichten einen Blick auf die „seltsamen Geschöpfe des Meeres“, die die meisten bis dahin allenfalls vom Hörensagen kannten. Um die Unterwasserpracht hinter Glas zu erhalten, gründete man an den Küsten Zulieferstationen, die Tiere, Pflanzen und Meerwasser verschickten. So beginnt die Geschichte der Zoologischen Station Rovigno.

Das Berliner Aquarium „Unter den Linden“ öffnete am 11. Mai 1869 seine Pforten. Die Besucher strömten herbei, um filigrane Röhrenwürmer, ätherische Quallen, skurrile Einsiedlerkrebse und farbenprächtige Seeanemonen zu bestaunen. Im Jahr 1876 ließ sich erstmals eine Seepferdchengeburt erleben, 1892 war ein riesiger Oktopus von zweieinhalb Metern Spannweite zu bewundern. Besonderer Beliebtheit erfreuten sich die regelmäßig stattfindenden „Abende des Meeresleuchtens“.

In den ersten Jahren kamen die ausgestellten Meerestiere vor allem aus Triest. Als dort durch den Ausbau der Hafenanlagen die Wasserverschmutzung zunahm, suchte man nach einer Alternative. Das Hafenstädtchen Rovigno (kroatisch: Rovinj) auf der istrischen Halbinsel – damals noch Teil Österreichs – schien ideal: Das Wasser war sauber, und die Felsküste bot Lebensraum für viele Arten. Der Ort lag außerdem an einer Eisenbahnstrecke, sodass der Transport in die deutsche Hauptstadt in nur 29 Stunden zu bewerkstelligen war.

Am 10. Mai 1891 wurde die „Zoologische Station des Berliner Aquariums“ an der Uferstraße des Nordhafens eröffnet. Im Erdge-

schoß befanden sich 24 Zementbecken, die zweimal täglich mit frischem Seewasser gespeist wurden, obendrein standen überall Glasgefäße mit Meerestieren.

„Einige Arten von kleinen Haifischen balgen sich um ihr Futter, während im hintersten Winkel des Bassins ein mächtiger Zitterrochen (*Torpedo*) bereit ist, seine elektrischen Schläge auszu-teilen“, stand 1897 in der Zeitschrift *DIE GARTENLAUBE*. Besonders fasziniert waren die Besucher von dem Becken mit den Seepferdchen und Seenadeln, „ihre geringe Intelligenz und Trägheit läßt sie aber mit der Zeit höchst uninteressant erscheinen“.

Neben dem Aquarienraum gab es in dem Gebäude auch einen Bereich zur Herstellung von Nass- und Trockenpräparaten, mehrere Arbeitsräume, eine Bibliothek, eine Dunkelkammer, Gästezimmer sowie eine Wohnung für Otto Hermes, den Direktor des Berliner Aquariums. Eine nach Westen gerichtete Terrasse bot eine grandiose Aussicht auf den Garten, die Stadt und das Meer.

„Wer ungestört arbeiten will und Freude daran hat, selbst auf das Meer zu gehen und neben seinen speziellen Studien auch ein Bild der gesamten Tierwelt der reichen Adria zu erhalten – der gehe nach Rovigno“, schrieb Hermes. „Im ganzen lebt es sich [hier ...] recht behaglich.“

So war die Station von Anfang an weit mehr als ein bloßes Anhängsel des Berliner Aquariums. Forscher aus verschiedenen Ländern reisten an, und schon bald musste man anbauen. Auch der Versand lief bestens. Lebendes und konserviertes Material ging nicht nur nach Berlin, sondern auch an verschiedene Universitäten. Teilweise wurden die Tiere von den lokalen Fischern gebracht; für den Fang stand jedoch auch eine eigene Flotte bereit, bestehend aus zwei Ruderbooten, einem Segelboot, einem Motorboot und einem kleinen Dampfer.

Im Jahr 1901 nahm sogar das Reichsgesundheitsamt die Arbeit in Rovigno auf. Mit Blick auf die deutschen Kolonien wollte man die Tropenmedizin voranbringen und ließ dazu in der Station ein Labor zur Erforschung einzelliger Parasiten einrichten. Rovigno war damals noch Malaria-gebiet – ein Eldorado für Parasitenforscher. Laborleiter wurde Fritz Schaudinn, der wenig später als Mitentdecker des Syphilis-Erregers Medizingeschichte schrieb.

Während die Station florierte, ging es mit dem Berliner Aquarium bergab. Die Leute hatten sich sattgesehen, und die Unter-



In der Schwebel: Die räuberische Schnecke *Tethys leporina* bewegt sich schwimmend fort. Das Foto entstand 1912 im Aquarium der Station.

haltskosten stiegen. Schließlich meldete die Kommanditgesellschaft Konkurs an. Das Aquarium schloss, und die Station in Rovigno ging in den Privatbesitz von Direktor Hermes über. Nach dessen Tod wollten die Erben die Station verkaufen.

Für die neu gegründete Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft war die Gelegenheit günstig. Nachdem bis dahin zwei chemische Institute geplant waren, durfte auch der biologisch-medizinische Bereich nicht zu kurz kommen. Rovigno sollte dafür Forschungsmaterial bereitstellen. Als der Rittergutsbesitzer Paul Schottländer aus Breslau die benötigten 100 000 Mark zusagte, war die Sache perfekt. Am 1. Oktober 1911 wechselte die Zoologische Station Rovigno offiziell den Besitzer. Stationsleiter war seit 1908 der Biologe und Quallenexperte Thilo Krumbach.

Zum geplanten Ausbau gehörte auch eine Erweiterung der Flotte. Das Vorhaben stand jedoch unter keinem guten Stern. Den Anfang machte der Dampfer *Albatros*, der mit drei Laboratorien bestens ausgestattet war und 1913 in Potsdam vom Stapel lief. Doch wegen des Kriegsausbruchs hat er seinen Bestimmungsort nie erreicht. Die Marine konnte mit der „seeuntauglichen Konstruktion“ nichts anfangen. Als das inzwischen in Hamburg liegen-

FRANKFURTER ZEITUNG VOM 6. Mai 1911

Der Fideikommissbesitzer Dr. Paul Schottländer in Breslau überwies der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft einen sehr hohen Betrag zum Ankauf und zur Erweiterung der zoologischen Station in Rovigno. Der Kaiser dankte dem Stifter mittels eines Schreibens aus dem Achilleion und genehmigte den Verwendungszweck.

de Schiff zu allem Überfluss auch noch bei einer Sturmflut beschädigt worden war, wurde es schließlich in Einzelteilen verkauft.

Nicht besser erging es dem von Schottländer gesponserten Unterseeboot *Loligo*: Ebenfalls kriegsbedingt wurde es von der italienischen Marine beschlagnahmt und landete letztendlich bei einem Schrotthändler – umso ärgerlicher, als es das erste Forschungs-U-Boot der Welt gewesen wäre. Lediglich das Glasbodenboot zur Beobachtung von Meerestieren fuhr im Dienst der Wissenschaft zur See. Es sank später bei einem Sturm.

Besser sah die Lage an Land aus: Bis zum Kriegsausbruch waren die Arbeitsplätze für Gastforscher gut ausgelastet, und der Versand boomte. Tiere und Pflanzen wurden an deutsche, österreichische, holländische und dänische Aquarien, Universitäten und Museen verschickt. Hinter dem Gebäude hatte Thilo Krumbach einen Botanischen Garten anlegen lassen. Eine Schausammlung sollte den Besuchern die einheimischen Tiere und Pflanzen und ihre Ökologie nahebringen. Dazu ließ er Aquarien einrichten, in denen die Meeresorganismen inmitten von originalen Felsformationen der dortigen Küste lebten.

Am 4. November 1918 eroberten italienische Truppen Rovigno. Krumbach gelang es, Teile des Stationsinventars und der Bibliothek beiseitezuschaffen, bevor er selbst floh. Die Station gehörte jetzt zu Italien. Die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft indessen gab sich nicht geschlagen und bemühte sich um Rückgabe beziehungsweise Entschädigung.

Es folgten zähe und langwierige Verhandlungen. Erst nach mehr als zwölf Jahren war endlich eine Lösung in Sicht: Man einigte sich, das Institut gleichberechtigt unter deutsche und ita-



In bester Lage: Die Zoologische Station Rovigno war die erste Forschungsstätte innerhalb der neu gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft – und vielleicht auch die schönste.

lienische Leitung zu stellen. Am 25. Februar 1930 wurde der Vertrag zu einem Deutsch-Italienischen Institut für Meeresbiologie in Rovigno feierlich unterzeichnet.

Den Posten als deutscher Direktor übernahm Adolf Steuer, ein Planktonexperte, der in die Adria vernarrt war und fließend Italienisch sprach. Er galt als der beste Kenner der adriatischen Tier- und Pflanzenwelt überhaupt und setzte sich dafür ein, sie möglichst vollständig zu erfassen.

Von italienischer Seite leitete der Zoologe Massimo Sella die Station. Der umtriebige Wissenschaftler tat sich in der Malaria-bekämpfung hervor. Er setzte unzählige Moskitofische, die er eigens aus New York kommen ließ, in den Tümpeln um Rovigno aus. Die mit den Guppys verwandten Fische fraßen die Larven der Anopheles-Mücke, des Überträgers der Krankheit. Innerhalb weniger Jahre war die Gegend malariafrei.

Eine andere Spezialität Sellas waren Fischwanderungen, die er mit teils originellen Methoden erforschte. Er wies etwa nach, dass Mittelmehrthunfische aus dem Atlantik einwandern. Dazu sammelte er die Angelhaken, die nach missglückten Fangversuchen in den Fischrachen stecken geblieben waren und je nach Herkunft eine typische Form hatten. Nicht zuletzt begeisterte sich der kreative Italiener auch für Trüffel und die kulinarische Verwendung von Seegurken.

Mit dem Ende des Zweiten Weltkriegs fiel Istrien an Jugoslawien. Damit war die erfolgreiche binationale Zusammenarbeit zu Ende. Die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft verlor die Station zum zweiten Mal – diesmal endgültig. Rund 21 Jahre lang hatte sie zum Kreis ihrer Forschungsstätten gehört.

Die deutsche Abteilung wurde 1946 nominell dem von Berlin nach Hechingen ausgelagerten Kaiser-Wilhelm-Institut für Biologie angegliedert. Wenig später gründete man in Wilhelmshaven das Kaiser-Wilhelm-Institut für Meeresbiologie, das bis 1968 als Max-Planck-Institut bestand. Heute ist die Meeresforschung innerhalb der Max-Planck-Gesellschaft in Bremen angesiedelt: Im Jahr 1992 eröffnete dort das Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie.

Die Zoologische Station Rovigno gibt es noch immer, mittlerweile auf kroatischem Boden. Seit 1969 ist sie eine Abteilung des Wissenschaftsinstituts Ruđer Bošković in Zagreb. Von außen sieht das Gebäude noch fast so aus wie auf den alten Postkarten. Der Versand von Meerestieren wurde längst eingestellt, doch kommen Wissenschaftler und Studenten noch heute hierher, um die Fauna und Flora der Adria zu studieren. Ein Schauaquarium ist auch für Besucher geöffnet.



Ein Mann von Welt

Andrea Wulf, **Alexander von Humboldt** und die Erfindung der Natur

560 Seiten, C. Bertelsmann Verlag, München 2016, 24,99 Euro

Manchmal braucht es einen Perspektivenwechsel, damit man die Welt mit anderen Augen sieht. So jedenfalls geht es Alexander von Humboldt, als er am 23. Juni 1802 auf dem Andenvulkan Chimborazo steht. Stundenlang haben er und seine Begleiter sich in der dünnen Luft durch Eis und Schnee gekämpft und immer wieder angehalten, um mit klammen Fingern wissenschaftliche Messungen vorzunehmen.

Nun endlich haben sie es geschafft. Vor ihnen breitet sich das Bergpanorama aus. Und auf einmal fügt sich für Humboldt alles zusammen, was er in den vergangenen Jahren gesehen hat: Die Erde ist für ihn ein einziger Organismus, in dem alles mit allem verbunden ist – ein „Netz des Lebens“. Mit dieser Sichtweise revolutioniert er unser Naturverständnis.

Mehr als fünf Jahre lang reist Alexander von Humboldt durch Süd- und Nordamerika, sammelt Zehntausende Pflanzen, fertigt Hunderte Skizzen an und füllt Dutzende Notizbücher mit seinen Beobachtungen. Er interessiert sich einfach für alles, sei es Zoologie, Botanik, Geologie, Meteorologie oder Astronomie.

Seine exzellente Beobachtungsgabe und die Fähigkeit, die richtigen Schlüsse zu ziehen, bescheren ihm visionäre Erkenntnisse. So sieht er in Venezuela die verheerenden Folgen der kolonialen Plantagen und warnt daraufhin vor den Gefahren des menschengemachten Klimawandels. Nach seiner Rückkehr nach Europa wird Humboldt gefeiert. Er geht in den eleganten Pariser Salons ein und aus und begeistert mit seinen Vorträgen und Büchern.

Dass die Person Humboldts bis heute nichts von ihrer Faszination eingebüßt hat, beweist die Historikerin Andrea Wulf mit ihrem hervorragend geschriebenen und vielfach preisgekrönten Buch. Darin taucht sie ein in das Leben und Wirken des Naturforschers und ergründet, inwieweit seine Ideen in unserer heutigen Sicht auf die Natur fortwirken. Sie hat dafür nicht nur Tausende Briefe gesichtet, sondern ist auch auf Humboldts Spuren durch Südamerika gereist. Sogar auf den Chimborazo ist sie ihm gefolgt.

Herausgekommen ist ein 560-Seiten-Wälzer, der dazu einlädt, sich an der Seite Humboldts ins 18. und 19. Jahrhundert zu begeben. In ihrem Buch beschränkt sich die Autorin nicht nur auf die Person des berühmten Naturforschers, sondern zeichnet gleichzeitig auch ein farbiges Gesellschaftsportrait.

Andrea Wulf schreibt mitreißend, und man merkt auf jeder Seite, dass sie ein glühender Humboldt-Fan ist. Einige Redundanzen sind wohl der Begeisterung geschuldet, sie stören aber nicht weiter. Dafür schafft es die Autorin glänzend, anhand von Anekdoten und Zitaten die verschiedenen Facetten von Humboldts eigenwilliger und rastloser Persönlichkeit herauszuarbeiten. Dieser war etwa dafür bekannt, ununterbrochen und „mit der Geschwindigkeit eines Rennpferdes“ zu reden, ohne sein Gegenüber zu Wort kommen zu lassen. Seine boshaften Kommentare waren gefürchtet.

Wie Humboldt mit seinen Ideen andere Wissenschaftler und frühe Naturschüt-

zer beeinflusst hat, beleuchtet Wulf in der zweiten Hälfte des Buchs. Zu den Erben des Wissenschaftlers zählt auch Charles Darwin. Ohne Humboldts Bücher wäre er, bekennt Darwin, nie an Bord der *Beagle* gegangen, noch hätte er die Gedanken zur *Entstehung der Arten* entwickelt. Einmal kommt es sogar zu einem Treffen zwischen den beiden Naturforschern. Doch auch Darwin muss, wie so viele andere, vor dem Redefluss seines älteren Kollegen kapitulieren...

Seine letzte Expedition führt Alexander von Humboldt nach Russland. Eigentlich wollte er zum Himalaja, aber die Ostindien-Kompanie verweigert ihm die Einreise nach Indien, wohl wegen seiner Kritik am Kolonialismus. So feiert er seinen 60. Geburtstag im Uralgebirge, gemeinsam mit dem späteren Großvater Lenins. Im Alter von 65 Jahren beginnt Humboldt mit der Arbeit am *Kosmos*, seinem berühmtesten Werk, das in vielen Sprachen erscheint. Als der Forscher 1859 im Alter von 89 Jahren stirbt, bekommt er ein Staatsbegräbnis. Zehntausende folgen dem Trauerzug.

Warum Andrea Wulfs Buch noch mehr als 150 Jahre danach ein Bestseller wurde? Zum einen wohl, weil es sich trotz der Fülle an Informationen streckenweise liest wie ein Abenteuerschmöker. Zum anderen vielleicht, weil die ausgestorbene Spezies des großen Universalgelehrten heute umso mehr fasziniert, als Wissenschaft immer spezialisierter und kleinteiliger wird.

Elke Maier



Galaxien und Geysire

Rhodri Evans, **Juwelen des Universums**, Die spektakulärsten Bilder aus dem All

192 Seiten, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH, Stuttgart 2016, 39,90 Euro

Der Anblick des Sternenhimmels fernab der Lichter und der Dunstglocke einer Stadt ist überaus faszinierend. Das bloße Auge erfasst Tausende Sterne, wobei die helleren in unterschiedlichen Farben funkeln. Der matte Schimmer der Milchstraße verleiht dem Firmament einen besonderen Reiz. Und strahlend helle Planeten wie Venus und Jupiter oder die schmale Sichel des Mondes ziehen die Blicke auf sich. Doch hinter all diesen Himmelslichtern verbergen sich Objekte, deren Schönheit sich wohl niemand entziehen kann – gleichsam „Juwelen des Universums“.

So lautet auch der Titel des Bildbandes von Rhodri Evans, Astrophysiker an der britischen Universität Cardiff und Autor populärwissenschaftlicher Fernsehsendungen und Bücher. Um es gleich vorwegzunehmen: Der Band ist ein Fest für die Augen und ein Muss für jeden, der sich für das Weltall interessiert.

Die Reise führt aus unserer kosmischen Nachbarschaft hinaus zu den Grenzen von Raum und Zeit. Die fünf Abschnitte umfassen das Sonnensystem, die Milchstraße, die lokale Galaxiengruppe sowie ferne und fernste Galaxien. Nicht nur die Fotografie hat seit dem 19. Jahrhundert ein neues Fenster ins Universum aufgestoßen. In den vergangenen Jahrzehnten haben zudem die elektronischen Augen der Raumsonden die Objekte des Planetensystems durchmustert.

Mit dieser Ära beschäftigt sich der Einleitungstext des ersten Teils. Im Folgenden stehen die großen Planeten im Blickpunkt, aber auch ihre Monde wie Europa.

Dieser Jupitertrabant, der zusammen mit drei anderen von Galileo Galilei im Januar 1610 entdeckt wurde, beherbergt unter seiner dicken Eiskruste offenbar einen Ozean aus flüssigem Wasser – ebenso wie der Saturnmond Enceladus, von dessen Oberfläche Geysire in den Weltraum spritzen. Das abgebildete Schwarz-Weiß-Foto dieser Fontänen erinnert in seiner düsteren Dramatik an einen Science-Fiction-Film. Die Aufnahme des schwammartigen Saturnmondes Hyperion hat ebenfalls etwas Irreales.

Die Milchstraße erscheint in mehreren Spektralbereichen, von Radio- bis Gammastrahlung, und aufgenommen von diversen Satelliten wie *Spitzer* oder *Cobe*. Weiter geht es mit Sternhaufen und bizarren Nebeln, die man teilweise so noch nicht gesehen hat wie den gigantischen Komplex um den Pferdekopfnebel mit sagenhafter Farbigkeit und Leuchtkraft. Natürlich dürfen auch die „Säulen der Schöpfung“ nicht fehlen – ein Bild mit Kultstatus. Diese Filamente aus dichten Molekülwolken sind so etwas wie der Kreißaal der Sterne. Vergleicht man die aktuelle Aufnahme mit dem eingeklinkten Foto aus dem Jahr 1995, fallen tatsächlich Veränderungen in der Wolkenstruktur auf, denn die „Säulen“ werden allmählich von der hochenergetischen Strahlung einiger Sterne zerfressen.

Von hoher Qualität ist auch das Panorama der Gegend um das schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße. Aus der Beobachtung der Umlaufbewegung von Sternen nahe diesem Sagittarius A* ge-

nannten Objekt haben die Astronomen – auch Forscher aus dem Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik – vor einigen Jahren auf die Existenz dieser Schwerkraftfalle geschlossen: Demnach befinden sich innerhalb einer Kugel von lediglich 44 Millionen Kilometern Durchmesser nicht weniger als 4,3 Millionen Sonnenmassen.

Solche schwarzen Löcher sitzen in den Zentren fast aller Spiral- und elliptischen Galaxien. Und mit diesen Welteninseln beschäftigen sich die letzten beiden Teile des Buchs. Da gibt es selbstverständlich die Andromedagalaxie, die im ungewöhnlichen Kompositbild des Ultraviolett Satelliten *Galex* und des Infrarotteleskops *Spitzer* mit grellen roten und blauen Ringen aus der Doppelseite förmlich herausstrahlt. Weiter draußen im Raum wimmelt es dann nur so von Milchstraßensystemen und Galaxienhaufen aller möglichen Farben und Formen.

Die Reise endet schließlich mit dem Hubble Ultra Deep Field, das geschätzt 10 000 Galaxien in den Tiefen des Universums zeigt, und einem Blick auf das Objekt GN-z11, dessen Licht 13,4 Milliarden Jahre benötigt, um zu uns zu gelangen. Das All im Bereich der Mikrowellen sowie eine kurze Beschreibung der Entdeckung von Gravitationswellen runden die Darstellung ab. Auch hier ist der Text stets auf der Höhe der Zeit, korrekt und gut verständlich. Hervorgehoben sei die kongeniale Übersetzung, die erheblich zum Lesevergnügen beiträgt.

Helmut Hornung

Der Ernst Haage-Preis zeichnet seit 2006 junge WissenschaftlerInnen für herausragende Leistungen auf dem Gebiet der chemischen Energiekonversion aus und fördert insbesondere den wissenschaftlichen Nachwuchs. Die Auszeichnung wird von der Mülheimer Ernst Haage-Stiftung verliehen und ist mit einem Preisgeld von € 7.500,- dotiert.



FORSCHUNGSPREIS
„CHEMISCHE ENERGIEKONVERSION“

Nominiert werden können promovierte WissenschaftlerInnen einer deutschen Forschungseinrichtung. Sie sollten ihren Lebensmittelpunkt in Deutschland haben, in der Regel nicht älter als 40 Jahre alt sein und noch nicht in einem unbefristeten Anstellungsverhältnis stehen.

Nominierungen können ab sofort bis zum **15. September 2017** schriftlich beim Stiftungskuratorium eingereicht werden. Folgende Unterlagen sollten Teil der Kandidatenvorschläge sein:

- zweiseitige Laudatio
- tabellarischer Lebenslauf
- vollständige Publikationsliste
- bis zu drei Sonderdrucke von Arbeiten der nominierten Person.

Eigenbewerbungen können nicht berücksichtigt werden.

Mit dem Preis sollen exzellente grundlegende wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der chemischen Energiekonversion ausgezeichnet werden, z.B. in den Bereichen:

- Wasserstoff als Energieträger/-speicher
- Photovoltaik-Speicherlösungen
- Elektrochemische Speicher
- Biomasse – Bioenergie
- CO₂ Umwandlung
- Wasserstoffoxidation bzw. Elektrolyse
- Stickstoffreduzierung
- Artifizelle und natürliche Photosynthese

ERNST HAAGE-PREIS AUSSCHREIBUNG 2017

Direktorium des
Max-Planck-Institutes
für Chemische Energiekonversion
z.Hd. Frau Christin Ernst
Stiftstr. 34-36
D-45470 Mülheim an der Ruhr
Stichwort: Ernst Haage-Preis



Weitere Informationen zum Ernst Haage-Preis, zur Stiftung und Preisverleihung stehen unter
<http://www.cec.mpg.de> zur Verfügung.

Prof. Dr. Robert Schlögl
Prof. Dr. Serena DeBeer
Prof. Dr. Wolfgang Lubitz
Prof. Dr. Frank Neese

 MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR
CHEMISCHE ENERGIEKONVERSION

Neu erschienen



Duett der Drongos

Wolfgang Wickler, **Wissenschaft auf Safari**, Verhaltensforschung als Beruf und Hobby

417 Seiten, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2017, 29,99 Euro

Der afrikanische Drongo hat den kompliziertesten Paargesang unter den Vögeln. Er besteht aus exakt aufeinander abgestimmten Abfolgen von Lauten, die ineinandergreifen wie die Zähne in einem Reißverschluss. Bis eine minutenlange Strophenserie fehlerfrei klappt, muss ein Drongopaar wochenlang üben. Dafür wirkt das mühsam einstudierte Gezwitscher als Beziehungskitt: Die Vögel bleiben normalerweise ein Leben lang zusammen.

Der Duettgesang von Vögeln ist nur eines von vielen Themen, die Wolfgang Wickler, emeritierter Direktor am früheren Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie in Seewiesen, gemeinsam mit seinen Kollegen erforscht hat. Sein neues Buch enthält eine Fülle von Informationen über das Verhalten von Tieren in freier Wildbahn und beschreibt gleichzeitig seinen eigenen Werdegang als Wissenschaftler, verknüpft mit einem Abriss der Instituts Geschichte.

Wicklers Leben wird gelenkt von seinem Interesse, „wie Tiere in Freiheit leben und womit sie ihren Tag verbringen“. Diese Neugier bringt ihn zum Biologiestudium und schließlich ans Seewiesener Institut zu Konrad Lorenz und Erich von Holst. Er promoviert über das Verhalten von Fischen, habilitiert sich und übernimmt schließlich die Leitung der Abteilung Ethologie.

Schon bald führen ihn Forschungsreisen immer wieder nach Afrika, zumeist in die Serengeti. Diesen Exkursionen ist ein Großteil des Buchs gewidmet. (Leser, die mit dem Afrika-Virus infiziert sind, seien gewarnt – man bekommt Lust, selbst los-

zuziehen.) Einige Passagen lesen sich wie das private Reisetagebuch des Autors, mit genauen Angaben zum Fahrtverlauf und zu den Aktivitäten. Dann wiederum geht es um allgemeine verhaltensökologische Prinzipien, wenn Wolfgang Wickler von den vielfältigen Projekten seiner Arbeitsgruppe erzählt und die Beobachtungen aus dem Blickwinkel des Ethologen erklärt und einordnet.

Verhaltensbiologisch Interessierte erfahren dabei viel Wissenswertes über Vögel, Hyänen, Paviane und Giraffen ebenso wie über Heuschrecken oder soziale Spinnen. Auch mit menschlichen Kulturen, etwa den in Südafrika lebenden Zulu und ihren Perlenbriefen, beschäftigt sich das Buch. Wickler schreibt anschaulich und verständlich, bisweilen sehr detailliert. Um das Gelesene nachzuschlagen, wäre ein Register hilfreich. Gegen Ende des Buchs schlägt Wolfgang Wickler die Brücke zu den Geisteswissenschaften. Hier setzt er sich kritisch mit den Wahrheitsansprüchen der Kirche auseinander – ein Thema, das den religiös erzogenen Wissenschaftler und passionierten Kirchenmusiker seit Jahrzehnten beschäftigt.

Das letzte, nicht ohne Wehmut vorgelegte Kapitel handelt von der Schließung des weltberühmten Max-Planck-Instituts für Verhaltensphysiologie, ein Jahr nach dessen 50-Jahr-Feier. Damit geht eine Ära zu Ende. Gleichzeitig entsteht etwas Neues: Im Jahr 2004 öffnet in Seewiesen das Max-Planck-Institut für Ornithologie seine Pforten.

Elke Maier



Natur ohne Mythos

Jürgen Teichmann, **Der Geheimcode der Sterne**, Eine neue Landschaft des Himmels und die Geburt der Astrophysik

372 Seiten, Verlag Deutsches Museum, München 2017, 20,00 Euro

Das Kloster Benediktbeuern ist eine der ältesten Benediktinerabteien nördlich der Alpen. Dort wurde nicht nur Geistesgeschichte geschrieben wie zum Beispiel mit den *Carmina Burana*, jenen berühmten Liedern, die sich 1803 in der Bibliothek fanden und im 20. Jahrhundert von Carl Orff vertont wurden. Im Kloster lebte und arbeitete von 1808 bis 1818 auch Joseph von Fraunhofer. Es mag um 1814 gewesen sein, als der Optiker und Forscher im Sonnenlicht, das er durch einen feinen Spalt und ein Prisma treten ließ, etwa 500 dünne schwarze Linien entdeckte. Auch im Spektrum der Sterne tauchten welche auf.

Ihre Natur, so schreibt Jürgen Teichmann, blieb mehr als 40 Jahre dunkel und unerklärlich. „Und doch leiteten sie eine Revolution ein. Ohne sie wüssten wir nichts über die Gashüllen der Sterne und fast nichts über das gesamte Universum.“ Diese Revolution mündete in die Geburt der Astrophysik. Jetzt wurde das Weltall zum Labor, die sogenannte Spektroskopie eröffnete sprichwörtlich einen neuen Himmel.

Hier setzt das Buch von Jürgen Teichmann an. Er ist Wissenschaftshistoriker an der Ludwig-Maximilians-Universität München und war lange Jahre am Deutschen Museum zuständig für den Fachbereich Physik/Astronomie, zuletzt als leitender Museumsdirektor. Der Autor ist also bestens vertraut mit der Materie – eine Tatsache, die man jeder Zeile seines lesenswerten Buchs anmerkt.

Selbstverständlich spielt Joseph von Fraunhofer in dem Buch eine große Rolle, ebenso wie William Hyde Wollaston, John

von Lamont sowie Robert Wilhelm Bunsen und dessen Freund Gustav Robert Kirchhoff – der in einer nur viereinhalb Seiten langen Mitteilung an die Königlich-Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin im Jahr 1859 die Fraunhoferschen Linien als neue Forschungslandschaft für Chemie, Physik und Astronomie vorschlug.

Damit, so Teichmann, hatten Kirchhoff und Bunsen in Heidelberg den gordischen Knoten durchschlagen: Sie zeigten, dass die dunklen Linien gleichsam die Fingerabdrücke chemischer Elemente sind. Kirchhoff verglich Sonnenlinien mit entsprechenden Linien irdischer Elemente. Dabei schickte er Licht des glühenden Gases durch eine Hälfte des Beobachtungsspalts, und zwar parallel zum Sonnenlicht, das durch die andere Hälfte fiel.

Jürgen Teichmann zieht nun einen bemerkenswerten Vergleich: Etwa zur selben Zeit, da die Spektroskopie unser einfaches Bild vom Nachthimmel der Lichtpunkte radikal veränderte – sozusagen eine neue Himmelslandschaft darbot –, stülpte die Landschaftsmalerei des 19. Jahrhunderts das tradierte Bild der Natur in Farben und Formen völlig um. Die Künstler malten jetzt in der freien Natur („en plein air“) und „sahen die Natur in Farben und Strichen unmittelbar, ohne Vermittlung von Mythos und Geschichte. Licht regierte vor der Form, Augenblicke und ihre Stimmungen erschienen wesentlich.“ Paris, so das Fazit des Autors, wurde das Zentrum der Malerei, Heidelberg jenes einer neuen Astronomie.

Die Wissenschaftler wandten die Spektralanalyse schließlich auf die Sterne an, die

sich auf diese Weise neu klassifizieren ließen – so, wie die Biologie die Tiere nach äußeren Merkmalen in Gruppen wie Vögel, Fische oder Insekten einteilt. Die Astronomen fragten sich, ob die Spektren etwas über die Entwicklung der Sterne verraten, über ihr Innenleben. Zudem löste man das „Nebelproblem“, das Rätsel um jene Objekte, die im Fernrohr nebelig aussahen: Einige waren tatsächlich leuchtende Gasmassen, andere Sternhaufen oder Galaxien wie unsere Milchstraße.

Jürgen Teichmann beschreibt die weitere Entwicklung der Astrophysik hin zu einer Spektralklassifikation der Universität Harvard mit der Folge O, B, A, F, G, K und M, außerdem das berühmte Hertzsprung-Russell-Diagramm. Im Jahr 1929 feierte die Spektralanalyse einen großen Triumph, als Edwin Hubble endgültig bewies, dass das Universum expandiert. Diese Erkenntnis sollte erheblichen Einfluss auf das Geburtszenario des Weltalls haben – der daraus abgeleitete Urknall avancierte schließlich zur favorisierten Theorie.

So endet der lehrreiche Streifzug durch die neue Landschaft des Himmels, hin zum „Geheimcode der Sterne“. An der Wissenschaftsgeschichte Interessierte finden in dem Buch jedenfalls reichlich Material, um ihre Neugier zu befriedigen.

Helmut Hornung



Federleicht

Michael Quetting, **Plötzlich Gänsevater**, Sieben Graugänse und die Entdeckung einer faszinierenden Welt

240 Seiten, Ludwig Verlag, München 2017, 19,99 Euro

Für ein Forschungsprojekt soll Michael Quetting sieben Graugänse aufziehen, um mit ihnen zu fliegen. Der wissenschaftliche Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell erfüllt eine wesentliche Qualifikation für diese Aufgabe: Er ist Pilot. Als alleinerziehender Vater einer Schar von Graugänsen fehlt ihm jedoch jede Erfahrung.

Mit viel Humor und Selbstkritik lässt Michael Quetting den Leser teilhaben an einem einzigartigen Abenteuer: von *Nils Holgersson*-Lesestunden für die Eier im Brutkasten, dem mühsamen Schlüpfen der Küken, dem ersten gemeinsamen Schwimmen im Teich bis zu den Flügen in Formation mit dem Ultraleichtflugzeug und dem Abschied von den flügge gewordenen Gänsen.

Die Gänseküken verlangen seine ganze Aufmerksamkeit und zwingen Quetting zur Abkehr vom Alltag. Er bezieht mit ihnen einen Wohnwagen, den er liebevoll *Duckingham Palace* nennt. Die Gänse kuscheln sich unter seinen Pullover. Als Heranwachsende werden sie in die angrenzende Voliere „verbannt“. An Privatsphäre ist nicht mehr zu denken: Die Gänse folgen Quetting überallhin – selbst auf die Toilette.

Wer die Bilder des Autors in der Mitte des Buches betrachtet, denkt unwillkürlich an Konrad Lorenz, den „Vater der Graugänse“. Schwarz-Weiß-Fotos im Internet zeigen den späteren Nobelpreisträger ebenfalls im Gänsemarsch mit den Vögeln, gemütlich mit ihnen auf einer Wiese oder beim Schwimmen im Eßsee. Der Wissenschaftler und Nobelpreisträger Konrad Lorenz, der am Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Seewiesen forschte, beschrieb zum ersten Mal das Phänomen der Prägung.

Am bekanntesten ist dabei die Nachfolgeprägung, speziell bei Gänsen. Die Küken der Gänse müssen nach dem Schlüpfen erst lernen, wer ihre Mutter (oder ihr Vater) ist. Sie nähern sich allen Menschen – aber auch Objekten – in ihrer Umgebung, die sich bewegen und regelmäßig Lautäußerungen von sich geben. Nach wenigen Minuten Aufenthalt in deren Nähe folgen die Küken ihnen nahezu bedingungslos.

Das vorliegende Buch ist etwas Besonderes. Niemand wird hier mit Fakten erschlagen, Wissen (feder-)leicht vermittelt. Niemals verlässt Michael Quetting den sehr persönlichen Erzählstil, der bereits seinen Blog *Ein Gänsesommer* zum Lesever-

gnügen machte. Scheinbar ganz nebenbei erfährt der Leser Wissenswertes über die Brut der Gänseeier, die Entwicklung der Federn, den Flugstil der Gänse und natürlich das Forschungsprojekt selbst. Mithilfe von Datenloggern, welche die Gänse auf ihrem Rücken tragen, werden präzise Aussagen über Flugmechanik, Aerodynamik und den momentanen Zustand der Atmosphäre gemacht.

Das Buch, das es auf die SPIEGEL-Bestsellerliste geschafft hat, ist ein Musterbeispiel gelungener Wissenschaftskommunikation. Es zeichnet ein buntes Bild von Tieren, die sonst nicht im Fokus von Tierdokumentationen stehen. Gänse sind weder gefährlich noch besonders niedlich oder außergewöhnlich selten. Sie werden gedankenlos als Gänsebraten verzehrt.

Wenn Michael Quetting nun – nach Erscheinen des Buches – in Talkshows eingeladen wird, bekommen die Tiere eine sympathische Lobby. Von wegen dumme Gans! Gänse werden als wilde Tiere begriffen, die es zu entdecken und zu schützen gilt und die einem dabei helfen können, das eigene Naturverständnis und Essverhalten zu überdenken.

Barbara Abrell

Weitere Empfehlungen

- David Bodanis, **Einsteins Irrtum**, Das Drama eines Jahrhundertgenies, 336 Seiten, Deutsche Verlags-Anstalt, München 2017, 19,99 Euro
- Gerd Kempermann, **Die Revolution im Kopf**, Wie neue Nervenzellen unser Gehirn ein Leben lang jung halten, 320 Seiten, Droemer Verlag, München 2016, 22,99 Euro

Standorte

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtungen
- Assoziierte Forschungseinrichtungen

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Impressum

MAXPLANCKFORSCHUNG wird herausgegeben von der Wissenschafts- und Unternehmenskommunikation der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V., vereinsrechtlicher Sitz: Berlin.
ISSN 1616-4172

Redaktionsanschrift

Hofgartenstraße 8
80539 München
Telefon: 089 2108-1719 / -1276 (Fax: -1405)
E-Mail: mpf@gv.mpg.de
Internet: www.mpg.de/mpforschung
Kostenlose App: www.mpg.de/mpf-mobil

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung

Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)
Helmut Hornung (Astronomie; -1404)

Redaktion

Dr. Elke Maier (Biologie, Medizin; -1064)
Dr. Harald Rösch (Biologie, Medizin; -1756)
Mechthild Zimmermann (Kultur, Gesellschaft; -1720)

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

Gestaltung

Julia Kessler, Sandra Koch
Voßstraße 9
81543 München
Telefon: 089 27818770
E-Mail: projekte@designergold.de

Litho

KSA Media GmbH
Zeuggasse 7
86150 Augsburg

Druck & Vertrieb

Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg

Anzeigenleitung

Beatrice Rieck
Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg
Telefon: 0931 4600-2721 (Fax: -2145)
E-Mail: beatrice_rieck@vogel-druck.de

MAXPLANCKFORSCHUNG berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den **Max-Planck-Instituten** und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemeinverständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (**MAXPLANCK-RESEARCH**) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr; die Auflage dieser Ausgabe beträgt 85 000 Exemplare (**MAXPLANCKRESEARCH**: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in **MAXPLANCKFORSCHUNG** vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der **Max-Planck-Gesellschaft** und ihrer Organe interpretiert werden.

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 84 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 22 300 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2017 umfasst insgesamt 1,6 Milliarden Euro. Die **Max-Planck-Institute** betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die **Max-Planck-Gesellschaft** ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.



MAXPLANCKFORSCHUNG wird auf Papier aus vorbildlicher Forstwirtschaft gedruckt und trägt das Siegel des Forest Stewardship Council® (FSC®)

Forschung leicht gemacht.

Schafft die Papierstapel ab!

Das Magazin der Max-Planck-Gesellschaft
als ePaper: www.mpg.de/mpf-mobil

Internet: www.mpg.de/mpforschung

Kostenlos
downloaden!



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT