

Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft **3.2017**



Moleküle für die Medizin

INNOVATION

Die digitale Zukunft
steht auf dem Spiel

KOSMOLOGIE

Der Taktgeber
des Urknalls

ÖKOLOGIE

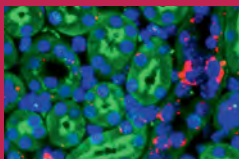
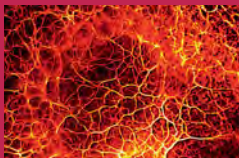
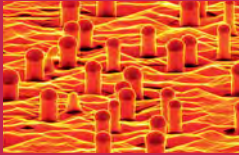
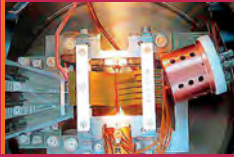
Ein Käfer sprengt
die Abwehr

GEMEINSCHAFTSGÜTER

Trolle unter
Kontrolle!



Connecting Science and Business.



Als Technologietransfer-Organisation der Max-Planck-Gesellschaft ist Max-Planck-Innovation das Bindeglied zwischen Industrie und Grundlagenforschung. Mit unserem interdisziplinären Team beraten und unterstützen wir die Wissenschaftler bei der Bewertung von Erfindungen, der Anmeldung von Patenten sowie der Gründung von Unternehmen. Der Industrie bieten wir einen zentralen Zugang zu den Innovationen der Max-Planck-Institute. Damit erfüllen wir eine wichtige Aufgabe: Den Transfer von Ergebnissen der Grundlagenforschung in wirtschaftlich und gesellschaftlich nützliche Produkte.

Connecting Science and Business





Foto: MPI für Kernphysik / Christian Föhr

Auf der Rennbahn

Im größten Teil des Weltalls ist es extrem kalt und leer. Trotzdem laufen auch dort chemische Reaktionen ab. Es bilden sich Ionen (elektrisch geladene Teilchen), kleine und große Moleküle, interstellarer Staub. In solchen Staubwolken wiederum entstehen Sterne und Planeten. Die Chemie des interstellaren Raums ist daher eines der aktivsten Forschungsfelder der Astronomie.

Mit dem neuen ultrakalten Speicherring (CSR) holen die Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kernphysik den Weltraum ins Labor. Der dazu erforderliche technische Aufwand ist allerdings fast ebenso extrem wie die Verhältnisse im All: Die Temperatur im inneren Vakuumsystem des CSR liegt einige Grad über dem absoluten Nullpunkt von minus 273 Grad Celsius, der Druck von unter 10^{-14} Millibar ist um das Hundert-Billiarden-Fache geringer als der normale Luftdruck. So ist es möglich, selbst hoch reaktive, mehrfach geladene Molekülionen viele Minuten – teilweise Stunden – auf der 35 Meter langen Umlaufbahn des Speicherrings zu halten. Während sie mit hoher Geschwindigkeit kreisen und dabei Strecken zurücklegen, die der mehrfachen Distanz zwischen Erde und Mond entsprechen, kühlen die Ionen auf Temperaturen ab, die jenen in interstellaren Wolken gleichen.

Gelenkt und fokussiert werden die Ionenstrahlen durch elektrische Felder. Mit deren Hilfe können die Forscher die gespeicherten Ionen mit Elektronen oder neutralen Atomen zur Reaktion bringen oder mit Laserstrahlen untersuchen. So lassen sich niederenergetische Kollisionen, wie sie für die Bedingungen im interstellaren Raum typisch sind, im Labor kontrolliert nachstellen.

Ähnlich wie ein Mensch, der sich mit übereinander getragener Kleidung gegen Kälte schützt, ist der Tieftemperaturbereich des Speicherrings durch mehrere Abschirmschichten gegen die Umgebungswärme isoliert. Das Abkühlen der Apparatur und das Aufwärmen nach mehreren Monaten Messbetrieb dauern jeweils gut drei Wochen. Das Foto zeigt den noch offenen Speicherring vier Monate vor dem ersten Abkühlen.



18 MOLEKÜLE FÜR DIE MEDIZIN

18 Die Natur als Apotheke

In Bakterien, Pflanzen und Tieren finden sich oft unbekannte Substanzen, die für den Menschen von Nutzen sein können. Forscher des Max-Planck-Instituts für molekulare Physiologie testen Naturstoffe auf ihre biologische Wirksamkeit und versuchen, den gleichen Effekt mit einfacher aufgebauten Molekülen zu erzielen.

26 Gifttransport zum Tumor

Medikamente, die Krebszellen effektiv beseitigen, jedoch kaum Nebenwirkungen mit sich bringen – um dieses Ziel zu erreichen, bauen Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung Proteine zu Wirkstofftransportern für die Nanomedizin aus.

32 Stoff für erhellende Diagnosen

In der Krebsdiagnostik setzen Ärzte schon heute oftmals auf die Positronen-Emissions-Tomografie. Um diese Methode breiter anwenden zu können, suchen Chemiker des Max-Planck-Instituts für Kohlenforschung nach Wegen, entsprechende Tracer-Substanzen mit Fluor-18 herzustellen.

ZUM TITEL Substanzen, die Tumorzellen wie die hier dargestellte Prostatakrebszelle töten, gesundes Gewebe aber kaum schädigen, sind nicht nur für Biomediziner eine Herausforderung, sondern auch für Chemiker.

Inhalt



10 Zukunftssinn: Für Deutschlands Wettbewerbsfähigkeit muss das Glasfasernetz ausgebaut werden.

PERSPEKTIVEN

- 06 Auftakt mit Apollo
- 06 Physik und Medizin für die Patienten
- 07 „Die Erwärmung hört nicht auf“
- 08 Das Immunsystem als Ganzes im Blick
- 08 Medikamente für ärmere Länder
- 09 Graduiertenausbildung mit internationaler Strahlkraft
- 09 Ins Netz gegangen

ZUR SACHE

- 10 Deutschlands digitale Zukunft steht auf dem Spiel**
Um den wirtschaftlichen Erfolg der Bundesrepublik auch in Zukunft zu sichern, müssen nicht zuletzt die digitale Infrastruktur und die Internetangebote von Behörden und Ministerien verbessert werden.

FOKUS

- 18 Die Natur als Apotheke
- 26 Gifttransport zum Tumor
- 32 Stoff für erhellende Diagnosen



GEOMAX

Das sechste Element - wie Forscher nach Kohlenstoff fahnden



54 Spürsinn: Direktorin Melina Schuh erforscht den empfindlichen Reifeprozess der menschlichen Eizelle.



60 Geruchssinn: Pheromone, die Kohlerdflöhe über weite Strecken riechen, locken die Schädlinge an.



68 Gemeinschaftssinn: In den sozialen Medien sollen Normen des Umgangs stärker durchgesetzt werden.

SPEKTRUM

- 40** Wölfe verstehen Zusammenhänge besser als Hunde
- 40** Mit dem Dritten lauscht man besser
- 41** Zeitmessung im Tunnel
- 41** Der doppelte Asteroid
- 42** Quantenkommunikation mit einem Satelliten
- 42** Schmarotzer und Frühwarnsystem
- 43** Glasfassaden sind Fallen für Fledermäuse
- 43** Geschenkte Jahre
- 43** Frauen aus der Ferne
- 44** Täuschende Zähne
- 44** Darmflora kann multiple Sklerose auslösen
- 44** Erdöl als Energiequelle für Meerestiere
- 45** Mit einer einfachen Kamera zur 3D-Animation
- 45** Der turbulente Lebensabend eines Sterns

PHYSIK & ASTRONOMIE

- 46 Der Taktgeber des Urknalls**
Wie das Universum entstanden ist, gehört zu den größten Rätseln der Wissenschaft. Forscher des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik versuchen, es mit modernstem mathematischem Werkzeug zu lösen.

BIOLOGIE & MEDIZIN

- 54 Fruchtbare Forschung**
Zur Person: Melina Schuh

UMWELT & KLIMA

- 60 Ein Käfer sprengt die Abwehr**
Kohlpflanzen schützen sich mit der Senfölbombe vor Fressfeinden. Kohlerdflöhe können die Verteidigungswaffe jedoch entschärfen und sogar zum eigenen Schutz nutzen. Wie sie das tun, erforschen Biologen am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie.

KULTUR & GESELLSCHAFT

- 68 Trolle unter Kontrolle!**
Sicherheit und Umweltschutz, Infrastruktur und Internet: Wenn Gemeinschaftsgüter ihren Segen entfalten sollen, müssen sich alle an Regeln halten. Soziologen des Max-Planck-Instituts zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern untersuchen die Bedingungen dafür - etwa in den sozialen Medien.

RUBRIKEN

- 03 Orte der Forschung**
- 16 Post aus - Warschau, Polen**
Wissenschaft als Beruf, nicht als Hobby
- 74 Rückblende**
Metall fürs Militär
- 76 Neu erschienen**
- 76 Ulrich Bahnsen, Das Leben lesen
- 77 Gerhard Vollmer, Im Lichte der Evolution
- 78 Peter Berthold, Unsere Vögel
- 79 Standorte**
- 79 Impressum**

Auftakt mit Apollo

Tübinger Neubau des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme eingeweiht

Die Eröffnung war echte Teamarbeit zwischen Mensch und Maschine: Roboter Apollo hielt das rote Band, und Ministerpräsident Winfried Kretschmann sowie Max-Planck-Präsident Martin Stratmann setzten die Schere an. Unterstützt von Wissenschaftsministerin Theresia Bauer und dem Geschäftsführenden Institutsdirektor Stefan Schaal fiel so die symbolische Absperrung. Damit war nach zweieinhalb Jahren Bauzeit der Neubau des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme offiziell eröffnet.

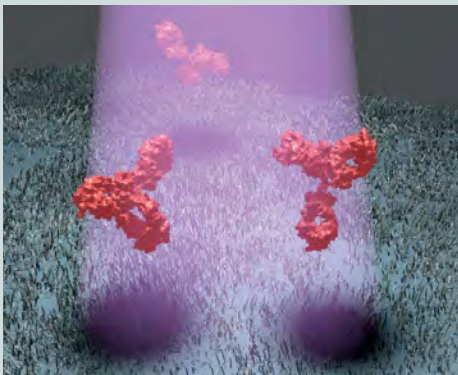
„Mit dem Institut hat die Max-Planck-Gesellschaft eines der wichtigsten Forschungsfelder für den digitalen Wandel fest in Baden-Württemberg verankert“, sagte der Ministerpräsident bei der Eröffnungsfeier Ende Juli. Das Max-Planck-Institut, das auch in Stuttgart einen Institutsteil hat, wurde vor sechs Jahren gegründet. Max-Planck-Präsident Martin Stratmann erhofft sich von der Forschung am Institut große Fortschritte für die kognitive Robotik. Der Neubau bietet ideale Bedingungen für die theoretische und experimentelle Robotikforschung. So soll es zukünftig im großzügig konzipierten Robotiklabor ein variables Trainingsgelände für Roboter geben. In der „Capture Hall“ soll in Kürze ein weltweit einzigartiger 4D-Ganzkörperscanner den Betrieb aufnehmen, der Körper und ihre Bewegungen in Raum und Zeit hochauflösend aufnehmen kann.



Einweihung mit prominenten Gästen: Direktor Stefan Schaal, Wissenschaftsministerin Theresia Bauer, Roboter Apollo, Max-Planck-Präsident Martin Stratmann und Ministerpräsident Winfried Kretschmann (von links) nach dem gemeinsamen Zerschneiden des roten Bandes.

Physik und Medizin für die Patienten

Max-Planck-Gesellschaft, Universität und Uniklinikum in Erlangen besiegeln Kooperation



Sensor für Proteine: Max-Planck-Forscher haben eine Methode entwickelt, die unmarkierte Biomoleküle anhand ihres Schattens identifiziert. Techniken wie diese können im Zentrum für Physik und Medizin zur Anwendung kommen.

Im neu gegründeten Zentrum für Physik und Medizin in Erlangen steht ein bisher wenig beachteter Faktor bei der Entstehung von Krankheiten im Mittelpunkt: die Physik. Ende Juli wurde der Kooperationsvertrag unterzeichnet. Der Freistaat Bayern fördert das Vorhaben samt Neubau mit 60 Millionen Euro. Eine Aufgabe des Zentrums wird es sein, die mechanischen, elektrischen oder chemischen Prozesse bei Entzündungen oder Tumorerkrankungen genauer zu verstehen und auf diese Weise Diagnostik und Therapie zu verbessern. „Wir werden die grundlegenden physikalischen Prozesse in Lebewesen, wie etwa die Kommunikation und die Kräfte zwischen den Zellen in krankem Gewebe, auf völlig neuen Wegen messen

und modellieren“, sagt Vahid Sandoghdar, Direktor am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts und einer der Initiatoren. „Durch das Verständnis, das wir so von diesen Vorgängen gewinnen, möchten wir neuartige Therapien und Medikamente ermöglichen.“

Die genauen Schwerpunkte des Kooperationsprojekts hängen davon ab, welche Wissenschaftler berufen werden. In dem Zentrum arbeiten eine neue Abteilung des Erlanger Max-Planck-Instituts gemeinsam mit zwei neuen Lehrstühlen für Biophysik und Mathematik in den Lebenswissenschaften und dem neu zu besetzenden Lehrstuhl für Medizinische Physik der Universität sowie mit fünf weiteren Forschungsgruppen.

„Die Erwärmung hört nicht auf“

Thorsten Mauritsen vom Max-Planck-Institut für Meteorologie ermittelt, wie viel Zeit noch bleibt, um das Pariser Klimaziel zu erreichen



Thorsten Mauritsen

Das Erdklima ist aus dem Gleichgewicht geraten: Weil sich in der Atmosphäre immer mehr CO₂ sammelt, ist die Temperatur seit Beginn der Industrialisierung um 0,8 Grad gestiegen. Selbst bei einem sofortigen Stopp aller fossilen Emissionen würde sich die Erde noch um weitere 0,3 Grad erwärmen, zeigt eine Studie von Thorsten Mauritsen vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg und Robert Pincus von der University of Colorado. Im Interview erläutert Mauritsen, warum es Jahrtausende dauern wird, bis die Erde wieder ins Gleichgewicht kommt.

Herr Mauritsen, was hat Sie zu dieser Studie veranlasst?

Thorsten Mauritsen: Ich war im Jahr 2015 ein bisschen irritiert, dass das 1,5-Grad-Ziel bei den Verhandlungen in Paris überhaupt diskutiert wurde. Ich war davon überzeugt, dass wir schon daran vorbei waren. Also wollte ich mit einfachen Mitteln zeigen, dass dieses Ziel überhaupt nicht mehr zu erreichen ist. Doch als ich in die Literatur eingedrungen bin und selbst mehr und mehr Berechnungen durchgeführt habe, musste ich irgendwann einsehen, dass das Szenario nicht völlig unrealistisch ist – das ist ja irgendwie doch ein positives Ergebnis.

Sie haben herausgefunden, dass sich die Erde um insgesamt 1,1 Grad Celsius erwärmen würde, selbst wenn es von sofort an keine fossilen Emissionen mehr gäbe. Wie kommt das?

Das Erdsystem ist aus der Balance geraten. Es fließt mehr Energie in das System hinein als wieder heraus. Diese überschüssige Energie wird hauptsächlich von den Ozeanen aufgenommen. Wasser hat eine große Wärmekapazität und daher eine lange Reaktionszeit, dadurch kühlen die Ozeane derzeit die Luft. Mit der Zeit erwärmen sich aber auch die tiefen Meeresschichten, bis sich schließlich, nach Tausenden von Jahren, das Klimasystem bei einer höheren Durchschnittstemperatur von Ozeanen und Atmosphäre einpendelt. Ohne neue Emissionen wären das am Ende dieses Jahrhunderts 1,1 Grad Celsius mehr als vor der Industrialisierung.

Welche Faktoren spielen Ihrer Meinung nach noch eine Rolle?

Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe stoßen wir außer CO₂ auch Aerosolpartikel in die Atmosphäre aus. Die Aerosolpartikel kühlen wahrscheinlich die Erde ein bisschen ab, wirken also sozusagen gegen das CO₂. Würde man keine Kohle und kein Erdöl mehr verbrennen, dann würden die Aerosole innerhalb weniger Wochen verschwinden, das CO₂ bliebe jedoch in der Atmosphäre. Daher gäbe es einen plötzlichen Erwärmungsschub. Über längere Zeitskalen nehmen aber die tiefen Ozeane einen Teil des CO₂ auf. Das verringert die vorbestimmte Erwärmung am Ende des Jahrhunderts um etwa 0,2 bis 0,3 Grad gegenüber dem Fall, bei dem das CO₂ konstant bleibt. Die Natur hilft uns also ein bisschen.

Wie wirken sich andere Treibhausgase aus, etwa Methan und Stickoxide?

Diese Gase haben eine eher kurze Lebenszeit von maximal zehn Jahren. Zehn Jahre sind natürlich nicht so wenig, aber wenn wir die Erwärmung über einen Zeitraum von hundert Jahren betrachten, dann schon. Die Emission dieser Gase führt dazu, dass die Erde jetzt ein bisschen wärmer ist. Wenn die Gase aus der Atmosphäre verschwinden, wird die globale Erderwärmung also etwas abgemildert.

Wie haben Sie die vorbestimmte Erwärmung ermittelt?

Dazu mussten wir eigentlich nur zwei Dinge wissen. Als Erstes mussten wir herausfinden, wie sensibel das Erdsystem ist, wie empfindlich es also auf den Anstieg von CO₂ in der Atmosphäre auf der Jahrhundert-Zeitskala reagiert – die sogenannte transiente Klimasensitivität. Das kann man aus Daten zum bisherigen Temperaturanstieg und zur Erwärmung der Ozeane schätzen. Außerdem mussten wir wissen, wie stark es sich auswirkt, wenn Aerosole, Methan und Stickoxide aus fossilen Brennstoffen wegfallen. Daraus konnten wir die Erwärmung bis Ende des Jahrhunderts schätzen.

Was ist der Unterschied zu früheren Studien?

Wir haben Beobachtungsdaten genutzt, um die Sensibilitäten zu schätzen. Bisherige Studien beruhten dagegen auf den Ergebnissen von Klimamodellen, in die sehr viel mehr Annahmen einfließen. Unsere Ergebnisse unterstützen aber weitgehend die modellbasierten Studien.

Was lernt man aus dem Ergebnis? Leider ist es ja nicht möglich, die Emissionen tatsächlich sofort zu stoppen.

Man kann sehen, wie weit die Menschheit von Klimazielen wie dem Pariser Abkommen entfernt ist, das festlegt, dass sich die Erde nicht um mehr als 1,5 bis zwei Grad erwärmen soll. Nach unserer Studie besteht eine Wahrscheinlichkeit von 13 Prozent, dass wir schon jetzt über das 1,5-Grad-Ziel hinweg sind. Wir zeigen auch, dass wir auf Basis der heutigen Emissionen noch etwa 30 Jahre Zeit haben, bis die Wahrscheinlichkeit, unter 1,5 Grad zu bleiben, nur noch bei 50 Prozent liegt.

Wie erklären Sie sich die große Aufmerksamkeit, die Ihre Studie hervorgerufen hat?

Offenbar haben wir einen Nerv getroffen. Umfragen zufolge glauben ganz viele Menschen, dass die globale Erwärmung aufgehört, wenn man die Treibhausgasemissionen stoppt. Viele nehmen sogar an, dass die Temperaturen schon nach ein paar Jahrzehnten wieder auf vorindustrielle Werte fallen. Als Klimawissenschaftler wissen wir aber seit Langem, dass das nicht so ist. CO₂ hat eine viel längere Lebenszeit, es bleibt bis zu viele Tausende von Jahren in der Atmosphäre. Daher muss man es einmal deutlich sagen: Die Erwärmung hört nicht auf, wenn die Emissionen aufhören.

Interview: Ute Kehse

Das Immunsystem als Ganzes im Blick

Forschungsgruppe an der Universität Würzburg gestartet

Mit der Berufung von Georg Gasteiger hat die neue Max-Planck-Forschungsgruppe für Systemimmunologie an der Universität Würzburg ihre Arbeit aufgenommen. Ziel ist es, das Immunsystem und sein Wechselspiel mit dem gesamten Organismus zu untersuchen. Dabei geht es nicht nur um den Schutz vor Krankheitserregern oder Krebszellen. Es stehen auch Krankheiten im Fokus, die das Immunsystem selbst auslöst, etwa multiple Sklerose oder Rheuma. Zur Finanzierung steuert der Freistaat Bayern 25 Millionen Euro bei, die Max-Planck-Gesellschaft zwei Millionen Euro. Vereinbart ist zunächst eine fünfjährige Laufzeit.

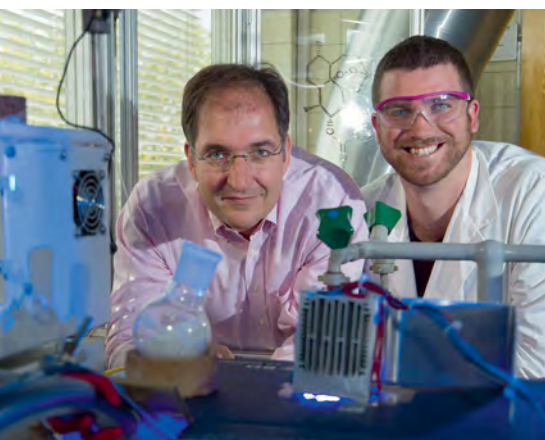
Nachdem der Vertrag vor vier Jahren unterzeichnet wurde, läuft jetzt die Arbeit an. Gasteiger führt seit Juni sein Team als Direktor, gleichzeitig leitet er einen neu geschaffenen Lehrstuhl für Systemimmunologie an der Universität. Die Leitung des zweiten Teams und einen weiteren Lehrstuhl auf diesem Feld hat Wolfgang Kastenmüller übernommen. Das Berufungsverfahren für den dritten Direktor läuft. „Wir wollen die Forschung der Max-Planck-Gesellschaft eng mit den deutschen Universitäten vernetzen“, erklärt Max-Planck-Präsident Martin Stratmann die Strategie der Max-Planck-Forschungsgruppen an Universitäten. Das gelte insbesondere für Gebiete, die weitreichende neue Erkenntnisse versprechen.



Standort am Campus: Die neue Max-Planck-Forschungsgruppe wird im Gebäude des Instituts für Pharmakologie und Toxikologie der Universität Würzburg angesiedelt.

Medikamente für ärmere Länder

Verfahren zur kostengünstigen Produktion pharmazeutischer Wirkstoffe lizenziert



Vielversprechende Entwicklung: Peter Seeberger (links) und Kerry Gilmore haben mit der Durchfluschemie-Technologie eine neue Möglichkeit geschaffen, Medikamente effizient herzustellen.

Die Firma Fluxpharm hat eine Lizenz für ein chemisches Verfahren erworben, das am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam entwickelt wurde. Die Durchfluschemie-Technologie ermöglicht es, verschiedene Standardwirkstoffe wesentlich effizienter und kostengünstiger zu produzieren als mit herkömmlichen Methoden. Bisher werden Arzneistoffe oft im sogenannten Batch-Verfahren produziert. Dabei werden alle benötigten Reagenzien in ein einziges Gefäß gegeben, in dem sie dann miteinander reagieren. Diese Fertigungsmethode ist allerdings

zeitaufwendig und erfordert große Mengen an Zusatzchemikalien. Bei dem von den Max-Planck-Wissenschaftlern entwickelten Durchflussverfahren läuft die Reaktion dagegen fließend in den Röhren eines speziell konstruierten Reaktors ab. Auf diese Weise können viel geringere Mengen an Stoffen sicherer und effizienter miteinander reagieren.

Fluxpharm will die Technologie nun weiterentwickeln und kommerziell verfügbar machen. Geplant ist unter anderem, die Produktion des pharmazeutischen HIV-Wirkstoffes Efavirenz voranzutreiben, um das Medikament für mehr Menschen in armen Ländern bereitzustellen. Auch für andere Wirkstoffe ist das Verfahren geeignet.

Graduiertenausbildung mit internationaler Strahlkraft

Drei Max Planck Schools starten in die Pilotphase

Deutschlandweit verteilte Exzellenz bündeln und damit die begabtesten Nachwuchstalente zur Promotion in die Bundesrepublik holen – das ist das Ziel der Max Planck Schools. Drei ausgewählte Schools gehen von 2018 an in eine fünfjährige Pilotphase: die *Max Planck School of Cognition*, die *Max Planck School of Photonics* sowie die *Max Planck School on Physics, Chemistry and Construction of Life*. Das gaben Bundesforschungsministerin Johanna Wanka, Max-Planck-Präsident Martin Stratmann und der Präsident der Hochschulrektorenkonferenz Horst Hippler Anfang September in Berlin bekannt. Hinter den drei Schools stehen Mitglieder von 21 Universitäten sowie 31 Instituten der außeruniversitären Forschungsorganisationen, darunter 22 Max-Planck-Institute. Die Verteilung unterstreicht den institutionenübergreifenden Charakter der Initiative.

„Die Max Planck Schools als überregionale Forschungs- und Ausbildungnetzwerke bringen die besten Köpfe aus ganz Deutschland zusammen. Indem wir so die Exzellenz in besonders inno-



Zukunftsweisendes Konzept: Max-Planck-Präsident Martin Stratmann und Bundesministerin Johanna Wanka stellen in einer Pressekonferenz Anfang September die neuen Max Planck Schools der Öffentlichkeit vor.

vativen Forschungsfeldern neu bündeln, können wir im internationalen Wettbewerb um die kreativsten Talente bestehen“, sagt Max-Planck-Präsident Martin Stratmann. Die drei Schools, de-

ren Konzepte für die Umsetzung weiter ausgearbeitet werden, erhalten in der Pilotphase vom Bundesministerium für Forschung und Bildung jährlich neun Millionen Euro.

Ins Netz gegangen



Pionier der Glykowissenschaften

Peter Seeberger, der mit dem Stifterverbandpreis 2017 ausgezeichnet wurde, hat mit der automatisierten Zuckersynthese die Entwicklung neuartiger Impfstoffe, Therapien und Diagnostika ermöglicht. Ein Video auf unserem Youtube-Kanal porträtiert den Wissenschaftler und erklärt, wie seine Forschung im Kampf gegen multiresistente Krankenhauskeime und gegen Malaria innovative Behandlungsmethoden erschließt.
www.youtube.com/user/MaxPlanckSociety

Ein Skalpell für das Erbgut

Mit der CRISPR/Cas9-Methode lässt sich das Erbgut unterschiedlichster Organismen sehr viel einfacher und schneller verändern als bisher. Doch wie funktioniert das zukunftssträchtige Verfahren? Welche Anwendungsgebiete gibt es? Unser Themenportal zur Genom-Editierung beleuchtet die Hintergründe und zeigt die ethischen Grenzen auf. Neben Interviews, Bildern und Videos findet sich auch eine Übersicht weiterer gentechnischer Methoden.
www.mpg.de/genom-editierung

Im Bilde

Seit August 2017 betreibt die Kommunikationsabteilung der Max-Planck-Gesellschaft einen Instagram-Account. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter können unter dem Hashtag #MaxPlanckSociety Fotos und Videos von ihren Instituten, von Veranstaltungen und Forschungsergebnissen teilen. Der Auftritt, der sich an eine junge Zielgruppe wendet, soll ein unterhaltsames Bild von der Arbeit und dem Leben an den insgesamt 84 Einrichtungen vermitteln.
www.instagram.com/maxplanckgesellschaft

Deutschlands digitale Zukunft steht auf dem Spiel

Die deutsche Wirtschaft boomt, Forschung und Entwicklung haben in den vergangenen Jahren erfreulich zugelegt. Doch man sollte sich nicht mit dem Erreichten zufriedengeben, warnt unser Autor, Vorsitzender der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) der Bundesregierung. Besonders bei der digitalen Infrastruktur und bei Internetangeboten von Behörden und Ministerien hat Deutschland Nachholbedarf. Aber auch die Hochschulen und junge innovative Unternehmen brauchen die Unterstützung der neuen Bundesregierung.

TEXT **DIETMAR HARHOFF**

Deutschland kann auf wichtige Erfolge in seiner Forschungs- und Innovationspolitik zurückblicken. So sind seit 2005 beachtliche Erhöhungen bei öffentlichen und privaten Forschungs- und Entwicklungsausgaben zu verzeichnen. Bei der Positionierung deutscher Forschungseinrichtungen und Hochschulen hinsichtlich Attraktivität und Exzellenz sowie bei

lität ebenso wie der Umgang mit der demografischen Entwicklung und die Sicherung gerechter Teilhabe an den Erträgen aus Innovation. Darüber hinaus wird die deutsche Politik durch die digitale Transformation vor erhebliche Probleme gestellt.

Ohne eine weitere Stärkung von Wissenschaft, Forschung und Innovation können die genannten Herausforderungen nicht angemessen beantwortet werden. Die Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) empfiehlt der deutschen Forschungs- und Innovationspolitik neben konkreten Maßnahmen auch, klare Ziele zu formulieren, anhand derer sich weitere Fortschritte messen und bewerten lassen.

Bis zum Jahr 2025 sollte Deutschland nach Ansicht der EFI 3,5 Prozent des Bruttoinlandsprodukts (BIP) für Forschung und Entwicklung aufwenden. Anzustreben wäre auch, mindestens drei deutsche Universitäten unter den 30 weltweit führenden zu etablieren. Außerdem sollte der Anteil des Wagniskapitals am Bruttoinlandsprodukt in diesem Zeitraum verdoppelt werden. Die Bundesregierung sollte darauf hinarbeiten, dass Deutschland in den kommenden Jahren zu den

Entscheidende Rolle: Der Ausbau der digitalen Infrastruktur, vor allem ein leistungsfähiges Breitbandnetz auf dem Land ebenso wie in der Stadt, ist eine wesentliche Voraussetzung für künftige Erfolge der deutschen Wirtschaft.

Die Bundesrepublik sollte gerade in Forschung und Innovation eine Vorreiterrolle anstreben

der Modernisierung der deutschen Wirtschaft wurden Verbesserungen erzielt. Dem Ziel, eine führende Rolle als Innovationsstandort zu spielen, ist Deutschland erheblich näher gekommen. Gleichzeitig sind die Herausforderungen in den vergangenen Jahren weiter gewachsen.

Zu diesen Herausforderungen zählen unter anderem die Bewältigung des Klimawandels, die Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung und Mobi-



fünf führenden Nationen im Bereich digitaler Infrastruktur gehört und eine Vorreiterrolle beim E-Government einnimmt. Zusätzlich sollte die Politik die Fördermittel im Bereich Digitalisierung verdoppeln.

Bei den Ausgaben für Forschung und Entwicklung hat Deutschland in den vergangenen Jahren beachtliche Erfolge erzielt. Von dem im Jahr 2002 beschlossenen Ziel der Europäischen Union, die Forschungs- und Entwicklungsausgaben bis 2010 auf drei Prozent des Bruttoinlandsprodukts zu steigern, war die Bun-

tems zu verbessern. Internationale Hochschulrankings sind – ungeachtet ihrer methodischen Mängel – ein wichtiger Orientierungspunkt für international mobile Forscher und Studierende. Eine Positionierung deutscher Hochschulen an den Spitzenplätzen internationalen Rankings wäre eine weithin sichtbare Dokumentation erfolgreicher Wissenschaftspolitik. Dazu bedarf es weiterer substanzieller Verbesserungen für den Hochschulsektor.

In den vergangenen zehn Jahren hat die Bundesregierung den Wissenschaftsstandort Deutschland bereits durch ein Bündel von Maßnahmen gestärkt. Eine dieser Maßnahmen war die Exzellenzinitiative. Es ist zu begrüßen, dass mit der Exzellenzstrategie ein unbefristetes Nachfolgeprogramm für die Exzellenzinitiative beschlossen worden ist, in dem zwei Förderlinien – die institutionelle Förderung der leistungsstärksten Universitäten und die Unterstützung herausragender Forschungsstrukturen – verankert wurden.

Eine zentrale Herausforderung der nächsten Jahre wird sein, die Grundfinanzierung der deutschen Hochschulen substanziell zu verbessern und ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit weiter zu stärken. Deutsche Hochschulen sind mehrheitlich immer noch strukturell unterfinanziert. Hier sind zunächst die Bundesländer in der Pflicht. Die Expertenkommission empfiehlt Bund und Ländern jedoch, gemeinsam ein Nachfolgeprogramm für den Hochschulpakt zu initiieren. Der Bund sollte die Länder weiterhin bei der Finanzierung der Lehre und der Overheadkosten unterstützen. Dies darf jedoch nicht dazu führen, dass die Länder ihre Beiträge zur Hochschulfinanzierung an anderen Stellen reduzieren. Daher muss der Bund seine Förderung an nachprüfbare Bedingungen knüpfen.

Wichtig ist außerdem, die Anzahl unbefristeter Professuren zu erhöhen, gleichzeitig die Betreuungsrelationen zu verbessern und die Lehrverpflichtung für Professorinnen und Professoren zu reduzieren. Dadurch kann das deutsche Wissenschaftssystem im internationalen Wettbewerb attraktiver werden – sowohl für exzellente Forscherinnen und Forscher als auch für besonders talentierte Studierende. Zudem würde die Qualität der Lehre für alle Studierenden steigen. Mehr unbefristete Professuren kommen auch dem wissenschaftlichen Nachwuchs zugute, denn sie verbessern die Karrierechancen für die stark gewach-

Seit Jahren leidet Deutschland an einem Mangel an Wagniskapital für junge Unternehmen

desrepublik 2005 mit einem Wert von knapp 2,5 Prozent weit entfernt. Im Jahr 2015 betrug der Anteil interner Forschung und Entwicklung am Bruttoinlandsprodukt tatsächlich drei Prozent.

Als eine der führenden Wirtschaftsnationen sollte Deutschland sich jedoch höhere Ziele stecken. Mit einer Vorgabe von 3,5 Prozent des Bruttoinlandsprodukts für Forschung und Entwicklung bis zum Jahr 2025 würde das Land seine Bereitschaft signalisieren, die technologische Wettbewerbsfähigkeit langfristig auszubauen und zu anderen Innovationsnationen aufzuschließen.

Ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum 3,5-Prozent-Ziel wäre die Einführung einer steuerlichen Forschungs- und Entwicklungsförderung. Sie kann die bestehenden und bewährten direkten Projektfördermaßnahmen wirkungsvoll ergänzen. Sinnvoll ist es, diese Förderung zunächst auf kleine und mittlere Unternehmen zu beschränken, deren Innovationsbereitschaft in den vergangenen Jahren rückläufig war. Für diese Gruppe von Unternehmen sind besonders starke Effekte einer steuerlichen Förderung bei moderaten Förderkosten zu erwarten – die Effizienz des Mitteleinsatzes wäre somit relativ hoch.

Die Expertenkommission spricht sich seit Jahren dafür aus, die Bedeutung und die internationale Wahrnehmbarkeit des deutschen Wissenschaftssys-



sene Anzahl junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. In diesem Umfeld können Hochschulen dann auch verstärkt auf Tenure-Track-Verfahren setzen, die für Nachwuchstalente mehr Klarheit über Karrierepfade und -anforderungen schaffen.

Neben einer Verbesserung der personellen und räumlichen Grundausstattung müssen auch Organisation und Führung in den Hochschulen modernisiert werden. Die Hochschulen brauchen mehr Spielräume für eine stärkere Differenzierung sowie für das Experimentieren mit neuen Verwaltungs- und Leitungsstrukturen.

Die Forschungs- und Innovationspolitik endet allerdings nicht an den Türen der Universitäten. Auch für die Unternehmen, besonders für junge, innovative Firmen, kann die Bundesregierung wichtige Weichen stellen. Seit Jahren leidet Deutschland an einem Mangel an Wagniskapital. Junge, innovative Unternehmen können ohne Wagniskapital ihre innovativen Produkte oder Geschäftsmodelle nicht realisieren und vermarkten.

Der internationale Vergleich zeigt, dass der Wagniskapitalmarkt in Deutschland deutlich weniger entwickelt ist als in den USA und in anderen europäischen Ländern. Während in Deutschland im Jahr 2015 etwa 0,027 Prozent des Bruttoinlandsprodukts in junge Wachstumsunternehmen investiert wurden, stand in den USA im Verhältnis zum BIP mehr als das Zehnfache zur Verfügung. Auch im europäischen Vergleich liegt Deutschland bestenfalls im Mittelfeld.

Um die Schwäche des deutschen Wagniskapitalmarktes zu überwinden und Deutschland zu einem international wettbewerbsfähigen Investitionsstandort zu machen, hat die Bundesregierung in den vergangenen Jahren eine ganze Reihe von Verbesserungen für Wagniskapitalinvestitionen sowie staatlich finanzierte Fonds auf den Weg gebracht. Die Expertenkommission rät allerdings davon ab, weitere öffentliche Mittel bereitzustellen. Stattdessen sollte die Politik Hürden abbauen und Anreize schaffen, die es für private Investoren attraktiv machen, in Wagniskapitalfonds und Start-ups zu investieren.

Das Ende 2016 verabschiedete Gesetz zur Weiterentwicklung der steuerlichen Verlustverrechnung bei Körperschaften war ein wichtiger Schritt, um Wagniskapitalinvestitionen zu erleichtern. Bisher gehen Ver-

lustvorträge unter, wenn ein Investor Anteile in bestimmter Höhe an einem Unternehmen erwirbt. Insbesondere innovative Firmen haben aber in den ersten Jahren hohe Ausgaben für Forschung und Entwicklung, die dann in Verlustvorträge eingestellt werden. Wenn diese Verlustvorträge für die geleistete Forschung und Entwicklung nach einer Übernahme nicht mehr berücksichtigt werden können, macht dies das Unternehmen für potenzielle Investoren weniger interessant.

Die von der Bundesregierung auf den Weg gebrachte Neuregelung zielt darauf ab, dass nicht genutzte Verlustvorträge trotz eines Wechsels der Anteilseigner weiterhin genutzt werden können. Bedingung dafür ist, dass der Geschäftsbetrieb nach dem Wechsel erhalten bleibt und eine anderweitige Verlustnutzung ausgeschlossen ist. Wichtig ist jetzt aller-

Der Ausbau der digitalen Infrastruktur sollte sich nicht am Durchschnitt orientieren

dings, dass diese Bedingung flexibel gehandhabt wird, da es in Start-ups oftmals zu Änderungen des Geschäftsmodells, der Kundenzielgruppen und der Technologie kommt. Diese geschäftlich bedingten Veränderungen dürfen nicht dazu führen, dass die Nutzung der Verlustvorträge unmöglich wird.

Ein erheblicher Standortnachteil besteht nach wie vor darin, dass – im Gegensatz zu zahlreichen anderen europäischen Ländern – in Deutschland die Verwaltungsleistungen von Fondsmanagerinnen und -managern umsatzsteuerpflichtig sind. Der Aufbau und die Verwaltung von Wagniskapitalfonds sind daher in Deutschland vergleichsweise unattraktiv.

Ein weiterer wesentlicher Baustein, um Innovationen zu fördern, ist der Ausbau der digitalen Infrastruktur. Sie ist heute eine wichtige Wachstumsdeterminante für moderne Volkswirtschaften. Die Digitalisierung stellt stetig wachsende Anforderungen an die Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit von Internetverbindungen. Deutschland liegt im internatio-



nenalen Vergleich bei nahezu allen Indikatoren zurück, die den Breitbandausbau mit Hochleistungsnetzen jenseits der 50 Megabit pro Sekunde betreffen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass selbst eine Versorgung mit Bandbreiten von 50 Megabit pro Sekunde in absehbarer Zeit schon nicht mehr bedarfsgerecht sein wird.

Für das Jahr 2025 gehen Netzbetreiber von einer durchschnittlichen privaten Nachfrage nach Internetgeschwindigkeiten von 400 Megabit pro Sekunde im Download und 200 Megabit pro Sekunde im Upload aus. Vor diesem Hintergrund sind die von der Bundesregierung formulierten Ziele zum Ausbau der Breitbandinfrastruktur nach Ansicht der Expertenkommission längst nicht mehr angemessen. Deutschland benötigt einen ambitionierten Ausbau der Infrastruktur, der sich nicht an Durchschnittswerten der OECD orientiert, sondern hinsichtlich Leistungs- und Ausbaufähigkeit führend ist. Die Ausbauziele müssen an die jeweiligen technischen Standards dynamisch angepasst werden.

Nachholbedarf gibt es auch bei der digitalen Abwicklung von Regierungs- und Verwaltungsprozessen – dem sogenannten E-Government. Nach wie vor ist das Angebot digitalisierter öffentlicher Dienstleistungen begrenzt und wenig nutzerfreundlich. Zudem werden die Datenbestände der öffentlichen Hand noch nicht standardmäßig als *Open Government Data* frei zugänglich bereitgestellt, gut strukturierte Zugänge fehlen ebenfalls.

Hauptursache für diese Defizite sind die föderalen Strukturen, denn Verwaltungsorganisation ist in Deutschland mehrheitlich Ländersache. Das Fehlen übergeordneter und rechtsverbindlicher Vorgaben und die Unterschiede in den Interessen der föderalen Akteure beim Ausbau von E-Government haben zu einem unübersichtlichen und technisch heterogenen Angebot in diesem Bereich geführt.

Ein wichtiger Schritt zur Überwindung dieser unbefriedigenden Situation erfolgte Ende 2016 mit dem Beschluss zur Neuordnung der Finanzbeziehungen von Bund und Ländern. Im Kontext dieser Neuordnung erhält der Bund durch eine Grundgesetzänderung die Kompetenz, per Gesetz den Zugang zu den Verwaltungsdienstleistungen von Bund und Ländern einschließlich der Kommunen auszugestalten.

Das parallel vom Kabinett verabschiedete Begleitgesetz – das sogenannte Onlinezugangverbesserungsgesetz – schreibt Bund, Ländern und Kommunen vor, ihre Verwaltungsleistungen binnen fünf Jahren auch online anzubieten und über einen Verbund der Verwaltungsportale von Bund und Ländern zugänglich zu machen. Bürgerinnen, Bürger und Unternehmen sollen von einem beliebigen Verwaltungsport-

Die Regierung hat es versäumt, Informationstechnologien ausreichend zu fördern

tal aus auf alle onlinefähigen Verwaltungsleistungen medienbruch- und barrierefrei zugreifen und sie mittels eines einzigen Nutzerkontos in Anspruch nehmen können.

Damit sind erfreulicherweise in den letzten Monaten wichtige Verbesserungen der Rahmenbedingungen erzielt worden. Somit besteht nun die Chance, leistungsfähige digitale Portale für Regierung und Verwaltung aufzubauen und die Qualität von E-Government in Deutschland in den kommenden Jahren an internationale Standards anzugleichen. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Bundesregierung in der neuen Legislaturperiode die geschaffenen Kompetenzen engagiert nutzen und zügig praktikable Lösungen zum Ausbau des E-Governments in Deutschland vorlegen.

Der digitale Wandel vollzieht sich derzeit mit beeindruckender Geschwindigkeit und stellt für die deutsche Wirtschaft eine große Herausforderung dar. Die dabei eingesetzten Technologien und Geschäftsmodelle gehören nicht zu den Kernstärken des deutschen Forschungs- und Innovationssystems. Gerade für Deutschland stellt die digitale Transformation in nahezu allen Bereichen eine radikale Veränderung dar, die langfristig erarbeitete Wettbewerbs- und Spezialisierungsvorteile infrage stellt.

Die Forschungs- und Innovationspolitik hat die diesem Wandel zugrunde liegende technische und ökonomische Dynamik bisher viel zu wenig beach-

tet. Die staatliche Förderung von Forschung und Entwicklung in den Informations- und Kommunikationstechnologien ist nicht ausreichend entwickelt – und das, obwohl der Bund begrüßenswerterweise die Gesamtausgaben für Forschung und Entwicklung deutlich erhöht hat: von 12,0 Milliarden Euro im Jahr 2009 auf 15,8 Milliarden Euro im Jahr 2016. Doch die Verteilung der Mittel auf die einzelnen Förderbereiche ist weitgehend konstant geblieben.

Zwischen 2009 und 2015 hat es die deutsche Bundesregierung schlicht versäumt, ausreichende Mittel in die Informations- und Kommunikationstechnologien zu lenken, die für die Bewältigung des digitalen Wandels wichtig sind. Erst der Sollwert der Fördermittel für das Jahr 2016 deutet auf eine etwas höhere Priorisierung dieses Bereichs hin. Deutschland muss in den kommenden Jahren im Hinblick auf die Digitalisierung neue technische und ökonomische Stärken aufbauen. Dieses Handlungsfeld sollte aus diesem Grund in der neuen Legislaturperiode von hoher Priorität sein.

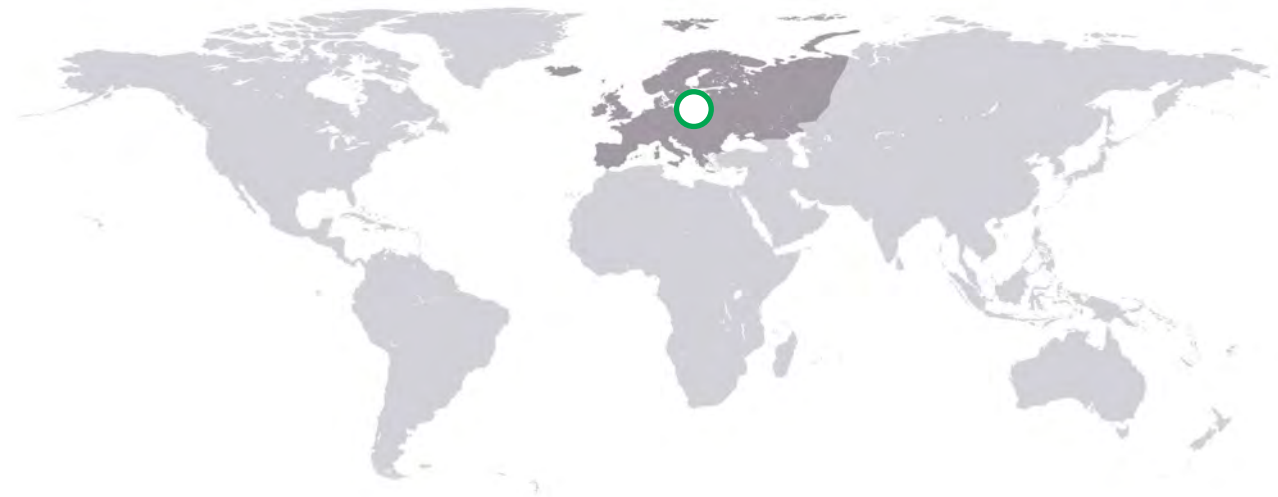
Wichtig ist dabei auch, die bisher fragmentierten und zum Teil gegenläufigen Aktivitäten der mit Digitalpolitik betrauten Ressorts stärker zu bündeln. Vor allem muss es der neuen Bundesregierung gelingen, schnell weitere Maßnahmen zur Stärkung der digitalen Infrastruktur in die Tat umzusetzen sowie Forschung und Innovation insbesondere bei den kleinen und mittleren Unternehmen wirkungsvoll zu fördern. Mögliche Lösungen wären eine bereits im Bundestag diskutierte Innovationsagentur, eine Koordinationsstelle im Bundeskanzleramt oder die Bildung eines Digitalministeriums mit weitreichender Zuständigkeit etwa für Infrastruktur, Innovationsförderung und E-Government. Diese Organisationsvarianten haben unterschiedliche Vor- und Nachteile – eine klare Überlegenheit einer der genannten Organisationsformen gibt es aus Sicht der Expertenkommission nicht.

In jedem Fall muss es die Politik aber schaffen, die Kompetenzen effektiver als bisher zu bündeln und dabei die Komplexität nachhaltig zu reduzieren. Langatmige Entscheidungs- und Umsetzungsprozesse kann sich das Land angesichts der Herausforderungen nicht leisten – auch die Politik muss deutlich agiler werden. ◀



DER AUTOR

Dietmar Harhoff, Jahrgang 1958, ist Direktor am Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb sowie Vorsitzender der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) der Bundesregierung. Als Diplomingenieur im Fach Maschinenbau arbeitete er zunächst als Forschungsingenieur in Großbritannien und Deutschland. Anschließend absolvierte er ein Masterstudium an der Harvard University und promovierte am Massachusetts Institute of Technology (MIT). 1996 habilitierte er sich im Fach Volkswirtschaftslehre an der Universität Mannheim und wurde zwei Jahre später an die Ludwig-Maximilians-Universität München berufen, wo er von 1998 bis 2013 das Institut für Innovationsforschung, Technologie-management und Entrepreneurship leitete.



Wissenschaft als Beruf, nicht als Hobby

Max-Planck-Wissenschaftler kooperieren mit Partnern in mehr als 110 Ländern dieser Erde. Hier schreiben sie über persönliche Erlebnisse und Eindrücke. Marcin Serafin studierte an der Universität in Warschau Soziologie. Für seine Doktorarbeit ging er an eine Max Planck Research School und genoss dort die Möglichkeit, sich komplett auf diese Aufgabe zu konzentrieren – das sei ein großer Unterschied zu den Arbeitsbedingungen eines Doktoranden in Polen.

Ich war schon auf der Highschool am sozialen Aspekt wirtschaftlicher Phänomene interessiert. Und auch später, während meines Masterstudiengangs am Institut für Soziologie an der Universität in Warschau, ließ mich das Interesse nicht los. Mir war damals allerdings nicht bekannt, dass diesem Thema ein komplettes Teilgebiet gewidmet ist, die sogenannte Wirtschaftssoziologie. Tatsächlich ermöglichte mir erst meine Zeit am Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, dieses Gebiet zu entdecken und meine Interessen wirklich zu verfolgen.

In meiner Doktorarbeit untersuchte ich, wie sich verschiedene Lebensaspekte auf die Arbeitszeiten von Taxifahrern auswirken. Im Gegensatz zu anderen Berufsgruppen sind Taxifahrer keine Angestellten, die feste Arbeitszeiten haben. Sie sind vielmehr Einzelunternehmer, die flexibel entscheiden können, wann und wie lange sie arbeiten wollen. Somit richten sich ihre Arbeitszeiten, die in anderen Berufen durch einen Arbeitsvertrag geregelt sind, an einem breiten Spektrum von Rahmenbedingungen aus, die in ökonomischen Standardmodellen oft vernachlässigt werden – etwa die Lebensumstände der Taxifahrer, deren Geschlecht oder Familienverhältnisse.

Ihre Arbeitszeiten sind auch das Resultat daraus, dass sie sich selbst nicht als Arbeiter sehen, sondern als Einzelunternehmer, die miteinander direkt in Konkurrenz stehen. Daher ist es schwierig, sie für ein gemeinsames Handeln zu mobilisieren und sie dazu zu bewegen, einer Gewerkschaft



Marcin Serafin, 31, studierte an der Universität von Warschau von 2005 bis 2010 Soziologie und ging im Rahmen der International Max Planck Research School an das Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung. Momentan ist er Assistenzprofessor am Institut für Soziologie und Psychologie an der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Warschau und seit April dieses Jahres Leiter der Max-Planck-Partnergruppe für Soziologie und ökonomisches Leben.

beizutreten, die für ihre Interessen eintritt. Für gewöhnlich kämpfen Berufsgruppen mithilfe von Gewerkschaften für bessere Arbeitsbedingungen und eine Begrenzung der Arbeitszeiten.

Während ich meine Doktorarbeit verfasste, erhielt ich sehr viel Unterstützung von meinem Institut und meiner International Max Planck Research School. Es war wirklich schön, dass es mir somit möglich war, mich komplett auf die vor mir liegende Aufgabe zu konzentrieren, ohne mich um Verwaltungs- oder Lehrangelegenheiten kümmern zu müssen. Das ist ein großer Unterschied, verglichen mit den Arbeitsbedingungen eines typischen Doktoranden der Sozialwissenschaften in Polen. Dort ist es schwierig, sich einfach nur auf die eigene Doktorarbeit zu konzentrieren. Gewöhnlich muss man noch andere Jobs annehmen, um seinen Lebensunterhalt zu bestreiten, und so wird die Promotion oft eher zu einem Hobby oder einem Investment in die außerakademische Karriere.

Sicherlich, eine Karriere in der Wissenschaft ist überall schwierig, besonders dann, wenn man seine berufliche Laufbahn als Forschungsgruppenleiter frisch antritt. Es hat den Beginn meines Lebens in dieser Position um einiges einfacher gemacht, dass wir den Status einer Max-Planck-Partnergruppe erhalten haben, und ich wünschte wirklich, mehr Menschen wüssten von dieser Möglichkeit. Ich leite ein kleines und kreatives Team an der Polnischen Akademie der Wissenschaften, und wir haben vor, mehrmals pro Jahr nach Köln zum Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung zu pendeln. Wissenschaftler von dort werden auch nach Warschau kommen, da hier nächstes Jahr unser Auftaktworkshop stattfindet. Ich denke, mein Team wird diese Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut genießen.

Wir arbeiten in meinem Team an zwei Forschungsprojekten. Zum einen untersuchen wir, wie die Zukunftserwartungen der Menschen deren ökonomisches Verhalten in der Gegenwart beeinflussen. So ist etwa die Entscheidung, eine Hypothek auf ein Haus aufzunehmen, in den Erwartungen begründet, wie sich das eigene Leben in den nächsten 20 Jahren entwickelt – etwas, das sich sehr schwer vorhersagen lässt. Zum anderen untersuchen wir gerade, wie neue digitale Plattformen wie Airbnb und Uber das wirtschaftliche und soziale Leben neu strukturieren. Dies betrifft besonders die Arbeitsbedingungen, mit denen die Mitglieder dieser neuen Digital Economy konfrontiert sind, sowie deren Teilnahme an Gewerkschaften und verschiedenen anderen Formen gemeinschaftlicher Vorgehensweisen.

Die Natur als Apotheke

Bakterien, Pflanzen und Tiere halten eine Fülle unbekannter Substanzen bereit, die für den Menschen nützlich sein könnten. **Herbert Waldmann** testet am **Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie** in Dortmund Naturstoffe auf ihre biologische Wirksamkeit und versucht, ihre Wirkung mit einfacher aufgebauten Molekülen zu imitieren.

TEXT CATARINA PIETSCHMANN

Die Evolution hat zahlreiche Arten mit Substanzen ausgestattet, mit denen sie beispielsweise kommunizieren, Partner anlocken oder Feinde abschrecken können. Einige davon haben sich auch als potente Wirkstoffe für den Menschen erwiesen, zum Beispiel Taxol, eine Substanz, die in der Rinde der Pazifischen Eibe entdeckt wurde. Die schmerzlindernde Wirkung von Salicylsäure aus der Rinde von Weiden war bereits den Germanen bekannt.

Der Nervenzellrezeptor-Blocker Atropin aus der Tollkirsche, das Opiat Morphin aus dem Schlafmohn und die Penicillin-Antibiotika verschiedener Pilze – die Liste kleiner Moleküle mit großer Wirkung ließe sich endlos verlängern. „Fast ein Drittel unserer Arzneimittel leitet sich noch heute von Naturstoffen ab, ein weiteres Drittel sind Proteine“, sagt Herbert Waldmann, Direktor der Abteilung Chemische Biologie am Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie.

In den 1990er-Jahren gelang es mittels der sogenannten kombinatorischen Chemie, automatisiert eine große Anzahl von chemischen Verbindungen zu synthetisieren. Substanzbibliotheken mit Hunderttausenden Verbindungen entstanden und wurden in Hochdurchsatz-Tests auf ihre pharmakologische Wirkung an Zellen getestet.

ZU WENIGE NADELN IM HEUHAUFEN

Das ernüchternde Ergebnis: Nur eine von hunderttausend Verbindungen besitzt eine biologische Wirkung. Das entspricht einer Trefferquote von gerade mal 0,001 Prozent. Nun könnte man einwenden, bei einer Million Ausgangsverbindungen hätte man immerhin schon zehn Treffer. „Leider ging diese Rechnung nicht auf“, sagt Waldmann. „Es bringt nichts, die Substanzbibliotheken immer weiter aufzustoßen.“ In einem immer größer werdenden Heuhaufen sind also nicht automatisch auch mehr Nadeln.

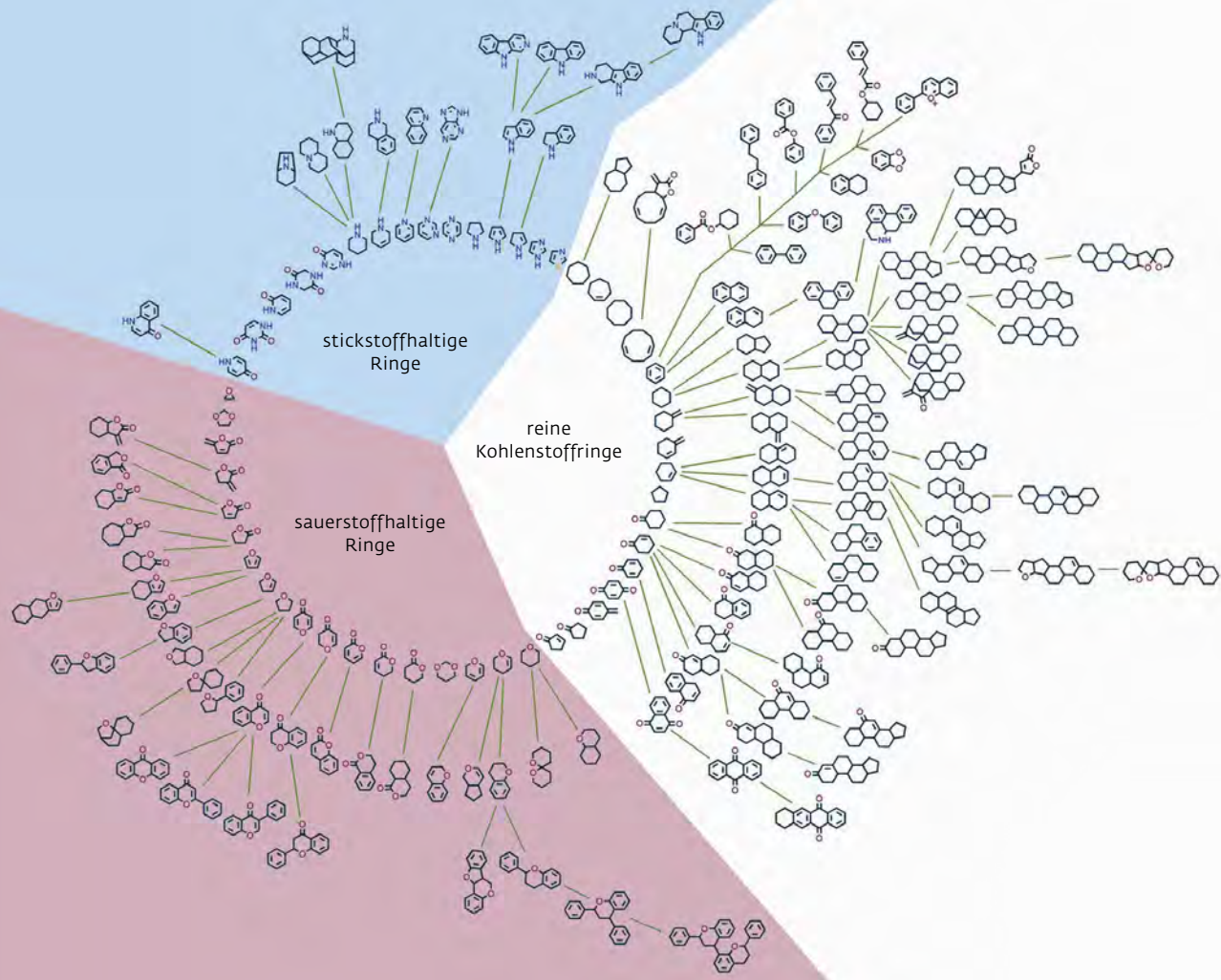
Die Synthese von komplexen Naturstoffen ist nach wie vor eine der spannendsten Aufgaben für Chemiker. Auch Waldmanns wissenschaftliche Karriere begann damit. „Doch diese Form der Wirkstoffforschung ist langsam. Außerdem sind die vielstufigen chemischen Synthesen oft nicht dafür geeignet, Substanzen in großen Mengen für die Industrie zu produzieren.“

Waldmann verfolgte deshalb einen anderen Ansatz. Anstatt wahllos chemische Verbindungen zu synthetisieren und zu testen, lässt er sich von den chemischen Strukturen leiten, die sich bereits als wirksam erwiesen haben. „Wir versuchen zu verstehen, was das Wesentliche an Naturstoffstrukturen ist, und nutzen diese Erkenntnisse zur Synthese neuer Verbindungen“, erklärt Waldmann.

Ein Medikament wirkt, weil sein Wirkstoff an das aktive Zentrum eines Proteins bindet und dadurch dessen Aktivität verändert oder ganz blockiert. Auffällig ist, dass die Natur nur einen bescheidenen Teil der theoretisch mög-

Schon in der Antike war der schmerzlindernde und fiebersenkende Effekt eines Extrakts aus Weidenrinde bekannt. Die Wirkung beruht auf dem darin enthaltenen Salicin, das im Körper in den eigentlichen Wirkstoff Salicylsäure umgewandelt wird. Sie ist die Leitstruktur für die noch wirksamere und nebenwirkungsärmere Acetylsalicylsäure (ASS) – den Wirkstoff des Aspirins.





Baum der Moleküle: Die chemische Struktur der außen liegenden Naturstoffe lässt sich schrittweise vereinfachen. So gelangt man entlang eines Astes zu einem Grundgerüst, das noch den Typ der ursprünglichen biologischen Aktivität besitzt, sich aber leichter chemisch synthetisieren lässt. Dieses Prinzip liegt dem Computerprogramm Scaffold Hunter zugrunde, das in Waldmanns Abteilung entwickelt wurde.

lichen Proteine nutzt: Aus den 20 in der Natur vorkommenden Aminosäuren könnten rein rechnerisch 10^{390} Proteine mit der Länge von 300 Aminosäuren zusammengesetzt werden. Aber selbst das Erbgut der höchstentwickelten Organismen enthält lediglich die Baupläne für maximal hunderttausend Proteine.

Ähnlich sparsam ging die Natur bei der Proteinfaltung vor. „Wahrscheinlich gibt es nicht mehr als einige Tausend Faltungstypen“, vermutet Waldmann. „Das ist auch sinnvoll, schließlich muss die Natur das Rad ja nicht mehrmals erfinden.“ Und so kommt es, dass eine Substanz aus Bakterien beim Menschen wirkt, weil sie in die Bindungstasche eines Proteins passt, die im Wesentlichen bereits der gemeinsame Vorfahr vor Jahrmillionen besaß.

Die in der Natur vorkommenden Wirkstoffmoleküle sind ebenfalls be-

grenzt. Meist bestehen sie aus bis zu neun miteinander verknüpften Ringssystemen. Über die Hälfte der Naturstoffe besitzt jedoch nur zwei bis vier Ringe. Mit diesem Format passen sie offenbar in die Bindungstaschen der allermeisten Proteine. Während deren grobe Form und Größe folglich nur in einem engen Rahmen variiert wird, ist das chemische „Innenfutter“ der Taschen sehr variabel. „Wie selektiv ein Wirkstoff bindet, hängt von den Seitenketten der Proteine und den funktionellen Gruppen der Naturstoffe ab.“

Waldmanns Strategie für die Wirkstoffsuche besteht darin, die chemischen Gerüste der Naturstoffe so weit zu reduzieren, dass eine Verbindung gerade noch wirksam ist. Dann nähert er sich der Wirksamkeit des Originals über den Anbau funktioneller Gruppen wieder an. Auf diese Weise muss

er sich nicht mit großen komplexen Molekülen herumschlagen und kann sich stattdessen auf kleinere, einfacher zu synthetisierende konzentrieren. „Was nützen die wirksamsten Naturstoffe, wenn aufgrund ihrer komplizierten Struktur nur ein paar Krümel davon herstellbar sind? Selbst wenn man damit die Menschheit retten könnte – wenn davon 100 Kilogramm nötig wären, wären sie trotzdem keine Hilfe“, so Waldmann.

Zuerst benötigte er eine Übersicht über die Vielfalt unterschiedlicher Strukturen von Naturstoffen. Eine Mammutaufgabe, die nicht ohne Computer zu lösen war. Waldmanns Team programmierte eine Software und analysierte alle bis zu diesem Zeitpunkt bekannten 190 000 Naturstoffe, reduzierte sie auf ihr chemisches Grundgerüst und sortierte sie nach Komplexität und strukturel-



Foto: Frank Vinken

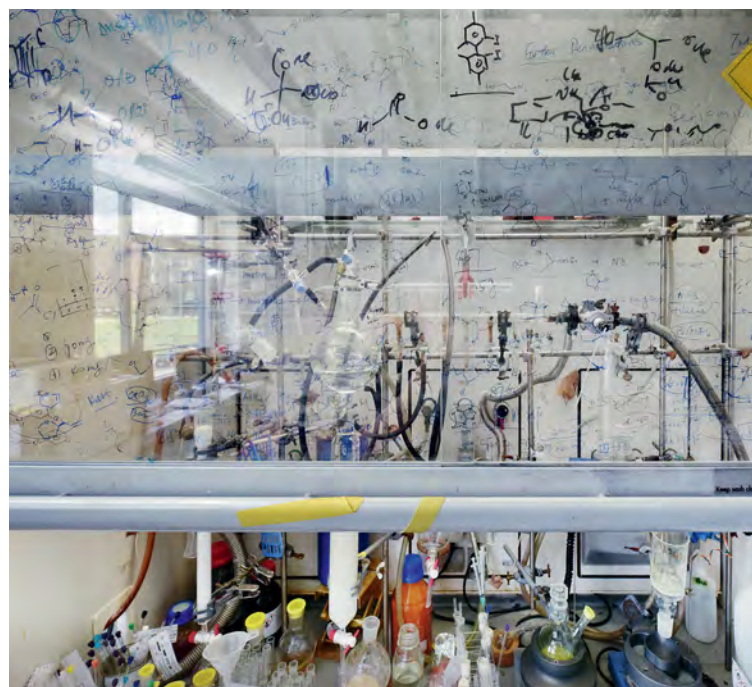
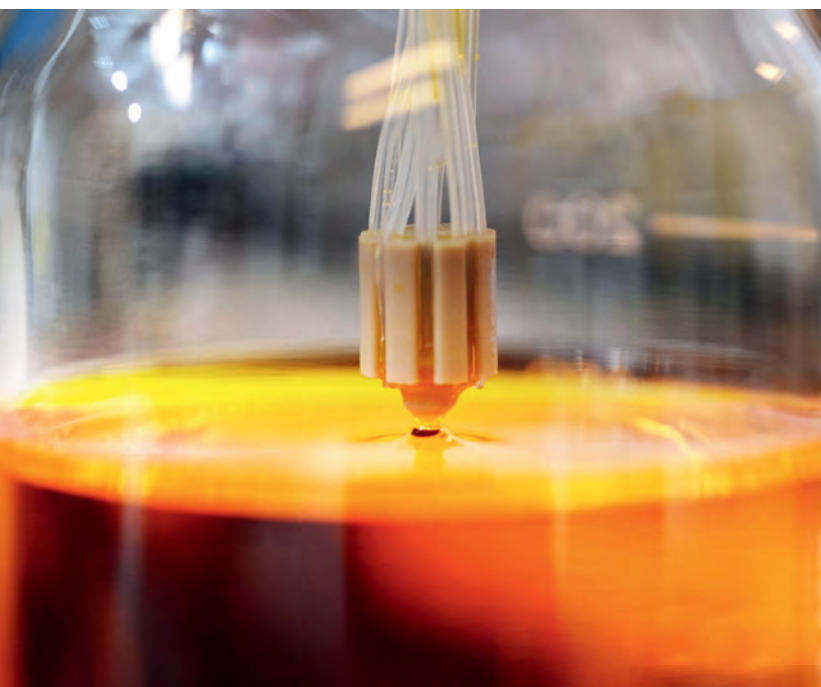
Auf dem Weg zu neuen Wirkstoffen: Herbert Waldmann nimmt die Natur als Vorbild und entwickelt aus natürlich vorkommenden Molekülen neue Substanzen für die Medizin. Diese sollen einfacher zu synthetisieren und wirksamer sein als ihre Vorbilder aus der Natur.

ler Verwandtschaft. Heraus kam eine baumartige Struktur: Auf den Ästen ganz außen sitzen die komplexesten, aber oft auch wirksamsten Verbindungen. Hin zum Stamm wird die Struktur einfacher und die biologische Aktivität schwächer. Den Stamm bilden die einfachen Ringe, aufgereiht nach Größe und in Sektoren unterteilt nach reinen Kohlenstoffringen sowie sauerstoff- und stickstoffhaltigen Ringen.

VON KOMPLEXEN ZU EINFACHEN MOLEKÜLEN

Scaffold Hunter, „Gerüstjäger“, nennt Waldmann das Programm, das er Wissenschaftlern und Pharmafirmen in aller Welt frei zur Verfügung stellt. Die Software enthält – sofern bekannt – die biologische Aktivität für darin gespeicherte Naturstoffe. Hat ein Forscher auf diese Weise einen Wirkstoff gefunden, der zu einem bestimmten Krankheitsbild passt, verfolgt er den Ast vom komplexen Original in Richtung Stamm. Dort gelangt er schließlich zu einer einfachen Verbindung, die er leichter synthetisieren und optimieren kann. Da eine solche Grundstruktur einfacher aufgebaut ist als ein Naturstoff, ist sie weniger selektiv und kann an verschiedene Proteine binden. Nun gilt es, den potenziellen Wirkstoff so anzupassen, dass er ausschließlich am Zielprotein bindet. Andernfalls könnte er schwere Nebenwirkungen bei einem Patienten auslösen und wäre als Medikament unbrauchbar.

Mit dieser Methode sind Waldmann und sein Team tatsächlich deutlich erfolgreicher: Statt bei 0,001 Prozent liegt



Links Zur Testung werden Flüssigkeiten mit einem Dispensiergerät auf Testplatten aufgebracht. Anstelle einer Testflüssigkeit wird hier ein oranger Farbstoff aus dem Vorratsgefäß des Geräts angesaugt. Auf diese Weise wird die Genauigkeit des Geräts bestimmt. Dieses kann dann geeicht werden.

Rechts Gläserne Abzugsschächte in den Labors verhindern, dass gasförmige Substanzen aus den Apparaturen entweichen. Auf die Frontscheiben der Abzüge kritzeln die Forscher manchmal chemische Formeln.

die Trefferquote nun bei rund einem Prozent. „Wenn wir von einer ausgewählten Substanzklasse 200 Varianten herstellen, stellen sich also im Durchschnitt zwei als brauchbar heraus. Nach der zweiten Optimierungsrunde haben wir dann meistens schon 20 bis 30 potente Moleküle“, erklärt Waldmann.

Interessant wird es dort, wo es Lücken im Strukturbaum der Naturstoffe gibt: Ist eine Substanz mit vier Ringen wirksam und eine mit zwei Ringen auch, müsste eine Verbindung mit drei Ringen ebenfalls biologisch aktiv sein. „Wir haben das getestet und in Zelltests bestätigt. Das Programm kann also auch die biologische Aktivität von Substanzen vorhersagen“, betont Waldmann.

Herbert Waldmanns Forschung wäre ohne umfangreiche Zelltests, sogenannte Screenings, kaum möglich. Mit der Gründung des Compound Managing and Screening Center (COMAS) am Dortmunder Max-Planck-Institut hat die Max-Planck-Gesellschaft ihre vorher verstreuten Substanzbibliotheken zusammengeführt. Inzwischen la-

gern hier über 250000 chemische Verbindungen. Die meisten davon wurden von anderen Anbietern erworben, zehn Prozent davon jedoch stammen aus Max-Planck-Labors. Sie gibt es nirgendwo sonst auf der Welt. Jeder Max-Planck-Wissenschaftler kann das Center nutzen und Substanzen auf ihre Wirkung testen lassen.

SUBSTANZEN FÜR DIE KREBSFORSCHUNG

Ein Teil der exklusiven Proben stammt aus Waldmanns eigener Abteilung. Sein Team hat mithilfe des Scaffold Hunter eine eigene Bibliothek mit Substanzen synthetisiert, die sich an Naturstoffen orientiert. Die Wissenschaftler setzen sie vor allem für die Suche nach Krebswirkstoffen ein. Ausgangspunkt dafür ist zunächst eine biologische Hypothese.

Ein Beispiel: „Krebszellen benötigen große Mengen an Nährstoffen für ihr Wachstum. Wenn wir die Kanalproteine in der Zellmembran blockieren, durch

die zum Beispiel Zucker hineingelangt, könnten wir die Krebszellen aushungern. Also haben wir in unserer Bibliothek nach einem Hemmstoff dieser Membrankanäle gesucht – und sind fündig geworden.“ Als Nächstes optimierten die Forscher den Hemmstoff und übergaben ihn an das Lead Discovery Center gleich nebenan.

Das Lead Discovery Center wurde 2008 auf Initiative der Max-Planck-Gesellschaft gegründet, um die Lücke zwischen Grundlagenforschung und Industrie zu schließen. Die Wissenschaftler des Zentrums testen Wirksamkeit, Aufnahmefähigkeit und Verträglichkeit aussichtsreicher Wirkstoffkandidaten an Tieren und verbessern diese Eigenschaften gegebenenfalls. Verlaufen die Tests zufriedenstellend, kann ein Pharmaunternehmen die Lizenz für den Wirkstoff erwerben und die dann notwendigen klinischen Tests durchführen.

Nur die wenigsten Kandidaten durchlaufen das Lead Discovery Center erfolgreich. Englerin zum Beispiel, ein



Links Bei einer Temperatur wie der des menschlichen Körpers wachsen die Zellen in den flüssigkeitsgefüllten Vertiefungen der Schalen. So lässt sich an ihnen die Wirkung von Substanzen aus der Stoffbibliothek des Zentrums direkt testen.

Rechts Sonja Sievers leitet die Screening-Einheit des COMAS. Mithilfe einer modernen Roboteranlage kann sie eine Vielzahl chemischer Verbindungen auf ihre biochemischen und zellulären Effekte untersuchen.

pflanzlicher Naturstoff, der in Zelltests selektiv Nierenkrebszellen tötete, scheiterte im ersten Tierversuch. „Die Mäuse starben innerhalb von fünf Minuten, denn Englerin blockiert nicht nur einen Calciumkanal in den Tumorzellen, sondern auch im Lungengewebe. Dadurch kommt es dort zu massiven Wassereinlagerungen“, sagt Waldmann.

Ganz oben auf Waldmanns Agenda stehen seit Langem Substanzen, die den sogenannten Ras-Signalweg in Tumorzellen blockieren. Bereits Anfang der 1990er-Jahre, damals noch in Bonn, wurde er darauf aufmerksam. Eine Mutation führt dazu, dass Ras-Proteine, die über ihren Fettsäurerest in der Zellmembran verankert sind, Krebszellen das Signal zur Teilung geben. Bei einem Drittel aller Tumore sind mutierte Ras-Proteine im Spiel.

Waldmann beginnt, Wirkstoffe gegen sie zu entwickeln, und erreicht dabei „die natürliche Grenze des Chemikers“, wie er sagt. „Du hast ein Molekül synthetisiert – und jetzt? Kühlschrank auf, Substanz rein, Tür zu, nächstes Pro-

jekt?“ Waldmann reicht das nicht. Er sucht jemanden, der mehr darüber weiß, und wird fündig: Alfred Wittinghofer, damals Leiter der Strukturbiologie am Dortmunder Max-Planck-Institut, untersucht gemeinsam mit dem Zellbiologen Philippe Bastiaens – heute ebenfalls Direktor am Institut – die Wirkungsweise dieser Signalproteine.

ZUSAMMEN AUF DER SPUR VON RAS

„Wittinghofer war sozusagen ‚Mr. Ras‘. Und ich dachte, den rufst du mal an...“, erinnert sich Waldmann. Eine erfolgreiche Zusammenarbeit der beiden Wissenschaftler nimmt ihren Anfang. 1999 wird Waldmann selbst ans Max-Planck-Institut berufen, wo er nun die Abteilung Chemische Biologie leitet, wenige Jahre später kommt Bastiaens nach Dortmund. Die drei Abteilungen ergänzen sich fortan. Wittinghofer und Bastiaens finden heraus, wie Ras in der Zelle transportiert wird. Was die Forscher jetzt brauchen, ist ein Molekül, das die-

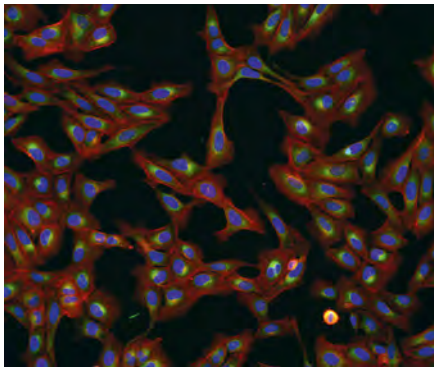
sen Transport verhindert. Hier kommt das COMAS ins Spiel. „Wir haben zusammen mit dem COMAS einen Zelltest entwickelt und unsere Bibliothek durchsucht. Die Treffer haben wir dann im Labor weiter optimiert.“

Einer dieser Treffer ist Deltarasin. Der Wirkstoff unterbricht den Ras-Transport und damit den Signalweg – aber leider nicht nur diesen, auch andere Abläufe werden gestört. Die Folge sind teils schwere Nebenwirkungen. Andere Kandidaten wiederum lösten weniger unerwünschte Wirkungen aus, waren aber nicht wirksam genug. Den Krebszellen gelingt es sogar, die Ras-Blockade wieder aufzuheben. Inzwischen entwickeln die Max-Planck-Wissenschaftler die vierte Generation von Blockern, die so fest an ihr Zielprotein andocken, dass die Krebszellen sie nicht wieder entfernen können.

Große Hoffnung setzt Waldmann in die Technik des sogenannten Cell Painting. Damit will er einen Zelltest entwickeln, mit dessen Hilfe er gleich nach der Synthese sagen kann: „Wir

Unten Beim Cell Painting werden Zellorganellen wie der Zellkern (blau), das endoplasmatische Retikulum (grün) oder das Zellskelett (rot) angefärbt. Wirkt eine Substanz auf eine dieser Organellen, lässt sich dies am veränderten Farbmuster ablesen.

Rechts Die Systemoperatorin Miriam Kunkel betreut die Substanzbibliothek des COMAS mit mehr als 250 000 verschiedenen Verbindungen. Temperaturen von minus 20 Grad Celsius stellen sicher, dass sich die Moleküle auch nach längerer Zeit chemisch möglichst wenig verändern.



wissen zwar noch nicht, was das Molekül kann – aber es hat in jedem Fall Potenzial!“

Als Nächstes möchte Waldmann über das hinausgehen, was die Natur kann. „Die Anzahl der in der Natur vorkommenden chemischen Grundstrukturen ist ja begrenzt. Bisher imitieren wir nur das, was die Natur uns vorgebracht hat. Wir werden also auch immer nur die Bioaktivität dieser Naturstoffe finden, aber nichts völlig Neues.“ Waldmann will daher die Molekülgerüste aus dem Scaffold Hunter virtuell in kleinere Fragmente zerlegen. „Und dann setzen wir diese so zusammen, wie die Natur es noch nie getan hat!“ So sollen Substanzen entstehen, die aussehen wie Naturstoffe – aber keine sind: Pseudo-Naturstoffe, „Natur 2.0“ also.

Aber kann das funktionieren? Waldmann nickt, zweimal waren sie bereits erfolgreich. Noch reicht das nicht für eine endgültige Aussage. Aber die Vorzeichen stehen gut, dass seine Wirkstoffbibliotheken schon bald mit neuen, vielversprechenden Substanzen aufgestockt werden können. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Mit einer Software können Wissenschaftler die chemische Struktur eines biologisch wirksamen Naturstoffs auf sein Grundgerüst reduzieren. Dieses lässt sich leichter im Labor nachbauen und gegebenenfalls optimieren.
- Durch die Kombination einzelner Strukturteile von Naturstoffen sollen künftig chemische Verbindungen mit völlig neuen Eigenschaften entstehen.
- Um das Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie herum haben sich in Dortmund verschiedene Institute angesiedelt, die potenzielle neue Wirkstoffe erforschen und ihnen den Weg in die Medizin ebnen.

GLOSSAR

Cell Painting: Dazu werden verschiedene Signalwege oder Zellorganellen mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert, sodass ein Muster aus verschiedenen Farben entsteht. Für Wirkstofftests werden die bunten Zellen auf mehrere Tests verteilt und Substanzen ausgesetzt, deren Effekt auf die Zellen bekannt ist. Diese Referenzsubstanzen verändern das Farbmuster auf charakteristische Weise. Die Wirkung eines neuen, unbekanntes Moleküls lässt sich nun durch einen Farbvergleich ablesen.

COMAS: Das **C**ompound **M**anagement and **S**creening Center hat das Ziel, wissenschaftliche Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung der Max-Planck-Gesellschaft für die medizinische Forschung und die Entwicklung neuer therapeutischer Anwendungen zu nutzen. Jede Substanz der aktuell 250 000 Verbindungen umfassenden Bibliothek wird in barcodierten Röhrchen bei minus 20 Grad aufbewahrt. Winzige Mengen der Substanzen von wenigen milliardstel Litern (Nanolitern) reichen für die Tests aus. Substanzen, die ihr Potenzial in den Tests am COMAS bewiesen haben, werden an das Lead Discovery Center weitergegeben und dort für die medizinische Anwendung weiterentwickelt.

100 Jahre

MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR PHYSIK

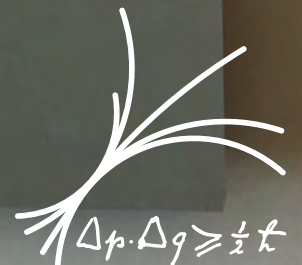
Kurz und unterhaltsam präsentiert:

DAS JUBILÄUMSMAGAZIN wirft einen
Blick auf die Geschichte der Teilchenphysik,
die frühere und die aktuelle Forschung
sowie die Menschen, die am Institut
aktiv waren und sind.

mpp.mpg.de/magazin

Jubiläumsmagazin
per E-Mail bestellen:
magazin@mpp.mpg.de

100 Jahre
MAX-PLANCK-
INSTITUT
FÜR PHYSIK



Gifttransport zum Tumor

Medikamente, die Krebszellen effektiv beseitigen, aber kaum Nebenwirkungen mit sich bringen. Das ist das Ziel, das die Gruppe von **Tanja Weil**, Direktorin am **Max-Planck-Institut für Polymerforschung** in Mainz, verfolgt. Die Chemiker bauen Proteine auch mithilfe von winzigen Diamanten zu Wirkstofftransportern für die Nanomedizin aus.

TEXT **PETER HERGERSBERG**

Es klingt erst mal nach einem gründlichen Missverständnis. „Mir waren Polymere immer etwas suspekt“, sagt Tanja Weil, die am Max-Planck-Institut für Polymerforschung promoviert hat – und dort jetzt Direktorin ist. Polymere sind lange, oft netzartige Moleküle, in denen sich kleine chemische Bausteine, unzählige Male wiederholt, aneinanderreihen. Aus diesen Kettenmolekülen bestehen die enorm vielseitigen und haltbaren Kunststoffe, die aus dem Alltag kaum noch wegzudenken sind.

Dass Tanja Weil zunächst trotzdem mit Polymeren fremdelte, hatte nicht zuletzt ästhetische Gründe: „Ich fand, die Schönheit und Präzision der organischen Chemie blieben da ziemlich auf der Strecke.“ Sehr vereinfacht gesagt, mische man in der Polymerchemie zum Beispiel zwei Monomere zusammen und drücke auf den Startknopf, erklärt die Forscherin, die im Jahr 2016 von der Universität Ulm an das Mainzer Institut wechselte. „Dann ist die Reaktion irgendwann zu Ende, und das war’s.“

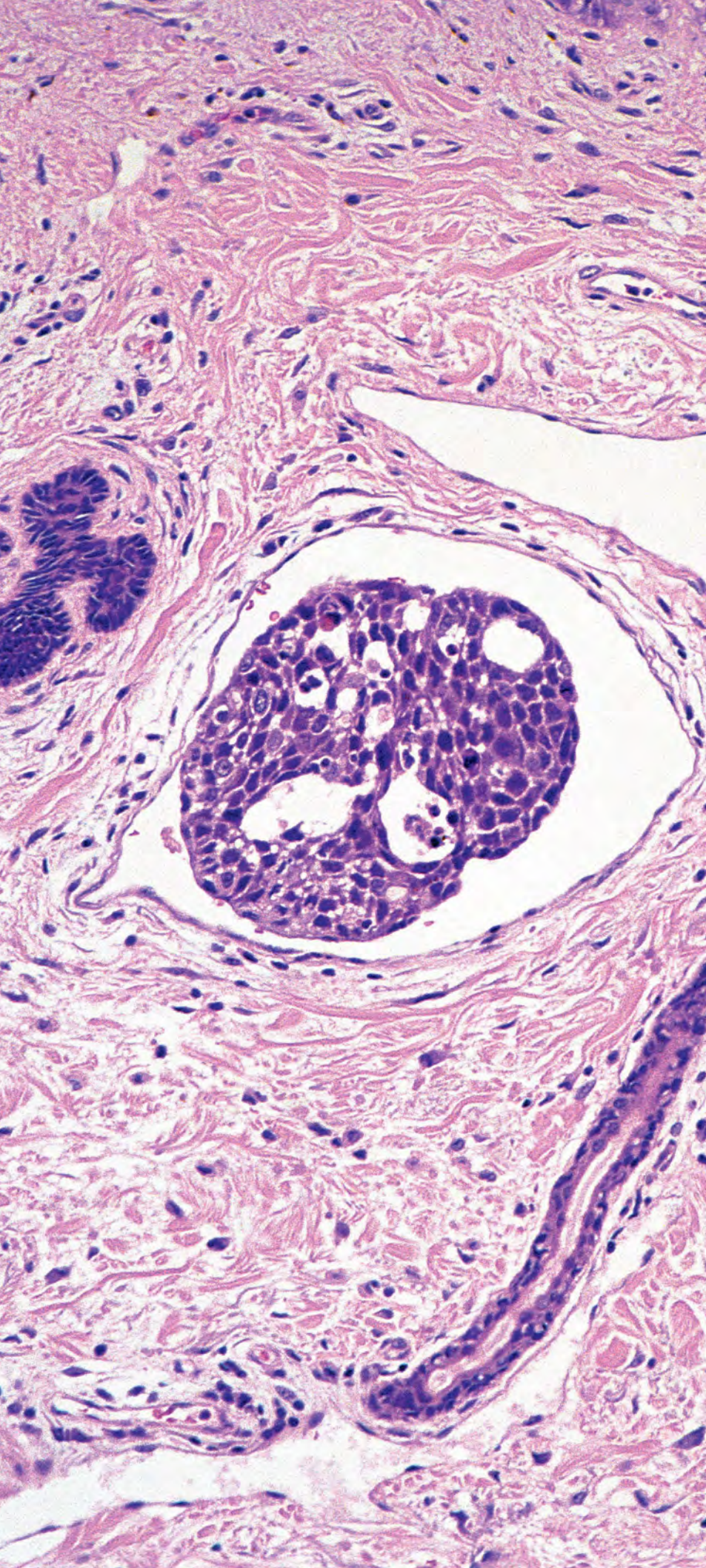
Dabei kommt in den meisten Fällen eine Mischung unterschiedlich langer Kettenmoleküle heraus. Nicht zuletzt deshalb hat Weil in ihrer Promotion auch an einer der wenigen Polymerklassen mit genau definierter Struktur gearbeitet: den sogenannten Dendrimeren – symmetrischen, baumartigen Molekülen, deren Äste aus den gleichen chemischen Grundeinheiten kontrolliert aufgebaut werden.

KETTENMOLEKÜLE ALS VEHIKEL FÜR WIRKSTOFFE

Der Wildwuchs, der damals in den Reagenzgläsern von Polymerchemikern herrschte, war aber nicht nur unschön, er vertrat sich auch nicht mit den Anwendungen, die Tanja Weil für Polymere mehr und mehr in den Blick nahm. Sie wollte die Kettenmoleküle als Vehikel für medizinische Wirkstoffe einspannen, etwa dafür, Zellgifte zielgenau zu einem Tumor zu manövrieren. Diese Form der Nanomedizin würde innerhalb der Krebszellen möglichst großen

Schaden anrichten, im restlichen Körper aber keinen. Wenn Kettenmoleküle jedoch unterschiedlich lang sind, werden sie auch mit unterschiedlich viel Wirkstoff beladen. „Allerdings gibt es mittlerweile vielversprechende neue Syntheseansätze, um das zu ändern“, sagt Tanja Weil. Denn es sei essenziell, Polymere für die Medizin kontrolliert und reproduzierbar mit einem Wirkstoff zu beladen, erklärt die Forscherin: „Ein Patient möchte jeden Tag eine Pille mit der gleichen Dosis.“

Profitieren könnten von einer Therapie, die sich gezielt gegen Krebszellen richtet, zum Beispiel Leukämiepatienten: „Mit der Standardtherapie, die seit den 1960er- bis 1970er-Jahren gegen akute Formen der Leukämie eingesetzt wird, bügeln wir grob über alle blutbildenden Zellen“, sagt Michaela Feuring-Buske, die als Professorin an der Klinik für Innere Medizin III und am Institut für Experimentelle Tumorforschung des Universitätsklinikums Ulm neue Therapieansätze gegen Leukämie entwickelt. Sie arbeitet mit Weil schon seit



deren Zeit als Professorin in Ulm zusammen. Der therapeutische Schuss mit der Schrotflinte auf alle Zellen, die sich schnell teilen, trifft auch gesunde Zellen – mit entsprechenden Nebenwirkungen: Haarausfall, Übelkeit, ein Rückgang roter und weißer Blutkörperchen und sogar Schädigungen des Herzmuskels sowie des zentralen Nervensystems, um nur einige zu nennen. „Eine Krebstherapie spezifischer zu gestalten, ist daher zeitgemäß und sehr attraktiv“, sagt die Ulmer Medizinerin.

Die Chemikerin Tanja Weil dürfte die Motivation, Transporter für Arzneistoffe zu entwickeln, auch aus ihrer Zeit beim Pharmaunternehmen Merz mitgenommen haben. Dort leitete sie verschiedene Bereiche – und forschte nebenbei eigenständig am Max-Planck-Institut für Polymerforschung. Nanofrachter, die einen Wirkstoff gezielt dorthin bringen, wo er gebraucht wird, gehören bislang zwar nicht zum Standardprogramm von Pharmaunternehmen. Aber daran, dass sie sich etablieren, arbeitet Tanja Weil mit ihren Kollegen, seit sie ganz in die akademische Forschung zurückgekehrt ist.

Die Anforderungsliste an einen zielgerichteten Wirkstofftransporter ist lang: Er braucht nicht nur einen geschützten Laderaum für den Wirkstoff, er muss auch eine Art Adresszettel tragen, um zu seinem Ziel zu finden. Zudem muss sich der Wirkstofffrachter tarnen, um den Wächtern des Immun-

Ziel der Nanoattacke: Mainzer Max-Planck-Forscher wollen Zellgifte mit Proteinfrachtern unter anderem in Zellen von Brustkrebstumoren (violett) schleusen.

systems zu entgehen. Schön wären auch noch Markierungen, mit denen sich der Weg der Fracht verfolgen lässt. Und das alles muss natürlich für den Körper verträglich sein. Diesen Anforderungskatalog können die meisten Materialien kaum erfüllen.

PROTEINE ALS PRÄZISE POLYMERE

Tanja Weil und ihre Mitarbeiter haben deshalb eine neue Idee entwickelt. Sie habe sich gefragt, ob man die präzisen Biopolymere wie etwa Proteine als herkömmliche Polymere verwenden kann, sagt die Chemikerin. Im Körper treten Proteine in verschiedenen räumlichen Formen auf, doch meist eher knobblig, mit Beulen und Dellen. Durch diese räumliche Struktur und die chemischen Eigenschaften seiner Oberfläche wird jedes Eiweißmolekül zu einem

Spezialisten. Manche von ihnen heften sich an andere Proteine, um mit ihnen gemeinsam Aufgaben zu erledigen. Andere arbeiten kleinere Moleküle zu einer im Organismus gerade benötigten Substanz um oder transportieren sie zu einer bestimmten Stelle.

Entwirrt handelt es sich bei einem Protein jedoch immer um ein Kettenmolekül mit einer exakt festgelegten Länge, das sich in definierter Reihenfolge aus 21 verschiedenen Aminosäurebausteinen zusammensetzt. Da ist absolute Präzision gefragt, weil sich nur eine spezielle Kette von Aminosäuren zu dem Gebilde verknäult, das im Organismus den ihm zugeordneten Job erledigt.

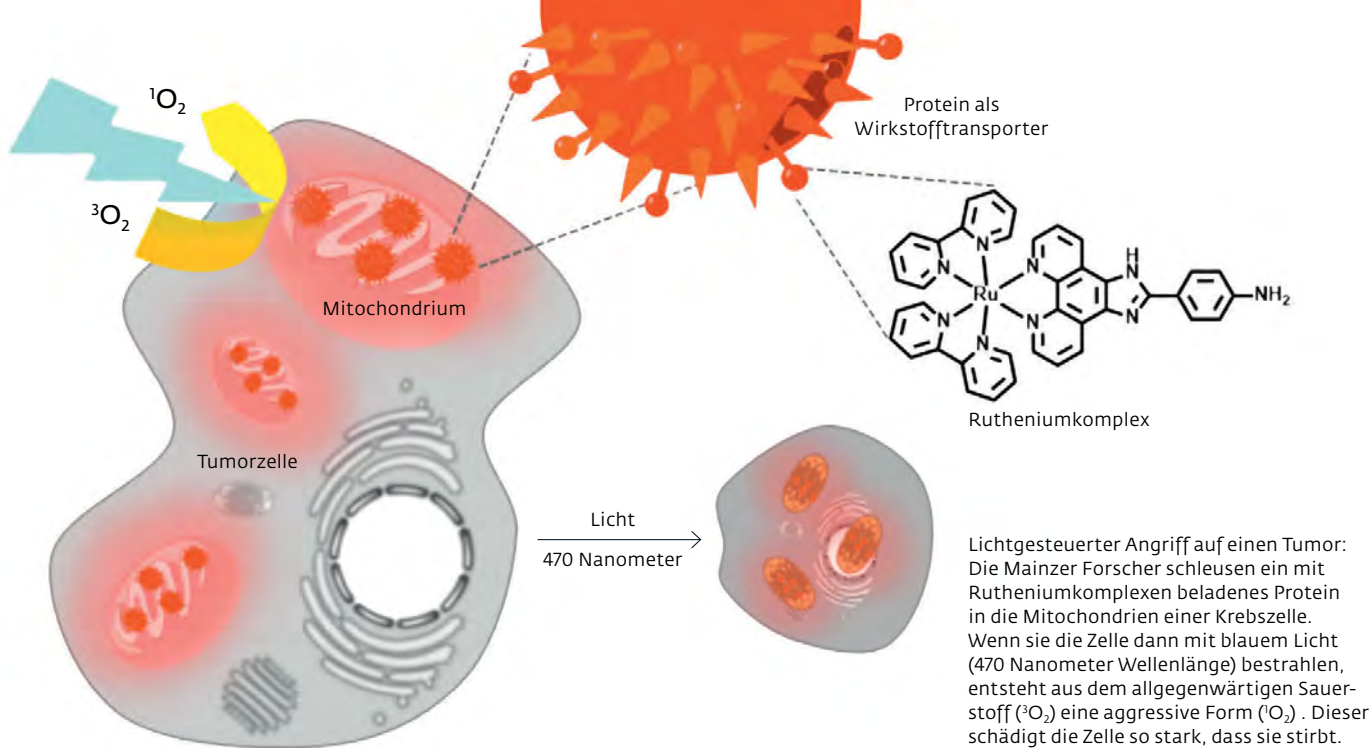
Die Eigenschaften der Aminosäuren werden durch charakteristische molekulare Gruppen – Chemiker sprechen von Funktionen – bestimmt. Manche dieser wirken wie chemische Haken und Ösen, an denen sich andere Mole-

küle befestigen lassen, zum Beispiel die eines Wirkstoffs. Genau das machen Tanja Weil und ihre Mitarbeiter. Einige aussichtsreiche Kandidaten für Tierstudien, die potenzielle Wirkstoffe zunächst durchlaufen, haben sie inzwischen entwickelt – eine Teamleistung, betont Tanja Weil. Die findigsten Lösungen für ein Problem ergäben sich oft erst, wenn eine Gruppe bei einem Becher Kaffee in ihrem Büro diskutiere.

Das war auch so bei der ersten Hürde, die Weils Gruppe auf dem Weg zum Proteinfahrer für medizinische Wirkstoffe zu nehmen hatte: Um Proteine wie herkömmliche Polymere einzusetzen, muss man die verknäulten Aminosäureketten erst einmal entwirren. Dabei müssen Bindungen gelöst werden, die zwischen weit auseinanderliegenden Gliedern der Kettenmoleküle bestehen und das Protein in seine biologisch aktive Form falten. Die stärkeren chemischen Bindungen zwischen den einzelnen Gliedern der Aminosäurekette sollen jedoch intakt bleiben, um das Polymer nicht zu zerlegen. Was Biochemiker Denaturierung nennen, ist nichts anderes als das, was beim Braten eines Spiegeleis geschieht: Die Wärme bricht die Verknüpfungen auf, die dem Eiweißmolekül seine dreidimensionale Struktur geben. Die entfalteten Proteine flocken aus – das Ei gerinnt. Für jede Anwendung außer auf dem Teller sind die Eiweiße damit wertlos: „Man bekommt sie dann nie wieder in Lösung“, sagt Yuzhou Wu, die in Weils Abteilung eine Forschungsgruppe leitet und inzwischen Professorin an der Huazhong-Universität für Wissenschaft und Technik im chinesischen Wuhan ist.

Orchestriert die Teamleistung: Wenn Tanja Weil und ihre Mitarbeiter Proteine zu Nanotransportern für medizinische Wirkstoffe umfunktionieren, formuliert sie oft die Probleme – die Lösungen finden sich bei Diskussionen in der Gruppe.





Vor allem durch die Untersuchungen, die Yuzhou Wu anstellte, als sie mit Tanja Weils an der Universität Singapur forschte, hat die Gruppe einen Weg gefunden, die Proteine zu denaturieren, ohne dass sie ausflocken. „Bevor oder kurz nachdem wir sie entfalten, pflöpfen wir wasserlösliche Komponenten, etwa Polyethylenglycol, an bestimmte Aminosäurebausteine“, erklärt Yuzhou Wu. „So halten wir die denaturierten Proteine in Lösung.“

Polyethylenglycol, kurz Peg, macht das Eiweiß jedoch nicht nur wasserlöslich, es setzt ihm gleichzeitig eine Tarnkappe auf: Der Charme des Proteintransporters beruht auch darauf, dass er biologisch abbaubar ist. Das sollte aber nicht geschehen, ehe der Arzneifrachter sein Ziel erreicht hat. Und so trifft es sich gut, dass die Peg-Anhängsel die Immunzellen täuschen: Die körpereigenen Ordnungskräfte erkennen das entfaltete Protein zunächst nicht, wodurch es länger in der Blutbahn zirkuliert und erst mit Verzögerung als Fremdkörper beseitigt wird.

Auf solche gut getarnten Nanotransporter haben Yuzhou Wu und andere Mitarbeiter in Tanja Weils Gruppe bereits verschiedene Wirkstoffe gepackt, zum Beispiel Doxorubicin – ein Wirkstoff gegen die akute myeloische Leukämie, an der vor allem ältere Menschen erkranken. Da das Zellgift starke Nebenwirkungen hat, wollten die Mainzer Chemiker es gern mit einem Protein

direkt zu den Tumorzellen transportieren. In diesem Fall setzen sie als Nano-frachter auf das Serumalbumin (HSA) aus dem menschlichen Blut. „Wir beladen HSA in dem Schritt mit Doxorubicin, den wir am präzisesten kontrollieren können, nämlich direkt nach der Denaturierung“, sagt Yuzhou Wu.

WIRKSTOFFTRANSPORT IN DIE ORGANELLEN DER ZELLEN

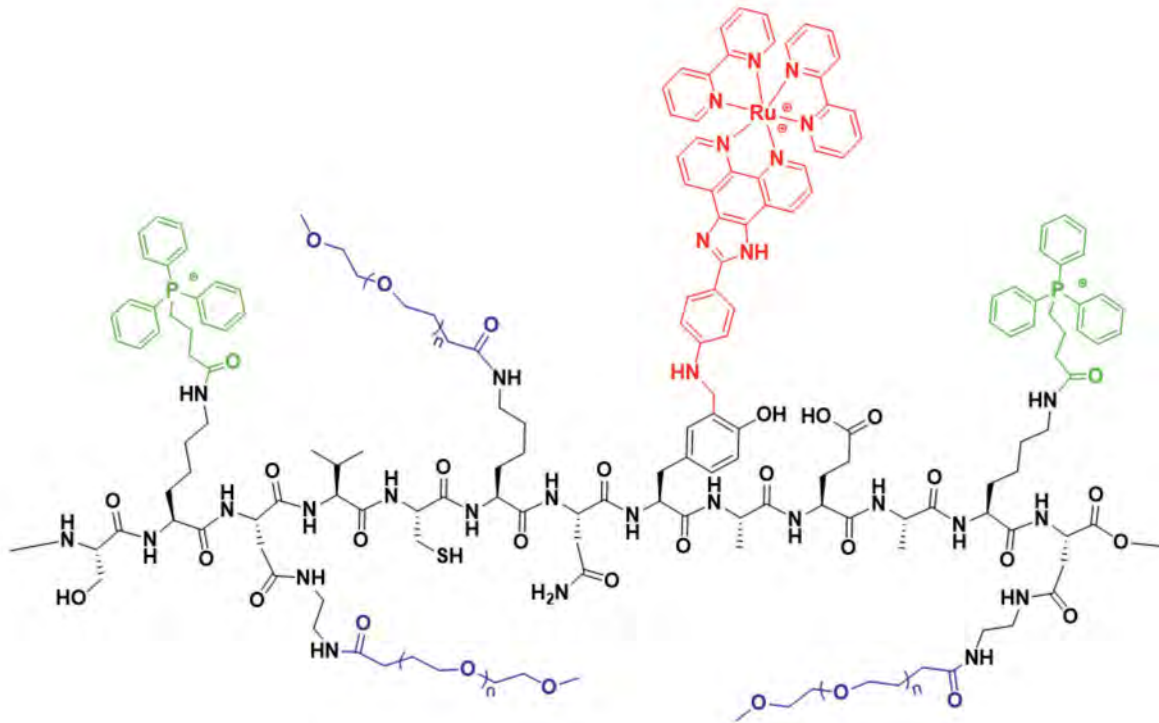
Die Wirkstoffmoleküle hängen die Forscher an Thiolgruppen, schwefelhaltige Baueinheiten der Aminosäure Cystein. „Und da alle HSA-Moleküle die gleiche Anzahl an zugänglichen Thiolgruppen besitzen, trägt jedes Proteinmolekül anschließend etwa 27 Wirkstoffmoleküle“, sagt Yuzhou Wu. Abweichungen gibt es nur, wenn im Reaktionsgemisch kein Wirkstoffmolekül zu einer Thiolgruppe findet.

Und die geballte Wirkstoffladung auf dem Protein ist effektiv, wie erste Tests zeigen. In Kulturen von verschiedenen Leukämiezellen tötete bereits eine vergleichsweise kleine Menge an Doxorubicin-beladenen Biopolymeren die Hälfte der Tumorzellen. Und in einer Studie über insgesamt zwölf Wochen, in der Mäusen zu Beginn unterschiedlich behandelte Krebszellen injiziert wurden, bestätigte sich die Wirkung. Während Mäuse im Mittel 69 Tage überlebten, wenn die Leukämiezellen nur mit Doxorubicin behandelt

worden waren, lebten nach der gesamten Laufzeit der Studie noch alle Tiere, in deren Tumorzellen die Forscher die mit Zellgift beladenen Proteinfrachter geschickt hatten.

Mittlerweile verfolgt Tanja Weils Gruppe einen Ansatz, um den Gifttransport zu Tumorzellen noch effektiver zu gestalten. Entstanden ist die Idee dazu, nachdem ein Projekt nicht so erfolgreich verlaufen war, wie die Wissenschaftler gehofft hatten. Sabyasachi Chakraborty, der in Weils Gruppe als Postdoktorand forscht, hatte einen HSA-Frachter mit etwa zehn Komplexen von Ruthenium bepackt. An diesem Edelmetall wird mit Lichtenergie eine aggressive Form des Sauerstoffs produziert. Außerdem versahen die Forscher den Rutheniumkomplex mit einem menschlichen Hormon, das gezielt an Rezeptoren auf Tumorzellen bindet.

„In Zellkulturen haben wir dann beobachtet, dass die Nanotransporter tatsächlich in Tumorzellen gehen und ihre Toxizität ansteigt, wenn wir sie mit Licht bestrahlen“, erklärt der Chemiker. „Die Kombination mit dem Hormon machte sie zudem spezifisch für Krebszellen.“ Doch im Vergleich zur Behandlung mit reinen Rutheniumkomplexen wirkte der Nanotransporter, der gezielt in die Tumorzellen geschickt wurde, nur unwesentlich besser. „Da waren wir schon enttäuscht“, gesteht Sabyasachi Chakraborty. Die Mainzer Chemiker fanden sich damit nicht ab und fragten



sich, woran es lag, dass ihre Fracht nicht stärker wirkte. Und wie sich das ändern lassen könnte.

In einer Teamsitzung stand irgendwann der entscheidende Vorschlag im Raum: Man solle doch versuchen, den Wirkstoff gezielt in bestimmte Organellen der Zelle zu transportieren, statt ihn bloß in eine Tumorzelle zu schleusen und dort sich selbst zu überlassen. Als vielversprechendes Ziel für einen solchen Angriff hatten die Chemiker dann schnell die Mitochondrien, die Kraftwerke der Zellen, ausgemacht: Sie vermuteten, diese würden besonders empfindlich auf die aggressive Form des Sauerstoffs reagieren. Also programmierte Sabyasachi Chakraborty die Frachter darauf, Mitochondrien anzu-steuern – ein passendes molekulares Adressschild fand er in einer Art Katalog, den Biochemiker bereits für die gezielte Navigation zu den verschiedenen Organellen zusammengestellt hatten.

Als die Forscher den Transporter nun auf die Mitochondrien der Krebszellen ansetzten, war die Wirkung durchschlagend: 200-mal stärker als der reine Wirkstoff wirkte das Zellgift, wenn es mit einem Nanotransporter dorthin geschleust wurde. Für jeden der zehn Wirkstoffkomplexe auf dem Frachter bedeutet das eine 20-fach erhöhte Toxizität. „Das war schon toll“, sagt Tanja Weil. Dass schon kleinste

Wirkstoffmengen Tumorzellen effektiv bekämpfen, wenn sie nur an den richtigen Ort in der Krebszelle gelangen, könnte der Krebsmedizin einen großen Fortschritt bringen. Auch die Ulmer Medizinprofessorin Michaela Feuring-Buske hofft, dass sich auf diese Weise die Nebenwirkungen von Medikamenten deutlich verringern lassen. Das gilt womöglich nicht nur für die Substanz, die bei Licht mit der heilsamen Zerstörung bösartiger Zellen beginnt, sondern auch für andere Wirkstoffe.

DIAMANTEN ALS BIOLOGISCHE NANOSENSOREN

Dass ein Arzneistoff quasi auf Knopfdruck erst anspringt, wenn er an seinem Zielort beleuchtet wird, ist für die Forschung praktisch – für die medizinische Anwendung eher nicht. Denn das Licht, das den aggressiven Sauerstoff freisetzt, dringt nicht weit in den Körper ein. Die Krebszellen im Knochenmark, die den Körper mit unbrauchbaren Blutkörperchen fluten, lassen sich so nicht bekämpfen.

Gemeinsam mit den Medizinern der Ulmer Uniklinik hat Tanja Weil aber auch dafür eine mögliche Anwendung gefunden: Nach einer anfänglichen Chemotherapie können Patienten mit einer myeloischen Leukämie zur Konsolidierung der Therapie mit ei-

ner Stammzelltransplantation behandelt werden. Wenn sich dafür kein geeigneter Spender findet, werden dem Patienten die Stammzellen selbst entnommen. Die lichtgesteuerte Therapie würde sich eignen, diese von Krebszellen zu befreien. Voraussetzung für den Erfolg des Vorgehens ist, dass das Medikament die bösartigen Zellen stärker schädigt als die gesunden.

Als die Mainzer und Ulmer Wissenschaftler das untersuchten, erlebten sie eine Überraschung: „Wir sahen einen Trend, dass der proteingebundene Rutheniumwirkstoff bevorzugt Krebszellen schädigt“, sagt Tanja Weil. Und zwar, ohne dass die Forscher sie mit komplizierten Adressschildern gezielt zu den Krebszellen dirigierten. „Das konnten wir zunächst nicht erklären, und die Mediziner hatten auch keine Ahnung“, bekennt die Chemikerin. Auch bei diesem Rätsel brachte eine Teamsitzung die Forscher auf eine Spur. Der folgen sie gerade und könnten dabei einen neuen Ansatz für eine gezielte Krebstherapie entdecken.

Den dürfte auch ein weiteres Projekt bieten, das Weils Gruppe zurzeit intensiv bearbeitet: Gemeinsam mit Physikern der Universität Ulm wollen die Wissenschaftler Diamanten als biologische Nanosensoren einsetzen. „Ich habe Diamanten immer eher langweilig gefunden“, sagt Tanja Weil. „Die sind to-

Links Zu einem vielseitigen Nanotransporter hat Tanja Weils Team ein Serumalbumin-Protein (schwarz) ausgebaut. Das Eiweiß, von dem hier nur ein Teil zu sehen ist, kommt im menschlichen Blut vor. Daran haben die Forscher verschiedene Anhängsel befestigt: Polyethylenglycol (blau) macht das Protein wasserlöslich und schützt es vor einem raschen Abbau im Körper. Der Rutheniumkomplex (rot) erzeugt bei Licht eine aggressive Form des Sauerstoffs, die als Zellgift wirkt. Die Triphenylphosphin-Gruppen (grün) navigieren den Wirkstofffrachter in die Mitochondrien, wo das Zellgift besonders gut wirkt.

Rechts Christiane Seidler, Wenhui Dong und Tanja Weil (von links) nehmen Lösungen von proteinbeschichteten Nanodiamanten in Augenschein. Durch gezielte Verunreinigungen mit Fremdatomen leuchten die Diamanten in unterschiedlichen Farben. Sie ermöglichen es, Wirkstofftransporte in Zellkulturen zu verfolgen.



tal hart und schön als Schmuckstein, aber sonst materialchemisch nicht wirklich interessant, da sie sich nur schwer kontrolliert funktionalisieren lassen.“ Doch dann kamen Fedor Jelezko und Martin Plenio, zwei Ulmer Physiker, in Weils Büro vorbei. Die drei Wissenschaftler diskutierten, was Diamanten können. Durch Defekte, winzige Fehlstellen, an denen im Kohlenstoffgitter andere Atome wie etwa Stickstoff sitzen, lassen sie sich unter anderem als Nanosensoren für die Strukturaufklärung beispielsweise in einer besonders sensitiven Kernspintomografie einsetzen. „Die vielfältigen Möglichkeiten fand ich dann schon sehr spannend“, sagt Tanja Weil.

Also entschlossen sich die drei Wissenschaftler, zusammen an den diamantenen Nanosensoren zu forschen. „Denn erstens: Wir waren uns alle sympathisch, und zweitens: Wir waren überzeugt, dass wir durch unsere fachübergreifende Kompetenz einen wissenschaftlichen Unterschied machen können“, sagt Tanja Weil. Für sie bestand dieser Unterschied vor allem darin, dass es Diamantsensoren erlauben würden, den Weg von wirkstoffbeladenen Biopolymeren im Körper und womöglich gar in einer Zelle zu verfolgen. „Deshalb wäre es interessant, im Kernspintomografen gucken zu können, ob unsere mit Nanodiamanten

versehenen Biopolymere im Patienten dorthin gehen, wo wir sie haben wollen“, sagt die Forscherin.

EIN SYNERGY GRANT ÜBER GUT ZEHN MILLIONEN EURO

Die Begeisterung, mit der die Forscherin von diesem Projekt erzählt, teilten mögliche Geldgeber anfangs nicht. Die immer gleiche Antwort auf die Förderanträge, die sie gemeinsam mit ihren Partnern gestellt hatte: Es sei viel zu unsicher, ob sich das Vorhaben um-

setzen lasse. Irgendwann war der Frust groß. Schließlich entschlossen sich die Forscher zu einem letzten Versuch: Sie bewarben sich um einen Synergy Grant des Europäischen Forschungsrats ERC – und ergatterten unter 800 Anträgen eine von elf Förderungen über gut zehn Millionen Euro. Damit arbeiten die Mainzer und Ulmer Forscher nun an Transportern für die Nanomedizin, die Wirkstoffe nicht nur gezielt zu einem Tumor manövrieren, sondern sich dabei auch genau beobachten lassen. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

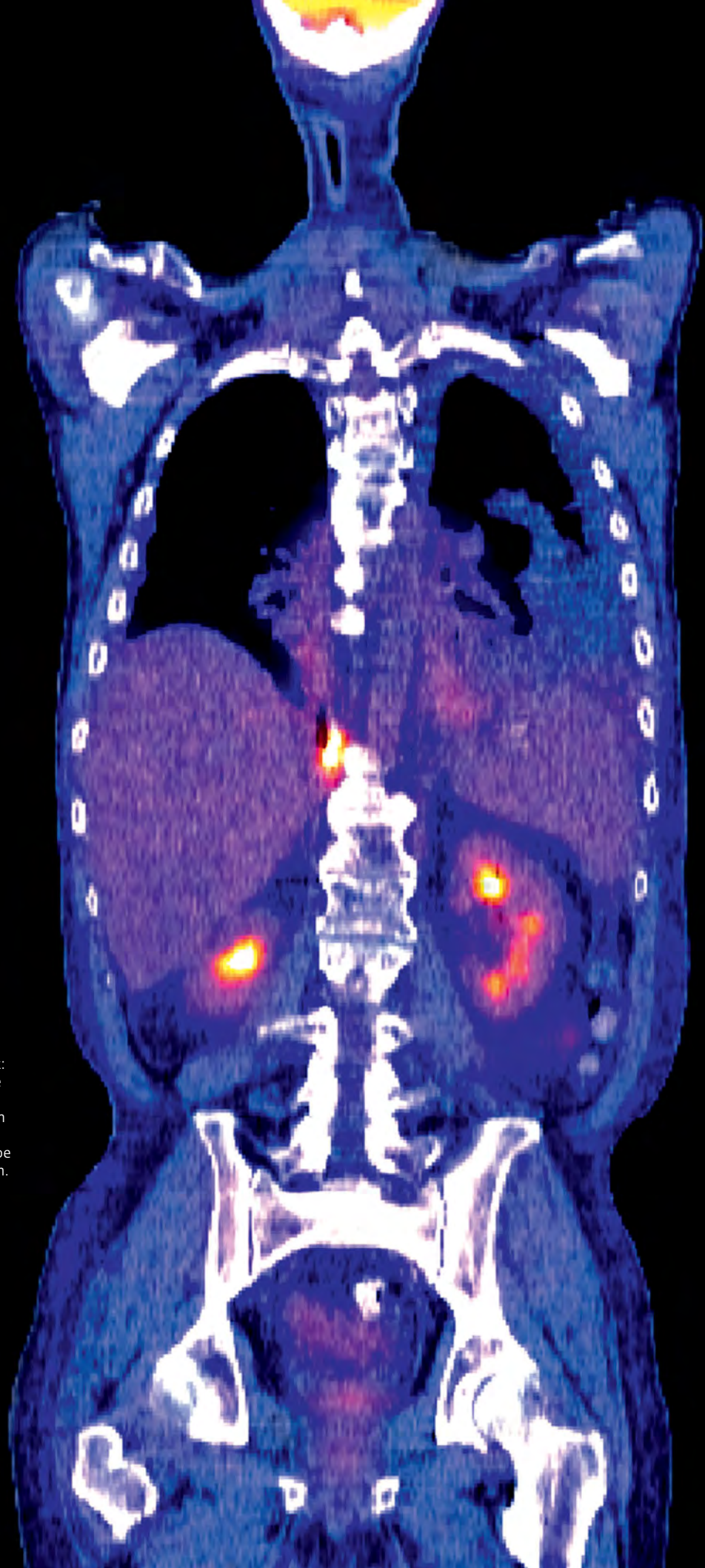
- Proteine lassen sich als Biopolymere von genau definierter Länge und Zusammensetzung mit medizinischen Wirkstoffen beladen und gezielt zu Tumorzellen steuern.
- Wenn solche Nanotransporter Zellgifte in Organellen wie etwa die Mitochondrien schleusen, könnte die Effektivität einer Krebstherapie enorm steigen.
- Von Nanodiamanten versprechen sich die Forscher nachweisbare Wirkstofftransporter, deren Weg im Körper sich bis in die Zellen verfolgen lässt.

GLOSSAR

Biopolymer: Ein Kettenmolekül, das von einem Organismus synthetisiert wird. Biopolymere sind neben Proteinen auch Polysaccharide und die DNA.

Chemische Funktion: Der Teil eines Moleküls, der die Eigenschaften und das Verhalten in chemischen Reaktionen prägt.

Nanomedizin: Anwendung der Nanotechnologie in der Medizin.



In der Krebsdiagnostik weit verbreitet: Die Positronen-Emissions-Tomografie ermöglicht es, Tumore wie hier in der Lunge zu identifizieren, weil sich darin etwa Glucose mit Fluor-18 anreichert. Auf den Aufnahmen ist krankes Gewebe deutlich als hell leuchtend zu erkennen.

Stoff für erhellende Diagnosen

In der Krebsdiagnostik setzen Ärzte schon heute häufig auf die Positronen-Emissions-Tomografie, kurz PET. Um die Methode auch bei anderen Krankheiten anwenden zu können, brauchen sie jedoch geeignete Tracer-Substanzen mit radioaktivem Fluor-18 – eine Herausforderung für **Tobias Ritter** und sein Team am **Max-Planck-Institut für Kohlenforschung** in Mülheim an der Ruhr. Die Chemiker suchen nach Wegen, vielfältige Moleküle mit Fluor-18 zu versehen und so die Möglichkeiten der Mediziner zu erweitern.

TEXT **KARL HÜBNER**

Es ist eine kleine, eher unscheinbare Edelstahlbox, die ein Bote alle paar Tage frühmorgens am Kaiser-Wilhelm-Platz 1 im Mülheimer Süden abliefern. Zwei Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Kohlenforschung stehen dann schon am Gebäudeeingang bereit, um das kantige Metallköfferchen in Empfang zu nehmen. Ein paar Unterschriften, dann geht es direkt ins Labor damit. Die dicke Sicherheitstür und die Aufschrift „Radioaktiver Kontrollbereich“ machen klar: In diesem Labor wird mit radioaktiven Substanzen gearbeitet.

Eine solche befindet sich auch in der gerade angelieferten Box. Es handelt sich um Fluor-18. Im Gegensatz zu natürlichem Fluor mit der Massenzahl 19 ist das künstlich hergestellte Fluor-18 sehr instabil. Es wandelt sich mit einer Halbwertszeit von 110 Minuten zu Sau-

erstoff-18 um. Weil dabei auch energiereiche Strahlung frei wird, müssen die Mülheimer Chemiker mit Fluor-18 in einem Speziallabor arbeiten. Und sie müssen schnell arbeiten, denn: Nach 110 Minuten ist bereits die Hälfte der Fluoratome verschwunden, nach 220 Minuten drei Viertel und so weiter.

MOLEKÜLE FÜR NEUARTIGE DIAGNOSTISCHE ANWENDUNGEN

Mit ihrer Arbeit gegen die Uhr verfolgen die Forscher ein konkretes Ziel. „Wir suchen nach Wegen, um Fluor-18 in Moleküle einzubauen, die neuartige diagnostische Anwendungen der Positronen-Emissions-Tomografie erlauben“, erklärt Tobias Ritter. Seit 2015 ist der Chemiker am Mülheimer Max-Planck-Institut Direktor der Abteilung Organische Synthese. Die Fluorchemie



und insbesondere das kurzlebige Fluor-18 sind Schwerpunkte dieses Bereichs. Die Positronen-Emissions-Tomografie ist in der Tumordiagnostik bereits ein bewährtes Verfahren. Dieses ist auf radioaktive Substanzen angewiesen, die Positronen freisetzen. Für die erforderlichen Syntheseveruche mit solchen Positronen-Lieferanten wurde vor einem Jahr eigens das radiochemische Speziallabor eingerichtet.

WIE GUT GELINGT ES, SUBSTANZEN ZU FLUORIEREN?

Dessen Herzstück sind zwei Kammern, die von Bleiwänden und einem dicken Bleiglasfenster umgeben sind. Hot Cells, heiße Zellen, heißen derart abgeschirmte Kammern im Fachjargon. Und in eine solche befördern die Mülheimer Forscher nun den metallischen Zylinder, den sie aus der angelieferten Edelstahlbox befreit haben. Er ist kaum größer als eine normale Konservendose, wiegt aber 15 Kilogramm. „Massives Blei“, erklärt Matthew Tredwell, der in Ritters Abteilung das radiochemische Labor

leitet. Erst als die Hot Cell wieder komplett abgeriegelt ist, entfernt eine Mitarbeiterin den Deckel des Zylinders. Sie hantiert dabei hoch konzentriert mit stählernen Greifarmen, die in die abgeschlossene Kammer hineinragen und sich von außen steuern lassen.

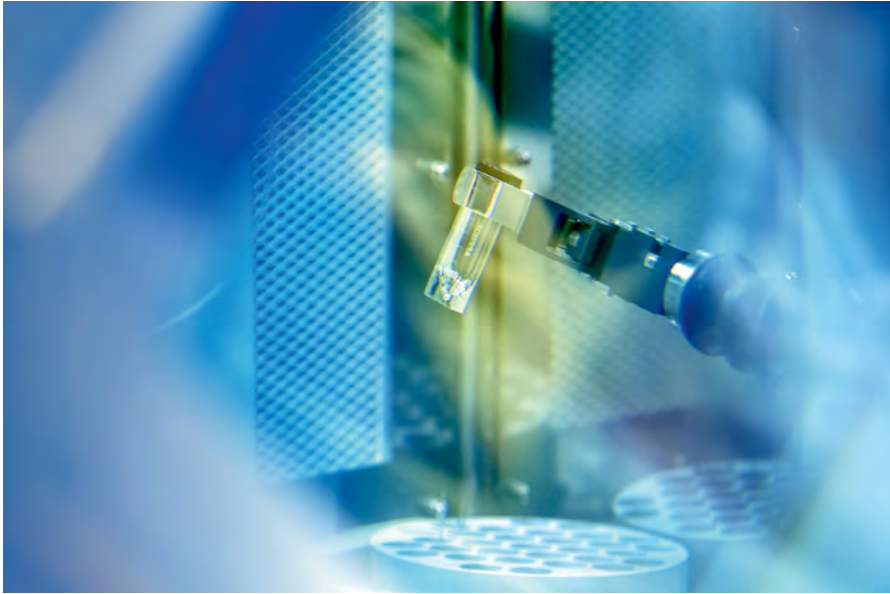
Dann entnimmt sie das, worauf es bei der Fracht ankommt: eine kleine Ampulle mit einer klaren Flüssigkeit. „Das ist einfaches Wasser, in dem Fluorid-18-Ionen gelöst sind“, erklärt Tredwell. Und als erschienen die wenigen Milliliter Flüssigkeit angesichts einer Verpackung von 15 Kilogramm nicht schon winzig genug, fügt der Chemiker noch hinzu, dass es sich bei der Menge Fluor in der Flüssigkeit gerade einmal um etwas mehr als ein Piko-gramm handelt, also den billionsten Teil eines Gramms.

Und obwohl dies so unvorstellbar wenig ist, so ist es doch reichlich für die Versuche, die die Wissenschaftler an diesem Tag geplant haben. Sie wollen testen, wie gut es gelingt, andere Substanzen zu fluorieren – also ein Fluoratom in sie einzubauen. Die hierfür

benötigten Synthesebausteine hat die Arbeitsgruppe zuvor schon hergestellt. Sie stehen nun in kleinen Gläschen in der Hot Cell bereit. Der Rest geht automatisch: Eine Art Kanüle steuert die jeweiligen Ampullen an, entnimmt eine genau festgelegte Menge und führt die gewünschten Reaktionspartner zusammen. Um danach sofort untersuchen zu können, ob und mit welcher Ausbeute und Reinheit die gewünschten Produkte gebildet wurden, befinden sich auch Analytikgeräte in dem radiochemischen Labor. In der jüngsten Vergangenheit haben diese immer wieder gezeigt, dass die Forscher auf einem guten Weg sind.

IN DEM VERFAHREN STECKT EIN GROSSES POTENZIAL

Das findet auch Verena Ruhlmann spannend. Die Medizinerin war dabei, als das Max-Planck-Institut sein Speziallabor Ende 2016 den Mülheimer Bürgern vorstellte. Sie war an diesem Tag sogar als Referentin eingeladen. Auf den ersten Blick überraschend, denn



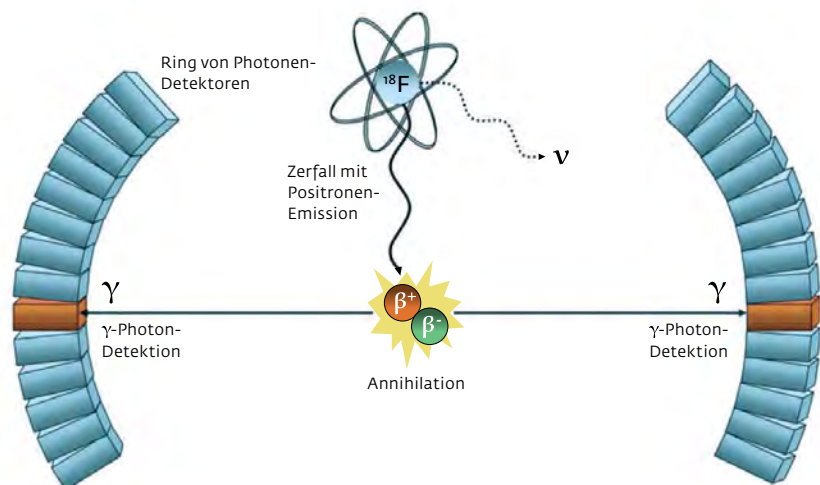
Sicherer Zugriff: In einem Speziallabor steuert Marta Brambilla (links) einen Greifarm, der in eine Kammer für radiochemische Experimente hineinragt. Diese Hot Cell schirmt radioaktive Strahlung durch Bleiwände und Bleiglasfenster ab. Darin stellen die Chemiker alle Komponenten für geplante Reaktionen in kleinen Gläschen bereit (rechts), darunter auch Substanzen, die radioaktives Fluor-18 enthalten. Ein Roboter mischt die Ausgangsstoffe dann für die Reaktionen zusammen.

Ruhlmann hat mit dem Max-Planck-Institut nichts zu tun. Ihr Arbeitsplatz befindet sich vielmehr einige Kilometer ostwärts. Im benachbarten Essen ist sie am Universitätsklinikum Oberärztin an der Klinik für Nuklearmedizin. An jenem Abend sprach sie darüber, was die Positronen-Emissions-Tomografie in ihrer Klinik leistet. Etwa in der Tumordiagnostik, wo es mit der PET zum Beispiel gelingt, eine gutartige von einer bösartigen Geschwulst zu unterscheiden. Veränderungen der Lymphknoten sichtbar zu machen. Oder zu zeigen, ob und wie gut eine Therapie angeschlagen hat. Und auch, ob ein Tumor nach einer zunächst erfolgreichen Behandlung vielleicht zurückgekehrt ist. Die Nuklearmedizinerin schwärmte von einem „ganz tollen Verfahren“.

Indirekter Nachweis: Beim Betazerfall von Fluor-18 werden ein Positron (β^+), das Antiteilchen des Elektrons, und ein Neutrino (ν) frei. Das Positron annihiliert sich sofort mit einem Elektron (β^-), wobei genau in entgegengesetzter Richtung zwei γ -Photonen emittiert werden. Diese werden detektiert, sodass sich rekonstruieren lässt, wo Fluor-18 zerfallen ist.

Schon jetzt untersuche ihre Abteilung jeden Tag rund 25 Patienten mittels einer PET. Die Medizinerin betonte aber auch, dass sie für die PET künftig noch ein viel größeres Potenzial sieht. Sowohl in der Tumordiagnostik als auch bei anderen Erkrankungen wie etwa Morbus Alzheimer, der Parkinsonkrankheit oder Herz-Kreislauf-Störungen.

Es ist diese Vision, die Einrichtungen wie das Universitätsklinikum Essen und das Max-Planck-Institut für Kohlenforschung zusammenbringt. Denn die neuen Substanzen, die Ritters Team im radiochemischen Labor herzustellen versucht, könnten eines Tages auch für Nuklearmediziner wie Verena Ruhlmann interessant werden. >





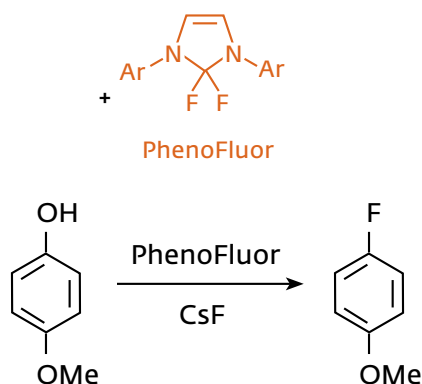
„Wir brauchen für jede PET-Untersuchung natürlich eine Substanz, die Positronen freisetzt“, sagt die Oberärztin. Fluor-18 sei das mit Abstand bedeutendste Isotop für PET-Tracer, wie die Fachleute die Substanzen nennen, deren Spuren im Organismus sie während der Untersuchung verfolgen können.

Fluor-18 einfach in Form eines Fluoridsalzes zu verabreichen, wäre für die meisten PET-Untersuchungen allerdings witzlos. Es würde sich allenfalls in den Knochen anlagern, aber nicht dort, wo es für die meisten diagnostischen Aufgaben gewünscht ist. Daher versuchen Chemiker, das Fluor in Moleküle einzubauen, die sich als Tracer eignen. Das sind solche, die sich möglichst selektiv, also ausschließlich, an den für die Diagnose relevanten Stellen im Organismus anreichern. Diese Stellen werden dann von außen sichtbar.

TRACER, DIE AN PLAQUE IM GEHIRN ANDOCKEN

Das derzeit wichtigste dieser Moleküle ist eine Fluordesoxyglucose. Die Substanz ähnelt dem normalen Traubenzucker, Glucose. Einzige Veränderung: Ein Kohlenstoffatom trägt ein Fluoratom – ein Fluor-18. Im Organismus verhält sich der fluoridierte Zucker trotz dieser Modifikation fast wie Glucose. Die Sub-

Wegbereiter für neue PET-Anwendungen: Tobias Ritter und sein Team entwickeln Werkzeuge, um neue Tracer-Substanzen für die Diagnostik – etwa von Tumoren und Herz-Kreislauf-Erkrankungen – herzustellen.



Schlüsselreaktion: Tobias Ritter hat mit PhenoFluor eine Substanz gefunden, mit der sich OH-Gruppen gezielt durch Fluoratome ersetzen lassen.

stanz wandert also nach einer Injektion in die Blutbahn überall dorthin, wo es Zuckerbedarf gibt. In den meisten Tumorzellen ist dieser besonders groß. Daher werden Tumore dank Fluordesoxyglucose in einer PET-Untersuchung gut sichtbar.

Auch bei Verena Ruhlmann in der Essener Universitätsklinik gibt es ein radiochemisches Labor, in dem die Substanz jeden Tag frisch hergestellt wird, weil das radioaktive Isotop zu schnell zerfällt, um es auf Dauer zu lagern. Für die Patienten ist die besondere Kurzlebigkeit der PET-Tracer jedoch ein Vorteil. Denn so klingt die ohnehin geringe Radioaktivität in ihrem Organismus relativ schnell vollständig ab. Dazu trägt auch bei, dass Fluor-18 sich wie auch andere Tracer-Substanzen ausschließlich in stabile Isotope umwandelt und keine radioaktiven Folgeprodukte hinterlässt.

Wenn die PET-Visionen wahr werden sollen, dann sind neben dem fluorierten Zucker noch viele weitere PET-Tracer-Moleküle nötig. Etwa solche, die an der für bestimmte Demenzformen charakteristischen Plaque im Gehirn andocken – ein erster Alzheimer-Tracer ist bereits auf dem Markt. Oder solche, die in der Tumordiagnostik Vorhersagen ermöglichen würden, welches Krebsmedikament für einen individuellen Patienten das optimale ist.

Damit sie an ihre Ziele im Körper gelangen, müssen die jeweiligen Moleküle chemisch passend aufgebaut sein. Damit sie als Tracer funktionieren, müssen sie darüber hinaus aber zum Beispiel Fluor-18 enthalten. Genau da

fängt das Problem an – und die Arbeit der Mülheimer Chemiker.

FLUOR IST EXTREM REAKTIONSFREUDIG

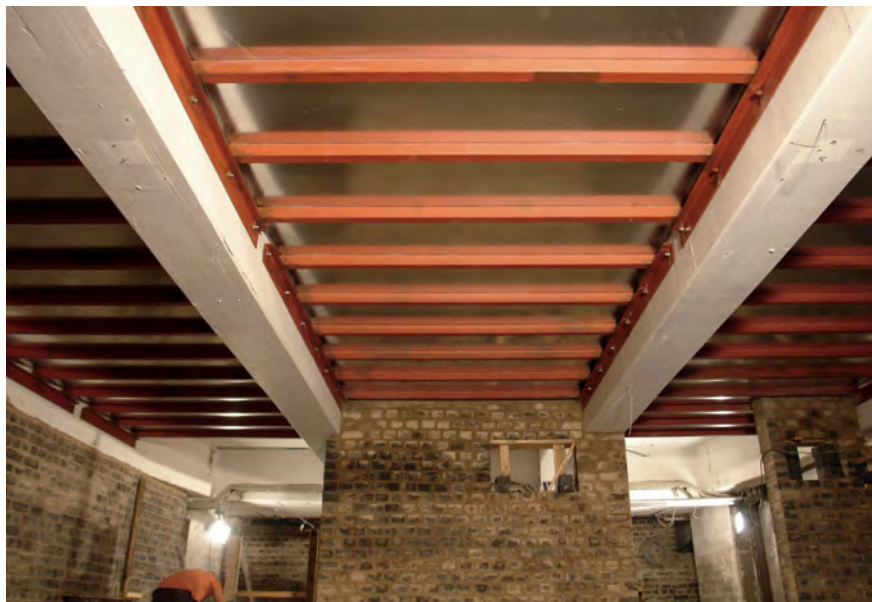
Wer Fluor in ein komplexeres organisches Molekül einbauen will, hat es nicht immer so leicht wie bei der Synthese von Fluordesoxyglucose, die mit einer einfachen Fluoridlösung gelingt. In der Regel muss man sich schon bei natürlichem Fluor-19 große Gedanken machen, wo es eigentlich herkommen soll. „Elementares Fluor scheidet in al-

ler Regel aus, da es viel zu reaktiv ist“, erklärt Tobias Ritter. Fluor ist so reaktionsfreudig wie kein anderes Element. Beim Fluorieren mit reinem Fluor würde dieses in den meisten Fällen daher gleich an mehreren Stellen im Molekül angreifen und nicht selektiv an der einen, gewünschten.

Hinzu kommt, dass elementares Fluor im Labor extrem schwer zu handhaben ist. In Verbindungen wiederum ist es oft so stabil gebunden, dass der Energieaufwand sehr groß ist, um es zu aktivieren. Nicht zuletzt diese Eigenschaft hat einst den Fluorchlorkohlenwasser-

Ergebniskontrolle: Mit der Hochleistungsflüssigkeitschromatografie, kurz HPLC, analysiert Matthew Tredwell, ob sich bei einer Reaktion die gewünschten Produkte gebildet haben.





Strahlensicherer Bau: Auf stabilen Trägern in der Decke des radiochemischen Speziallabors sind Stahlplatten montiert, auf denen Bleisteine liegen (oben). Die Wände sind aus Strahlenschutzsteinen gemauert, die so dunkel sind, weil sie große Mengen Eisenoxid enthalten (unten links). Mit dem Mörtel werden Eisenoxidkugeln vermischt (unten rechts).



mit dem vergänglichen Fluor-18 nicht. Der Aufbau eines komplexen Moleküls verläuft häufig über zehn oder noch mehr Schritte, die jeweils einige Zeit benötigen. Würde man das radioaktive Fluor in einer frühen Phase einbauen, wäre es im fertigen Molekül kaum noch vorhanden. „Daher müssen wir bei Fluor-18 einen Weg finden, es erst im letzten oder vielleicht vorletzten Reaktionsschritt einzubauen“, sagt Ritter und fügt sofort hinzu: „Genau das ist sehr schwierig.“

OH-GRUPPEN LASSEN SICH GEZIELT ERSETZEN

Im Jahr 2011 allerdings horchte die Fachwelt auf. Gemeinsam mit zwei Kollegen publizierte Ritter, der damals noch an der Harvard University in Boston forschte, in einem Fachmagazin einen Weg, wie sich OH-Gruppen in einer bestimmten Klasse von Molekülen gezielt durch Fluoratomer ersetzen lassen. Herzstück des Verfahrens war ein Reagens, das später den kommerziellen Namen PhenoFluor erhielt. Die Forscher stellten fest, dass sich damit eine ganze Reihe auch recht komplexer organischer Moleküle mit guter Ausbeute fluorieren ließ. Einzige Voraussetzung: Die Ausgangssubstanz musste dort, wo später das Fluor sitzen sollte, eine OH-Gruppe tragen. Ein Meilenstein.

Doch eine Sache gelang auch mit PhenoFluor nicht. Der Einbau von

stoffen und auch der Fluorchemikalie Teflon® zu großen Karrieren verholfen.

Bei Fluor-18 kommt die Kurzlebigkeit erschwerend hinzu. Sie zwingt Tobias Ritter und seine Mitarbeiter, komplett umzudenken. „Normalerweise ist es bei komplexen Zielmolekülen so, dass ein Chemiker versuchen würde, das Fluor in einem möglichst frühen

Reaktionsschritt einzubauen“, erklärt der Wissenschaftler. „Denn mit jeder weiteren Stufe wird das Molekül komplexer. Und damit das Risiko größer, dass die Fluorierung nicht mehr selektiv ist, sondern an verschiedenen Stellen im Molekül stattfindet.“

Bereits in einem frühen Stadium der Synthese zu fluorieren, geht aber

» Wir haben den chemischen Baukasten erweitert, mit dem wir Fluor-Tracer für die PET herstellen können.

Fluor-18. Das Problem war, dass PhenoFluor zwei Fluoratome enthält, die so gleichwertig sind, dass sich nicht steuern lässt, welches der beiden am Ende den eigentlichen Fluorierungsschritt durchführt. „Wir hätten ein PhenoFluor mit zwei F-18-Atomen herstellen müssen, aber das ist aus technischen Gründen nicht möglich, weil Fluor-18 immer mit Fluor-19 verunreinigt ist“, erklärt Tobias Ritter. Es musste also ein anderes Reagens her.

Es dauerte fünf weitere Jahre, ehe die Forscher das Problem gelöst hatten. Ihr Trick bestand darin, zunächst ein Reagens einzusetzen, das ähnlich wie PhenoFluor aufgebaut ist, aber anstelle der beiden Fluoratome zwei Atome des chemischen Verwandten Chlor enthält. Mit dieser Substanz lässt sich eine ähnliche Reaktion vornehmen wie mit PhenoFluor. Vor deren letztem Schritt greifen die Chemiker allerdings noch einmal ein. „In diesem Moment liegt eines der Chloratome als Chloridion vor, und genau das tauschen wir dann mit einer gängigen Technik gegen ein Fluorid-18-Ion aus“, so Ritter. Dieses sorgt dafür, dass die OH-Gruppe gegen das Fluor-18 getauscht wird.

„Mit dieser Reaktion haben wir den chemischen Baukasten erweitert, mit dem wir Fluor-Tracer für die PET herstellen können“, sagt Ritter. Doch ganz so schnell geht es nicht. Denn welche Moleküle es genau sein werden, die die medizinische Diagnostik am Ende wirklich benötigt, steht in vielen Fällen noch gar nicht fest. Um medizinischen Bedarf und chemisches Rüstzeug enger zusammenzubringen, kooperiert Ritters Abteilung mit klinischen Einrichtungen wie den Universitätskliniken in Essen oder auch dem Massachusetts General Hospital in Boston. Das Ziel: geeignete Moleküle für ganz konkrete Einsatzgebiete

zu ermitteln und für sie praktikable Synthesewege zu entwickeln. Im zweiten Schritt müsste dann noch Fluor-18 in diese Moleküle integriert werden, damit sie als PET-Tracer funktionieren.

Ob dabei die bereits entwickelten Fluorierungswerkzeuge schon genügen, hängt vom jeweiligen Zielmolekül ab und lässt sich daher noch nicht sagen. Ohnehin arbeiten die Forscher

ja in ihrem radiochemischen Labor daran, den Werkzeugkasten für Synthesen mit Fluor-18 zu ergänzen. Schließlich soll das Spektrum fluorierbarer Molekülklassen noch größer werden. Der Bote wird daher auch weiterhin regelmäßig am Kaiser-Wilhelm-Platz vorfahren und sein 15 Kilogramm schweres Metallkofferchen mit dem billionstel Gramm Fluor-18 ausladen. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Für die Positronen-Emissions-Tomografie werden Tracer-Moleküle mit radioaktiven Atomen wie Fluor-18 benötigt. Wegen der Kurzlebigkeit dieser Atome sind solche Moleküle jedoch schwer zu synthetisieren.
- Chemiker um den Max-Planck-Direktor Tobias Ritter entwickeln Methoden, um Fluor-18 gezielt an gewünschten Stellen in einem Molekül anzubringen. Die entsprechenden Experimente machen sie in einem radiochemischen Speziallabor.
- Erster Erfolg: ein Syntheseweg, der in vielen, auch komplexen organischen Molekülen OH-Gruppen durch Fluor-18 ersetzt. Künftig möchten die Max-Planck-Forscher diesen Weg weiter optimieren und auf noch komplexere Molekülklassen ausweiten.

GLOSSAR

Halbwertszeit: Die Zeit, nach der sich die Menge eines radioaktiven Isotops halbiert hat. Jedes radioaktive Isotop besitzt eine konstante Zerfallsgeschwindigkeit – und damit eine feste und eindeutige Halbwertszeit.

Isotop: Chemische Elemente können in verschiedenen Atomversionen auftreten. Grund ist eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen im Atomkern. Die verschiedenen Versionen ein und desselben Elements nennt man Isotope.

Positron: Elementarteilchen, das auch als Antiteilchen aufgefasst wird. Es ist genauso groß und schwer wie ein Elektron, allerdings elektrisch entgegengesetzt, nämlich positiv geladen. Ein Positron vereinigt sich mit einem Elektron. Dabei wird Energie in Form von zwei Gammaquanten frei. Da alle Materie Elektronen enthält, erfolgt die Vereinigung praktisch sofort, sodass Positronen immer nur kurz existieren.

Positronen-Emissions-Tomografie (PET): Dabei handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren, das wie die Magnetresonanztomografie (MRT) oder die Computertomografie (CT) in der Lage ist, Schnittbilder von einzelnen Schichten des Körperinneren zu erstellen. Für das Verfahren werden Substanzen mit den radioaktiven Elementen Fluor-18 oder Gallium-68 benötigt, die sich etwa in Tumoren anreichern und bei ihrem Zerfall Positronen abgeben. Diese Elementarteilchen vereinigen sich sofort, quasi am Ort ihres Entstehens, mit einem Elektron. Dabei werden zwei Strahlungspulse freigesetzt – und zwar in genau entgegengesetzter Richtung. Werden diese außerhalb des Körpers von Detektoren registriert, lässt sich der genaue Ort berechnen, an dem das Fluoratom zerfiel.

Wölfe verstehen Zusammenhänge besser als Hunde

Die Haustiere scheinen kognitive Fähigkeiten verloren zu haben, als sie domestiziert wurden



Wer auf den heißen Herd langt, verbrennt sich. Das Prinzip von Ursache und Wirkung lernt der Mensch von Kindesbeinen an. Doch auch Tiere wie der Wolf verstehen kausale Zusammenhänge, und das sogar besser als Hunde, wie eine Studie gezeigt hat. Ein Forschungsteam unter Beteiligung von Juliane Bräuer vom Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte hat das Verhalten von Hunden und von Wölfen untersucht, die an Menschen gewöhnt sind. Dafür versteckten die Forscher Futter und testeten, ob die Tiere Hinweise auf den gesuchten Ort verstanden. Hunde wie Wölfe konnten kommunikative Signale wie Blickbewegungen,

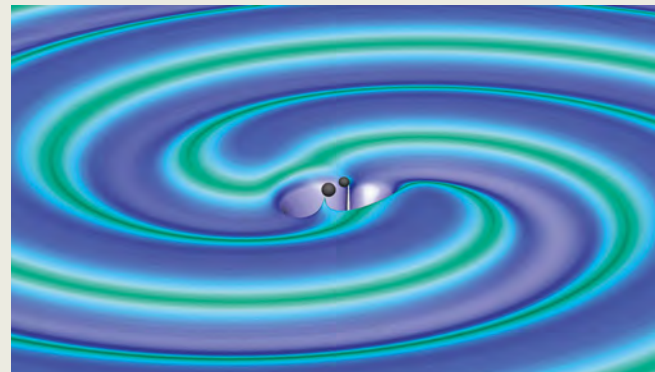
Fingerzeige oder Nicken verstehen, ebenso eine auf den fraglichen Ort gerichtete Geste. Als die Tiere erkennen sollten, dass ein Becher mit Futter, den man schüttelt, ein Geräusch erzeugt, ein leerer Becher aber nicht, gelang jedoch nur den Wölfen der richtige Schluss. „Das deutet darauf hin, dass die Domestikation einen Einfluss auf die kognitiven Fähigkeiten unserer heutigen Hunde hatte“, sagt Bräuer. „Allerdings kann man auch nicht ausschließen, dass Wölfe größeren Forschungsdrang zeigen müssen als Haustiere. Denn im Gegensatz zu Hunden müssen Wölfe selbst Futterquellen entdecken.“ (www.mpg.de/11476449)

Vielsagender Blick: Wölfe können Augenbewegungen und Gesten von Menschen richtig deuten, wenn es darum geht, verstecktes Futter zu finden.

Mit dem Dritten lauscht man besser

Gravitationswellen zweier schwarzer Löcher gehen dieses Mal auch dem italienischen Virgo-Detektor ins Netz

Die Beobachtung von Gravitationswellen wird allmählich zur Routine: Erneut haben Forscher diese von Albert Einstein vor hundert Jahren vorhergesagten Kräuselungen der Raumzeit registriert. Doch dieses Mal war neben den beiden US-amerikanischen Advanced-LIGO-Observatorien, die alle drei bisher registrierten Gravitationswellen entdeckt hatten, auch der italienische Virgo-Detektor im Spiel. Am 14. August beobachteten sämtliche drei Anlagen das Signal GW170814, das durch die Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern erzeugt wurde. Die kosmischen Monster besaßen 31 und 25 Sonnenmassen. Das Signal erreichte den LIGO-Detektor in Livingston rund acht Millisekunden vor dem in Hanford und etwa 14 Millisekunden vor Virgo in der Toskana. Aus der Kombination dieser Laufzeitunterschiede ließ sich die Richtung zur Quelle berechnen. So gelang es, GW170814 auf einen Bereich von 60 Quadratgrad am Südhimmel zwischen den Sternbildern Eridanus und Pendeluhr zu lokalisieren. Der Vergleich der gemessenen Wellenform mit Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie wiederum lieferte eine Entfernung von etwa 1,8 Milliarden Lichtjahren. An Entdeckung und Datenauswertung beteiligt waren auch dieses Mal Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik in Potsdam und Hannover. (www.mpg.de/11491142)



Signal aus dem All: Zwei schwarze Löcher mit 31 und 25 Sonnenmassen verschmelzen und senden dabei Gravitationswellen aus. Die Farben charakterisieren die Stärke des Feldes.



Über oder durch den Energiewall? Klassische Teilchen können eine Energiebarriere nur überwinden, wenn sie mit Energieaufwand darübergehoben werden. Quantenteilchen haben auch eine Chance, den Wall hinter sich zu lassen, wenn sie dafür eigentlich nicht genügend Energie besitzen – sie können durch das Hindernis tunneln.

Zeitmessung im Tunnel

Bei einem quantenmechanischen Effekt benötigen Teilchen einige Attosekunden, um eine Energiebarriere zu überwinden

Harry Potter kann vieles, was wir nicht können, auch durch Mauern gehen: Um zum Gleis 9 $\frac{3}{4}$ zu gelangen, wo der Zug zur Zauberschule Hogwarts hält, schlüpfen er und seine Mitschüler durch eine Wand zwischen den Gleisen neun und zehn. Was im wirklichen Leben unmöglich ist, gehört in der verrückten Welt der Quantenphysik zur Normalität. Teilchen wie etwa Elektronen können eigentlich unüberwindbare Energiebarrieren durchdringen. Physiker sprechen vom quantenmechanischen Tunneleffekt. Jetzt haben Forscher des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg erstmals nachgewiesen, dass Elektronen für den Tunnelvorgang eine endliche Zeit benötigen. Um das zu untersuchen, dreh-

ten die Forscher mit dem elektromagnetischen Feld eines Lasers den Potenzialtopf, den das elektrische Feld eines Atoms bildet und in dem dessen Elektronen gefangen sind. Dann beobachteten sie ein Elektron, als es aus dem Potenzialtopf heraustunnelte. Durch die Drehung wurde die Flugbahn des Teilchens ein bisschen verschoben, das Elektron hatte also einige Attosekunden, milliardstel Bruchteile einer milliardstel Sekunde, im Quantentunnel verbracht. Obwohl der Tunneleffekt seit nahezu hundert Jahren bekannt ist, war bislang unklar, ob ein Teilchen in einer endlichen Zeit einen Tunnel durch eine Barriere bohrt oder ob es im selben Moment hinter der Wand auftaucht. (www.mpg.de/11414673)

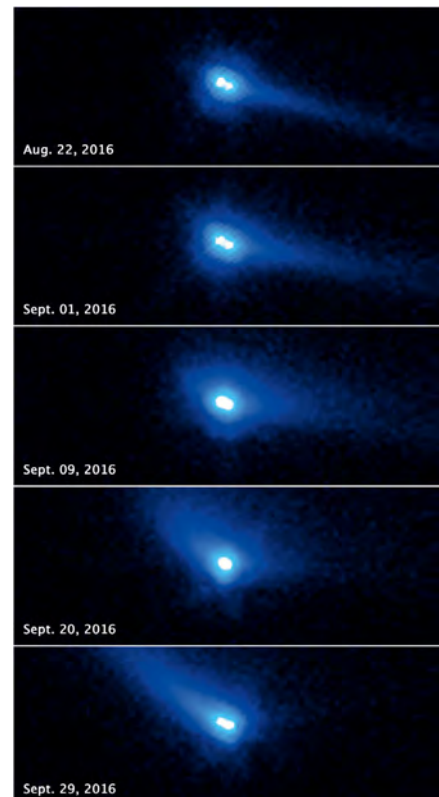
Der doppelte Asteroid

Ein Objekt namens 288P ist der einzige bekannte aktive Kleinplanet, der aus zwei Teilen besteht

Der Körper 288P, der im Asteroidengürtel zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter um die Sonne kreist, ist ein Unikat: Er gehört nicht nur zur Gruppe außergewöhnlicher Asteroiden, die Staub und Gas ins All spucken – und sich damit eher wie Kometen verhalten, die als Einzelgänger durch das Sonnensystem ziehen; er besteht auch aus zwei getrennten Teilen, die sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt drehen. Das legen Daten des Weltraumteleskops *Hubble* nahe, die Wissenschaftler unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung jetzt ausgewertet haben. 288P ist somit der erste bekannte aktive Doppelasteroid. Vermutlich zerbrach er vor nicht mehr als 5000 Jahren unter dem

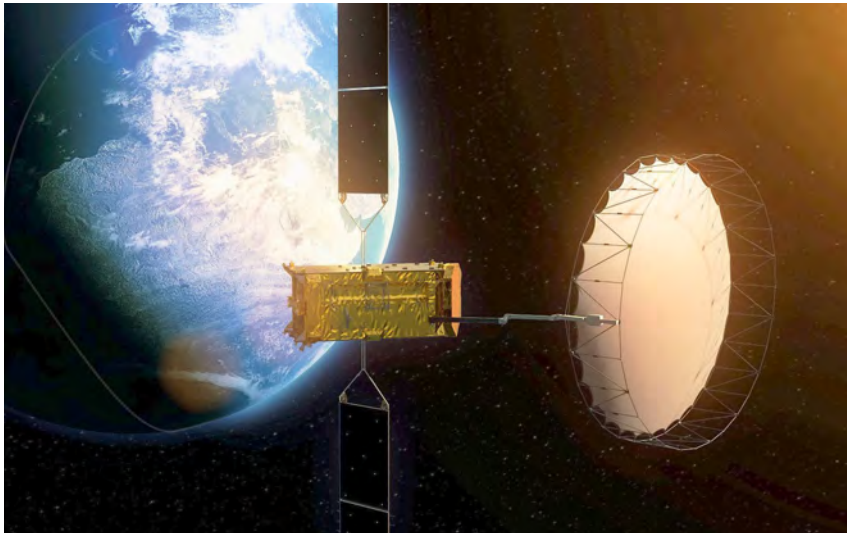
Einfluss der eigenen Rotation in zwei Teile. Diese besitzen Durchmesser von jeweils etwa einem Kilometer. Simulationen zeigen, dass sie sich auf einer stark elliptischen Bahn im Abstand von rund 100 Kilometern umkreisen. Ähnlich einem Kometen wird der Asteroid stets aktiv, wenn er sich der Sonne auf seiner Bahn annähert. Offenbar liegt das an Gasen, die dann freigelegt werden und verdampfen. (www.mpg.de/11479535)

Zwei statt eins: Diese Reihenaufnahmen des Weltraumteleskops *Hubble* zeigen, dass der Doppelasteroid 288P aus zwei Teilen besteht, die umeinander kreisen, und kometenähnliche Merkmale aufweist. Dazu gehören die Koma – eine dünne Gashülle – und der Staubschweif.



Quantenkommunikation mit einem Satelliten

Mit der Übertragung von Quanteninformation aus dem Orbit wird ein sicherer weltweiter Datenaustausch möglich



Vielseitiger Satellit: Ein Teil des *Alphasat I-XL* ist eigentlich für die Demonstration der Datenübertragung zwischen Erdbeobachtungssatelliten und der Erde entwickelt worden, eignet sich aber auch, um Quantenzustände zu übertragen.

gen auf diesem Gebiet nun vorgestellt hat, dürfte das rapide gewachsene Interesse nicht zuletzt von Telekommunikationsunternehmen, Banken und Regierungseinrichtungen an der Technik noch einmal beflügeln. Denn die Physiker haben zusammen mit der Firma Tesat-Spacecom und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt jetzt eine Voraussetzung geschaffen, um mithilfe der Quantenkryptografie auch über große Strecken abhörsicher zu kommunizieren. Sie haben die Quantenzustände von Lichtsignalen gemessen, die von einem 38000 Kilometer entfernten,

Was als exotische Forschung in physikalischen Labors begann, könnte bald die weltweite Kommunikation sensibler Daten verändern: die Quantenkryptografie. Die jüngste Arbeit, die ein Team um Christoph Marquardt und Gerd Leuchs am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlan-

geostationären Kommunikationssatelliten gesendet wurden. Die Physiker sind daher zuversichtlich, dass sich aufbauend auf der etablierten Satellitentechnik innerhalb weniger Jahre ein weltweites abhörsicheres Kommunikationsnetz errichten lässt. (www.mpg.de/11382103)

Schmarotzer und Frühwarnsystem

Wirtspflanzen informieren andere Pflanzen mithilfe eines Parasiten über gefräßige Insekten

Pflanzen können mittels gasförmiger Substanzen und unterirdischer Pilznetzwerke miteinander kommunizieren. Ein Team von Wissenschaftlern des Kunming-Instituts für Botanik in China und des Max-Planck-Instituts für chemische Ökologie in Jena hat nun entdeckt, dass auch Parasiten als Vermittler dienen können. Der Teufelszwirn überträgt Informationen über den Befall mit anderen Schädlingen zwischen seinen Wirtspflanzen. Die parasitische Pflanze der Gattung *Cuscuta* hat selbst keine Wurzeln. Stattdessen bildet sie Saugorgane, die ihren Wirtspflanzen Nährstoffe entziehen. Der Teufelszwirn befällt mehrere Pflanzen gleichzeitig und verbindet sie netzartig miteinander.

Die Wissenschaftler haben alle aktiven Gene in den Blättern der über den Teufelszwirn verbundenen Pflanzen analysiert und festgestellt, dass von Insekten befallene Pflanzen Signale über Teufelszwirn-Brücken an ihre Nachbarpflanzen weiterleiten – und dies sogar an andere Arten. Die Empfänger können so die Produktion von Abwehrstoffen ankurbeln und sich gegen eine Attacke wappnen. Ob der Teufelszwirn seine Vermittlerrolle völlig uneigennützig spielt, sollen weitere Studien klären. (www.mpg.de/11409612)

Der Teufelszwirn verursacht bedeutende wirtschaftliche Schäden beim Anbau von Luzerne, Klee und Soja.



Glasfassaden sind Fallen für Fledermäuse

Fledermäuse verlassen sich weitgehend auf ihre Echoortungslaute, um sich im Dunkeln zu orientieren. Treffen ihre Laute jedoch im schrägen Winkel auf horizontale glatte Flächen wie Wasser, werden sie von den Fledermäusen wegreflektiert. Die Oberflächen von Seen, Teichen oder Flüssen wirken daher auf sie wie Spiegel, von denen sie kaum Echosignale erhalten. Denselben Effekt haben künstliche horizontale glatte Flächen: Die Tiere verwechseln sie mit Wasser. Ähnliches geschieht bei vertikalen glatten Flächen – teilweise mit fatalen Folgen: Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Ornithologie in Seewiesen haben festgestellt, dass Fledermäuse eine senkrechte glatte Fläche

meist erst zu spät erkennen und zunächst für ein Loch zum Durchfliegen halten. Solche Flächen sind für die Tiere unhörbar und damit quasi unsichtbar. Die Wissenschaftler haben das Flug- und Echoortungsverhalten Großer Mausohren (*Myotis myotis*) mithilfe von Infrarotkameras und Mikrofonen untersucht. In einem abgedunkelten Flugraum stießen 19 von 21 Tieren innerhalb kurzer Zeit mit einer glatten Platte an der Wand zusammen. Legten die Forscher die Platte auf den Boden, gab es keine einzige Kollision, 13 Tiere wollten jedoch davon trinken. Die Forscher fordern nun Maßnahmen, um Kollisionen von Fledermäusen mit Glasfassaden zu verhindern. (www.mpg.de/11464675)

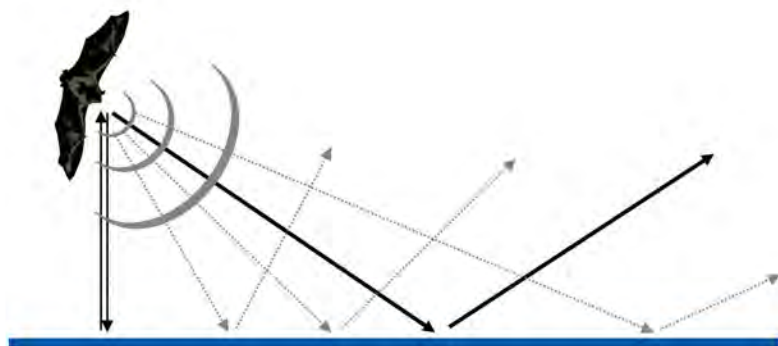


Überraschende Herkunft: Forscher fanden in bayerischen Gräbern aus der Bronzezeit zahlreiche Frauen aus weit entfernten Regionen. Beerdigt waren sie genauso wie Einheimische.

Frauen aus der Ferne

Ins Lechtal kamen vor 4000 Jahren viele Bräute aus Böhmen und Mitteldeutschland

Am Ende der Steinzeit und in der frühen Bronzezeit wurden Familien im Lechtal, südlich von Augsburg, auf überraschende Weise gegründet: Viele Frauen kamen aus der Fremde, wohl aus Böhmen oder Mitteldeutschland, während die Männer zumeist aus der Region stammten. Und das war kein vorübergehendes Phänomen, es lässt sich über einen Zeitraum von 800 Jahren nachweisen. Das ergaben archäologische Auswertungen im Rahmen eines Forschungsvverbands, an dem Johannes Krause vom Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte beteiligt ist. Die Forscher untersuchten die menschlichen Überreste von 84 Individuen genetisch sowie mittels Isotopenanalysen und werteten die Ergebnisse archäologisch aus. Die Menschen waren zwischen 2500 und 1650 vor Christus in Gräberfeldern bestattet worden, die zu jeweils einzelnen Gehöften gehörten. Genetische Analysen sowie Untersuchungen der Zähne ergaben, dass die Mehrheit der Frauen nicht aus der Region stammte. Sie wurden jedoch genauso beerdigt wie Einheimische, was darauf hindeutet, dass sie in die lokale Gemeinschaft integriert waren. (www.mpg.de/11463276)



Wenn eine Fledermaus auf eine glatte Oberfläche zufliegt, werden ihre Echoortungslaute zunächst von ihr wegreflektiert. Erst wenn sie sich direkt neben der glatten Fläche befindet (Bild), werden Echos zu ihr zurückgeworfen.

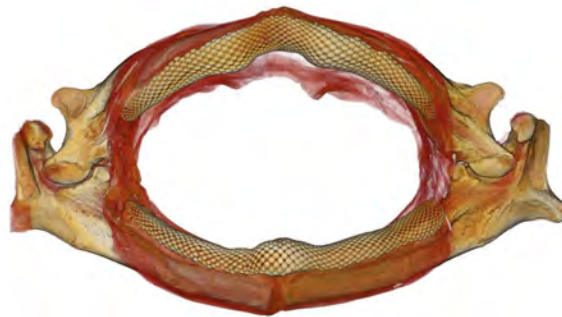
Geschenkte Jahre

Menschen, die nicht rauchen, nicht stark übergewichtig sind und nur mäßig Alkohol konsumieren, haben eine sieben Jahre höhere Lebenserwartung als der Durchschnitt der Bevölkerung. Außerdem können sie damit rechnen, dass sie die meisten dieser gewonnenen Jahre in guter gesundheitlicher Verfassung verbringen. Zu diesem Ergebnis kommt eine Studie von Mikko Myrskylä, Direktor am Max-Planck-Institut für demografische Forschung, und Neil Mehta, von der Universität Michigan. Die Forscher werteten Daten von mehr als 14 000 US-Bürgern aus. Danach leben Menschen, die insgesamt nicht mehr als 100 Zigaretten geraucht und einen Body-Mass-Index von weniger als 30 haben, vier bis fünf Jahre länger als der Durchschnitt der Bevölkerung, und das mit deutlich weniger körperlichen Beeinträchtigungen. Die Ergebnisse der Analyse zeigten weiter, dass Personen mit einem moderaten Alkoholkonsum im Schnitt sieben Jahre älter werden als der Durchschnitt der Bevölkerung. Damit übertrifft die Lebenserwartung dieser Menschen sogar die durchschnittliche Lebenserwartung in Japan, einem Land, dessen Bewohner im Schnitt besonders lange leben. (www.mpg.de/11407435)

Täuschende Zähne

Obwohl das Gebiss des Geigenrochens nur darauf ausgelegt ist, Schalentiere zu zermalmen, frisst er auch Stachelrochen

Manche Tiere ernähren sich anders, als es die Form ihrer Zähne vermuten lässt. Das zeigen aktuelle Untersuchungen an Kiefern des Geigenrochens, die ein Team um Mason Dean, Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam-Golm, vorgenommen hat. Obwohl diese Rochen breite Zähne haben und normalerweise Muscheln und Garnelen fressen, machen sie offenbar auch Jagd auf Stachelrochen. Das verraten im Kiefer verborgene Bruchstücke von Stacheln. Bislang konnten sich Zoologen und Paläontologen gut an das Prinzip halten: „Zeige mir deine Zähne, und ich sage dir, was du frisst.“ Wie die aktuellen Erkenntnisse verdeutlichen, sollten sie bei der Erforschung



Pikanter Beigeschmack: Den untrüglichen Hinweis auf das bisher unbekannteste Ernährungsverhalten von Geigenrochen lieferte die Computertomografie eines Gebisses: Auf ihr waren eindeutig die Stacheln eines Stachelrochens im Kiefer des Knorpelfisches zu erkennen.

von Tieren künftig stärker nach Hinweisen auf Ernährungs- und Lebensgewohnheiten suchen, die auf den ersten Blick nicht zu erkennen sind. Für die Potsdamer Forscher war das Ergebnis der Kieferanalyse auch deshalb überraschend, weil die Geigenrochen die Stacheln in Knochengewebe eingehüllt hatten. Dieses bilden Knorpelfische, zu denen Rochen gehören, nur sehr selten. (www.mpg.de/11474443)

Darmflora kann multiple Sklerose auslösen

Mikroorganismen aus dem Darm von MS-Patienten rufen in genetisch veränderten Mäusen Hirnentzündung hervor



Escherichia coli ist eine von rund 1000 Bakterienarten im menschlichen Darm.

Mäuse können an einer MS-ähnlichen Hirnentzündung erkranken, wenn sie die Darmflora von Patienten mit multipler Sklerose erhalten. Dies ist das Ergebnis einer Studie eines internationalen Forscherteams, darunter Wissenschaftler der Max-Planck-Institute für Neurobiologie, für Biochemie sowie für Immunbiologie und Epigenetik. Die Wissenschaftler über-

trugen dabei Mikroorganismen aus dem Darm von MS-Patienten auf genetisch veränderte Mäuse ohne eigene Darmflora. Mit ihrem Befund belegen die Forscher erstmals, dass Bestandteile der menschlichen Darmflora an der Aktivierung fehlgeleiteter T-Zellen des Immunsystems beteiligt sind. Die Forscher analysierten darüber hinaus, wie sich die Mikroorganismen im Darm erkrankter und gesunder Menschen unterscheiden. Zwillingspaare, bei denen nur ein Zwilling an multipler Sklerose erkrankt ist, sind dafür besonders gut geeignet, denn da eineiige Zwillinge genetisch identisch sind, können etwaige Unterschiede nicht durch die Gene erklärt werden. Die Forscher haben mehr als 50 solcher Zwillingspaare ausfindig gemacht und einige subtile Unterschiede in der Darmflora erkrankter und gesunder Geschwister entdeckt. Ob aus diesen Erkenntnissen eines Tages Diagnose- und Therapieverfahren hervorgehen werden, lässt sich heute noch nicht sagen. (www.mpg.de/11471454)

Erdöl als Energiequelle für Meerestiere

In den Tiefen des Golfs von Mexiko treten in etwa 3000 Metern Wassertiefe Öl und Asphalt aus dem Meeresboden und bilden bizarr anmutende Strukturen, die an erkaltete Lava erinnern. An diesen Asphaltvulkanen hat sich eine vielfältige Lebensgemeinschaft unterschiedlicher Organismen gebildet, die 15 Jahre nach ihrer Entdeckung noch immer voller Überraschungen steckt, wie Forscher des Bremer Max-Planck-Instituts nun zeigen. Da die höheren Organismen wie Schwämme und Muscheln den Asphalt und das Öl selbst nicht verwerten können und es kaum andere Nahrungsquellen in der Tiefsee gibt, haben sich einige von ihnen mit Bakterien zusammengetan: Die Wissenschaftler haben an den Vulkanen Muscheln und Schwämme entdeckt, die in Symbiose mit Bakterien leben. Diese Mikroorganismen können aus dem Öl sowohl Energie als auch lebenswichtigen Kohlenstoff gewinnen. Die Mikroben haben sich dabei auf die leicht abbaubaren Bestandteile des Öls spezialisiert – sogenannte kurzkettige Alkane wie Butan, Ethan und Propan. Sie gehören zur Verwandtschaft freilebender ölabbauender Bakterien, die zu den Schlüsselorganismen für den Abbau von Erdöl in den Ozeanen zählen. Im Gegensatz zu ihren freilebenden Verwandten können die Untermieter von Schwämmen und Muscheln aber keine schwer abbaubaren Bestandteile im Öl verwerten, sogenannte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. (www.mpg.de/11351051)

Mit einer einfachen Kamera zur 3D-Animation

Anhand der Aufnahmen eines Smartphones oder einer Webkamera lassen sich die Bewegungen einer Person in einem dreidimensionalen Modell rekonstruieren

Eine Person und ihre Bewegungen in der virtuellen Realität in Echtzeit dreidimensional abzubilden, wird künftig deutlich einfacher. Forscher des Max-Planck-Instituts für Informatik in Saarbrücken haben ein Verfahren namens VNect entwickelt, das digitale 3D-Modelle alleine anhand der Aufnahmen einer einfachen Kamera etwa eines Smartphones erstellt. Solche Modelle von Personen und ihren Bewegungen werden für immer mehr Anwendungen gebraucht: Angefangen bei der Animation virtueller Figuren in Computerspielen über die Bewegungsanalyse im Sport bis hin zu Untersuchungen in der Medizin. Um die Pose eines Menschen in Echtzeit in ein digitales Modell zu übersetzen, bedienen sich die Saarbrücker Forscher des maschinellen Lernens: Mit mehr als 10 000 von einfachen Kameras aufgenommenen Bildern unterschiedlicher Körperhaltungen trainierten sie ein neuronales Netzwerk, das die Arbeitsweise des menschlichen Gehirns nachahmt, darauf, beliebige Posen zu erkennen. Bisher war dies nur mit teuren Kamerasystemen möglich. (www.mpg.de/11385558)



Srinath Sridhar führt vor, wie gut VNect aus Aufnahmen einer preiswerten Webkamera in Echtzeit ein dreidimensionales Modell der Körperhaltung des Forschers berechnet.

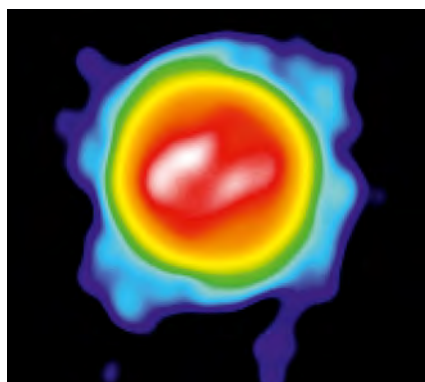
Der turbulente Lebensabend eines Sterns

Forscher kartieren die Atmosphäre des roten Überriesen Antares

In einer klaren Sommernacht leuchtet Antares im Sternbild Skorpion in unseren Breiten hell über dem Südhorizont. Die Astrophysiker wissen, dass dieser gewaltige Stern – er ist fast 700-fach größer als unsere Sonne und würde an

ihrer Stelle bis zur Umlaufbahn des Mars hinausragen – am Ende seines Lebens steht. Denn der knapp 600 Lichtjahre von der Erde entfernte Antares hat einen großen Teil seines Brennstoffs verbraucht, ist im Stadium des roten Überriesen angelangt und verliert peu à peu Materie. Was jetzt genau abläuft, erforscht ein internationales Team, an dem auch Wissenschaftler des Bonner Max-Planck-Instituts für Radioastronomie beteiligt sind. Dazu haben die Astrophysiker eine Momentaufnahme

der turbulenten Bewegungen in der Atmosphäre von Antares eingefangen. Über die komplette Oberfläche bestimmten sie sowohl dessen Strahlungsintensität, die ein Maß für seine Gasverteilung ist, als auch die Geschwindigkeit des Gases. Bisher sind solche Messungen nur für die Sonne gelungen. Um die Oberflächenkarte zu erstellen, verbanden die Forscher gleich drei Teleskope der Europäischen Südsternwarte ESO zu einem sogenannten Interferometer. (www.mpg.de/11451979)



Zoom auf Antares: Das erste relativ detaillierte Bild des roten Überriesensterns zeigt die Sternscheibe in Gelb mit zwei stärker strahlenden Regionen in Weiß, dazu in Grün und Blau die ausgedehnte Atmosphäre des Sterns. Deren unregelmäßige Form mit einigen Ausstülpungen und die unterschiedlich verteilte Gasmenge deuten darauf hin, dass der Stern nur in manchen Regionen Materie verliert, und zwar in einer turbulenten Strömung.

Der Taktgeber des Urknalls

Es ist die Frage aller wissenschaftlichen Fragen: Wie ist das Universum entstanden? **Jean-Luc Lehnert** vom **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik** in Potsdam-Golm geht sie mit modernsten mathematischen Werkzeugen an und untersucht dabei auch die Möglichkeit, dass es ein Vorläuferuniversum gab.

TEXT **THOMAS BÜHRKE**

Aller Anfang war der Urknall. Diese Grundlage unseres kosmischen Weltbildes ist ebenso fundamental wie unbegreiflich. Wie soll es möglich gewesen sein, dass die enorme Menge an Materie – alle Sterne, Planeten, Gas- und Staubwolken – in einem Punkt zusammengepresst war? Der plötzlich explodierte, wobei Raum und Zeit entstanden sind? Ein unvorstellbares Szenario.

Angesichts dessen beruhigt es direkt ein wenig, wenn selbst ein ausgemachter Fachmann wie Jean-Luc Lehnert vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) die Geburt des Universums „äußerst rätselhaft“ findet. Aber genau das ist der Grund, weshalb er sich seit vielen Jahren damit beschäftigt. „Mich hat schon immer die Frage fasziniert, woher alles kommt“, sagt Lehnert, dessen mit Papier bedeckter Schreibtisch aussieht, als hätte dort kürzlich ein Mini-Urknall stattgefunden ...

Die Indizienlage in Sachen Urknall ist klar. In den 1920er-Jahren entdeckten Georges Lemaître und Edwin Hubble die Expansion des Universums: Sie

zeigt sich in der Tatsache, dass nahezu alle Galaxien von uns fortstreben – je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto schneller bewegt sie sich. Kosmologen deuteten diese Galaxienflucht im Rahmen von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Demnach dehnt sich das Universum, also der Raum, aus, und die Galaxien entfernen sich voneinander – ähnlich wie Rosinen in einem aufquellenden Hefeteig.

ES BLIEB KEINE ZEIT, UM INFORMATION AUSZUTAUSCHEN

Der belgische Mathematiker und Abt Lemaître kehrte die Expansion in Gedanken um und postulierte 1927 die „Geburt des Universums aus einem Uratom“. Einfach und logisch. „Wir wissen aber schon länger, dass es so einfach nicht gewesen sein kann“, sagt Lehnert. „Der Urknall hat vielmehr an vielen Orten gleichzeitig stattgefunden.“ Das macht die Vorstellung nicht eben einfacher, Lehnert kann es aber erklären.

Wenn man mit den Einstein-Gleichungen den Beginn des sich ausdehnenden Babyuniversums berechnet, dann stellt man fest, dass viele Bereiche

nicht in kausalem Kontakt gestanden haben können. Es blieb nicht genug Zeit, um zwischen diesen Bereichen Information auszutauschen, was grundsätzlich nur maximal mit Lichtgeschwindigkeit möglich ist. Dennoch ist das Universum erstaunlich homogen gewesen.

Das beweist die älteste Kunde aus dem jungen All, die wir im Bereich der Mikrowellen auffangen können: die kosmische Hintergrundstrahlung. Sie spiegelt Temperatur und Dichte des Ur-gases 380000 Jahre nach dem Urknall wider. Sichtbare Abweichungen von einem Mittelwert erreichen nur etwa ein hundertstel Promille. Wie aber konnte das Universum so gleichförmig sein, wenn viele Bereiche keinen Kontakt miteinander hatten? Jean-Luc Lehnert identifiziert jede dieser Regionen mit einem Urknall – der Entstehung von Raum und Zeit aus einer Quantenfluktuation. Bleibt die Frage: Was koordinierte diese „Urknalle“?

Bei einem Vortrag auf einer Falling-Walls-Konferenz hat Lehnert das Problem im Auditorium veranschaulicht. Zehn Zuschauer fanden unter ihrem Sitz ein kleines Becken und einen Stab. Nun forderte Lehnert einen von ihnen



Im Anfang war der Urknall: Das Universum ist nach den Theorien der Kosmologen aus einem Punkt entsprungen. Doch diese Singularität ist selbst für Fachleute äußerst rätselhaft.

» Die Theorie vom inflationären Universum besagt, dass es vor dem Urknall einen Zustand gab, in dem alle Teile miteinander in Kontakt standen.

auf, damit einen Klang zu erzeugen. Der Gong stand bildhaft für einen Urknall. Anschließend sollten die anderen neun Zuschauer gleichzeitig gegen das Becken schlagen. Präzise funktionierte das nur, wenn Lehnerts den Takt angab. Wer aber war der Taktgeber des Urknalls?

Es gibt hierfür zwei Vorschläge. Der bekannteste ist die bereits vor mehr als 30 Jahren entwickelte Theorie vom inflationären Universum. Sie besagt, dass

es vor dem Urknall einen Zustand gab, in dem alle Teile miteinander in Kontakt standen. Dann setzte eine kurze Phase ein, in welcher der Raum überlichtschnell expandierte. Dadurch wurden Gebiete so weit voneinander getrennt, dass sie keinen Kontakt mehr hatten. Als diese Phase endete, wandelte sich die Inflationsenergie in Strahlung und Materie um – dieser Moment gilt als Urknall.

Es gibt noch eine zweite Möglichkeit, mit der sich Lehnerts intensiv beschäftigt hat: Demnach könnte der Urknall ein Durchgangsstadium gewesen sein. Vorher existierte ein anderes Universum, das sich am Schluss zusammenzog und dann im Urknall wieder expandierte. „Wenn man eine solche Kontraktionsphase berechnet, stellt man fest, dass diese wohl sehr langsam vonstattenging. Das konnte bewirken, dass das nachfolgende Universum homogen und isotrop wurde“, erklärt der Max-Planck-Forscher. Hier entspricht der Urknall dem Umschwung von der Kontraktions- zur Expansionsphase, wobei wiederum Strahlung und Materie erzeugt wurden.

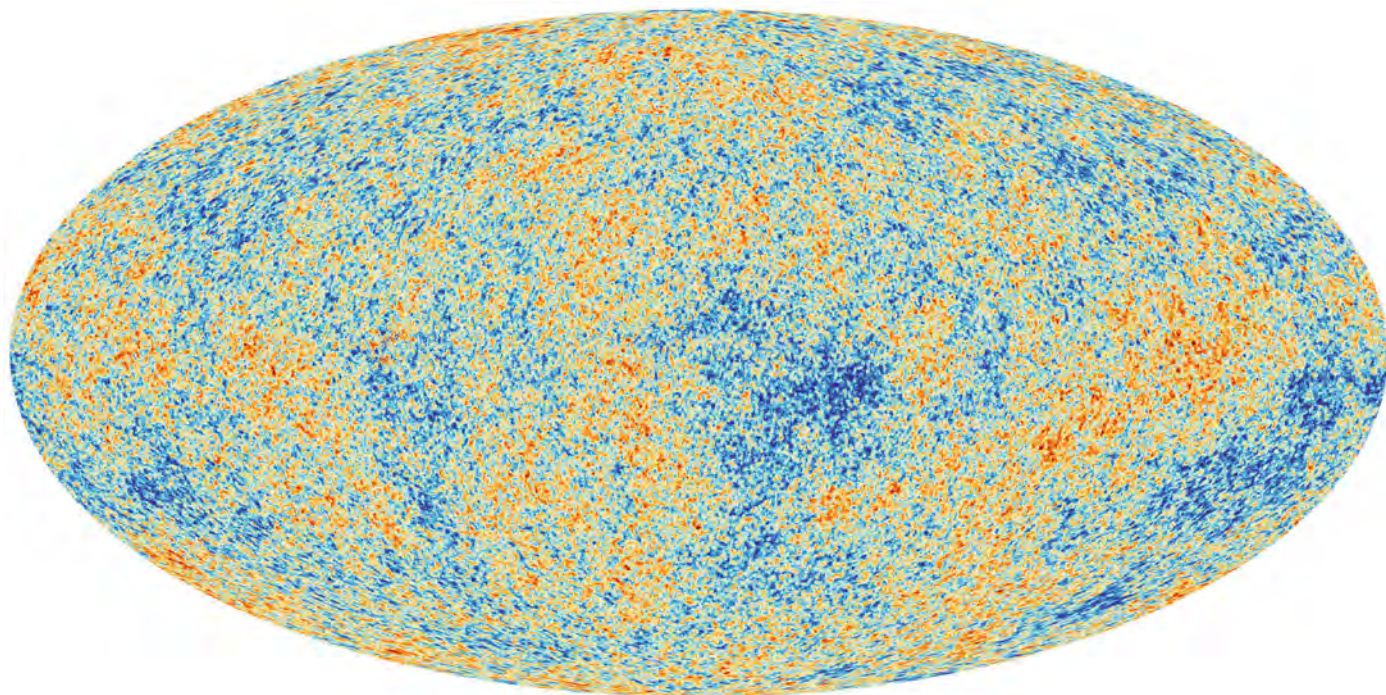
DIE VORHANDENE MATERIE LÄSST EINEN RÜCKPRALL NICHT ZU

Die Idee eines solchen zyklischen Universums erscheint verlockend, hat sie doch Anklänge an alte Mythen der Hindus und Buddhisten. Aber entspricht dieses Szenario der Realität? Jean-Luc Lehnerts ist der Frage nachgegangen – mit dem ernüchternden Resultat, dass die Materie, wie sie im heutigen Universum existiert, einen solchen Rückprall nicht zulässt. Es müsste ein unbekanntes Energiefeld vorhanden gewesen sein, das die Materie zum Umschwung gebracht hat. Könnte das jüngst entdeckte Higgs-Teilchen hierbei eine Rolle gespielt haben?

Das Higgs-Teilchen ist – wie in der Quantenphysik üblich – mit einem Feld

Weiter Blick in die Ferne: Dieser Ausschnitt aus dem Hubble Ultra Deep Field zeigt Galaxien am Rand von Raum und Zeit. Aufgrund der kosmischen Expansion scheinen alle diese Milchstraßensysteme vor uns zu fliehen – je weiter entfernt, desto schneller.





Babybild des Weltalls: Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall wurde das Universum für Strahlung durchsichtig. Der Satellit *Planck* hat diesen Mikrowellenhintergrund mit großer Präzision aufgenommen. Die Karte zeigt winzige Temperaturschwankungen in Regionen mit leicht unterschiedlicher Dichte, aus denen Sterne und Galaxien hervorgegangen sind.

verbunden, das den gesamten Raum erfüllt. Die derzeit bekannte Stärke dieses Feldes würde aber nicht ausreichen, um einen Rückprall der Materie auszulösen. „Ich habe untersucht, ob das Higgs- oder ein ähnliches Feld bei extrem hoher Dichte andere Eigenschaften besessen haben könnte als im heutigen Weltall, aber mit wenig Erfolg“, so Lehnert. Es sieht also nicht so gut aus für die Idee des zyklischen Universums.

Doch der Wissenschaftler will diese Möglichkeit nicht so leicht aufgeben. Zurzeit untersucht er einen anderen Ansatz, der schon in den 1920er-Jahren aufkam, aber nicht intensiv weiterverfolgt wurde. Er beruht darauf, dass bestimmte Teilchen, wie Elektronen, den Raum um sich herum geringfügig verdrehen. Ursache ist ihr sogenannter Spin, den man sich ähnlich vorstellen kann wie die Rotation eines Kreisels. Diese vom Spin hervorgerufene Verdrehung des Raums ist so klein, dass sie unter normalen Bedingungen überhaupt keine Rolle spielt.

Aber vielleicht, so die Idee, entwickelt diese Raumverdrehung unter den Extrembedingungen vor dem Rückprall eine Kraft, welche die sich verdichtende Materie vor dem vollständigen Kollaps

bewahrt und die Kompression in eine Expansion umkehrt. Man kann sich das vielleicht ähnlich vorstellen wie zu einem Zopf verdrehte Gummibänder, die sich wieder entwirren wollen und einen Druck nach außen ausüben.

Diese Art der theoretischen Forschung erfordert das Zusammenführen der allgemeinen Relativitätstheorie, welche die Physik von Raum und Zeit im Großen beschreibt, und der Quantenphysik, die für den Mikrokosmos der Teilchen zuständig ist. Das Ziel besteht seit Jahrzehnten darin, beide Gebiete in einer übergeordneten Theorie der Quantengravitation zu vereinen. Dann könnte man vielleicht Extremzustände – wie den Urknall oder das Innere schwarzer Löcher – verstehen und beschreiben.

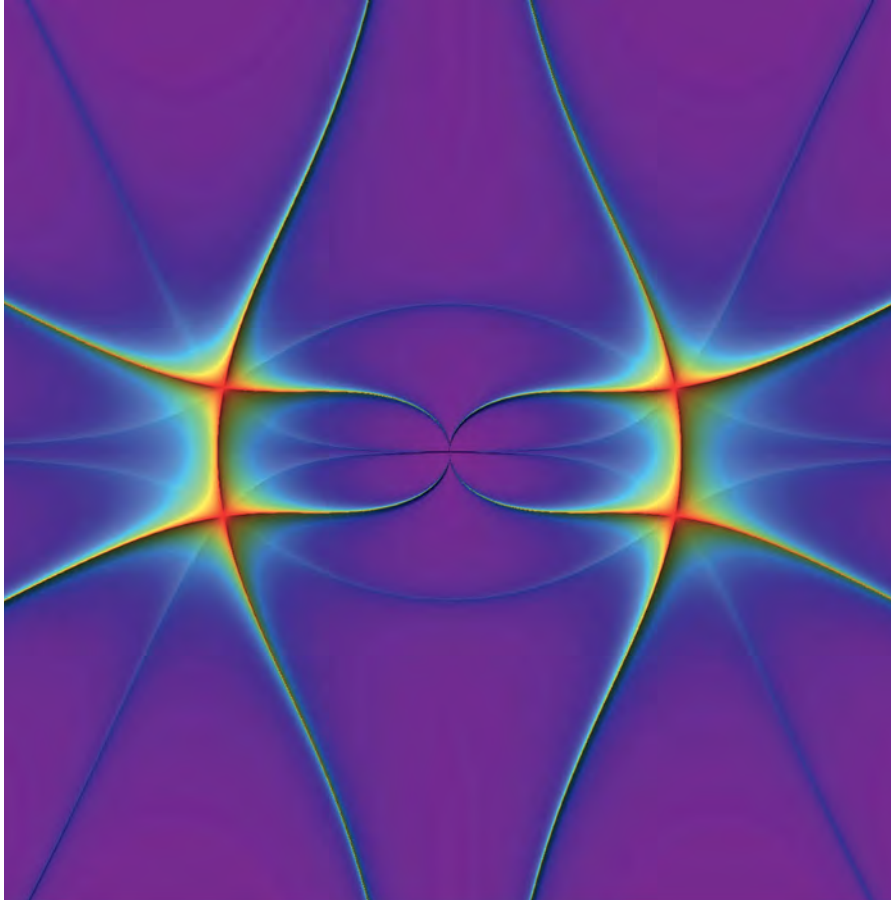
Solange dieses Ziel nicht erreicht ist, müssen die Theoretiker Erkenntnisse der einen Theorie auf die andere anwenden und die Auswirkungen ermitteln. Es ist eine Annäherung an eine abschließende „Theorie für alles“, wobei nie ganz klar ist, wie weit man sich der Wahrheit genähert hat. Vielleicht könnte man dies mit dem Versuch vergleichen, Öl in Wasser vollständig zu lösen. Weil das aber nicht gelingt, schaut man erst einmal nach, was pas-

siert, wenn ein Öltröpfchen (Teilchen) ins Wasser (Raum und Zeit) fällt. Solche Analysen erfordern nicht nur exzellente Kenntnisse der beiden Grundpfeiler der Physik, sondern auch einen sicheren Umgang mit mathematischen Methoden, welche die meisten Physiker zur Verzweiflung bringen würden.

SUPERGRAVITATION ALS THEMA DER DOKTORARBEIT

Diese Fertigkeiten hat der gebürtige Luxemburger Jean-Luc Lehnert in Institutionen von Weltrang erlangt. Bis zu seiner Promotion hielt er sich wechselweise am Imperial College London und in Stephen Hawking's Gruppe an der Universität Cambridge auf. In seiner Doktorarbeit beschäftigte sich Lehnert mit dem Thema Supergravitation. Sie stellt den Versuch dar, eine bestimmte Symmetrie aus der Teilchenphysik auf die Relativitätstheorie zu übertragen.

Auf die Frage, warum er sich ausgerechnet auf dieses schwierige Terrain gewagt habe, hat Lehnert eine einfache Antwort: „Ich dachte, wenn ich die Theorie jetzt nicht lerne, dann lerne ich sie nie.“ Anschließend ging er an



Komplexe Mathematik: Dieses Bild symbolisiert, wie sich das Integral über die Zeit verhält, wenn man eine Quantentheorie vom Skalenfaktor des Universums (sprich: von seiner Größe) aufstellt. Dieses Integral muss man sich als eine Summe über mögliche Universen vorstellen, die alle verschieden lang brauchen, um am heutigen Zustand anzugelangen. In einer Quantentheorie des Kosmos ist es nämlich nicht von vornherein festgesetzt, wie viel Zeit das All benötigt, um vom Entstehungszeitpunkt bis heute zu kommen. Dort, wo sich die Linien im Bild treffen, befinden sich die wahrscheinlichsten Entwicklungen des Universums in diesem Modell.

die Universität Princeton, Einsteins ehemalige Wirkungsstätte, und wechselte nach einem kurzen Zwischenaufenthalt am Perimeter Institute in Kanada an das Max-Planck-Institut in Potsdam-Golm. Hier leitet er seit dem Jahr 2010 die Forschungsgruppe „Theoretische Kosmologie“.

Die Näherungsmethoden der Quantenkosmologie führen oft zu einer Vielzahl an möglichen Lösungen. Erst bestimmte Annahmen, die physikalisch plausibel erscheinen, schränken diese Vielfalt so weit ein, dass im Idealfall nur

noch wenige Lösungen übrig bleiben. „Aber was heißt schon plausibel, wenn wir es mit dem Urknall zu tun haben?“, schränkt Lehnert dieses Verfahren ein. Letztendlich müssen astronomische Beobachtungen darüber entscheiden, ob eine der möglichen Lösungen die Natur richtig beschreibt.

Nun befinden sich die Kosmologen in der einzigartigen Situation, in die Vergangenheit schauen zu können. Der Grund ist die zwar sehr hohe, aber endliche Geschwindigkeit des Lichts. So lassen sich heute Galaxien beobachten,

deren Strahlung etwa 13 Milliarden Jahre benötigt hat, bevor sie unsere Teleskope erreichte. Die Astronomen sehen diese Sternsysteme also in einem Entwicklungszustand, den sie vor 13 Milliarden Jahren oder rund 800 Millionen Jahre nach dem Urknall besaßen.

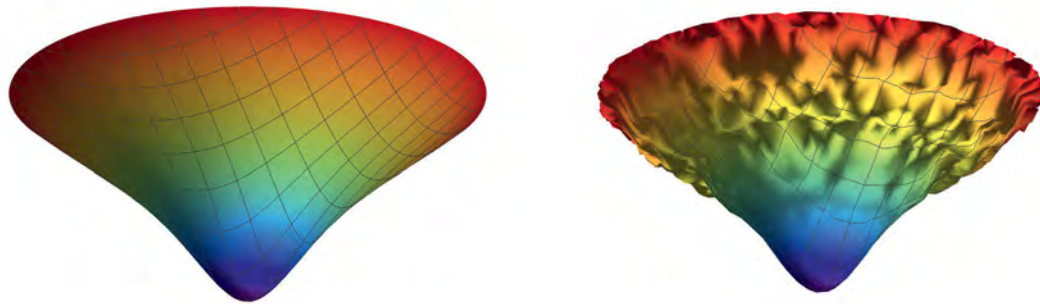
DIE KONTRAKTION DES WELTALLS LIEF EHER GEMÄCHLICH AB

Die Forscher können aber nicht beliebig weit zurückschauen. Die älteste Kunde ist die erwähnte kosmische Hintergrundstrahlung. Sie entstand, als das heiße Urgas durchsichtig wurde, was etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall geschah. Auf kosmischer Zeitskala gesehen, ist das eine relativ kurze Zeitspanne. Deshalb enthält dieses Strahlungsfeld auch Informationen über den Urknall und die postulierte inflationäre Phase. In ihr sollten starke Gravitationswellen entstanden sein – Verwerfungen, die den Raum wellenartig stauchen und dehnen. Man kann sie sich ähnlich vorstellen wie Wellen auf der Oberfläche eines Teichs.

Diese Gravitationswellen sollten sich in einem bestimmten Muster in der kosmischen Hintergrundstrahlung „durchgepaust“ haben. Physiker sagen, die Strahlung sei in ganz charakteristischer Weise polarisiert, schwingt also vornehmlich in einer Ebene. In der Theorie des zyklischen Universums sollten keine oder nur ganz schwache Gravitationswellen entstanden sein, weil die Kontraktion des Vorläuferuniversums eher gemächlich abließ und die Raumzeit nicht so stark erschüttert worden ist.

Insofern bietet die Beobachtung der Polarisation in der kosmischen Hintergrundstrahlung die große Chance, zwischen den Theorien der Inflation und des zyklischen Universums zu unterscheiden. Allerdings sollte das Signal extrem schwach und von anderen Effekten überlagert sein.

Es war deshalb eine Sensation, als im Frühjahr 2014 ein Forscherteam vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics behauptete, mit dem am



Ausweg als Holzweg: Die Keine-Grenze-Hypothese von Stephen Hawking (Foto unten) und James Hartle vermeidet die Singularität des Urknalls. Die Quantenfluktuation, aus der das Universum wohl entstanden ist, besaß eine endliche Größe (blau) und expandierte von dort aus inflationär (Aufweitung des Kegels). Doch einen Stresstest hat die Keine-Grenze-Hypothese nicht bestanden: Quantenfluktuationen, die im Lauf der Zeit immer stärker werden (rechts), verhindern ein stabiles Universum wie das unsere.

Südpol arbeitenden Teleskop *Bicep2* genau dieses Polarisationsmuster gefunden zu haben. Einige Kosmologen wähten den Physik-Nobelpreis schon zum Greifen nahe.

Zur Ernüchterung aller stellte sich nach einer Analyse der Beobachtungsdaten des europäischen Weltraumteleskops *Planck* heraus, dass die Forscher etwas übersehen hatten: Das Polarisationsmuster stammte nicht von Gravitationswellen, sondern von Staub in unserer Milchstraße, den die Hintergrundstrahlung auf dem Weg zu uns durchquert hatte. Eine schlichte Fehlinterpretation also! Wegen der großen Bedeutung dieser Beobachtung für die Kosmologie laufen derzeit Messungen der Hintergrundstrahlung mit verbesserter Empfindlichkeit.

Die Entdeckung des Polarisations signals wäre so etwas wie der Heilige Gral der Kosmologie. Doch für Theoretiker wie Lehnerts bliebe auch nach diesem Erfolg die Frage bestehen: Wie kann man die Singularität des Urknalls mit physikalisch sinnloser, unendlich hoher Dichte und Temperatur verstehen und beschreiben? Vor 35 Jahren sorgten Stephen Hawking und dessen damaliger Mitarbeiter James Hartle mit einer möglichen Lösung für Aufsehen, die sie Keine-Grenze-Hypothese nannten.

Die Idee beruht auf mehreren Annahmen, wie man Quantenphysik und

allgemeine Relativitätstheorie zu einem Modell des Urknalls zusammenfügen und dabei die Singularität vermeiden kann. Einer der entscheidenden Schritte bestand darin, dass Hawking und Hartle die Zeit als komplexe Größe beschrieben. Die nun imaginäre Zeit wird so formal zu einer vierten Raumkoordinate: Raum und Zeit sind ununterscheidbar geworden.

EINE ELEGANTE HYPOTHESE – ABER LEIDER FALSCH

„Man kann eigentlich gar nicht mehr von Raum und Zeit reden. Vielmehr ist das Universum jetzt ein Quantenzustand oder eine Quantenfluktuation“, sagt Jean-Luc Lehnerts. In dieser Beschreibung kann das All in sich selbst geschlossen gewesen sein, ähnlich wie eine Kugel. Es besaß damit keinen Rand, war aber unbegrenzt, so wie man prinzipiell die Erde umrunden könnte, ohne auf einen Rand oder eine Grenze zu stoßen. Auf ihr gibt es auch keine Singularität, also keinen Ort mit physikalisch sinnlosen Größen.

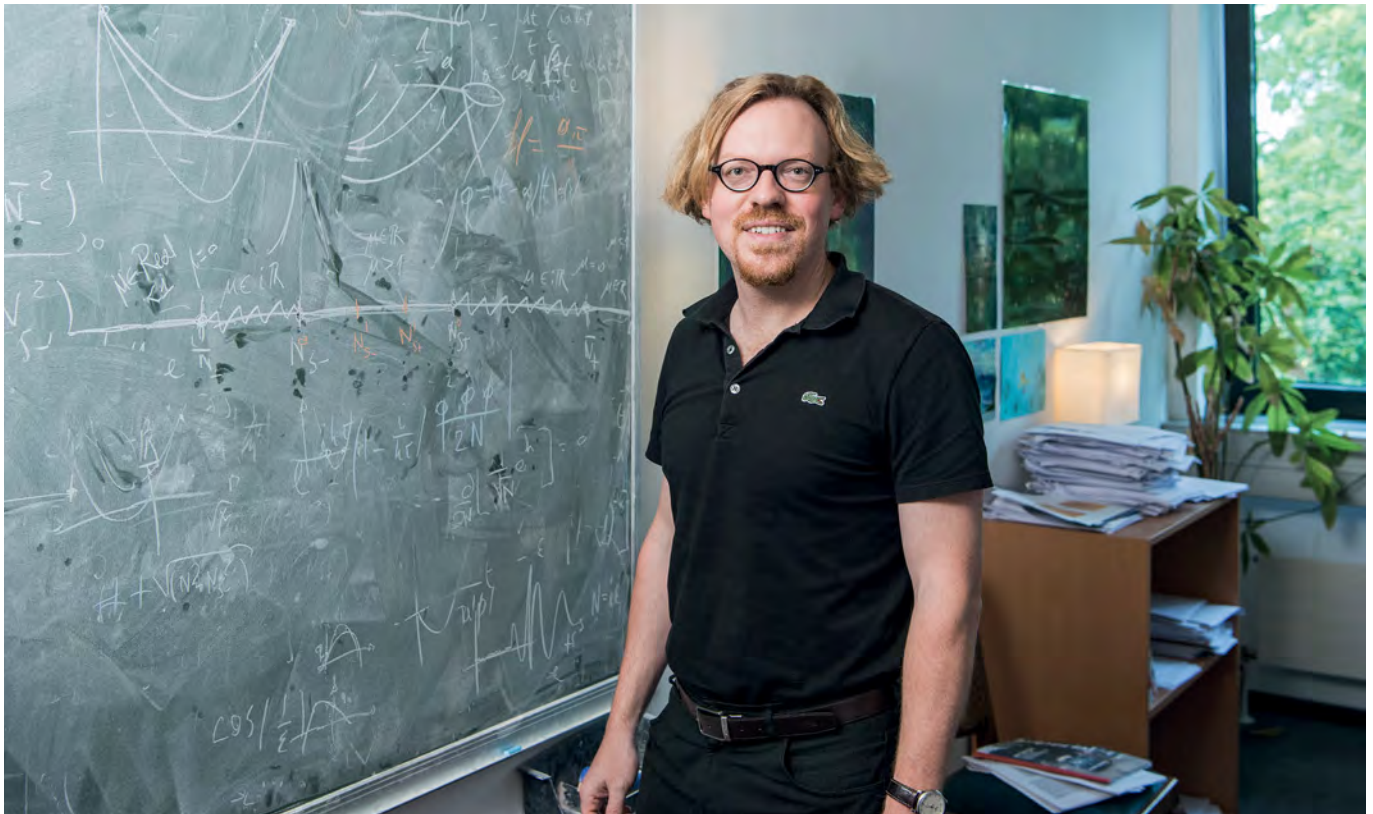
Im Urknall expandierte dieser randlose Quantenzustand, und Raum und Zeit entstanden in der heutigen Form. Interessanterweise benötigt dieses Szenario für den anfänglichen Keine-Grenze-Zustand ein Energiefeld – genauso wie die Theorie der inflationären Expansion. „Aus dem Anfangszustand würde



sich also automatisch ein inflationäres Universum entwickeln“, sagt Lehnerts. Eine elegante Hypothese also, mit der man gleich zwei Probleme gelöst hätte: Die Anfangssingularität des Urknalls wäre vermieden und die Ursache der Inflation geklärt.

Doch schon Hawking hatte zu bedenken gegeben, dass die Keine-Grenze-Hypothese nur ein Vorschlag gewesen sei, der sich von keinem tiefer liegenden Prinzip ableiten lasse. Insbesondere wurde dieses Szenario wegen der mathematischen Schwierigkeiten immer mit starken Vereinfachungen gerechnet, von denen niemand wusste, wie realistisch sie waren.

Jean-Luc Lehnerts hat kürzlich zusammen mit seinen Kollegen Job Feldbrugge und Neil Turok vom Perimeter Institute in Kanada Hawkings Modell mit verbesserten mathematischen Me-



Suche nach der Antwort: Wie ist das Universum entstanden? Diese Frage beschäftigt die Menschen seit Jahrtausenden. Jean-Luc Lehnars geht sie am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam-Golm mit modernsten mathematischen Werkzeugen an.

thoden einem Stresstest unterzogen – mit einem interessanten Ergebnis: Es funktioniert nicht! Die Theoretiker untersuchten hierfür die Stabilität der anfänglichen Quantenfluktuationen und fanden heraus: Je größer eine Fluktuation ist, desto chaotischer ist sie. Wenn man sie als Schwingung der Raumzeit ansieht, bedeutet dies, dass diese Schwingungen immer heftiger werden und verhindern, dass sich ein stabiles Universum entwickeln kann wie das unsere. Und: Je größer eine Fluktuation ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für ihr Auftreten.

„Nach oben gibt es keine Grenze“, sagt Lehnars. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine genügend kleine Quantenfluktuation entstanden ist, aus der sich unser Universum entwickeln konnte, ist gleich null. „Wir waren selbst erstaunt, dass die von uns gefundenen Effekte das Modell von Hawking und Hartle praktisch auf den Kopf stellen“, so Lehnars: „Es liefert keine sinnvollen Lösungen.“

Der Forscher sieht dieses unangenehme Resultat keineswegs negativ. Vielmehr weist es ihm den Weg, auf dem er fortfahren will. „Wir haben heu-

te bessere mathematische Methoden, um weiterzufragen“, sagt er. Wann und ob dieser Weg überhaupt zu einem endgültigen Ziel führen wird, weiß derzeit

niemand. Aber schließlich handelt es sich um die größte Frage, die der Mensch stellen kann: Wie ist unsere Welt entstanden? ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die Geburt des Universums im Urknall ist unter Kosmologen unumstritten. Weniger klar ist allerdings, was genau sich zum Zeitpunkt null wirklich abgespielt hat.
- Die populärste Hypothese geht von einer inflationären, überlichtschnellen Expansion des Babyuniversums aus. Aber auch die Vorstellung eines sanfteren Übergangs von einem Vorläuferuniversum ist nicht ausgeschlossen.
- Kürzlich brachten Jean-Luc Lehnars und zwei Kollegen die Keine-Grenze-Hypothese zu Fall, mit der Stephen Hawking und James Hartle die Anfangssingularität hatten vermeiden wollen.

GLOSSAR

Expansion des Universums: Nachdem der Belgier Georges Lemaître im Jahr 1927 die Expansion des Universums theoretisch entdeckt hatte, bestätigte der US-Astronom Edwin Hubble 1929 diese auch in der Praxis. Hubble beobachtete die Galaxienflucht, die sich als Rotverschiebung der Linien in den Spektren von Milchstraßensystemen zeigt. Diese galaktische Rotverschiebung wiederum hatte der amerikanische Forscher Vesto Slipher bereits im Jahr 1912 gefunden.

Weltraumteleskop Planck: Die 2009 gestartete europäische Raumsonde lieferte bis zu ihrem Missionsende im Jahr 2013 die bisher präziseste Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung. Mithilfe des Satelliten legten die Forscher das Alter des Alls auf 13,82 Milliarden Jahre fest. Außerdem leiteten sie sehr genau seine Zusammensetzung ab. Demnach besteht es heute aus 68,3 Prozent Dunkler Energie, 26,8 Prozent Dunkler Materie und 4,9 Prozent baryonischer Materie (Atome).

jugend forscht 2018

schüler experimentieren



Spring!



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bis 30.11.2017 anmelden
auf www.jugend-forscht.de

Fruchtbare Forschung

Eizellen und Spermien sind während ihrer Entwicklung sehr empfindlich. Wenn beispielsweise das Erbgut nicht korrekt auf die einzelnen Keimzellen verteilt wird, sind die daraus hervorgehenden Embryonen oft nicht lebensfähig oder weisen schwere Defekte auf. **Melina Schuh** vom **Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie** in Göttingen will herausfinden, warum der Reifeprozess einer Eizelle so fehleranfällig ist. Ihre Erkenntnisse könnten eines Tages ungewollt kinderlos gebliebenen Paaren helfen.

TEXT CATARINA PIETSCHMANN

Endlich mal wieder ein trockener, warmer Sommerabend in der Göttinger Altstadt. Melina Schuh ist bereits da, studiert auf der Terrasse des Restaurants die Speisekarte. Heute Abend hat sie „kinderfrei“, ihr Mann hütet den Nachwuchs. Das Smartphone legt sie vorsichtshalber in Sichtweite. „Falls es zu Hause Probleme gibt...“, sagt sie lächelnd.

Schuhs berufliches Interesse gilt einem bislang erst wenig verstandenen Prozess, ohne den die sexuelle Fortpflanzung nicht funktionieren würde – weder beim Fadenwurm noch beim Menschen: der sogenannten Reifeteilung, auch Meiose genannt. Während andere Körperzellen zwei Chromosomensätze enthalten, dürfen Eizellen und Spermien nur einen davon besitzen. „Andernfalls würde sich die Chromosomenzahl verdoppeln, wenn Ei- und Spermienzelle miteinander verschmelzen: Aus zwei Chromosomensätzen würden dann vier“, erklärt Schuh. „Darum wird einer der beiden während der Reifeteilung aus der Eizelle geschleust.“

Diese erste meiotische Zellteilung findet schon im Eierstock statt. Anders als bei Fröschen, Mäusen und den meisten anderen Tieren verläuft die Meiose beim Menschen manchmal fehlerhaft.

Die Folge: Der Kinderwunsch bleibt unerfüllt, es kommt zu Fehlgeburten, oder der Embryo erhält zu viele oder zu wenige Chromosomen.

HALBER CHROMOSOMENSATZ

Bei der Meiose wird vor der eigentlichen Zellteilung das Erbgut verdoppelt. Dann ordnet der Spindelapparat die Chromosomen eines Paares so in der Eizelle an, dass sich die beiden gegenüberliegen. Als Nächstes ziehen die Proteinfasern des Spindelapparats jeweils eines der Chromosomen eines Paares zu den gegenüberliegenden Spindelpolen. Dadurch werden die beiden Chromosomensätze voneinander getrennt. In der zweiten meiotischen Teilung werden auf diese Weise auch noch die bei der Verdopplung des Erbguts entstandenen Kopien voneinander getrennt. Im männlichen Geschlecht entstehen auf diese Weise vier Spermienzellen. Im weiblichen Geschlecht entwickeln sich dagegen nur eine Eizelle und zwei winzige Polkörper, welche die ausgeschlossenen Chromosomen enthalten.

Bei der Bildung des Spindelapparats kommt es manchmal zu Fehlern. Hinzu kommt, dass die Trennung der Chromosomen ungenau verlaufen kann. „Verbleiben zum Beispiel zwei Kopien

des Chromosoms 21 in der Eizelle, entsteht nach der Befruchtung ein Embryo mit Trisomie 21, also dem Downsyndrom“, erklärt Schuh. Auch wenn andere Chromosomen in falscher Anzahl vorhanden sind, hat dies negative Auswirkungen auf die Entwicklung des Embryos. „In den meisten Fällen haben Embryonen mit falscher Chromosomenzahl so starke Defekte, dass sie sich gar nicht erst in der Gebärmutter einnisten können. Meistens merkt die Frau nicht einmal, dass eine Befruchtung stattgefunden hat.“

Mit zu vielen X-Chromosomen lässt sich hingegen leben. „Es wird geschätzt, dass ungefähr eine von tausend Frauen drei statt zwei X-Chromosomen besitzt – meistens ohne es zu wissen.“ Wie kommt es zu diesen Fehlern, die vermehrt in Eizellen am Ende des dritten und zu Beginn des vierten Lebensjahrzehnts auftreten? Darüber weiß man bislang so gut wie nichts. Melina Schuh will das ändern.

Bei Säugetieren entstehen die Eizellen schon sehr früh in der Embryonalentwicklung. Sie werden als sehr kleine Zellen von einer hauchdünnen Schicht Körperzellen umgeben, sogenannten Follikelzellen, und sind bereits bei der Geburt eines Mädchens im Eierstock eingelagert. Erst in der Pubertät werden



Noch ist Melina Schuhs Arbeitsplatz eine Baustelle: Ihre Abteilung zieht Ende 2017 in neue Räumlichkeiten, die speziell auf die Untersuchung von lebenden Eizellen zugeschnitten sind. Dort kann sie die Hochleistungsmikroskope unterbringen, mit denen sich lebende Eizellen während ihrer Entwicklung über lange Zeiträume beobachten lassen.



sie aktiviert, und in jedem Menstruationszyklus wachsen nun zwei bis drei heran. Über feine Kanäle sind die Follikelzellen mit der noch unreifen Eizelle verbunden und füttern sie. Dabei teilen sie sich und bilden einen Kokon um die Eizelle. Von den anfangs zwei bis drei Follikeln erreicht nur einer in der Mitte des Zyklus seine volle Größe. Die anderen sterben ab.

Jetzt schüttet die Hirnanhangdrüse ein Hormon aus, um den Eisprung einzuleiten. Die Meiose beginnt, und die Follikelhülle lockert sich. Ist die Chromosomentrennung vollzogen, schlüpft die Eizelle aus ihrem Kokon, verlässt den Eierstock und wandert in den Eileiter – bereit zur Befruchtung.

„Wenn eine Frau mit 40 Jahren schwanger werden möchte, sind ihre Eizellen und die darin enthaltenen Chromosomen ebenfalls 40 Jahre alt“, sagt Melina Schuh. Die Chromosomenpaare werden von ringförmigen Proteinkomplexen zusammengehalten, die wie ein Klebstoff wirken. Normalerweise sorgen Enzyme dafür, dass die Proteinkomplexe zwischen den Paaren erst während der Meiose aufgeschnitten werden. „Wir haben aber beobachtet, dass die Chromosomenpaare bereits bei Frauen ab 25 nicht mehr gut halten. Einige Paare fallen förmlich auseinander.“ Unter dem Mikroskop ist zu erkennen, dass die Chromosomen deshalb unvoll-

ständig gepaart sind, sich während der Trennung drehen oder die Chromosomenpaare frühzeitig auseinanderfallen. „So können die Spindelfasern sie nicht mehr richtig greifen und korrekt trennen.“ Je nach Alter der Frau sind dadurch zehn bis mehr als 50 Prozent der Eizellen unbrauchbar.

GUTE UND SCHLECHTE EIZELLEN

Die mit dem Alter abnehmende Qualität unreifer Eizellen ist also eine der Ursachen des steigenden Risikos von Chromosomen-Anomalien und Fehlgeburten. Die betroffenen Frauen haben weder etwas falsch gemacht, noch können sie es in irgendeiner Form beeinflussen. „Aber die gute Nachricht lautet: Auch wenn ein Teil der Eizellen nicht mehr zu gebrauchen ist, sind es die übrigen doch noch“, betont Schuh. Wenn es nicht gleich in den ersten Monaten klappt, ist das also kein Grund aufzugeben. Schon beim nächsten Eisprung könnte eine gut erhaltene Eizelle an den Start gehen.

Melina Schuh kam aus England vom MRC Laboratory of Molecular Biology (LMB) in Cambridge nach Göttingen, wo sie vorwiegend mit Eizellen von Mäusen gearbeitet und bereits an menschlichen Eizellen geforscht hatte. Auch nach ihrem Umzug nach Göttingen hat ihr Labor weiterhin wichtige

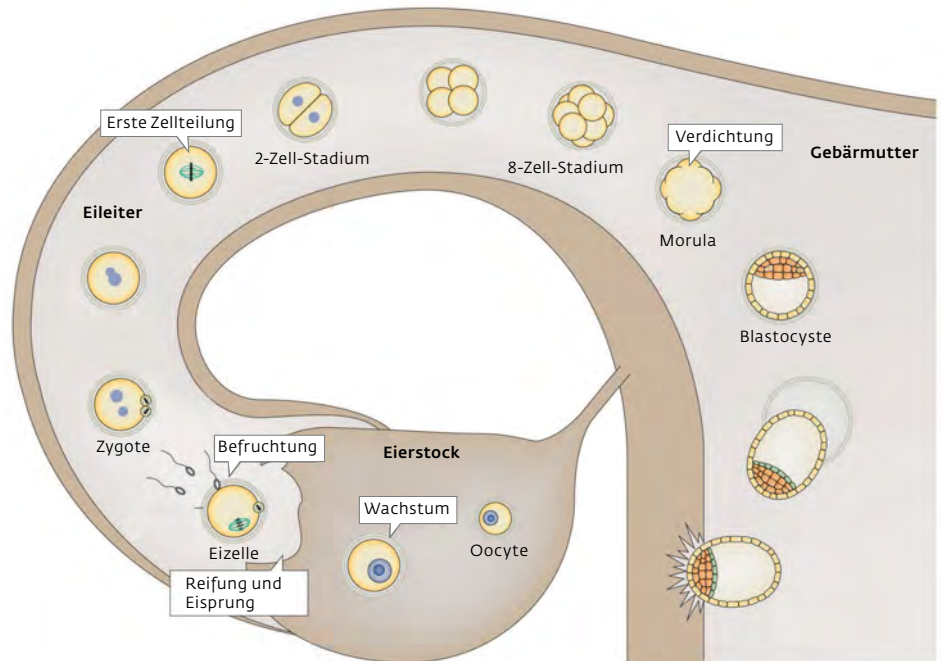
Verbindungen mit Cambridge: Sie hat in der Bourn Hall Clinic, einer In-vitro-Fertilisationsklinik, ein kleines Labor. Dort untersucht sie, wie menschliche Eizellen entstehen. Die Bourn Hall Clinic ist eine ganz besondere Klink: Sie war die Erste ihrer Art und wurde von Robert Edwards und Patrick Steptoe, den Pionieren der In-vitro-Fertilisation, gegründet. Deren Arbeiten haben 1978 zur Geburt des ersten künstlich gezeugten Babys, Louise Brown, geführt und damit den Weg für die Geburt von Millionen durch künstliche Befruchtung gezeugten Babys geebnet.

„Entnimmt man für eine solche In-vitro-Fertilisation Eizellen, befinden sie sich meist in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Zellen, die noch keine meiotische Teilung durchlaufen haben, sind für die In-vitro-Fertilisation nicht geeignet. Wenn eine Patientin ihr Einverständnis gibt, können wir diese überzähligen unbefruchteten Zellen, die sonst verworfen würden, für unsere Arbeit nutzen.“

Schuh stammt aus Bad Pyrmont, wo sie mit drei jüngeren Geschwistern aufwächst. Als Kind macht sie viel Sport: Sie ist im Schwimmverein, bestreitet Leichtathletikwettkämpfe, spielt Volleyball und Badminton. Auch ihre musikalischen Interessen sind vielfältig. Sie singt im Chor, spielt verschiedene Instrumente, darunter Klavier und Querflöte.

Links Mit einem speziellen Mikroskop injizieren Katarina Harasimov (links) und Melina Schuh RNA-Moleküle in Eizellen. Damit können die Forscherinnen bestimmte Strukturen in den Zellen sichtbar machen.

Rechts Während der menschlichen Embryonalentwicklung werden die unreifen Eizellen (Oocyten) im Eierstock eingelagert. In der Pubertät werden die Eizellen aktiviert. In der Mitte des Menstruationszyklus reift eine Eizelle, indem sie die erste meiotische Teilung durchläuft. Danach wird sie in den Eileiter entlassen, wo sie befruchtet werden kann. In diesem Fall teilt sie sich so lange, bis ein kompakter Zellhaufen aus 32 Zellen entsteht (Morula). Im Zuge weiterer Zellteilungen bildet die Morula einen flüssigkeitsgefüllten Hohlraum. Der in diesem Stadium Blastocyste genannte Embryo streift seine Proteinhülle ab und nistet sich in der Gebärmutter ein.



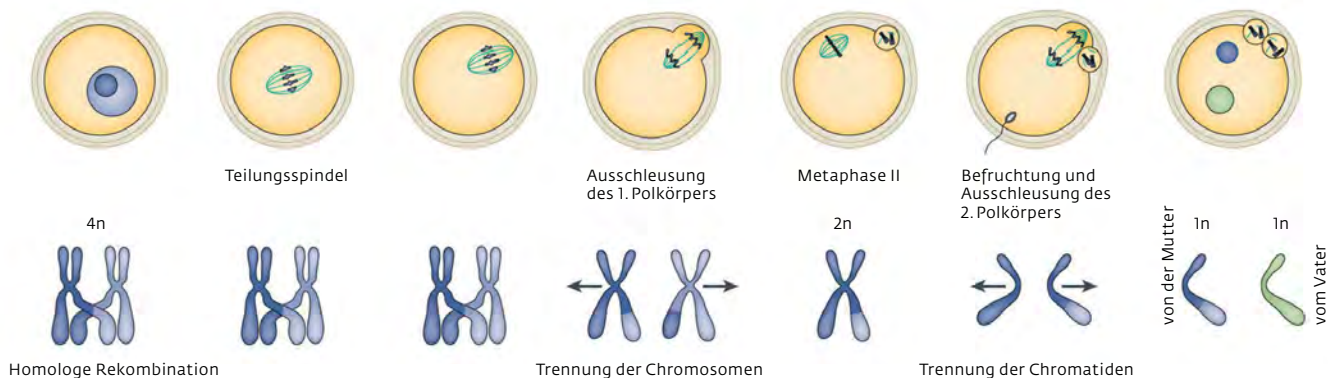
Sie wählt Deutsch und Biologie als Leistungskurse, studiert später Biochemie in Bayreuth. „Jedes Mal, wenn ich aus den Vorlesungen kam, hatte ich das Gefühl, ein bisschen mehr über die Welt um mich herum zu verstehen.“ Für ihre Diplomarbeit untersucht sie die Zellteilung bei Fruchtfliegen-Embryonen, schließt das Diplom mit Bestnote ab und geht anschließend nach Heidelberg an das European Molecular Biology Laboratory (EMBL). Jan Ellenberg, Spezialist für Zellteilung und Mikroskopie, bietet ihr an, mit Eizellen von Seesternen zu arbeiten. Den ersten

Sommer ihrer Doktorarbeit verbringt sie am renommierten Meeresbiologischen Laboratorium von Woods Hole in Massachusetts, USA, wo schon über hundert Jahre lang die Fortpflanzung von Meerestieren erforscht wird.

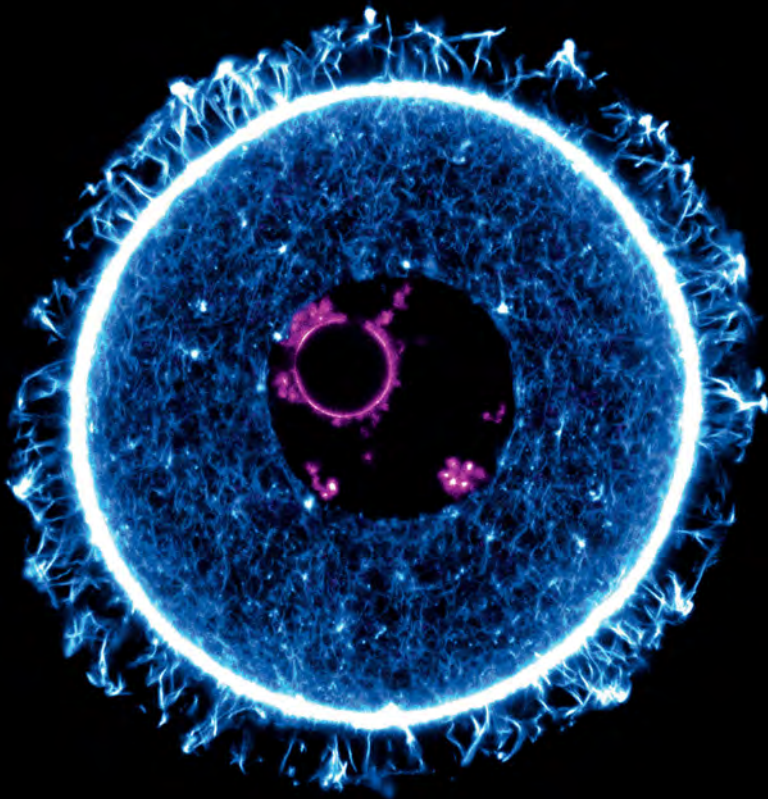
„Die Eizellen der Seesterne sind relativ groß. Da sie auch in relativ großen Mengen geerntet werden können, eignen sie sich gut für biochemische Experimente. Außerdem sind die Eizellen recht transparent und können somit gut im Mikroskop beobachtet werden.“ Eigentlich will sie jedoch verstehen, welche Prozesse in menschlichen Eizel-

len ablaufen. Also beginnt sie in Heidelberg, Methoden für die Hochleistungsmikroskopie von Eizellen von Mäusen zu entwickeln, denn die Zellen der Nager sind menschlichen Eizellen ähnlicher als die der Seesterne.

Sie schreibt gerade an ihrer Doktorarbeit, als eine Anfrage aus Cambridge kommt. Man schlägt ihr vor, sich auf eine Gruppenleiterstelle am LMB zu bewerben. „Ich hatte lediglich eine Woche Zeit, um einen Forschungsplan zu skizzieren“, erinnert sich Melina Schuh. Doch der Zeitpunkt ist perfekt: „Mein Mann hatte gerade einen Platz für das

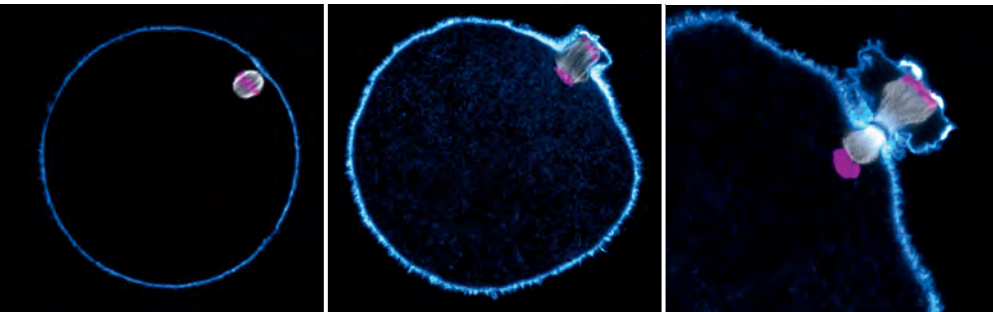


Die Phasen der Eizellreifung: Nachdem sich die Hülle des Zellkerns aufgelöst hat, wandert die neu gebildete Teilungsspindel zur Zelloberfläche und trennt die (zuvor verdoppelten) Chromosomen eines Paares. Nach der Bildung einer zweiten Spindel verharrt die Zelle in der Metaphase II bis zur Befruchtung. Dringt ein Spermium in die Eizelle ein, trennt die Spindel die beiden Kopien eines Chromosoms. Die Chromosomenzahl wird also in zwei Schritten halbiert, die überschüssigen Chromosomen werden in Polkörpern aus der Zelle geschleust. Die befruchtete Eizelle (Zygote) enthält nun jeweils einen sogenannten Pronucleus mit einfachem Chromosomensatz von der Mutter (blauer Kreis) und vom Vater (grün).



Oben Eizelle einer Maus in der sogenannten Prophase: Unter dem Fluoreszenzmikroskop leuchtet das Netzwerk aus Aktinfasern in Blau, die Chromosomen im Innern des Zellkerns (schwarzer Kreis) in Magenta. In diesem Abschnitt der Meiose ballen sich die Chromosomen zusammen, bevor als Nächstes der Spindelapparat entsteht.

Unten Menschliche Eizelle während der ersten meiotischen Teilung: In der Metaphase ist der Spindelapparat (grau: Mikrotubuli, magenta: Chromosomen) an der Zelloberfläche verankert (links; blau: Aktinfasern). Die Chromosomen werden voneinander getrennt (Mitte). Die eine Hälfte verbleibt in der Eizelle, die andere wird aus der Zelle geschleust. Der erste Polkörper entsteht (rechts).



Planck-Gesellschaft nun längerfristige und auch riskantere Projekte verfolgen zu können.“

Forschung, Dienstreisen, Familie, selbst Termine wie dieser mit der Journalistin – alles muss organisiert sein. Seit Anfang 2016 leitet die 37-jährige Biochemikerin nun die Abteilung „Meyose“ am Göttinger Max-Planck-Institut. Eine Sekretärin und eine Labormanagerin nehmen ihr inzwischen viel Organisations- und Planungsarbeit ab. Dafür ist sie sehr dankbar. „Wenn man kleine Kinder hat, ist der Tag schon sehr kurz. Deshalb möchte ich die Zeit im Institut lieber mit der eigentlichen Forschung verbringen und weniger mit Verwaltungsaufgaben.“

Sieben Jahre Forschung in Cambridge haben auch ihren Führungsstil geprägt. „Ich habe dort ein weitgehend hierarchiefreies, freundliches und kooperatives Miteinander erlebt. Vieles von dem, was ich am EMBL und später in Cambridge gelernt habe, versuche ich nun auch hier in meiner Abteilung umzusetzen.“ 15 Mitarbeiter hat sie inzwischen, „eine gute Zahl“, wie sie sagt, damit ein Team sich gut austauschen und Visionen entwickeln kann. „Ich möchte meinen Mitarbeitern größtmögliche Freiheit geben und sie unterstützen, auch ehrgeizige Fragestellungen anzugehen.“

Da nur wenige menschliche Eizellen für die Forschung zur Verfügung ste-

MBA-Programm der London Business School erhalten, und so beschlossen wir, dass er nach London geht und ich nach Cambridge.“ Anfangs pendeln sie viel, kaufen ein Haus in Cambridge und renovieren es größtenteils selbst. Als es fertig ist, kommt ihr Sohn auf die Welt, zwei Jahre später eine Tochter.

„Für das Leben mit Kindern war die kleine Universitätsstadt einfach ideal: Es gibt sehr viele Grünflächen zwischen den Colleges, tolle Spielplätze, Kühe mitten im Stadtzentrum – ein bisschen heile Welt.“

Die Wege sind kurz, das meiste lässt sich mit dem Rad erledigen. Die Kinder sind im Anhänger dabei. Kitas und Geschäftszeiten sind in England gut auf berufstätige Eltern eingestellt. Nur manchmal, wenn sie zu Konferenzen muss und auch ihr Mann als Unternehmensberater unterwegs ist, wird es eng.

Dann fliegen Melinas Eltern als Babysitter aus Deutschland ein.

Als sie in Cambridge das Angebot der Max-Planck-Gesellschaft erreicht, als Direktorin an das Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie nach Göttingen zu wechseln, muss sie trotzdem nicht lange überlegen. „Hier gibt es ideale Bedingungen für unsere Forschung, noch dazu in der Nähe meiner Heimatstadt.“

Vermisst sie hier etwas aus England? „Freunde natürlich, manchmal auch die sprichwörtliche Höflichkeit der Briten, Läden, die sonntags geöffnet sind. Und gesunde Fertiggerichte“, fügt sie lachend an. „Alles in allem hätte ich ein Leben lang dort bleiben können.“ Aber in Cambridge hatte sie nur eine sehr kleine Arbeitsgruppe. „Irgendwann übersteigen die Ideen die Möglichkeiten. Deshalb ist es toll, bei der Max-

hen, brauchen die Forscher Modellsysteme. Die Eizellen von Mäusen beispielsweise sind nicht nur kleiner als die des Menschen, sie unterscheiden sich auch im Aufbau des Spindelapparats. Auf der Suche nach geeigneteren Alternativen kam Melina Schuh auf das Schwein. Eizellen der Tiere sind leicht aus Schlachthöfen zu beziehen und können in kurzer Zeit isoliert werden.

NEUES SPINDELPROTEIN ENTDECKT

Kürzlich ist es ihrem Team gelungen, in den Teilungsspindeln von Maus, Schaf, Schwein und Mensch Aktin nachzuweisen, ein Protein, das unter anderem für die Form und die Wanderung von Zellen von entscheidender Bedeutung ist. Ohne dieses Protein können die Chromosomen in den Eizellen von Säugetieren offenbar nicht korrekt voneinander getrennt werden. „Ohne ausreichend Aktin ordnen sich die Chromosomenpaare vor der Teilung nicht richtig in der Zellmitte an. Außerdem trennen sich die Chromosomen häufig langsamer, und es bleiben zu viele oder zu wenige Chromosomen in der Eizelle“, berichtet Schuh. Aktin wird demnach vermutlich für den Aufbau der Spindel-fasern benötigt.

Warum die Meiose bei anderen Arten, etwa der Maus, viel exakter abläuft als beim Menschen, ist unklar. „Man könnte evolutionär argumentieren, dass es für den Erhalt der Spezies Maus wichtig ist, viele Nachkommen zu haben.“ Alle paar Wochen können sie einen Wurf von fünf bis zehn Jungen zur Welt bringen. „Würde sich etwa ein Viertel der Embryonen nicht entwickeln, so wäre das eine enorme Verschwendung von Ressourcen.“ Der Mensch aber hatte schon immer vergleichsweise wenige Nachkommen. „Selbst wenn beim Menschen ein Viertel der Eizellen Defekte haben, so hat dies eventuell keinen besonders negativen Effekt auf die Fortpflanzung. Die meisten defekten Embryonen können

sich nicht in der Gebärmutter einnisten, und es kann schon im nächsten Zyklus wieder zu einer Schwangerschaft kommen. Die Eizelle muss also vielleicht gar nicht so genau arbeiten wie bei anderen Arten“, meint Schuh.

Die Meiose in allen Details zu verstehen und Wege zu finden, Eizellen mit richtiger und falscher Chromosomenzahl schon vor der Befruchtung unterscheiden und sie vielleicht sogar bei der richtigen Entwicklung unterstützen zu können, ist ein großes Ziel. Melanie Schuhs Erkenntnisse könnten sich so positiv auf die Familienplanung vieler Menschen auswirken. Ihre Forschung geht deshalb auch über die reine Grundlagenforschung hinaus. Als Schuh selbst das erste Mal schwanger wird, ist sie bereits bestens mit dem Thema vertraut und kennt die möglichen Risiken. „Ich konnte mir vor der Geburt meines ersten Kindes kaum vorstellen, dass das gut gehen kann – schließlich müssen unzählige Entwicklungsschritte richtig ablaufen und aufeinander abgestimmt sein, bis ein Kind geboren wird.“ Heute hat sie drei gesunde Kinder.

Keine Frage, Melina Schuhs Leben ist im Moment sehr intensiv und der Tag eigentlich zu kurz. Immer wieder wird beklagt, wie schade es ist, dass so wenige junge Frauen in der Forschung

arbeiten. „Es gibt Frauenförderprogramme, Frauenquoten und vieles mehr. Aber es hapert immer noch an der Vereinbarkeit von Familie und Forschung“, beklagt Schuh.

Gerade in der Forschung können Frauen nach der Geburt nur schwer lange zu Hause bleiben, da die Wissenschaft heute so schnell voranschreitet, dass Projekte oft schon nach einem Jahr Elternpause veraltet sind. Es gibt aber kaum Betreuungsmöglichkeiten mit ausreichend Erziehern für Kinder unter einem Jahr. „Damit ich meine Kinder guten Gewissens in fremde Hände geben kann, muss ich sie gut aufgehoben wissen. Qualitativ hochwertige Kinderbetreuungsmöglichkeiten sind deshalb aus meiner Sicht für die Vereinbarkeit von Beruf und Familie gerade im Bereich Forschung essenziell.“ Dass die Kita auf dem Max-Planck-Campus bereits für Kinder ab sechs Monaten geöffnet ist – was in England normal ist –, geht auch auf ihr Engagement zurück.

Gut 30 Jahre Forschung liegen noch vor ihr. Ist es ein Vorteil, so jung Direktorin zu werden? „Auf jeden Fall, denn man kann sich große Ziele setzen. Ich freue mich auf das, was kommt!“

Forschung und Familie? Bei Melina Schuh zumindest funktioniert es gut. Im Grunde ist es wie bei der Meiose: Alles eine Frage der Organisation. ◀

GLOSSAR

Chromosomensatz: Abgesehen von den Keimzellen besitzen die Körperzellen der meisten Wirbeltiere in der Regel einen doppelten Chromosomensatz, jedes Chromosom liegt also doppelt vor. Menschliche Embryonen, die eine falsche Chromosomenzahl tragen, sterben meist noch vor der Einnistung in die Gebärmutter. Nur in wenigen Fällen sind solche Embryonen lebensfähig, etwa Embryonen mit drei Kopien von Chromosom 21, dem Downsyndrom.

Spindelapparat: Sorgt dafür, dass sich die Chromosomen während der Zellteilung in der Äquatorialebene paarig anordnen und in entgegengesetzter Richtung voneinander wegtransportiert werden. Die Spindel ist aus Proteinfasern aufgebaut, den sogenannten Mikrotubuli. Diese bestehen aus aneinandergeschlossenen Tubulin-Proteinen und heften sich an einen speziellen Proteinkomplex des Chromosoms, das Kinetochor. Für die korrekte Trennung der Chromosomen durch die Spindel ist neuesten Erkenntnissen zufolge neben Mikrotubuli und Kinetochor-Proteinen auch Aktin erforderlich. Dieses Protein bildet ebenfalls lange Ketten und ermöglicht es beispielsweise Muskelzellen, sich zusammenzuziehen.



Ein Käfer sprengt die Abwehr

In jeder Kohlpflanze tickt eine Bombe, eine Senfölbombe. Für viele Insekten ist die Pflanze deshalb ungenießbar. **Franziska Beran** vom **Max-Planck-Institut für chemische Ökologie** in Jena weiß inzwischen jedoch, wie Insekten diese Gefahr entschärfen können: Kohlerdföhe zum Beispiel überlisten die Verteidigungswaffe der Pflanzen und setzen sie sogar zum eigenen Schutz ein.





Kohlerdföhe sind gefürchtete Schädlinge. Wenn sie von Duftstoffen ihrer Artgenossen in Massen zu Rapsfeldern gelockt werden, können sie die Blätter der Pflanzen regelrecht durchsieben.

» Für ihre Senfölbombe setzen die Käfer einerseits selbst produzierte Komponenten ein, aber auch Substanzen ihrer Futterpflanzen.

TEXT KLAUS WILHELM

Zum ersten Mal hat Franziska Beran von der Senfölbombe während ihres Biologiestudiums an der Berliner Humboldt-Universität gehört. „Es ist ein hocheffektives Abwehrsystem, das die Pflanzen erst aktivieren, wenn sie angefressen werden – eine wirklich geniale Erfindung der Natur“, sagt Beran, die in Jena die Forschungsgruppe „Sequestrierung und Detoxifizierung in Insekten“ leitet. Mit dieser chemischen Abwehr sind nur Pflanzen aus der Familie der Kreuzblütler ausgestattet, darunter wichtige Gemüse-, Gewürz- und Öllieferanten wie Weißkohl, Broccoli, Blumenkohl, Rosenkohl, Kohlrabi, Senf, Raps, Radieschen oder Kresse.

Die Senfölbombe ist als Zweikomponentensystem konzipiert. Komponente 1: sogenannte Senfölglycoside (Glucosinolate), die vollkommen harmlos sind. Komponente 2: das Enzym Myrosinase. Wird eine Pflanze beispielsweise von einem Käfer angeknabbert, baut das Enzym die Senfölglycoside zu übel schmeckenden und giftigen Stoffen ab. Im unversehrten Zustand speichert die Pflanze beide Komponenten fein säuberlich getrennt, damit sie bloß nicht miteinander in Kontakt kommen – und die Bombe nicht versehentlich hoch-

geht. Diese Ordnung gerät bei einer Verletzung durcheinander, sodass die Senfölbombe zündet.

Zu den gebildeten Stoffen gehören die Senföle oder Isothiocyanate, welche Senf seinen charakteristisch scharfen Geschmack verleihen. Isothiocyanate stören aber auch die Verdauung der Insekten, sodass die Senfölbombe giftig wirken kann. „Das schreckt die meisten Fressfeinde der Kreuzblütler ab“, erklärt Beran. Dazu zählen vor allem Insekten – aber Isothiocyanate können die Pflanze auch vor krank machenden Pilzen und Bakterien schützen.

Allerdings wirkt die Senfölbombe nicht gegen sämtliche Fressfeinde – einige Insekten haben im Laufe der Evolution Strategien entwickelt, um die Bombe zu entschärfen. So reichern beispielsweise die gefräßigen Raupen des Kohlweißlings ein Protein in ihrem Darm an, das den Abbau der Senfölglycoside zwar nicht verhindern kann, jedoch die Bildung von deutlich weniger giftigen Nitrilen anstelle der Senföle bewirkt.

Eine andere Gruppe von Insekten, die sich ebenfalls nicht von der Senfölbombe beeindrucken lässt, sind die Kohlerdföhe: Käfer, die springen wie Flöhe, was ihnen den ebenso treffen-

den wie irreführenden Namen eingebracht hat, denn mit Flöhe sind die Winzlinge nicht näher verwandt. Kohlerdföhe sind in manchen Gegenden der Erde gefürchtete Schädlinge von Nutzpflanzen und führen zu großen Ernteeinbußen. In Kanada beispielsweise befallen sie in Massen Rapsfelder und hinterlassen Pflanzen mit durchsiebten Blättern.

SCHÄDLING IN ASIEN

Vor allem in Südostasien hat der Befall von Nutzpflanzen mit diesen Schädlingen in den vergangenen Jahren stark zugenommen. In Taiwan hat die Max-Planck-Forscherin während eines Praktikums am World Vegetable Center selbst erlebt, wie massiv sich Kohlerdföhe dort über wichtige Kohlpflanzen hermachen. Am schlimmsten treibt es der Gestreifte Kohlerdfloh *Phyllotreta striolata*. „Wenn wir am Freitag Kohlgewächse wie Pak Choi oder Rettich gepflanzt haben, waren die Setzlinge bereits montags aufgefressen.“

Betrachtet man die Käfer genauer, erscheint das hintere der drei Beinpaare der Kohlerdföhe auffällig verdickt. Im Inneren befindet sich eine Art Sprungfeder, mit der sich die Käfer in



Theresa Sporer sammelt die Käfer einmal wöchentlich von Senfpflanzen ab und versorgt sie mit frischen Pflanzen (oben). Da die Käfer exzellent springen können und daher kaum zu greifen sind, verwendet Sporer einen kleinen elektrischen Handstaubsauger, mit dem sie die Tiere einsaugt (unten).

die Luft katapultieren und so vor Feinden in Sicherheit bringen können. Wenn Berans Mitarbeiterin Theresa Sporer die heimischen Meerretticherdflöhe (*Phyllotreta armoraciae*) im Keller des Max-Planck-Instituts pflegt, bekommt sie manchmal sportliche Höchstleistungen geboten: Sprünge von einem halben Meter schaffen die etwa drei Millimeter großen Winzlinge spielend. Einmal ist ein Käfer aus dem Zuchttraum trotz umfangreicher Sicherheitsmaßnahmen ausgebüxt und hat sich im Gewächshaus des Instituts an den Versuchspflanzen anderer Mitarbeiter satt gefressen. „Darüber waren die Kollegen

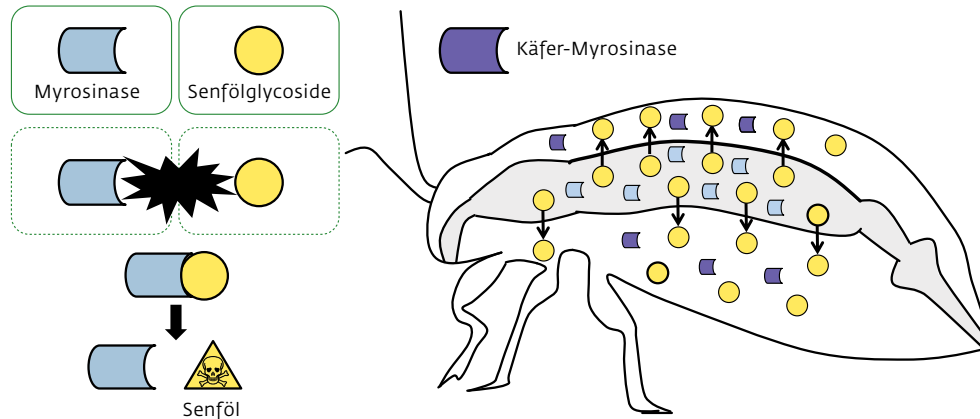
verständlicherweise nicht sehr erfreut“, erzählt Sporer. Die Vorkehrungen gegen solche Ausbruchsversuche wurden seitdem nochmals verschärft.

KOMFORTABLES LEBEN IM LABOR

Aber warum sollten die kleinen Käfer auch das Weite suchen? Schließlich leben sie in ihrem Keller ganz vorzüglich: Sie haben es warm und hell und können so viel Blattsenf fressen, wie sie wollen. Wenige Wochen nach dem Schlupf legen sie Eier, aus denen sich Larven entwickeln. Diese fressen in den Blattstielen und verpuppen sich

schließlich im Boden. Dank der Käferzucht im Labor stehen täglich „frische“ Käfer für die Forschung zur Verfügung. In freier Wildbahn vermehrt sich der Meerretticherdfloh dagegen nur einmal pro Jahr. Der Gestreifte Kohlerdfloh schafft es dank des tropischen Klimas in Asien bis zu neunmal in einem Jahr.

Vor ihrer Forschung zu der Senfölbombe hat Franziska Beran untersucht, wie sich der Gestreifte Kohlerdfloh urplötzlich in Massen auf den Kohlpflanzen zum gemeinsamen Mahl versammelt. Und das, obwohl zunächst nur wenige Käfer die Futterquelle ausfindig



Das Prinzip der Senfölbombe: Solange das Enzym Myrosinase und die Senfölglycoside in unterschiedlichen Zellen gespeichert werden, sind die Substanzen unschädlich. Erst wenn sie miteinander in Kontakt kommen, zum Beispiel wenn die Zellen verletzt werden, entstehen die giftigen Senföle. Erdflohkäfer setzen für ihre Senfölbombe Komponenten unterschiedlicher Herkunft ein: Die Senfölglycoside stammen von den Futterpflanzen. Sie werden über den Darm aufgenommen und im Körper angereichert. Die in der Nahrung enthaltene Myrosinase bleibt dagegen ungenutzt und wird von den Käfern selbst hergestellt.

gemacht haben. Für die verzögert auf die Attacke einsetzende Abwehrreaktion der Pflanze kommt der Überfall zu massiv und schnell: Die Käfer fressen sie praktisch auf, bevor sie sich wehren kann.

Den Weg zum Festschmaus finden die Kohlerdföhe dank eines Pheromons, wie die gebürtige Berlinerin herausgefunden hat. Hat ein Käfer eine neue Futterquelle entdeckt, lockt er seine Artgenossen mit einem solchen Signalstoff an, den diese selbst aus großer Entfernung riechen können. „Aggregationspheromone funktionieren ähnlich wie Sexualpheromone, sie werden aber in diesem Fall von den Männchen abgegeben und locken beide Geschlechter an“, erklärt Beran.

Auf den ersten Blick erscheint es widersinnig, dass ein Kohlerdfloh seine Artgenossen informiert, wenn er Nahrung entdeckt hat. Durch den scheinbar selbstlosen Akt lockt er schließlich Konkurrenz herbei. Trotzdem lohnt es sich für den Käfer, das Signal an die anderen weiterzugeben, denn gemeinsam schaffen sie es schneller, die harte Außenschicht eines Blattes zu durchdringen. Erst unter der wachsartigen Oberfläche vieler Kohl-

gewächse liegen die Blattschichten, die den Käfern so gut schmecken. Studien haben gezeigt, dass jeder einzelne Käfer größere Mengen Pflanzennahrung aufnehmen kann, wenn viele Tiere zusammen fressen.

EINLADUNG ZUM FESTMAHL

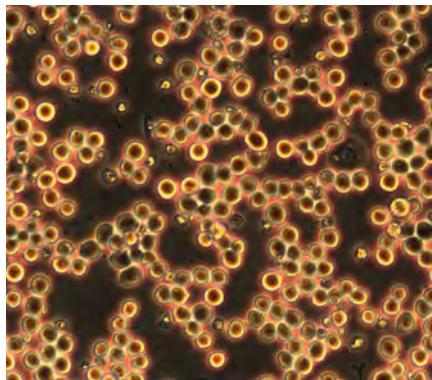
Die männlichen Käfer senden das Pheromonsignal erst aus, wenn sie begonnen haben, die Pflanze anzuknabbern. Die Artgenossen können mit ihren Antennen bereits ein millionstel Gramm wahrnehmen und der Duftspur bis zu ihrem Ursprung folgen.

Chemisch handelt es sich bei diesen Pheromonen um sogenannte Terpene, genauer gesagt: um Sesquiterpene. Diese Moleküle sind eine weitverbreitete Gruppe sogenannter sekundärer Stoffwechselprodukte in Pilzen, Bakterien und Pflanzen. Sie verleihen beispielsweise dem Harz von Nadelbäumen seinen typischen Geruch. Die Biologin hat nachgewiesen, dass die männlichen *Phyllotreta striolata*-Käfer ein Terpengemisch produzieren, das aus acht strukturell miteinander verwandten bicyklischen Sesquiterpenen besteht.

Bislang hat Franziska Beran noch nicht die anlockende Wirkung der kompletten Mixtur testen können, da noch nicht sämtliche Komponenten zur Verfügung stehen. „Das war aber auch gar nicht notwendig, denn bereits ein Gemisch aus zwei Terpenen lockt die Käfer zuverlässig an.“

Die meisten Insekten können keine Terpene produzieren. Ganz anders *Phyllotreta striolata*: Er verfügt den Studien Berans zufolge über spezielle Enzyme, sogenannte Terpensynthasen. Die Forscherin hat die Gene mit den Bauanleitungen für die Enzyme analysiert und entdeckt, dass sich die Enzyme der Käfer von denen aus Bakterien und Pflanzen unterscheiden. Die Käfer haben die Herstellung der Terpene für sich sozusagen neu erfunden und nutzen zur Kommunikation also weder die Terpene ihrer Futterpflanzen, noch ziehen sie dafür Symbiosebakterien heran, sondern sie bilden die Substanzen ausschließlich selbst.

Diese Ergebnisse werfen natürlich die Frage auf, ob sich die Terpene auch zum Nachteil der Kohlerdföhe einsetzen ließen, beispielsweise in Form von Pheromonfallen, mit denen die Käfer



Unter dem Mikroskop betrachtet Franziska Beran in Kultur gehaltene Zellen von Insekten. Die Zellen sind genetisch so verändert, dass sie die Myrosinase des Kohlerdflohs *Phyllotreta striolata* bilden (unten). Beran löst das Enzym aus den Zellen heraus, um seine Eigenschaften zu untersuchen.

Foto: Anna Schroll (oben), Yannick Pauchet / MPI für chemische Ökologie (unten)

gezielt angelockt werden können. Für Beran ist dies jedoch Zukunftsmusik. „Noch wissen wir zu wenig darüber, wie die Käfer mit ihren Botenstoffen kommunizieren“, sagt sie. Sie hat synthetisch im Labor hergestellte Pheromone in einem Feldversuch auf ihre Wirksamkeit überprüft und festgestellt, dass die künstlichen Duftstoffe die Käfer zwar anlocken, aber bei Weitem nicht so effektiv sind wie die Originale. So lassen sich die Käfer noch nicht wirksam genug von ihren Futterpflanzen abhalten. „Entweder sind doch alle acht Terpene notwendig, oder es spie-

len noch andere, bislang unbekannte Substanzen für die Massenansammlung der Insekten eine Rolle.“

Doch zurück zur Senfölbombe. Dank der Erkenntnisse der Forscher aus Jena wissen wir heute, dass Kohlerdföhe bestimmte Senfölglycoside aus ihren Nahrungspflanzen aufnehmen und im Körper anreichern können. Und das nicht zu knapp: Fast zwei Prozent des Körpergewichts der Käfer sind Senfölglycoside. Die Forscher wollen nun wissen, wie die Käfer verhindern, dass die Senfölbombe während des Fressens an der Pflanze zündet. Schließlich müsste

die Verletzung der Pflanze doch dazu führen, dass die Myrosinase die Senfölglycoside zu giftigen Senfölen abbaut.

Tatsächlich scheinen die Käfer nicht vollständig immun gegenüber der Senfölbombe der Kreuzblütler zu sein. Pflanzen mit sehr hoher Myrosinase-Aktivität und entsprechend hohem Gehalt an Isothiocyanaten sind besser vor den Schädlingen geschützt. „Die Käfer können das Abwehrsystem der Pflanzen also nicht ganz ausschalten“, sagt Beran.

Was aber machen die Käfer mit den gespeicherten Senfölglycosiden? Besitzen sie vielleicht gar ihre eigene Senfö-

Unten Klebefalle in einem Kohlfeld in Taiwan. Die Falle ist mit einem künstlich hergestellten Pheromon der Käfer bestückt. Der Wind verteilt den Duftstoff in der Umgebung und lockt die Schädlinge an, sodass sie in der Falle kleben bleiben.

Rechts Franziska Beran hat während eines Praktikums selbst erlebt, welchen Schaden Kohlerdflöhe an wirtschaftlich bedeutenden Kohlarten in Asien verursachen können. Ihre Forschung konnte seitdem schon einige Geheimnisse der winzigen Käfer lüften. So will sie dazu beitragen, dass Landwirte die Schädlinge in Zukunft möglichst zielgenau und umweltschonend abwehren können.



bombe? Dafür müsste aber auch das dazugehörige Enzym vorhanden sein. Und tatsächlich: Eine Analyse des Erbguts der Kohlerdflöhe hat ergeben, dass sie in ihren Genen die Bauanleitung für eine Myrosinase besitzen. „Die Käfer haben unabhängig von den Pflanzen ihr eigenes Enzym entwickelt, das die Senfölglycoside zu Isothiocyanaten abbaut. Die Senfölbombe der Kohlerdflöhe beruht folglich auf selbst produzierter Myrosinase und Senfölglycosiden von den Futterpflanzen“, erklärt Beran.

Womöglich sind es weniger andere Tiere, die ihnen gefährlich werden – schließlich können sie dank ihrer Beine schnell wegspringen –, sondern Krankheitserreger wie Bakterien und Pilze. Oder aber die Senfölbombe schützt die Käferlarven, die im Boden leben und an den Wurzeln fressen. Dort sind sie einer Reihe von Feinden ausgesetzt, unter anderem auch hier wieder Bakterien.

Die Kohlerdflöhe haben also nicht nur gelernt, die Abwehrwaffe ihrer Futterpflanzen unschädlich zu machen, sie zweckentfremden diese auch noch. Die Wissenschaftler können deshalb von den Winzlingen mit dem großen

Sprungvermögen eine Menge über die Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Insekten lernen – ein Wissen,

das sich vielleicht eines Tages zum Schutz landwirtschaftlicher Nutzpflanzen einsetzen lässt. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Kreuzblütler wandeln Senfölglycoside mithilfe des Enzyms Myrosinase in giftige Isothiocyanate um. Erst wenn die Pflanzen angefressen werden, kommt das Enzym mit den Glycosiden in Kontakt, und das Gift entsteht.
- Kohlerdflöhe können den Abbau der Senfölglycoside durch die Myrosinase zumindest teilweise verhindern und so das Abwehrsystem der Pflanzen umgehen. Einen Teil der Senfölglycoside lagern sie in ihrem Körper ein und nutzen ihn zusammen mit selbst produzierter Myrosinase zur eigenen Verteidigung.
- Kohlerdflöhe senden ein Gemisch aus Terpenen aus, mit dem sie Artgenossen zu Futterpflanzen locken. Zusammen können die Käfer die harten Pflanzenblätter besser durchdringen.

GLOSSAR

Kohlerdflöhe: Die etwa eineinhalb bis drei Millimeter großen Käfer erscheinen dunkelblau bis schwarz oder sind gelb gestreift. Sie überwintern im Boden, die Weibchen legen im Frühjahr ihre Eier an frischen Pflanzen ab. Die unscheinbaren weißen Larven der Kohlerdflöhe ernähren sich von Pflanzenwurzeln oder minieren in den Blattstielen, dabei richten sie keine wirtschaftlich bedeutsamen Schäden an. Im Sommer erscheinen die Jungkäfer. Diese ernähren sich von den Blättern, in die sie kreisrunde Löcher fressen. Kohlerdflöhe können Erreger von Pflanzenkrankheiten wie etwa das Rettichmosaikvirus übertragen. Insektenschutznetze mit entsprechend kleiner Maschenweite können verhindern, dass die Käfer zu ihren Futterpflanzen gelangen.

Mein gegen

kontrovers

Die auflagenstärkste hochschul- und
wissenschaftspolitische Zeitschrift Deutschlands.
Leseprobe unter: www.forschung-und-lehre.de
oder per Fax 0228 902 66-90

**Forschung
& Lehre**

ALLES WAS DIE WISSENSCHAFT BEWEGT

Trolle unter Kontrolle!

Sicherheit und Umweltschutz, Infrastruktur und Internet – wenn Gemeinschaftsgüter ihren Segen entfalten sollen, müssen sich alle an Regeln halten. **Fabian Winter** vom **Max-Planck-Institut zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern** in Bonn untersucht die Bedingungen dafür. Und liefert überraschende Belege für politische Eingriffe in die sozialen Medien.

TEXT **MARTIN TSCHECHNE**

Stehen drei Männer auf dem Bahnsteig. Einer hat seinen Kaffee ausgetrunken und wirft den Pappbecher nun achtlos auf den Boden. Wie verhält sich der Zweite, der nebenan auf seinen Zug wartet? Der Soziologe Fabian Winter hat das Ganze inszeniert. Der Becherwerfer ist ein Mitarbeiter seines Teams; Winter besetzt die Rolle immer wieder neu: Mal ist es einer, der sich in seinem Äußeren möglichst wenig von der Mehrzahl der Menschen in Köln oder Bad Godesberg unterscheidet, mal einer mit eher dunklem Teint und dunklen Haaren, erkennbar vielleicht als Türke oder Syrer. Ein Dritter hat sich unter die Wartenden gemischt, um zu registrieren, was geschieht. Zu beobachten ist: Wer reagiert auf die Verletzung der Regeln? Und wie?

Der Soziologe, Leiter einer Max-Planck-Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern in Bonn, hat schon viele Kaffeebecher werfen lassen. Hat gestaunt über den Befund, dass etwa jeder zehnte Einheimische anspringt, wenn einer die Regeln verletzt, den er für seinesgleichen hält – aber rund doppelt so viele, wenn es ein

Ausländer zu sein scheint, der seinen Müll einfach fallen lässt. Und dass, umgekehrt, nur sehr wenige Menschen aus Südeuropa oder dem Nahen Osten ihren Unmut gegenüber einem blonden und hellhäutigen Regelbrecher äußern. Strenger schon sind sie mit denen, die sie als ebenfalls fremd in Deutschland wahrnehmen.

DEUTSCHES AUSSEHEN SCHÜTZT VOR TADEL

„Mein großes Interesse sind soziale Normen“, sagt Winter. „Unter welchen Umständen wandeln sie sich? Wann bleiben sie gleich? Das schaue ich mir an.“ Für die höchst unterschiedlichen Reaktionen auf einen weggeworfenen Kaffeebecher hat der Soziologe viele Möglichkeiten der Deutung parat – vom Bedürfnis, die eigene Umgebung gegenüber Fremden zu verteidigen, bis zur Furcht vor Auseinandersetzung in einer vielleicht nur mühsam beherrschten Sprache. Von der Sorge, ein Ausreißer aus der eigenen Gruppe könnte dem eigenen Ansehen schaden, über wohl-erzogenen Respekt bis hin zum Gefühl einer Verantwortung, die sich in der Fremde auch auf Landsleute ausdehnt.

Die Befunde lassen sich leicht und immer wieder bestätigen. Und doch wehen den Forscher bisweilen auch Zweifel an seiner scheinbar schlichten Feldstudie an. „Ich denke, dahinter steckt ein sehr sensibles Thema“, sagt Winter und verweist auf die verbreitete Meinung, ethnische Diversität vergrößere die Probleme im gesellschaftlichen Miteinander. Wachsamkeit gegenüber anderen lässt nach, das Gefühl von Zuständigkeit schwindet, Normen und Regeln verlieren ihre Verbindlichkeit. Winters empirische Daten sprechen eine andere Sprache: „Wer ungeschoren davonkommt, das sind vor allem die Deutschen. Ausländer werden häufiger auf eine Verfehlung angesprochen, sowohl von Einheimischen als auch von ihresgleichen. Wenn es ein Ziel ist, möglichst viele Normenverstöße zu sanktionieren, also die Aufmerksamkeit im Alltag zu fördern, dann sollte die Gesellschaft eher noch heterogener sein, als wir sie jetzt schon haben.“

Das ist das Kreuz mit den Gemeinschaftsgütern, mit Klima, Wasser und Infrastruktur, mit Netzwerken, freiem Handel und innerer Sicherheit: Jeder kann daran teilhaben, aber nicht jeder muss dazu beisteuern. Straßenlaternen



Im Schutz der Anonymität: Menschen äußern sich in sozialen Medien wie Facebook oft hemmungsloser als in der Öffentlichkeit. Soziologen untersuchen, welche Rahmenbedingungen Hass und Hetze im Netz fördern oder bremsen.



Soziale Kontrolle im Test: Fabian Winter (im Hintergrund) beobachtet, wie Nebenstehende reagieren, wenn ein Mitglied seines Teams im Bahnhof einen leeren Kaffeebecher auf den Boden wirft. Auffällig ist, dass ausländisch Aussehende besonders oft gerügt werden.

leuchten auch für den, der keine Steuern zahlt. Fabian Winter spricht von Nicht-Ausschließbarkeit – und rät, einfach mal einen Blick in die Zeitung zu werfen. Der Streit um Klimaschutz und das Elend der Flüchtenden. Die ständig aufgestockten Attacken eines Donald Trump gegen das Wirtschafts- und Wertesystem des Westens. Polen, Ungarn, der Brexit, die Türkei. Der Gipfel der G20-Industrienationen in Hamburg hat eine lang anhaltende Debatte darüber befeuert, welche Objekte, Menschen oder Wohngebenden legitime Ziele der Gewalt seien. Parkende Autos, Polizisten oder das schicke Quartier Pöselndorf – Winter ist in Hamburg aufgewachsen; er kann da mitreden. Und in Berlin hefteten Nachbarn kleine Zettel an Bäume und in Hausflure, um ihre Gedanken zum Kiezleben kundzutun – aber niemand konnte sagen, wo zwischen „Huhu, wir planen hier eine Hausgeburt. Könnte ein bisschen lauter

werden“ und „Hängt euch doch selber auf, ihr Scheiß-Schwaben“ die Grenze zwischen schlafloser Verzweiflung und spöttischem Jokus verlief. Manche freuen sich, wenn sie ein bisschen Unfrieden stiften können.

GLOBALISIERUNG SCHAFFT MEHR GEMEINSCHAFTSGÜTER

„Jeder profitiert“, fasst der Forscher also zusammen, „aber nicht jeder muss mitmachen.“ Seit zwei Jahren genießt er es sehr, wenn sich die Kollegen seines Instituts jeden Montag für den ganzen Tag in der alten Villa am Ufer des Rheins versammeln, Ökonomen und Juristen, Soziologen, Psychologen, Informatiker und Politikwissenschaftler, manchmal mit Gästen, um in einem kleinen Symposium abzustecken, wo sich ihre Kenntnisse und Kompetenzen überlappen und ergänzen. Wer etwas zu berichten hat, hält einen Vortrag. Auch

Wissen, so hatte es bereits die 2009 mit dem Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften ausgezeichnete Politologin Elinor Ostrom gesagt, kann ein Gemeinschaftsgut sein. Es vergrößert sich durch Teilen.

Natürlich treten bei den montäglichen Treffen auch Differenzen zwischen den wissenschaftlichen Positionen zutage. Wie weit geht Gemeinschaft? Wie frei ist die Teilhabe? Vom Standpunkt der Ökonomen her gesehen, erläutert der Soziologe Winter, zähle etwa auch das Arbeitslosen- und Sozialhilfeprogramm Hartz IV zu den Gemeinschaftsgütern: Jeder trägt mit seinen Steuerzahlungen dazu bei, und so gut wie jedem steht es im Notfall zur Verfügung. Er selbst sieht das ein wenig anders: Wer Hartz IV in Anspruch nimmt, der werde damit an den Rand der Gesellschaft gestellt und stigmatisiert. „Das sind die Fragen, die eher in der Soziologie verhandelt werden.“

Solche Widersprüche sind es, die ihn anlocken. Ränder und Übergänge, an denen das Terrain unsicher wird und Konflikte zutage treten – und das beileibe nicht nur zwischen den Disziplinen der Wissenschaft. Während etwa beim Hamburger G20-Gipfel eine erregte Öffentlichkeit lautstark darüber stritt, wie viele Einsatzkräfte es braucht, um parkende Autos vor dem Schwarzen Block zu schützen, gingen viele weiter reichende Probleme im Getöse unter. Wieder einmal. Warum ist es ein so zähes Unterfangen, die Industrieländer im Kampf gegen CO₂ und Erderwärmung zu vereinen? Wie lässt sich ein Handel organisieren, der allen ihren Gewinn bringt? Was bedeutet es, wenn öffentliche Krankenhäuser privatisiert werden, vielleicht auch Wasserwerke oder Teilstücke der Autobahn? „Es wird nicht nur Wohlstand geschaffen“, fasst Fabian Winter zusammen, „sondern immer mehr auch Ungleichheit.“

Was vor ein, zwei Generationen noch eine Utopie war, ist längst von der

Planung eingeholt. Der Austausch findet auf sämtlichen Ebenen statt, nicht nur lokal, sondern auch regional, national, kontinental und global. In Echtzeit. Und selbst wenn Ziele noch im Nachhinein definiert werden müssen, wenn immer wieder Rückschläge, Machtgerangel und Korruption den Prozess erschweren – die Konzepte sind da, häufig auch die Mittel, die Institutionen. Europa ist eine Realität, wenn auch eine knirschende und ächzende. Sogar die erklärten Gegner der Globalisierung zeigen sich erstaunlich weltoffen: Bis aus Griechenland und Spanien strömten sie im Juli zum Gipfel der G20 nach Hamburg. Sie werden auch zum nächsten Gipfel reisen, mehr oder minder gewaltbereit, um ihren Dissens zu demonstrieren. Das Spektrum der Gemeinschaftsgüter ist riesig und expandiert. Woran hapert es?

Fabian Winter nähert sich einer Antwort über den Weg der überprüfbareren Fakten. Die Kollegen aus den Wirtschaftswissenschaften, damals noch in Jena, haben ihn mit ihren empirischen Studien und Simulationen den ökonomischen Blick gelehrt. Der Forscher spricht von „experimenteller Soziologie“, weiß auch um frühe Vorläufer aus der Sozialpsychologie. Wissen vergrößert sich nun mal durch Teilen.

„Ich gebe Ihnen zehn Euro“, beschreibt er also die Grundform eines Spiels aus der Verhaltensökonomik, in dem er Wohlstand und Gerechtigkeit immer wieder zum Gegenstand von Verhandlungen gemacht hat, „unter der Bedingung, dass Sie einem Mitspieler von dem Betrag etwas abgeben. Akzeptiert dieser Ihr Angebot, können Sie beide das Geld behalten; lehnt er es ab, bekommt keiner etwas.“

Wie viel eigenen Verlust nimmt ein Gegenüber nun hin, um dem Geber ein unfaires Geschäft zu verderben? Nur einen Euro anzubieten, wäre da riskant. Aber wer besitzt schon die Demut, Größe oder Dummheit, mit dem Geld-



Gemeinschaftsgefühl entscheidet: Fabian Winter lässt Testpersonen am Computer die Wahl, wie sie zehn Euro mit einer anderen Person teilen. Schon ein Foto des virtuellen Gegenübers veranlasst Probanden, sich freigiebiger zu zeigen.

schein in der Hand gleich fifty-fifty vorzuschlagen? Winter hat das Experiment vielfach variiert – mit Menschen, die einander in die Augen sahen, und solchen, die nichts voneinander wussten. Mit Männern und Frauen, Studenten,

Kindern und Senioren, mit oder ohne die Möglichkeit, dem anderen hinterher die Meinung zu sagen. Die Resultate bestätigten natürlich immer wieder, dass zuerst Gemeinschaft da sein muss, um die Idee des Gemeinschaftsguts als

Chance zu erkennen und zu nutzen. Und sei die Dosierung noch so bescheiden: Schon ein Foto seines Gegenübers genügte, um den Anbieter im ungleichen Geschäft ein wenig kooperativer zu stimmen.

Und dann das weltweite Netz, in dem jeder jedem begegnen und dabei gänzlich unerkannt bleiben kann. In dem jeder Angriff seinen Applaus findet und keiner jemals Rechenschaft schuldet. In dem Hetzer, Pöbler und Stalker ungehindert Drohungen und Verleumdungen verbreiten, Terroristen ihre Anschläge verabreden und schließlich das Signal zum Angriff geben – ein Gemeinschaftsgut, das jede Grenze der Überschaubarkeit sprengt und damit jede Zuständigkeit und Verantwortung aushebelt. „Ganz so ist es nicht“, wirft Winter ein und erklärt: Viele Foren oder Blogs legen Bedingungen fest, unter

denen der Zutritt gewährt wird, und sanktionieren Fälle von Verletzung. Facebook, Twitter, Youtube oder das Karriereportal Xing achten auf Einhaltung ihrer Regeln und schließen Nutzer aus, die Diffamierung und Beleidigung tolerieren, Pornografie verbreiten oder offen zur Gewalt aufrufen.

HASS UND HETZE LASSEN SICH EINDÄMMEN

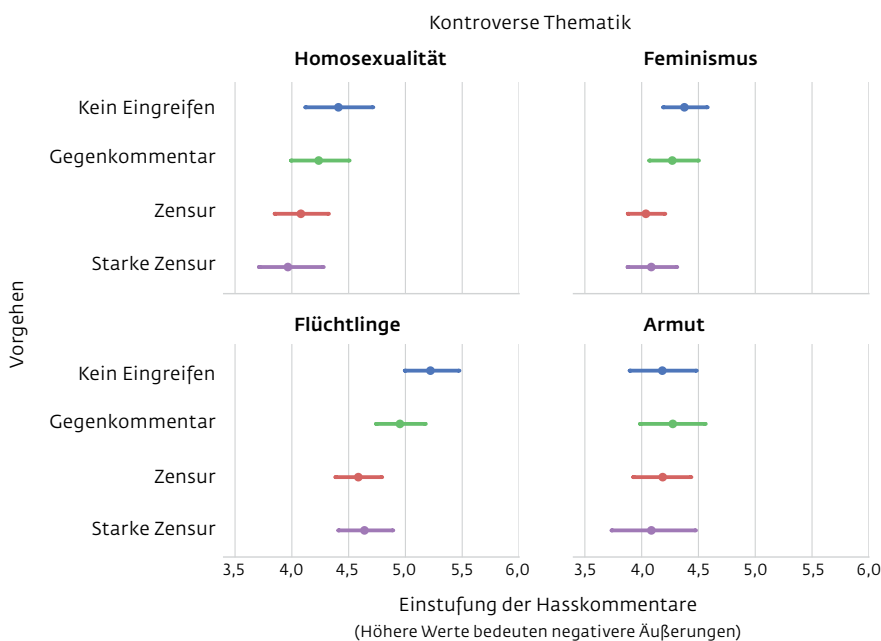
Mit den Methoden der experimentellen Soziologie hat Winter die Wirkung von Kontrolle im Internet untersucht. Auf dem Feld der soziologischen Erkundung von Hass und Hetze in sozialen Medien ist er damit ein Pionier. Wie reagieren die Teilnehmer eines Forums auf ein Foto, das einen Mann mit Kind auf dem Rücken zeigt, der einen anderen Mann küsst? Wie auf Bilder von Ge-

walt, Flüchtlingselend oder politischem Protest? Und wie reagieren sie, nachdem andere schon ihre Meinung auf derselben Plattform geäußert haben?

Soziale Normen fasst Winter als ein Bündel von Regeln und Übereinkünften, die im Konsens mit anderen entwickelt und gefestigt werden – es ist also wichtig, andere Menschen in zumindest ähnlichen Situationen erlebt zu haben und solche Beobachtungen auch bestätigt zu finden. Aber gilt in den anonymen, vorbildlosen Weiten des Internets das, was auf jedem Marktplatz selbstverständlich scheint? Der Soziologe erinnert sich an einen Bericht der Politikerin Renate Künast, die wissen wollte, welche Lebensumstände und Charaktere sich hinter den Beleidigungen und Drohungen verbergen, die sie immer wieder im Posteingang ihres Computers fand. Im Herbst 2016 machte sich die frühere Partei- und Fraktionsvorsitzende der Grünen auf den Weg, um bei einigen dieser sogenannten Trolle an der Wohnungstür zu klingeln. Sie sei überrascht gewesen, so gestand sie später, wie wohlhabend die Verhältnisse und wie zurückhaltend und sogar höflich viele der gefürchteten Hassbürger im persönlichen Umgang gewesen seien.

„Sehr wahrscheinlich, dass sie Frau Künast gar nicht persönlich meinten“, vermutet Fabian Winter, „sondern einen vagen Groll auf ferne Eliten und unüberschaubare, vielleicht ungerechte Verhältnisse artikulieren wollten. Und sehr wahrscheinlich auch, dass sie nicht ahnten, wie öffentlich sie dabei agierten.“

Woher aber kam die Wut? Und was verwandelte Reihenhausbewohner in bössartige Furien? In einer Serie eigener Experimente variierte der Forscher das Umfeld, in dem Beiträge zu Netzdebatten formuliert werden, und die Form der Kontrolle über sie. In einem eigens dafür eingerichteten Internetforum legte er den Teilnehmern seiner Studien-



Eingreifen hilft: Ungefilterte Kommunikation (blau) führt in Netzdebatten oft dazu, dass Hass und Hetze sich weiter steigern. Auch Gegenkommentare (grün) können die Kontroverse anheizen. Dagegen hilft es, extreme Kommentare zu löschen (rot), um zu einer sachlicheren Diskussion zu kommen. Eine fundamentale Zensur (violett) kann jedoch das Gegenteil bewirken.



„Pfui!!!“, „Unerträglich!!!!“, „Peinlich!!!!“

„Wenn ich die schon sehe!“

„Es wird bald Prozesse für Politiker (sic!) wie dich geben!“

„Dumm wie Brot!“

„Armes Deutschland!“

„Volksverräterin!“

Mit Humor gewappnet: Die Grünenpolitikerin Renate Künast wird regelmäßig im Netz beschimpft und bedroht. Auf ihrem Facebook-Profil hat sie daraufhin eine ironische Anleitung für Hasskommentare gepostet und darin häufige Beleidigungen zitiert. Künast setzt sich jedoch auch mit Strafanzeigen zur Wehr.

reihe ein breites Spektrum von Kommentaren auf die Fotos homosexueller Paare oder langer Schlangen von Migranten vor – in einer ersten Gruppe ungefiltert, in einer zweiten ergänzt um Erwidern auf die Kommentare. Wie es in Chatrooms üblich ist. Die Aufforderung: „Mischen Sie sich ein in die Debatte! Stellen Sie dazu, was Sie darüber denken!“ Aus einer dritten Liste hatten Mitarbeiter der Forschergruppe besonders feindselige Aussagen gestrichen, in einer vierten zu den kontroversen Themen der Fotovorlagen nur ausgesprochen freundliche Kommentare übrig gelassen. Das Ziel der Forscher war herauszufinden, wie stark die Meinung einer Person vom Klima in der sozialen Umgebung beeinflusst ist.

Das Resultat scheint den Forscher selbst ein wenig überrascht zu haben: Löschen hilft. Gegenkommentare führen kaum dazu, die Kontroverse abzuschwächen, und auch die Häufigkeit der extremen Hasskommentare nimmt durch sie nicht ab. Auch die fundamentale Zensur, die nur unverfängliche Nettigkeiten zur weiteren Debatte zuließ, scheint manch einen zu zorniger Reaktanz veranlasst zu haben. Die vorsorgliche Entnahme offen rassistischer, verleumderischer und sexistischer Kommentare aber half, Duktus und Inhalte

im Diskussionsforum in eher sachlichen Bahnen zu halten. Fabian Winter zuckt mit den Achseln: „Don’t feed the trolls“, zitiert er eine alte Weisheit der Netzgemeinde. „Es gibt Leute, die haben einfach Spaß an der Eskalation. Denen sollte man nicht auch noch eine Einladung aussprechen.“

Renate Künast hat Strafanzeige erstattet, jedes Mal, wenn ein Hasskommentar ihr zu persönlich und zu bedrohlich wurde. Viel hat es nicht geholfen. Die meisten Verfahren wurden eingestellt. Es ist ein Kampf gegen Windmühlen. Fabian Winter weiß, dass der Umweg über komplizierte Verschlüsselungen und einen Server in irgendeiner fernen Tundra eine Verfolgung von Fake-News und krimineller

Hetze extrem erschwert. Der Justizminister will mit seinem im Sommer verabschiedeten Gesetz zur Verbesserung der Rechtsdurchsetzung in sozialen Netzwerken, kurz NetzDG, die Betreiber selbst in die Verantwortung nehmen. Facebook hat bereits die Selbstkontrolle seiner Inhalte intensiviert. Kritiker bis hinauf zu den Vereinten Nationen fürchten jedoch um die Meinungs- und Informationsfreiheit und warnen vor totalitärer Zensur.

Winters Daten legen nahe, dass es im Gemeinschaftsgut Internet notwendig ist, Regeln durchzusetzen und eine Dynamik des Aufschaukelns zu bremsen. Über die Formen und Instanzen wird zu verhandeln sein. Die Diskussion geht in die nächste Runde. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Soziologen untersuchen, wie Regeln des gesellschaftlichen Miteinanders gewahrt werden, wenn soziale Kontakte immer mehr in der virtuellen Welt stattfinden.
- Beim persönlichen Aufeinandertreffen, etwa auf dem Bahnsteig, hängt es von der Einschätzung des Gegenübers ab, ob Regelverletzungen angemahnt werden oder nicht.
- Je anonymere die Umgebung, desto stärker verletzen selbst Menschen, die normalerweise höflich und zurückhaltend sind, grundlegende Anstandsregeln.
- Im Internet schaukeln sich Hass und Hetze leicht immer weiter auf. Um eine Debatte zu versachlichen, hilft oft nur das Löschen extremer Äußerungen.

Metall fürs Militär

Mitten im Ersten Weltkrieg wurde 1917 das **Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung** gegründet. Es sollte ein Innovationslabor für die deutsche Stahlindustrie werden und entwickelte sich zu einem Zentrum kriegstechnischer Wissensproduktion. Seine Geschichte offenbart das Risiko anwendungsorientierter Grundlagenforschung in wirtschaftlichen und politischen Krisenzeiten.

TEXT **SUSANNE KIEWITZ**

Frühjahr 1917. Auf dem Schreibtisch Fritz Wüsts im Eisenhüttenmännischen Institut an der TH Aachen stapeln sich die Telegramme. Der Chemiker, dessen Spezialgebiet Legierungen sind, hat viel zu tun, denn Deutschland befindet sich im Krieg. Und Wüsts Rat, wie sich Geschütze, Gewehrläufe und Granaten verbessern lassen, halten die Militärs für kriegsentscheidend. Angesichts der bitteren Erkenntnis, dass deutsche Soldaten dem Gegner waffentechnisch unterlegen sind, ist der Siegestaumel vom August 1914 verflogen. Die Materialschlachten an der Westfront erfordern raschen Nachschub, doch deutscher Stahl lässt sich schwieriger verarbeiten als französischer. „Hunger nach Eisen“ haben überdies Schiffs- und U-Boot-Werften. Diese unvorhergesehene industrielle Dimension des Kriegs fordert die ganze Kraft der deutschen Montanindustrie.

Fritz Wüst arbeitet an einer Denkschrift zur Gründung eines Spezialinstituts für Metall-, Legierungs-, und Eisenforschung und findet damit volle Unterstützung bei Friedrich Schmidt-Ott vom Kultusministerium in Berlin. Auch die Stahlindustrie, vertreten im mächtigen Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), fordert seit Langem eine überbetriebliche Forschungsstätte und nimmt Wüsts Vorschläge mit Beifall auf. Das neue Institut soll die gesamte Produktionskette der Eisenverhüttung im Blick haben, um theoretisch und praktisch neues Wissen über Eisenerz, Eisenerzeugung, -verarbeitung und -veredelung zu gewinnen.

Der VDEh wusste schon länger um die Qualitätsmängel, die jedoch erst der Krieg zu einem massiven Problem gemacht hatte. Seit der industriellen Revolution schauten deutsche Ingenieure nach England, dem Vorreiter für die Entwicklung hüttentechnischer Methoden. Befeuert vom Gründerfieber hatten die Stahlbarone an Rhein und Ruhr seit 1871 die Massenproduktion angekurbelt, aber die Qualität vernachlässigt. Die wenige Industrieforschung war werksgeheim und gab der Branche insgesamt keinen Innovationsschub. Und die Hochschulen konnten kaum helfen.

Dass es auch anders ging, hatte die chemische Industrie vorgemacht. Ihr Fach gehörte nicht nur zum Kanon der Universitäten, sondern sie besaß auch innovationsstarke Forschungslabore und mit dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie in Berlin seit 1912 eine Einrichtung, deren Wissen überbetrieblich verfügbar war. Ähnliches wollte auch die Stahlindustrie, deren Hauptproblem der niedrige Eisenanteil heimischer Erze war. Mehr Wissen über deren chemische und physikalische Eigenschaften würde helfen, diese effizienter auszubeuten und neue Legierungen zu entwickeln, die sich material- und kostengünstiger verarbeiten ließen.



Grundsteinlegung: Albert Vögler, Vertreter der Stahlindustrie und späterer Präsident der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft, bei seiner Rede auf der Feier am 3. Juni 1934 in Düsseldorf.

In der Nähe zur Industrie sah das Kultusministerium jedoch auch eine Gefahr und holte die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (KWG) als Garant der wissenschaftlichen Qualität und Unabhängigkeit mit an den Verhandlungstisch. Die Gesellschaft war 1911 mit dem Auftrag gegründet worden, die außeruniversitäre Forschung zu fördern. Man kam überein, das neue Institut an die Statuten der KWG anzugliedern. Finanzieren sollte es der VDEh über eine Sonderabgabe der Industrie. Der Plan ging auf, denn angesichts der satten Gewinne, die Unternehmer wie Krupp, Thyssen und Stinnes im Krieg verbucht hatten, erschienen ihnen zwei Pfennig des pro Tonne Roheisen eingestrichenen Gewinns gut angelegt.

Im Juni 1917 beschloss der Verein Deutscher Eisenhüttenleute „nachmittags 4 ¼ Uhr in Düsseldorf, Stahlhof“ die Gründung des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Eisenforschung. Dabei betonte der Vorsitzende Albert Vögler, das Institut sei „ausschließlich Friedenszwecken gewidmet“. Er sprach damit den Unternehmern aus der Seele, denn diese dachten bereits mit Sorge an die Nachkriegszeit und bereiteten die Umstellung ihrer Produktion auf die Friedenswirtschaft vor.

Die strittige Frage des Standorts wurde vertagt. Sie sollte Fritz Wüst, dem man den Direktorenposten antrug, in den kommenden Monaten weiter beschäftigen. Immerhin hatte Vögler das Ministerium überzeugt, das neue Institut nicht im Forschungsmekka Berlin-Dahlem, sondern im rheinisch-westfälischen Industriegebiet anzusiedeln. Unter diesen Bedingungen begann die Arbeit am 1. April 1918 in den Räumen von Wüsts Hochschulinstitut in Aachen. Im Jahr 1920 zog die wachsende Belegschaft nach Düsseldorf in die Rheinische Metallwaren- und Maschinenfabrik um.

Obwohl die Stadt Düsseldorf nach zähen Verhandlungen ein Grundstück zugesichert hatte, das in „würdiger Nachbarschaft“ und zentral gelegen keinen von Wüsts Wünschen offenließ, verzögerte sich der Neubau bis 1934. Da das Institut unmittelbar von den Einkünften der Industrie abhing, wirkten sich auch die Wirtschaftskrisen der Nachkriegszeit direkt aus. Der Versailler Vertrag hatte Deutschland die Hauptschuld am Krieg zugewiesen und forderte hohe Reparationen, die nicht zuletzt die Rhein- und Ruhrindustrie aufbringen musste. Im Jahr 1923 erlebte die Weimarer Republik mit

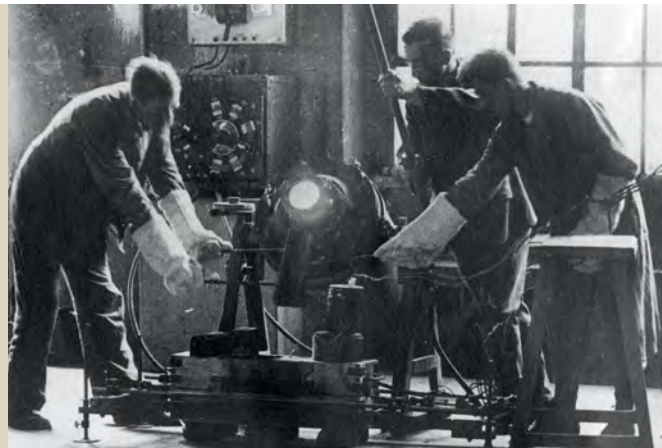
BERLINER TAGEBLATT VOM 13. Mai 1934

» **Drei Millionen Mark für „reine Forschung!“ Für den grosszügigen Neubau des Eisenforschungs-Instituts in Düsseldorf, für die Arbeit an Schreibtisch und Mikroskop. Aber die Praktiker der Wirtschaft sind sich im Klaren darüber, dass dieser „Wechsel auf lange Sicht“ einmal mit Zinsen und Zinseszinsen eingelöst werden wird. [...]**

der Geldentwertung ihr erstes großes ökonomisches Desaster. Und als französische Truppen das Ruhrgebiet besetzten, lähmte dies die wissenschaftliche Arbeit für mehrere Monate. Die deutschen Arbeiter boykottierten aus Protest gegen die Besatzer Fabriken und Förderanlagen, darunter auch die Rheinische Metallwaren- und Maschinenfabrik und mit ihr das Institut als Untermieter.

Erst von 1925 an besserte sich die Lage vorübergehend. Unter Friedrich Körber, der Wüst 1922 als Direktor abgelöst hatte, wuchs die Forschung. Die fünf Abteilungen widmeten sich der Metallurgie, Chemie und Physik, der mechanischen Prüfung sowie der Metallografie. Wie geplant fokussierte man sich auf die Frage, wie die eisenarmen deutschen Erze angereichert werden könnten. Diese waren nach dem Verlust der reicheren lothringischen Minen die wichtigste Rohstoffquelle der Stahlindustrie. Von 1926 an arbeiteten die Wissenschaftler – wie die meisten Deutschen geprägt von der demütigenden Erfahrung der nationalen Niederlage – geheim auch für die Reichswehr.

Die Ernennung Adolf Hitlers zum Reichskanzler beendete im Jahr 1933 die erste deutsche Demokratie, deren schwache Kräfte sie nicht gegen eine dominierende national-konservative Mehrheit verteidigen konnten. Auch die mächtige Ruhrindustrie hatte Hitler massiv finanziell unterstützt. Fast unmittelbar nach der Machtübernahme begann der NS-Staat ein massives Aufrüstungsprogramm – einerseits als Arbeitsbeschaffungsmaßnahme, andererseits, um den nächsten Krieg vorzubereiten.



Im Brennpunkt: Mitarbeiter der Abteilung Metallurgie hantieren an der Hochfrequenzschmelze. Das Bild entstand um das Jahr 1920.

Für das Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung flossen die Gelder nun reichlich, sodass es die lange verschobenen Neubaupläne verwirklichen konnte. Im Sommer 1934 war Grundsteinlegung und schon im November 1935 Einweihung. Bei beiden Feiern demonstrierte die Institutsleitung – zumeist Mitglieder der NSDAP – im Einklang mit der Belegschaft ihre feste nationalsozialistische Überzeugung. Die Presse berichtete beeindruckt von der Veranstaltung, die im markig-pompösen Stil nationalsozialistischer Feiern stattfand. Dem „Einläuten des Gußstahlgeläuts“ durch drei Hitlerjungen folgten die rituellen Hammerschläge, ausgeführt von Wissenschaftsminister Bernhard Rust als Vertreter des NS-Staats, KWG-Präsident Max Planck als Abgeordnetem der Wissenschaft sowie Albert Vögler als dem Repräsentanten der Industrie.

Obwohl sich die Redner in ihren politischen Tonlagen erheblich unterschieden, lobten alle das Miteinander von Wissenschaft und Technik zum nationalen Nutzen. Eingerahmt wurde die Feier vom städtischen Orchester, das mit der Ouvertüre zu den Opern *Rienzi* und *Die Meistersinger von Nürnberg* zwei Lieblingsstücke Adolf Hitlers spielte. Als politisches Bekenntnis endete die Feier mit dem Horst-Wessel-Lied, der Parteihymne der NSDAP, und dem „Deutschlandlied“, bevor die Festgemeinde sich zum rustikalen Eintopfen niederließ.

Aus dem Gebäude selbst sprach jedoch ein anderer Geist, denn die Architekten Heinrich Blecken und Paul Bonatz hatte den kubischen Klinkerbau im Stil des Bauhauses entworfen, das auf nationalsozialistischen Druck in dieser Zeit bereits geschlossen war. Auch für die Büros wählten die Planer Stahlrohrmöbel, welche die Avantgardenkünstler Marcel Breuer und Ludwig Mies van der Rohe Mitte der 1920er-Jahre entworfen hatten. So demonstrierten sie, wie vielseitig, flexibel und zukunftsfähig der Werkstoff Stahl war.

In dem Institut, das mit seiner hervorragenden Ausstattung weltweit eines der modernsten seiner Art war, widmeten sich die Wissenschaftler zwar weiterhin vielfältigen Aspekten der metallurgischen Materialforschung, meist aber für militärische Zwecke. Im Jahr 1940 wurde das Institut als Wehrwirtschaftsbetrieb dem Rüstungsministerium unterstellt, für das es Waffen, Gewehrläufe und Panzerketten verbesserte. Schon seit 1933 beriet man das Luftfahrtministerium.

Nach einem Bombentreffer zog die Forschung von 1943 an Stück für Stück an die Bergakademie Clausthal. Nach Kriegsende verhängten die amerikanischen Truppen ein Arbeitsverbot. Im Jahr 1947 wurde es aufgehoben, und der Wiederaufbau begann, von 1948 an unter dem Dach der neu gegründeten Max-Planck-Gesellschaft. Diese sicherte schließlich langfristig die bei der Gründung als essenziell erachtete Forschungsfreiheit und die politische Unabhängigkeit.



Spiegel und Wahrsagekugel

Ulrich Bahnsen, **Das Leben lesen**, Was das Blut über unsere Zukunft verrät

272 Seiten, Droemer Verlag, München 2017, 19,99 Euro

In unserem kollektiven Gedächtnis bietet das Blut seit Jahrhunderten Stoff für zahllose Geschichten – und beschert uns mittlerweile auch individuell viel Wissen über den Zustand unseres Körpers. Doch was die Forschung nun erreicht hat, das kommt nach Ansicht des Wissenschaftsjournalisten Ulrich Bahnsen einer bislang fast unvorstellbaren „Revolution“ gleich: Das pulsierende Rot, das durch unsere Adern fließt, ist zu einem genauen Spiegel unserer gesundheitlichen Gegenwart, mehr noch: zu einer seriösen Wahrsagekugel für unsere gesundheitliche Zukunft geworden. In seinem Buch *Das Leben lesen* erklärt der Autor die aktuelle Erforschung des Blutes infolgedessen zum „wohl aufregendsten Forschungsgebiet der Medizin und der Genetik“.

Dabei begann laut Bahnsen alles mit der Pränataldiagnostik: Bis vor Kurzem sei die Wahrscheinlichkeit genetischer Veränderungen beim Fötus – wie etwa die Trisomie 21 – nur anhand invasiver oder nicht ausreichend präziser Untersuchungen bestimmt worden. Doch nun sei es möglich, so der Autor, aus dem Blut der Mutter mit deutlich größerer Genauigkeit herauszulesen, ob bei dem werdenden Kind genetische Anomalien vorliegen könnten. Nicht nur Fehlgeburten würden aufgrund der nichtinvasiven Tests verhindert werden, sondern auch Fehldiagnosen – und damit Abtreibungen.

Der Blick in unser Blut offenbart aber nicht nur die genetische Beschaffenheit

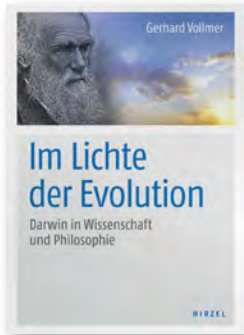
von werdenden Kindern, sondern auch den gesundheitlichen Istzustand von möglichen Krebspatienten: Ebenfalls deutlich präziser und auch sehr viel schneller könnten im Blut bösartige Tumore entdeckt werden. Das revolutioniere die klassische Krebsvorsorge und ermögliche eine deutlich verbesserte Diagnose und Behandlung. „Nur mit einer Blutprobe können Mediziner also künftig entscheiden, welchen ihrer Patienten sie die zusätzliche Chemo- und Strahlentherapie zumuten müssen und welchen Kranken sie erspart bleiben kann.“ Die Erforschung unseres Blutes verspricht laut Bahnsen außerdem bisher utopische – oder auch dystopische – (Wissens-)Möglichkeiten rund um unseren Alterungsprozess.

Wie ist all das möglich? Bahnsen erklärt: „Es klingt seltsam, aber trotz der Bösartigkeit eines Tumors und der Schönheit werdenden Lebens gibt es zwischen einem Krebsherd und einem Fötus eine Menge biologischer Parallelen. Beide wachsen auf Kosten eines Wirts, nämlich des Körpers eines Patienten oder der Schwangeren. Biologisch verhalten sich Tumor wie Fötus gleichsam wie Parasiten, mit ihrem eigenen Überlebensinteresse.“ So lasse sich bei einer Schwangeren das Erbmaterial des Fötus im Blut finden und auf genetische Anomalien untersuchen; bei Krebskranken würden permanent Erb-moleküle ins Blut gestreut, die ein wesentlich aktuelleres Bild der Erkrankung lieferten als etwa Biopsien.

Diese „Revolution“ wirft allerdings auch Fragen auf, vor allem ethische: Was bedeutet eine noch genauere Selektion von gesunden Föten für unsere Gesellschaft? Wer wird Zugang zu den Bluttests haben? Und: Wo so viel Potenzial für die Zukunft der Medizin ist, da tauchen auch die Schattenseiten des Profitstrebens auf. Als ein Beispiel nennt Bahnsen die pränatale Suche nach einem dreifachen X-Chromosom: „Frauen mit Triple X haben nämlich in der Regel keine Beeinträchtigung, bei den meisten wird die Anomalie daher auch nie diagnostiziert. Warum also sollte man beim Fötus danach suchen? Nun, man verdient damit Geld. Medizinisch sinnvoll ist diese Diagnose fast nie. Auch das Geschäft mit den Weissagungen des Blutes hat mehr als eine schmutzige Seite.“ Doch diese Seite kommt bei Bahnsen bedauerlicherweise etwas zu kurz.

Ansonsten besticht das Buch durchaus. Der Autor versteht es, komplexe medizinische Vorgänge für Laien verständlich zu vermitteln. Diese Leistung ist umso größer, als Ulrich Bahnsen die entsprechenden Fachartikel offenbar größtenteils selbst rezipiert hat – für ein populärwissenschaftliches Sachbuch ist das alles andere als selbstverständlich. Bahnsens Erkenntnisse aus Fachveröffentlichungen und -gesprächen zeigen dabei sehr klar: Der Blick in unser Blut wird wohl tatsächlich viele Aspekte unserer medizinischen Gegenwart und Zukunft massiv verändern.

Anne-Kathrin Weber



Darwin an der Börse

Gerhard Vollmer, **Im Lichte der Evolution**, Darwin in Wissenschaft und Philosophie

616 Seiten, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 2017, 39,00 Euro

„Nichts in der Biologie macht Sinn außer im Lichte der Evolution“, schreibt 1973 der Genetiker Theodosius Dobzhansky. Der Physiker und Philosoph Gerhard Vollmer geht sogar noch weiter: „Evolution ist überall“, lautet sein Credo. In seinem neuen Buch untersucht er, wie sich der Evolutionsgedanke in den unterschiedlichsten Fachgebieten niedergeschlagen hat. Die Idee dazu geht auf das Darwinjahr 2009 zurück: Auf verschiedenen Kongressen begegnete Vollmer einer solchen Themenvielfalt, dass er beschloss, alle Disziplinen zusammenzustellen, in denen Evolution eine wichtige Rolle spielt. Dabei ahnte er anfangs noch nicht, auf welche Mammutaufgabe er sich da einließ.

Acht Jahre später bringt Gerhard Vollmer ein 616 Seiten dickes Sammelwerk heraus. Darin behandelt er 58 Disziplinen, von Evolutionärer Finanztheorie, Kunst, Ökonomie, Pädagogik bis hin zu Evolutionärer Psychologie. Die Biologie taucht dabei eher am Rande auf, liegt doch die Faszination für den Autor vor allem darin, „wie der Evolutionsgedanke in nichtbiologischen Disziplinen Fuß gefasst hat“. Naturgemäß geht es in dem Buch daher nicht nur um Evolution im biologischen Sinne; der Begriff wird vielmehr auch allgemein verwendet, im Sinne von „Wandel und Entwicklung“. Das ist teils irritierend, denn anders, als das Cover verheißt, haben manche Kapitel wie „Evolutionäre Kosmologie“ mit Darwin nichts zu tun.

Das Werk gliedert sich in vier große Abschnitte: Nach einer Einführung „Über

Evolution“ bietet der zweite Teil „Darwin in den Wissenschaften“ eine alphabetisch sortierte Zusammenstellung der Gebiete, die vom Evolutionsgedanken beeinflusst sind. Dazu zählt etwa die „Evolutionäre Finanztheorie“, die Vorgänge auf dem Finanzmarkt analog zu biologischen Prozessen modelliert. Innovationen entsprechen dabei den Mutationen im Erbgut, nicht planbare Veränderungen des Marktes dem Wandel der Umwelt. Händler sind Individuen, die der natürlichen Auslese unterliegen und ihre Strategien den äußeren Umständen und dem Verhalten der Konkurrenz anpassen. Wirtschaftswissenschaftler wollen mit diesem Ansatz Anomalien auf den Finanzmärkten erklären, die sich der klassischen Finanztheorie entziehen.

Die „Evolutionäre Kunst“ ist ein Ansatz, der Mitte der 1990er-Jahre von dem deutschen Künstler und Informatiker Günter Bachelier entwickelt und sogar zum Patent angemeldet wurde. Ein gegenständliches Motiv, etwa ein Porträt, dient dabei als Ausgangspunkt für einen evolutionären Prozess. Es wird vom Künstler digital abgespeichert und über ein spezielles Programm vielfach variiert („Mutation“). Aus den verschiedenen Varianten werden dann einige ausgewählt („Selektion“), erneut variiert und je nach Gusto auch untereinander gemixt („Rekombination“).

Im Abschnitt „Evolutionäre Psychologie“ geht es dann um Risikoeinschätzung und Risikobereitschaft – ein Gebiet, auf dem Gerd Gigerenzer, Direktor am Ham-

burger Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, arbeitet. Dieser fand heraus, dass nach den Anschlägen auf das World Trade Center etwa 1600 Menschen zusätzlich starben bei dem Versuch, die vermeintlichen Gefahren des Fliegens zu umgehen, indem sie aufs Auto umstiegen. Dabei waren sie von der Furcht vor „Schockrisiken“ getrieben, bei denen viele gleichzeitig sterben – möglicherweise eine evolutionäre Anpassung aus einer Zeit, als die Menschen noch in Sippen zusammenlebten.

Vollmer schließt mit den Kapiteln „Darwin und die Philosophie“ sowie „Darwin in der Philosophie“. Der Autor, der sich vor allem mit seinen Arbeiten zur evolutionären Erkenntnistheorie einen Namen gemacht hat, beschreibt hier, welche Rolle der Evolutionsgedanke etwa in der Metaphysik, der Ethik oder im Humanismus spielt.

Das Buch hat den Charakter eines Nachschlagewerks, und wohl die wenigsten werden es von vorne bis hinten durchlesen. Laut Vollmer ist das auch gar nicht nötig: Die Kapitel sind in sich abgeschlossen und enthalten immer wieder Querverweise. „Ich stelle mir deshalb gern vor, dass man in dem Buch schmökert wie in einem Lexikon, dabei von einem Thema zum anderen gerät“, schreibt der Autor. Interessant sind dabei vor allem seine fachübergreifenden Gedanken, die immer wieder neue Blickwinkel und Zusammenhänge eröffnen.

Elke Maier



Keimzellen für die Natur

Peter Berthold, **Unsere Vögel**, Warum wir sie brauchen und wie wir sie schützen können

336 Seiten, Ullstein Verlag, Berlin 2017, 24,00 Euro

„Die modernen landwirtschaftlichen Produktionsmethoden vernichten den Artenreichtum auf den Feldern. So fliegen über intensiv bewirtschafteten Fluren heute kaum noch fünf Prozent der Tagfalter, die dort noch vor einem Vierteljahrhundert anzutreffen waren“. So klagte *Knaurs Großer Naturführer* bereits 1984 über die Verhältnisse auf Deutschlands Wiesen und Feldern. Mehr als 30 Jahre später ist diese Entwicklung nicht gestoppt – im Gegenteil: Die Zahl der Insekten ist noch einmal um bis zu 80 Prozent zurückgegangen, und die Liste bedrohter Arten wird länger und länger. In dramatischer Weise sind davon auch die Vögel betroffen.

Peter Berthold zeichnet ein ernüchterndes Bild davon, wie sich die Artenvielfalt hierzulande entwickelt hat. Der frühere Direktor am Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell zitiert Berichte von Zeitgenossen, denen zufolge Anfang des 19. Jahrhunderts Tausende von Drosseln, Rotkehlchen und Grünfinken die Hecken und Gärten der Umgebung bevölkerten. Mitte des Jahrhunderts setzte dann ein unaufhörlicher Niedergang der Vogel-

welt in Deutschland ein, der bis zum heutigen Tag anhält.

So gibt es in Deutschland heute 80 Prozent weniger Vögel als im Jahr 1800. Selbst Arten wie die früher allgegenwärtigen Spatzen und Meisen sind in vielen Gebieten selten geworden. Peter Berthold nennt mehrere Hauptursachen für das Verschwinden: den großflächigen Anbau von Monokulturen in der Land- und Forstwirtschaft sowie den Einsatz von Unkraut- und Insektenvernichtungsmitteln, die Lebensraumzerstörung durch Siedlungen, Straßen und Freizeitnutzung sowie die Jagd auf Zugvögel in Ländern rund um das Mittelmeer.

Berthold belässt es aber nicht bei einer Bestandsaufnahme der „heruntergewirtschafteten“ Natur in Deutschland, er weiß einen Ausweg: Nachdem sich der staatlich organisierte Naturschutz als weitgehend wirkungslos erwiesen hat – viele Schutzgebiete sind zu klein, zu weit auseinander gelegen, zu wenig geschützt –, setzt Berthold auf private Initiativen vor Ort. Sein Rezept: Gemeinden, Privatpersonen und andere Grundbesitzer schaffen auf landwirtschaftlich unattraktiven Flächen neu-

en Lebensraum für die Natur, „Jeder Gemeinde ihr Biotop“ lautet das Motto. Nicht weiter als zehn Kilometer sollen die Flächen voneinander entfernt sein, damit sich Tiere und Pflanzen austauschen können.

Wie das aussehen könnte, hat Berthold selbst eindrucksvoll vorgeführt. Mit dem Biotopverbund Bodensee hat er die Keimzelle für ein bundesweites Netzwerk aus Lebensräumen begründet. Ein ganzes Kapitel seines Buches widmet er seinen Erfahrungen im Umgang mit Lokalpolitikern und Behörden. Leser, die selbst aktiv werden wollen, finden hier wertvolle Tipps und Hilfestellung bei der Schaffung neuer Biotope.

Aber Peter Berthold möchte nicht nur neue Lebensräume schaffen, sondern auch bestehende für die Natur zurückgewinnen. Auf vier Prozent der Landesfläche oder 15000 Quadratkilometern können Hobbygärtner nach eigenem Gutdünken schalten und walten. Hier schlummert ein enormes Potenzial: Naturnah bepflanzt und bewirtschaftet, könnten in Deutschlands Gärten rund 30 Millionen Singvögelpaare nisten – ein Appell also an alle Thuja-, Kirschlorbeer- und Zierkies-Liebhaber. Harald Rösch

Weitere Empfehlungen

- David Eagleman, **The Brain**, Die Geschichte von dir, 224 Seiten, Pantheon Verlag, München 2017, 22,99 Euro
- Ernst Peter Fischer, **Das große Buch der Physik**, 320 Seiten, Fackelträger Verlag, Köln 2017, 40,00 Euro
- Charles Foster, **Der Geschmack von Laub und Erde**, Wie ich versuchte, als Tier zu leben, 288 Seiten, Piper Verlag (Malik), München/Berlin 2017, 20,00 Euro
- Christophe Galfard, **Das Universum in deiner Hand**, Die unglaubliche Reise durch die Weiten von Raum und Zeit und zu den Dingen dahinter, 400 Seiten, Verlag C.H. Beck, München 2017, 24,95 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 2781 8770
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 (**MAXPLANCKRESEARCH**) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr; die Auflage dieser Ausgabe beträgt 85000 Exemplare (**MAXPLANCKRESEARCH**: 10000 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 22300 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