

Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft **3.2016**



Schlaf

FORSCHUNGSPOLITIK

Ein Update
für Open Access

ROBOTIK

Mikroboote
kommen in Fahrt

ATMOSPHÄRENCHEMIE

Heiße Luft
im Orient

ETHNOLOGIE

Ein Meer von
Verbindungen

The background of the entire page is a photograph of a large wind turbine in the foreground, with its blades blurred from motion. In the distance, other wind turbines and a small offshore platform are visible on the sea under a cloudy sky.

SIEMENS

Ingenuity for life

Pictures of the Future

Das Magazin für Forschung und Innovation

Dossier – Die Zukunft der Energieversorgung

Erfahren Sie hier, wie wir die Abkehr von fossilen Energieträgern bis 2100 erreichen können.

[siemens.de/pof-zukunft-der-energieversorgung](https://www.siemens.de/pof-zukunft-der-energieversorgung)



Foto: MPI für Evolutionsbiologie

Das Labor im großen See

Sonne, Wasser, blauer Himmel und im Hintergrund ein Schloss – viele Menschen verbinden mit den Plöner Seen unbeschwerte Urlaubstage im Norden Deutschlands. Auch die Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Evolutionsbiologie haben den Blick für die Schönheit der Landschaft sicher nicht verloren, doch ihr Interesse gilt vor allem einem der Seebewohner und seinen Genen. Der Dreistachelige Stichling (*Gasterosteus aculeatus*) fühlt sich besonders wohl im Uferbereich des Großen Plöner Sees. Und genau dort, mitten im natürlichen Brutrevier des kleinen Fisches, stehen die Freiwasserlabore des Instituts.

In sechs großen Käfigen können die Stichlinge – im Labor gezüchtet und im Frühjahr eingesetzt – unter natürlichen Bedingungen Reviere erobern, Nester bauen und sich fortpflanzen. Wobei sie auch den dort vorkommenden Parasiten ausgesetzt sind. Das Besondere an den Fischlein: Die spezifische, individuelle Kombination der Immungene jedes einzelnen Tieres ist bekannt. So können die Forscher beobachten, welche Stichlinge im stetigen Wettlauf mit den verschiedenen Parasiten am widerstandsfähigsten sind und – da während der gesamten Brutsaison für jedes Ei mithilfe molekulargenetischer Methoden Vater und Mutter bestimmt werden – wie viele Nachkommen welcher Fisch hat.

Die resistentesten Fische geben ihre Immunkompetenz an ihre vielen Nachkommen weiter. Dabei bevorzugen Stichlingsweibchen offenbar Paarungspartner, deren Immungene ihre eigene Ausstattung am besten ergänzen – und die zudem durch ihre gesunde Prachtfärbung zeigen, dass sie über die gegen die aktuell vorherrschenden Parasiten benötigten Genvarianten verfügen. Die Partnerwahl der Mutter hat also einen direkten Vorteil für die Nachkommen.

Welches Männchen für eine Paarung infrage kommt, erkennen die Weibchen neben der Prachtfärbung am Geruch des potenziellen Partners. Denn der Geruch wird – wie übrigens auch bei uns Menschen – durch die Zusammensetzung der Immungene bestimmt.



Inhalt



10 Befreit: In Zeiten von Open Access müssen die Verlage ihre Geschäftsmodelle umstellen.

PERSPEKTIVEN

- 06** Unter freiem Himmel
- 06** Die Sinne des Lebens
- 07** „Eigentlich hätten wir gern weitergemacht!“
- 08** Tierversuche verstehen
- 08** Angestiftet
- 09** Doppelter Karrierestart
- 09** Ins Netz gegangen

ZUR SACHE

- 10** **Ein Update für Open Access**
Die Welt des Publizierens hat sich mit dem Siegeszug des Internets dramatisch verändert. Es ist an der Zeit, dass die Verlage ihre Geschäftsmodelle überdenken.

FOKUS

- 18** Schlummern zwischen Himmel und Erde
- 26** Metronome, die den Tag regieren
- 32** Wenn das Gehirn auf Stand-by schaltet

18 SCHLAF

18 Schlummern zwischen Himmel und Erde

Fregattvögel dösen problemlos in der Luft, ohne abzustürzen. Und während ihrer tagelangen Flüge über dem offenen Ozean kommen sie insgesamt mit extrem wenig Schlaf aus. Ein Team um Niels Rattenborg vom Max-Planck-Institut für Ornithologie hat erstmals nachgewiesen, dass Vögel im Schlafmodus fliegen können.

26 Metronome, die den Tag regieren

Ludwig II. regierte nachts und schlief am Tag. Litt der bayerische Märchenkönig unter einer Störung, die seinen Schlaf-Wach-Rhythmus durcheinanderbrachte? Darüber kann auch Gregor Eichele nur spekulieren. Aber er und sein Team am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie haben viele neue Erkenntnisse über die natürlichen Taktgeber unseres Körpers gewonnen.

32 Wenn das Gehirn auf Stand-by schaltet

Ist man unausgeschlafen, sieht die Welt oft ziemlich trist aus. Wenn die Müdigkeit lange anhält, kann die trübe Stimmung krankhaft und zu einer Depression werden. Umgekehrt gehen Depressionen häufig mit massiven Schlafstörungen einher. Axel Steiger und seine Kollegen untersuchen am Max-Planck-Institut für Psychiatrie den Zusammenhang zwischen Schlafstörungen und Depression.

ZUM TITEL Schlaf ist ein Grundbedürfnis und etwa für das Lernen und Erinnern unerlässlich. Innere Uhren im Körper steuern den Tag-Nacht-Rhythmus und beeinflussen dabei das Verlangen nach Ruhe – bei Menschen ebenso wie bei vielen Tieren.

TECHMAX

Moleküle auf der Zunge –
wie die Physik das
Essen erforscht



46 Begeistert: Für Joe Hennawi ist die Kosmologie der spannendste Wissenschaftszweig überhaupt.



54 Bewegt: Forscher manövrieren Mikroschwimmer wie diesen durch biologische Flüssigkeiten.



62 Bedrängt: Im Nahen Osten machen Hitze und Trockenheit den Menschen immer mehr zu schaffen.

SPEKTRUM

- 40** Erdähnlicher Planet bei Proxima Centauri
- 40** Massenpanik im Computer
- 41** Wörter sind kein Zufall
- 41** Lockstoffe im Fliegenkot
- 41** Widerstandskraft hat ihren Preis
- 42** Hologramme mit Schall
- 42** Gut und Böse im Gehirn
- 43** Kohlmeisen auf dem Land sind fitter
- 43** Spiralen helfen bei der Planetengeburt
- 44** Warmes Mittelmeer lässt Sahel ergrünen
- 44** Ein Quantenprozessor für einzelne Photonen
- 45** Mikroroboter mit Magnetantrieb
- 45** Schlupfloch für Tumore
- 45** Klischees über Nationen steuern unser Handeln

PHYSIK & ASTRONOMIE

- 46 Der Archäologe des Universums**
Zur Person: Joe Hennawi

MATERIAL & TECHNIK

- 54 Mikroboote kommen in Fahrt**
Medikamente mit einem Mikro- oder gar Nanofrachter direkt zu einem Krankheitsherd zu transportieren, könnte die Behandlung so mancher Krankheit erleichtern. Forscher entwickeln winzige Roboter, die das eines Tages ermöglichen sollen.

UMWELT & KLIMA

- 62 Heiße Luft im Orient**
Der Nahe Osten und Nordafrika werden von bewaffneten Konflikten und politischen Krisen erschüttert. Doch selbst wenn diese gelöst würden, dürften viele Menschen dort bald gezwungen sein, ihre Heimat zu verlassen: Wissenschaftler prognostizieren einen drastischen Klimawandel und zunehmende Luftverschmutzung.

KULTUR & GESELLSCHAFT

- 70 Ein Meer von Verbindungen**
Lange waren Schiffe die schnellsten Verkehrsmittel, und sie konnten Menschen und Güter in großer Zahl transportieren. So wurden Meere zum Kontakt- und Handelsraum für unterschiedliche Nationen, und über das Wasser hinweg haben sich vielfältige Netzwerke entwickelt.

RUBRIKEN

- 03 Orte der Forschung**
- 16 Post aus dem Nordatlantik**
Auf Kurs bei Wind und Wellen
- 78 Rückblende**
Kohle – flüssig gemacht
- 80 Neu erschienen**
- 80** Lothar Krappmann, Christian Petry, Worauf Kinder und Jugendliche ein Recht haben
- 81** Elizabeth Kolbert, Das sechste Sterben
- 82** Julian Baggini, Ich denke, also will ich
- 83 Standorte**
- 83 Impressum**

Unter freiem Himmel

„Bilder aus der Wissenschaft“ jetzt auch in Bremen



Vor dem „Universum Bremen“, dem Wissenschaftsmuseum der Hansestadt, bekommen Besucher ein Bild von der Forschung der Max-Planck-Institute.

Keine Frage – kaum etwas ist besser geeignet, um Aufmerksamkeit zu erregen, als spektakuläre Bilder. Genau dies nutzt die Ausstellung „Bilder aus der

Wissenschaft“. Mit überraschenden, ästhetischen Aufnahmen im Großformat bietet sie einen außergewöhnlichen, leichten Zugang zur Forschung

an den Max-Planck-Instituten. Insgesamt umfasst sie 50 Motive, die regelmäßig aktualisiert und um neue ergänzt werden. In ihrer Gesamtheit sind die Bilder jederzeit online zu sehen sowie in wechselnden Zusammenstellungen an verschiedenen Orten weltweit. Auch in Deutschland erfreuen sich die „Bilder aus der Wissenschaft“ nach wie vor großer Beliebtheit. Jedes Jahr zieht die Ausstellung in München im Rahmen der „Langen Nacht der Museen“ an nur einem Abend weit mehr als anderthalbtausend Besucher an. Neuester Zuwachs: eine Schau unter freiem Himmel. Hoch im Norden der Republik begrüßen seit Juli zehn Bilder auf dem Vorplatz des Science Centers „Universum Bremen“ die Besucher. Wem die Bilder gefallen, der kann sich per QR-Code gleich an Ort und Stelle in die Online-Ausstellung auf der Homepage der Max-Planck-Gesellschaft einklinken.

 www.bilder.mpg.de

Die Sinne des Lebens

Martin Wikelski und Bonnie Bassler erhalten Max-Planck-Forschungspreis

Die Frage, wie Organismen ihre Umwelt wahrnehmen können, steht dieses Jahr im Mittelpunkt des Max-Planck-Forschungspreises. Dabei studieren die beiden Preisträger Lebewesen, wie sie unterschiedlicher nicht sein könnten: Während Martin Wikelski, Direktor am Max-Planck-Institut für Ornithologie, die Sinnesleistungen von Tieren in ihrer natürlichen Umgebung beobachtet, arbeitet Bonnie L. Bassler von der Universität Princeton und dem Howard Hughes Medical Institute mit Bakterien. Die US-Amerikanerin hatte einen entscheidenden Anteil an der Entdeckung, dass selbst diese kleinsten Lebewesen über Signalfstoffe miteinander kommunizieren und dann als Kollektiv handeln. Martin Wikelski geht der Frage nach, wie verschiedene Wirbeltiere ihre Umwelt wahrnehmen und sich in ihr zurechtfinden. Er hat vor allem wertvolle Erkenntnisse darüber gewon-



Bonnie Bassler und Martin Wikelski untersuchen, wie verschiedene Lebewesen die Umwelt wahrnehmen.

nen, wie Tiere sich auf ihren mitunter Tausende Kilometer langen Reisen orientieren und an ihr Ziel finden. Mit dem satellitengestützten Beobachtungssystem Icarus ist er ein Pionier auf dem Gebiet der Wildtier-Telemetrie. Der mit 750 000 Euro dotierte Max-Planck-Forschungspreis wird vom Bundesforschungsministerium finanziert und von der Alexander von Humboldt-Stiftung und der Max-Planck-Gesellschaft vergeben.

„Eigentlich hätten wir gern weitergemacht!“

Holger Sierks vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung zum Ende der Rosetta-Mission

Am 30. September landete die Raumsonde Rosetta auf der Oberfläche des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko. Damit endete eines der spannendsten Projekte der europäischen Raumfahrt. Holger Sierks vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen leitete das Konsortium des Kamerasystems Osiris, dem Wissenschaft und Öffentlichkeit spektakuläre Aufnahmen vom Kern des Schweifsterns verdanken.

Herr Sierks, die Kometenmission Rosetta ist zu Ende gegangen. Schwingt da nicht auch ein wenig Wehmut mit?

Holger Sierks: Die Mission hat rund 30 Jahre gedauert: angefangen mit einer Findungsphase auf wissenschaftlicher Ebene, dann der Planungs- und Bauphase und schließlich der Flugzeit zum Zielkometen. Die letzten zweieinhalb Jahre hat Rosetta den Kometen dann in unmittelbarer Nähe begleitet. Das Ende war für alle Beteiligten sehr emotional. Die wenigsten Kollegen sind noch aus der Pionierphase dabei; ich selbst bin vor 20 Jahren dazugestoßen. Rosetta ist also ein gutes Beispiel für eine generationenübergreifende Arbeit in der Weltraumforschung. Die Raumsonde funktionierte bis zum Schluss wunderbar. Eigentlich hätten wir gern weitergemacht!

Wäre das denn möglich gewesen?

Die Alternative wäre gewesen, die Sonde nochmals in einen Winterschlaf zu versetzen und sie bei erneuter Annäherung des Kometen an die Sonne zu reaktivieren. Allerdings hätte dann der Treibstoff nicht dazu ausgereicht, um mit dem Kometen wieder in Sonnennähe zu kommen und den nächsten Aktivitätszyklus zu sehen.

Was ist für Sie der interessanteste Aspekt der Mission?

Am meisten berührt mich die Diskussion um den Ursprung des Kometen. Wir erhoffen uns Erkenntnisse darüber, wie es in den ersten Millionen Jahren im Sonnensystem ausgesehen hat. Vermutlich ist der Kometenkern, den wir heute sehen, aus zwei kleineren entstanden. In der Gasphase der Akkretionsscheibe um die junge Sonne wurden diese Kerne abgebremst und sind



„Das Ende war für alle Beteiligten sehr emotional“: Holger Sierks, Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung.

mit sehr geringer Geschwindigkeit aufeinandergetroffen. Spannend finde ich auch die zylindrischen Einbrüche, bei denen wir von der Oberfläche aus beinahe 200 Meter in die innere Struktur des Kometen blicken – und das bei einem Kometenkern mit einem Radius von nur 1000 oder 2000 Metern. Auch wenn das Material dort durch die Sonneneinstrahlung sicher etwas prozessiert ist, schauen wir in die Tiefe des Kometen und damit vielleicht in seine 4,5 Milliarden Jahre alte Geschichte. Und die Innenwände dieser Einbrüche sind nicht glatt und homogen. Sie besitzen auf einer Zwei- bis Dreimeterskala sehr scharf definierte Strukturen, die Apfelsinen in einer Apfelsinenkiste ähneln.

Es gibt also eine Menge Daten auszuwerten. Wie lange werden Sie und Ihre Kollegen damit beschäftigt sein?

Es existieren heute noch Zusammenarbeiten von der Giotto-Mission, die vor 30 Jahren am Halleyschen Kometen vorbeigeflogen ist. Ich gehe davon aus, dass wir auch für Rosetta 20, 30 Jahre brauchen werden. Damit meine ich nicht nur die Analyse der Osiris-Bilddaten, sondern auch die übergreifende Analyse der Spektrometerdaten, der thermischen und Millimeter- sowie Submillimeterdaten der oberflächennahen

Strukturen. Was die Osiris-Aufnahmen betrifft, haben wir zunächst drei Jahre Zeit, um ein umfassendes Archiv zu erstellen. Dieses Vorgehen ist ein Novum. Normalerweise sind diese Arbeiten mit der Abgabe der Daten nach zwölf Monaten abgeschlossen. Wir werden die Bilder kalibrieren, Mosaik und Geländemodelle erstellen und die Produkte dann der Öffentlichkeit und der Wissenschaft zugänglich machen.

Ihr Fazit zum Ende der Mission?

Rosetta hat es 2014 auf die Titelseite der Zeitschrift SCIENCE mit dem Label „Breakthrough of the Year“ gebracht. Ich glaube, die Mission ist tatsächlich als Durchbruch in der Kometenforschung einzuordnen.

Was wird nach Rosetta der nächste Schritt in der Kometenforschung sein?

Ich denke, die wissenschaftliche Gemeinschaft ist sich einig darüber, dass wir als Nächstes Kometenmaterial hierherholen und in den irdischen Labors untersuchen müssen – insbesondere die organischen Bestandteile. Wir überlegen schon heute, wie wir eine solche Rückholaktion auslegen würden. Interview: Felicitas Mokler

 Dossier zum Thema:
www.mpg.de/rosetta

Tierversuche verstehen

Allianz der Wissenschaftsorganisationen startet Informationsinitiative

Das Thema Tierversuche schürt häufig starke Emotionen. Doch gerade in vielen Bereichen der Grundlagenforschung sind Untersuchungen an Tieren unverzichtbar. Nur mit ihrer Hilfe lassen sich komplexe Vorgänge im Organismus nachvollziehen. Sie sind Ausgangspunkt für neue wissenschaftliche Erkenntnisse und treiben den Fortschritt in der Medizin voran. Vor diesem Hintergrund hat die Allianz der Wissenschaftsorganisationen, der auch die Max-Planck-Gesellschaft angehört, die Initiative „Tierversuche verstehen“ ins Leben gerufen. Öffentlichkeit und Medien sollen umfassend, aktuell und faktenbasiert über Tierversuche informiert werden. Wichtigster Baustein ist dabei eine Internetplatt-

form, die Nachrichten und Hintergrundtexte, Filme, Infografiken und eine Bilddatenbank bereitstellt sowie die Möglichkeit zur Diskussion bietet. Journalisten können Kontakt zu Experten knüpfen, Schüler und Lehrer finden dort Informationen für den Unterricht. Ziel ist, die Debatte über Notwendigkeit, Nutzen und Alternativen tierexperimenteller Forschung zu versachlichen. Auch in den sozialen Medien ist die Initiative aktiv. Ab Ende dieses Jahres will sich „Tierversuche verstehen“ zudem bei öffentlichen Veranstaltungen präsentieren und der Diskussion stellen.

 www.tierversuche-verstehen.de



Angestiftet

Max-Planck-Förderstiftung feiert Jubiläum

Seit zehn Jahren unterstützt die Max-Planck-Förderstiftung als unabhängige Institution die Arbeit von Max-Planck-Wissenschaftlern. Aus den Erträgen des Stiftungskapitals wurden seither rund 30 Projekte mit mehr als 45 Millionen Euro gefördert, so zum Beispiel der zweite Flug von Sunrise, dem größten fliegenden Sonnenteleskop, oder die Initiative zum Zentrum für Systembiologie in Dresden. Die zusätzlichen privaten Gelder bieten einen schnellen und flexiblen Spielraum dort, wo öffentliche Mittel nicht zur Verfügung stehen. Ein weiterer Förderschwerpunkt besteht darin, die Arbeitsbedingungen für exzellente Forscher zu sichern, besonders um sie für ein Max-Planck-Institut zu gewinnen oder dort zu halten.

Foto: TWde

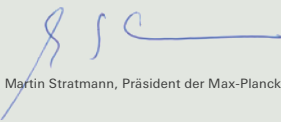


MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Danke.

10 Jahre Freiräume für Ideen
10 Jahre herausragendes Engagement
10 Jahre Max-Planck-Förderstiftung

Seit zehn Jahren werden unsere Pioniere des Wissens durch die Max-Planck-Förderstiftung unterstützt und ermutigt, wissenschaftliches Neuland zu betreten.
Wir danken allen Stiftern und Spendern, insbesondere den Gründungsstiftern Stefan von Holtzbrinck und Reinhard Pöllath.



Martin Stratmann, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft



www.maxplanckfoerderstiftung.de

Doppelter Karrierestart

Max-Planck-Gesellschaft und TU München berufen gemeinsam junge Spitzenwissenschaftler

Die Möglichkeit, eigene Forschungskonzepte umzusetzen, Zugang zu hervorragender Laborausstattung, interdisziplinärer Austausch mit erfahrenen Kollegen: Diese Merkmale charakterisieren das neue Kooperationsmodell der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) und der Technischen Universität München (TUM). Das Konzept: Junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die aus einem internationalen Bewerberpool für die Leitung einer Max-Planck-Forschungsgruppe ausgewählt wurden, erhalten von der TUM zusätzlich einen Ruf auf eine befristete Tenure-Track-Professur. Damit bekommen die jungen Wissenschaftler eine verlässliche Perspektive für ihre weitere Karriereentwicklung. Eine Evaluation nach sechs Jahren entscheidet, ob sie dauerhaft an der TUM forschen und lehren – zunächst als Associate Professor mit W3-Besoldung, verbunden mit der Option auf den weiteren Aufstieg zum Full Professor. Laut Max-Planck-Präsident Martin Stratmann ist das Angebot weltweit einzigartig: „Die neue Kooperation ist ein echter Gewinn für den Wissenschaftsstandort Deutschland im Wettbewerb um exzellente Nachwuchswissenschaftler aus aller Welt.“ Im Oktober haben beide Institutionen erstmals sieben Nachwuchstalente gemeinsam berufen, zum Teil von so renommierten Institutionen wie der Universität Berkeley.



Gemeinsames Ziel: Wolfgang Herrmann, Präsident der TU München, und Max-Planck-Präsident Martin Stratmann (rechts) wollen mithilfe der Kooperation die besten jungen Talente gewinnen.

Ins Netz gegangen



Korallen im Zeitraffer

Korallen gehören zu den farbenprächtigsten Meeresbewohnern. Die Nesseltiere leben nicht nur in lichtdurchfluteten tropischen Gewässern. Einige von ihnen kommen auch in der Tiefsee mehr als 2000 Meter unter dem Meeresspiegel vor. Ein vierminütiges Video aus mehr als 25000 Makroaufnahmen zeigt die flirrende Schönheit der Korallen. Die Aufnahmen dazu entstanden am Great Barrier Reef vor der Küste Australiens und dokumentieren eines der größten Naturwunder unserer Erde. Durch die globale Klimaerwärmung, die Ozeanversauerung, aber auch durch Tourismus und den geplanten Ausbau eines Kohlehafens ist das sensible Ökosystem extrem gefährdet.

[video.com/156942975](https://www.youtube.com/watch?v=156942975)

Der Rede wert

Erzählen, erklären, diskutieren, überreden, unterrichten – was Menschen mit Sprache bewerkstelligen, geht weit über den Austausch von Informationen hinaus. Ohne Sprache gäbe es weder Handel noch Politik, weder Religion noch Wissenschaft, weder Rechte noch Gedichte. Doch das Phänomen Sprache birgt viele Rätsel: Worauf ist diese einzigartige menschliche Fähigkeit zurückzuführen? Wie lernen Kinder sprechen? Und welche Ausprägungen hat die Sprache in verschiedenen Teilen der Welt entwickelt? Ein neues Dossier mit Interviews, Videos und Podcasts gibt einen Überblick über wichtige Forschungsfragen innerhalb der Max-Planck-Institute.

www.mpg.de/sprache

Chancengleichheit im Fokus

Begabung, Kreativität und Leidenschaft – darauf setzt die Max-Planck-Gesellschaft. Sie fördert Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter unabhängig von Geschlecht, Nationalität, Religion, Behinderung, Alter, kultureller Herkunft und sexueller Identität: In der Vielfalt liegt die Basis für erfolgreiche Forschung. Um die auch weiterhin zu stärken, bietet die Max-Planck-Gesellschaft Hilfestellungen an, die auf ihrer Karriere-Webseite gebündelt dargestellt sind. Wichtige Säulen sind die Vereinbarkeit von Familie, Freizeit und Beruf, die Förderung von Wissenschaftlerinnen, um eine größere Zahl von ihnen in Führungspositionen zu bringen, sowie Mentoring und Karriereentwicklung.

www.mpg.de/chancengleichheit

Ein Update für Open Access

Die Welt des Publizierens hat sich mit dem Siegeszug des Internets dramatisch verändert. Doch die Verlage setzen weiter auf Rezepte aus Zeiten des Buchdrucks. Unser Autor plädiert daher für die notwendige Umstellung des Geschäftsmodells wissenschaftlicher Zeitschriften – und liefert eine Skizze des Weges, der dafür zu gehen ist.

TEXT **RALF SCHIMMER**

Seit deutlich mehr als zehn Jahren wird die Forderung nach einem freien Zugang zu den Ergebnissen wissenschaftlichen Arbeitens erhoben. Open Access ist das Sinnbild einer Wissenschaftspraxis, die als Kontrast und Verheißung gegenüber den herrschenden Bedingungen entworfen wird. Trotzdem sind aktuell nur etwa 15 Prozent der Fachartikel eines Jahres über den freien Zugang verfügbar. Viele Befürworter des Open

Ohne die Möglichkeiten des Internets ist wissenschaftliches Arbeiten heute nicht mehr vorstellbar. Auch die Publikationsbedingungen sind flächendeckend über alle Disziplinen hinweg konsequent auf einen digitalen Produktionsprozess hin ausgerichtet worden. Das beginnt bei der Erstellung von Manuskripten, setzt sich bei der Einreichung und dem Begutachtungsprozess fort und führt in fast allen Fällen am Ende zu einer Veröffentlichung in elektronischer Form, unabhängig von der Frage, ob es auch noch eine parallele Druckausgabe gibt. Doch im entscheidenden Moment – dem Augenblick der Verteilung einer fertigen Publikation – wird die digitale Verwertungskette auf verhängnisvolle Weise durchbrochen.

Statt die dem Internet innewohnenden Möglichkeiten maximaler Verbreitung in Echtzeit konsequent auszuschöpfen, unterwirft man die mit viel Mühe erzeugte und qualitätsgesicherte Publikation einer Verknappung, die aus heutiger Sicht nur als künstlich zu bezeichnen ist. Mit einem beachtlich hohen technischen und juristischen Aufwand werden die Inhalte hinter eine Bezahlsschranke gestellt und dem ungehinderten Zugriff entzogen. Verantwortlich für diese Verknappung sind die bemerkenswert ungebrochenen Konventionen des Subskriptions-

Aktuell sind nur 15 Prozent der Fachartikel eines Jahres über den freien Zugang verfügbar

Access fragen sich deshalb, ob nicht ein Umdenken in der eigenen strategischen Ausrichtung einsetzen, Open Access quasi ein Update erhalten muss, mit dem ein konkreteres Ziel in den Blick kommt: die Umstellung des noch immer auf Abonnements basierenden Geschäftsmodells der großen Verlage.



wesens – also die zwischen Verlagen und Bibliotheken seit Jahrzehnten eingespielte Verfahrenslogik, wonach Zugang zu den Inhalten einer wissenschaftlichen Zeitschrift nur derjenige erhält, dessen Bibliothek ein Abonnement erwirbt.

Dieses Austauschverhältnis, das von Bibliotheken und Verlagen gleichermaßen gestützt wird, ist vom Modernisierungsdruck der Digitalisierung bisher erstaunlich unberührt geblieben. Kaum eine andere Sphäre in der Wissenschaftskommunikation konnte sich bisher so sehr dem Wandel verschließen – was umso mehr erstaunt, wenn man bedenkt, wie zentral Publikationen für die Wissenschaft sind und welche Gelder damit umgesetzt werden.

Das Konzept wissenschaftlicher Zeitschriften ist 350 Jahre alt und stammt aus einer Zeit, als die Bündelung wissenschaftlicher Arbeiten und vor allem ihre Distribution die großen Herausforderungen waren. Ohne ihre physische Auslieferung war an wissen-

Auch auf nationaler Ebene werden die gesteckten Ziele immer ambitionierter

schaftliche Arbeiten nicht heranzukommen. Diese Herausforderung hat eine gesamte Epoche wissenschaftlicher Kommunikation bis an die Schwelle des 21. Jahrhunderts geprägt.

Und obwohl unter den heutigen Internetbedingungen diese Herausforderung nicht mehr vorhanden ist, besteht das auf Zeitschriftenabonnements beruhende Distributions- und Finanzierungsmodell wissenschaftlicher Kommunikation samt seinen inhärenten Verknappungseffekten weiter fort. Jetzt setzt sich immer mehr die Erkenntnis durch, dass das Subskriptionswesen als solches die größte und wirkungsmächtigste Barriere auf dem Weg zu Open Access ist und an dieser Stelle der Hebel angesetzt werden muss, wenn der Durchbruch in größerem Stil gelingen soll.

Wenden wir uns der Frage zu, wie die Open-Access-Bewegung zu dieser Erkenntnis gefunden hat. An sich sind der freie – im Sinne von ungehinderte – Zugriff auf die Ergebnisse wissenschaftlichen Arbeitens und damit der Abbau aller diesem Ziel entgegenstehenden Barrieren das zentrale Anliegen sämtlicher Open-Access-Deklarationen. Als Initiatorin der *Berliner Erklärung über den offenen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen* von 2003 und (Mit-)Ausrichterin von inzwischen insgesamt zwölf „Berlin-Konferenzen“ stand die Max-Planck-Gesellschaft immer im Zentrum der Debatte und ist weltweit anerkannt als eine der treibenden Kräfte.

Zusammen mit einer stetig wachsenden Zahl an Wissenschaftseinrichtungen in vielen Ländern engagiert sich die Max-Planck-Gesellschaft in Projekten, Verbänden oder Pilotvorhaben, um das Prinzip des Open Access weiter voranzubringen. Nach mehr als einer Dekade internationaler Aufbauarbeit ist Open Access im wissenschaftspolitischen Diskurs auf der ganzen Welt fest verankert. Nicht von ungefähr hat sich der erst im Jahr 2012 ins Leben gerufene Global Research Council gleich diesem Thema zugewandt und binnen eines Jahres eine entsprechende Resolution ausgearbeitet.

Auch auf nationaler Ebene, vor allem in einigen europäischen Ländern, werden die gesteckten Ziele durch Selbstverpflichtungen immer ambitionierter. Erst kürzlich wurden diese Entwicklungen im Rahmen der niederländischen EU-Ratspräsidentschaft im ersten Halbjahr 2016 auf europäischer Ebene aufgegriffen und im April auf einer Konferenz als *Amsterdam Call for Action on Open Science* verabschiedet.

In einem recht markanten Kontrast zur allgegenwärtigen Verankerung von Open Access als wissenschaftspolitischer Zielsetzung steht die einigermaßen ernüchternde Tatsache, dass trotz aller Unterstützung nur 15 Prozent der Fachbeiträge per Open Access erscheinen. Und was vielleicht noch mehr zählt: Dieser Anteil, der aktuell um etwa einen Prozentpunkt pro Jahr zunimmt, übt aus sich selbst heraus keinen wirklichen Transformationsdruck auf das Subskriptionswesen aus.

Eine wirkungsvolle Delegitimierung der herrschenden Distributions- und Finanzierungsbedin-



gungen ist bisher nicht festzustellen. Genauso wenig lässt der Kostendruck nach, unter dem die Bibliotheken durch die jährlichen Preissteigerungen leiden, die ihnen ein monopolartiges Zeitschriftenwesen Jahr für Jahr abverlangt. Trotz der vielen Errungenschaften des Open Access bleibt das herrschende Subskriptionswesen, mit dem wissenschaftliche Zeitschriften vertrieben werden, weiterhin bestehen. Die Umsatzrendite der großen kommerziellen Verlage steigt ungebrochen an und liegt bei Margen zwischen 30 und 40 Prozent. Mit wissenschaftlicher Information lässt sich also nach wie vor weit mehr Geld verdienen als in der Automobil- oder Erdölindustrie. Ähnlich profitabel sind nur Google oder Apple.

Auch deshalb setzt sich bei Open-Access-Befürwortern immer mehr die Erkenntnis durch, dass all die Maßnahmen der vergangenen zehn Jahre – die Verabschiedung von Auflagen und Mandaten, der Aufbau von institutionellen Repositorien als Instrumenten des „grünen Wegs“ der Zweitveröffentlichung, die unzähligen Handreichungen und anderen Dokumente einer breit angelegten Strategie – zwar richtig und wichtig waren, dass es jedoch zugleich der neuen Fokussierung bedarf, um Open Access doch noch in der Fläche durchzusetzen.

Man könnte es so formulieren, dass die Maßnahmen der vergangenen zehn Jahre vielleicht zu stark darauf ausgerichtet waren, die Praxis der Wissenschaft an eine bestimmte Vorstellung von Open Access anzupassen: Die Wissenschaftler mussten sich auf Open Access zubewegen; es galt, ihr Verhalten in eine bestimmte Richtung zu lenken. Vielleicht ist es an der Zeit, dieses Verhältnis umzukehren und auf eine andere Form von Bewegungsenergie zu setzen.

Nicht die Forscher müssen bewusst im Sinne des Open Access handeln, sondern Open Access muss überall dort verankert werden, worauf sich die Wissenschaftler in ihrer täglichen Arbeit beziehen. Dazu gehören auch und vor allem die gewohnten und bekannten Zeitschriften, die für ein wahrgenommenes Qualitätsniveau und für bestimmte Karrierechancen stehen. Wenn ein Wissenschaftler sich an der Reputation einer Zeitschrift orientiert und dort publizieren möchte, dann gehört nicht seine Haltung hinterfragt, sondern das Geschäftsmodell der Zeitschrift.

Um Open Access zum Standard in der wissenschaftlichen Kommunikation zu machen, muss der Korpus an Fachzeitschriften, die aktuell noch nach dem Subskriptionsmodell vertrieben werden und hinter einer Bezahlschranke der freien Nutzung entzogen sind, möglichst flächendeckend auf eine Open-Access-Geschäftsgrundlage umgestellt werden. Die Transformation der bestehenden Zeitschriften ist also das

Trotz der vielen Errungenschaften bleibt das herrschende Subskriptionswesen bestehen

nächste und mutmaßlich endgültige Ziel der Open-Access-Debatte. Das bedeutet, dass die Zahlungsströme, die jetzt noch an der Finanzierung von Zeitschriftenabonnements und damit auf den lesenden Zugriff ausgerichtet sind, umgestellt werden auf die unmittelbare Vergütung von Publikationsdienstleistungen der Verlage.

Den Weg, wie Open-Access-konforme Geschäftsmodelle organisiert und ausgestaltet werden können, haben Pionierverlage wie BioMed Central und PLOS seit mehr als zehn Jahren gewiesen. Deren Geschäftsmodell, das auf Publikationsgebühren, sogenannten Article Processing Charges (APCs) beruht, sind viele weitere Verlage gefolgt – wobei festzuhalten ist, dass die Praxis des Open-Access-Publizierens auch noch andere erfolgreiche Finanzierungsmodelle kennt, die keineswegs außer Acht zu lassen sind.

Die Debatte um die Umstellung und letztendliche Überwindung des Subskriptionswesens wird nicht zuletzt von der Max-Planck-Gesellschaft maßgeblich befördert. Im April 2015 legte die Max Planck Digital Library ein White Paper (<http://dx.doi.org/10.17617/1.3>) vor, in dem die grundsätzliche Machbarkeit einer großflächigen Open-Access-Transformation auf der Basis von Publikationsdaten einerseits und den Umsatzzahlen wissenschaftlicher Verlage andererseits herausgearbeitet wurde. Marktanalysen zufolge erzielen



wissenschaftliche Verlage über den Verkauf von Zeitschriftenabonnements weltweit Umsätze in einer Größenordnung von 7,6 Milliarden Euro jährlich.

Aus einschlägigen Publikationsdatenbanken wie dem *Web of Science* wird ersichtlich, dass sich die Anzahl der jährlich veröffentlichten Fachartikel in international erscheinenden Zeitschriften auf ungefähr 1,5 Millionen beläuft. Daraus folgt, dass unter dem aktuellen Subskriptionswesen für jeden einzelnen Artikel rechnerisch rund 5000 Euro bezahlt werden – eine stolze Summe, die weit über die Kosten hinausgeht, die man bisher aus dem reinen Open-Access-Publikationsmarkt kennt.

Die Kosten, die aus diesem Marktsegment dokumentiert sind, liegen für die deutschen Hochschulen aktuell bei einem durchschnittlichen Preis von 1300 Euro. Selbst wenn man am Ende von etwas höheren Publikationszahlen und Durchschnittspreisen ausgeht, so deutet doch alle verfügbare Evidenz darauf hin, dass eine Umstellung des Geschäftsmodells wissenschaftlicher Zeitschriften ohne Mehrkosten im Rahmen der jetzt schon eingesetzten Finanzmittel möglich wäre, dass also bereits jetzt genug Geld im System ist.

Seit seiner Veröffentlichung vor einem Jahr wurde das White Paper der Max Planck Digital Library zu einem zentralen Referenzdokument der weltweit geführten Transformationsdebatte. Das große Interesse wurde auch sichtbar auf einer zweitägigen internationalen Konferenz Ende 2015, als 100 Repräsentanten aus 19 Ländern einer Einladung der Max-Planck-Gesellschaft folgten, um über einen beschleunigten Weg zu Open Access zu debattieren. Die Teilnehmer stimmten darin überein, dass auf die Transformation im Sinne der hier dargelegten Überlegungen gemeinsam hingearbeitet werden solle. Die Ergebnisse der Tagung, eine Absichtserklärung (*Expression of Interest*) und ein Aktionsplan, wurden im März 2016 unter dem Kampagnennamen *Open Access 2020* veröffentlicht.

Seither wächst die Zahl an Wissenschaftsorganisationen, die sich durch Unterzeichnung der *Expression of Interest* zu dieser Kampagne bekennen, stetig an. Immer mehr Einzelorganisationen und Verbände sehen ein, dass das Haltbarkeitsdatum des bestehenden Subskriptionswesens deutlich überschritten ist

und dass zu einer wirkungsvollen Erneuerung des Systems der Hebel an den Finanzströmen anzusetzen ist. Aktuell wird sehr viel Geld für in Anbetracht heutiger Möglichkeiten lächerlich geringe Nutzungsmöglichkeiten ausgegeben. Es wird immer offenkundiger, dass sich mit maximal dem gleichen Geld ein sehr viel besseres System der wissenschaftlichen Kommunikation aufbauen und finanzieren ließe.

Was muss nun passieren, damit die gewünschte Transformation auch tatsächlich herbeigeführt wird? Den Schlüssel des Handelns halten die Einrichtungen

In Deutschland arbeitet vor allem die Max Planck Digital Library an Übergangsmodellen

in der Hand, die über die eingesetzten Mittel verfügen und darüber entscheiden, wofür sie ihr Geld einsetzen – oder auch nicht. Das sind die Wissenschaftseinrichtungen, in dieser Angelegenheit durch ihre Bibliotheken vertreten. Ein wesentlicher Teil der Kampagne muss dementsprechend auf die Bibliotheken und ihre Verbandsorganisationen ausgerichtet sein. Für die geplante Umstellung der Bezahlung von Abonnements auf Publikationsdienstleistungen sind andere Kenngrößen zu berücksichtigen und neue Prozessabläufe zu entwickeln. Eine Bibliothek muss sich sehr viel präzisere Kenntnisse als bisher über das Publikationsaufkommen und die Verteilung auf die einzelnen Verlage erschließen, um Übergangsszenarien und Kostenmodelle entwickeln zu können.

Nur so können die Bibliotheken in zielgerichtete Transformationsmodelle mit den Verlagen eintreten. Solche Übergangsansätze verbreiten sich seit gut zwei Jahren immer weiter und werden vor allem in Großbritannien, den Niederlanden und in Österreich vorangetrieben. In Deutschland ist es bisher vor allem die Max Planck Digital Library, die aktiv an Übergangsmodellen arbeitet und sich seit Ende 2015 in einem Pilotprojekt mit dem Springer-Verlag befindet.

Aber inzwischen ziehen weitere Einrichtungen nach, sodass bis zum Jahresende 2016 mit neuen Abschlüssen zu rechnen ist.

Für den Übergang ist ein neuartiges Vertragsmodell aufgekommen, das in Fachkreisen unter dem Stichwort Offsetting diskutiert wird und einen guten Einstieg in eine systematische Umschichtung von Lizenzkosten (Abonnements) hin zu Publikationskosten bietet. Der Ansatz besteht darin, die Subskriptionslogik aufzubrechen und auf Basis des aktuellen Umsatzvolumens zusätzlich Open-Access-Dienstleistungen einzufordern. Man bleibt also Subskriptionskunde, erhält weiterhin die erforderlichen Leserechte und setzt durch, über den Verlag per Open Access publizieren zu können. Offsetting zielt auf einen Systemwechsel und ist ein Modell des Übergangs. Tendenziell umgestellt werden nicht nur die Grundlogik der Verträge, sondern auch die Finanzströme und die erforderlichen Abrechnungsprozesse im Sinne des Open Access.

Durch derartige Übergangsmodelle bieten die Wissenschaftsorganisationen den Verlagen die Möglichkeit zu einer geordneten Transformation. Ziel der Umstellung sind das Geschäftsmodell und die Bezahlgrundlage für die Dienstleistungen der Verlage. Diese Verlagsdienstleistungen als solche sollen erhalten bleiben und auch weiterhin in fairer und angemessener Weise vergütet werden. Das disruptive Element der Transformation soll nur auf die Finanzströme gerichtet sein, nicht aber auf die Austauschbeziehungen zwischen Wissenschaft und Verlagen insgesamt.

In der großflächigen Transformation der Geschäftsmodelle liegt eine Chance sowohl für die Wissenschaft als auch für die Verlage, die künstliche Verknappung wissenschaftlicher Inhalte in einer auf maximale Distribution hin ausgerichteten Umgebung endlich zu beenden und der heutigen Erwartungshaltung gerecht zu werden. In einer Zeit, in der Informationen in Sekunden um den Erdball getwittert werden, mutet der heutige Modus wissenschaftlicher Kommunikation absurd an. Wenn die Transformation auf den geordneten Bahnen in den nächsten Jahren nicht gelingt, dann wird es nicht mehr lange dauern, bis die nachwachsende Generation dem bestehenden System einfach den Stecker ziehen wird. ◀



DER AUTOR

Ralf Schimmer, Jahrgang 1962, ist Bereichsleiter Information und stellvertretender Leiter der Max Planck Digital Library in München. Der promovierte Sozialwissenschaftler verantwortet die zentrale elektronische Informationsversorgung aller Max-Planck-Institute und ist seit der *Berliner Erklärung* von 2003 beteiligt an den Open-Access-Zielsetzungen der Max-Planck-Gesellschaft. Schimmer ist Mitglied in Beiräten mehrerer Informationseinrichtungen, von EU-Projekten und Wissenschaftsverlagen. Aktuell ist er Projektleiter der Initiative *Open Access 2020* und Mitglied im Steuerungsgremium der Schwerpunktinitiative *Digitale Information* der Allianz der deutschen Wissenschaftsorganisationen.



Auf Kurs bei Wind und Wellen

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

Der Geologe Ralf Schiebel vom Mainzer Max-Planck-Institut für Chemie berichtet von seiner jüngsten Schiffsexpedition in den Nordatlantik, dem Leben an Bord und großen Glücksmomenten in tosender Gischt.

Zum x-ten Mal rolle ich gegen die Wand meiner Koje und werde in die Matratze gedrückt, tiefer als vorher. Das Schiff hebt sich diesmal lange, hält, und ab geht's nach unten, wo der Bug mit einem dumpfen Knall in die nächste Welle eintaucht. Ein Blick auf die Uhr: 3:24. Gute Zeit, um aufzustehen. Gleich sind wir auf Station, das heißt: Einsatz. Über Nacht haben die Seismiker die günstigste Position für Sedimentkerne am Mittelatlantischen Rücken gesucht. Nun wollen wir mit Bohrgeräten diese Klimazeugen aus einer Wassertiefe von bis zu 4000 Metern bergen.

Wir sind in den letzten Tagen unserer vierwöchigen Expedition mit dem deutschen Forschungsschiff Maria S. Merian im Nordatlantik unterwegs. Begonnen hat die Reise im regnerischen, kühlen Reykjavik. Ziel sind die milden Azoren knapp 3000 Kilometer südlich. Auf Kampagne sind wir in diesem Herbst, um die Tiefenwasserzirkulation der jüngeren geologischen Geschichte zu studieren. An Bord sind 20 Wissenschaftler voller Tatendrang. Für viele ist es die erste Fahrt. Ich war schon oft im Nordatlantik, leide zum Glück nicht an Seekrankheit. Windstärke sechs und Fünf-Meter-Wellen sind hier typisch. Wir sind auch schon mit leeren Händen heimgekehrt – die Geräte von Bord gespült und das Schiff schwer beschädigt.



Ralf Schiebel, 51, untersucht die Ökologie und Biogeochemie moderner und fossiler Organismen im globalen Stoffkreislauf und deren Wechselwirkungen mit dem CO₂-System. Er hat Geologie in Kiel studiert, war Postdoc an der Universität Tübingen, Oberassistent an der ETH in Zürich, hat am National Oceanography Centre in Southampton unterrichtet und war Institutsleiter an der Universität von Angers in Frankreich. Seit 2015 beteiligt er sich am Aufbau der Abteilung für Klimageochemie am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz.

Der leitende Ingenieur, Mitglied der 24-köpfigen Besatzung, ist stolz auf sein Schiff: Brauchwasseranlage, Dieselelektrik, alles gut durchdacht und sauber. Heutzutage wird der Müll an Bord getrennt, und das Schiff fährt nach den Bestimmungen des „Blauen Engels“. Anfang der 1990er-Jahre wurde noch auf See entsorgt und mit Schiffsdiesel gedampft. Damals konnte man für 20 Mark die Minute mit seinen Lieben telefonieren, einmal pro Woche. Heute gibt es E-Mail und Telefon auf der Kammer.

Einen Tag nach Auslaufen die erste Station. Bei stürmischer See gilt es, Plankton zu fischen. Das 200 Kilogramm schwere Netz geht über die Reling. Es funktioniert. Die Mannschaft ist eingespielt. Charlotte, Studentin aus Kiel, steht mit an der Bordwand und Doro, Doktorandin aus Mainz, an der Steuerung im Labor. Nach zehn Minuten taucht das Netz wieder aus den Wellen auf, knallt gegen die Bordwand, der Wind fasst hinein. Wasser überall. Nur der Bootsmann ist noch nicht zufrieden mit uns: „Immer eine Hand fürs Schiff und eine Hand für dich!“, ruft er.

Im subtropischen Atlantik konzentrieren wir uns auf die Sedimentkerne als Indikatoren der Klimaentwicklung. Messen können wir die Temperatur von vor 8000 Jahren nicht, aber wir können sie rekonstruieren. Das Bergfest – also die Halbzeit der Ausfahrt – haben wir bei bestem Wetter an Deck gefeiert, während wir zur nächsten Station fahren. Mittlerweile haben wir jegliches Zeitgefühl verloren. Unser Tag ist von den Mahlzeiten getaktet. Dreimal am Tag warmes Essen, Obst, Salat und frisches Brot. Das Frühstück der einen ist das Abendessen der anderen.

Wir haben Glück. Die Proben könnten nicht besser sein, und die Stimmung ist gut. Der Atlantik ist nun gnädig mit uns. Ich möchte trotzdem heim. Meine Frau hat mit unserem Baby Urlaub bei den Großeltern gemacht. Jeden Tag haben wir geschrieben und telefoniert. Ob der Kleine fremdeln wird? An einem Freitag laufen wir um 8 Uhr morgens in Ponta Delgada auf den Azoren ein. Das Schiff wird ent- und beladen, am Samstag beginnt die nächste Forschungsreise. Wir werden dann im Flieger nach Frankfurt sitzen.

Schlummern zwischen Himmel und Erde

Beim Autofahren kann schon ein kurzer Anfall von Schläfrigkeit fatale Folgen haben. Fregattvögel schlummern dagegen problemlos in der Luft, ohne abzustürzen. Während ihrer tagelangen Flüge über dem offenen Ozean kommen sie insgesamt aber mit extrem wenig Schlaf aus. Ein Team um **Niels Rattenborg** vom **Max-Planck-Institut für Ornithologie** in Seewiesen hat erstmals nachgewiesen, dass Vögel im Schlafmodus fliegen können.

TEXT **ELKE MAIER**



Die Pfuhschnepfe zählt zu den Rekordhaltern der Vogelwelt. Sie ist nicht so groß wie ein Strauß, nicht so schnell wie ein Wanderfalke und auch nicht so laut wie der südamerikanische Fettschwalm. Stattdessen hält sie den Streckenrekord im Nonstopflug: Mehr als 11 000 Kilometer legt sie von ihrem Brutplatz in Alaska bis nach Neuseeland zurück. Dabei schafft sie die

ganze Strecke ohne Zwischenlandung in acht Tagen. Die Pfuhschnepfen machen also keine Pausen, um ihre Muskulatur zu regenerieren oder um zu ruhen.

So beeindruckend das auch ist – die Spitzenreiter im Dauerflug sind die Schnepfen damit noch lang nicht: Fregattvögel bleiben über zwei Monate ununterbrochen in der Luft, und Alpen-

Nickerchen im Nest: Zwei Fregattvogelweibchen erholen sich von ihren letzten Jagdausflügen. Im Hintergrund sind die Zelte der Seewiesener Forscher zu sehen.

segler können möglicherweise sogar 200 Tage am Stück fliegen, ohne zu landen. Aber wie schaffen diese Tiere das, so ganz ohne Schlaf?

Niels Rattenborg ist Leiter der Forschungsgruppe „Vogelschlaf“ am Seewiesener Max-Planck-Institut für Ornithologie südlich von München. Mit seinem Thema befasst sich der Ameri-





Ankunft auf der Insel: Für ihren Aufenthalt fernab von der Zivilisation müssen Niels Rattenborg und seine Kollegen alles Lebensnotwendige per Boot heranschaffen. Die Seelöwen lassen sich vom geschäftigen Treiben der Forscher nicht beirren (oben). Auch das Fregattvogelweibchen zeigt keine Scheu, als der Biologe Bryson Voirin es in die Freiheit entlässt (unten).



kaner mit dänischen Wurzeln seit gut zwei Jahrzehnten. „Vögel haben mich schon als Kind fasziniert“, erzählt er. Dass dann noch der Schlafaspekt hinzukam, verdankt Rattenborg einem Ferienjob: „Nach dem College-Abschluss habe ich im Sommer und über Weihnachten in einem Schlaflabor gearbeitet. Und später war ich dort zehn Jahre lang Techniker.“

Es traf sich ausgezeichnet, dass sich die Ornithologie und Schlaf so gut verbinden ließen. Rattenborg studierte Biologie, promovierte über das Schlafverhalten von Stockenten und nahm eine Wissenschaftlerstelle in Wisconsin an. Seit 2005 forscht er in Seewiesen. Nun haben Rattenborg und sein Kollege Bryson Voirin den Beweis geliefert, dass Vögel tatsächlich beim Fliegen schlafen.

OB WURM ODER ELEFANT – SCHLAFEN MUSS JEDER

Die Frage, warum Lebewesen schlafen müssen, beschäftigt schon Generationen von Wissenschaftlern. Ob Fadenwürmer, Fruchtfliegen, Fische oder Elefanten – ohne Schlaf kommt auf Dauer keiner aus. Warum das so ist, ist bislang unbekannt. Ein Erklärungsversuch ist in Fachkreisen als „synaptische Homöostase-Hypothese“ bekannt. Demnach ist Schlaf dazu da, um den Kopf frei zu machen: Im Wachzustand prasseln zahllose Informationen auf uns ein und müssen verarbeitet werden. Dazu werden im Gehirn ständig neue Synapsen gebildet, bestehende Verbindungen werden ausgebaut. „Irgendwann hätten wir unseren Kopf so voll, dass wir nichts Neues mehr aufnehmen könnten“, sagt Niels Rattenborg. Damit das nicht passiert, werden im Schlaf manche Verbindungen wieder gelöscht. Das schafft neue Kapazitäten.

Für diese Hypothese spricht, dass jene Gehirnregionen, die tagsüber sehr aktiv waren, nachts besonders tief schlafen. Niels Rattenborg und seine Kollegen hatten dies an Tauben beobachtet, denen sie David Attenboroughs Film über *Das Leben der Vögel* vorspielten, wobei sie sie wach hielten. Während der Filmvorführung wurde jeweils ein Auge mit einer Klappe bedeckt. In der darauffolgenden Nacht schlief jene Gehirnregion, die für das sehende Auge zuständig war, tiefer als jene mit Verbindung zum zuvor bedeckten Auge.

Warum aber ist das Schlafbedürfnis quer durchs Tierreich so unterschiedlich? Wie kann es sein, dass Igel und Fledermäuse bis zu 20 Stunden pro Tag schlummern, während Giraffen mit nur zwei Stunden auskommen? Und was ist mit Zugvögeln, die keine Möglichkeit zur Zwischenlandung haben, etwa weil sie über dem offenen Ozean fliegen? Schlafen sie in der Luft? Verzichteten sie zeitweise auf Schlaf? Oder schläft ihr Gehirn womöglich auf Raten?

Schon während seiner Doktorarbeit an Stockenten hatte Rattenborg ein faszinierendes Phänomen beobachtet: In einer Gruppe schlafender Enten halten diejenigen, die am Rand sitzen, das nach außen gerichtete Auge offen, und die dazugehörige Gehirnhälfte bleibt wach. So können die Vögel einen Teil des Gehirns ausruhen und haben gleichzeitig potenzielle Feinde im Blick. Dieser sogenannte unihemisphärische Schlaf, bei dem immer bloß eine Gehirnhälfte schläft, während die andere wach bleibt, ist außer von Vögeln etwa auch von Delfinen, Robben und Seekühen bekannt.

Andere Vogelarten, wie die nordamerikanischen Dachsammern, brauchen dagegen zu bestimmten Zeiten weit weniger Schlaf als sonst. Während ihre Artgenossen in freier Natur in ihre Win-

terquartiere ziehen, hüpfen Dachsammern in Gefangenschaft rastlos in ihrem Käfig herum und schlagen mit den Flügeln. Wie Rattenborg und seine Mitarbeiter herausgefunden haben, schlafen die Vögel während dieser sogenannten Zugunruhe nur ein Drittel so lange wie sonst. Erstaunlicherweise scheint der Schlafentzug die Vögel jedoch nicht zu beeinträchtigen: Bei Lern- und Gedächtnisaufgaben schneiden sie unverändert gut ab.

ERFOLGREICH IST, WER AM LÄNGSTEN WACH BLEIBT

Der arktische Graubruststrandläufer kommt mit wenig Schlaf ebenfalls bestens zurecht. Rattenborg hat zusammen mit einem Forscherteam aus Seewiesen beobachtet, dass sich die Männchen während der dreiwöchigen Balzzeit kaum Ruhe gönnen. Stattdessen stecken sie all ihre Energie in Scharmützel mit anderen Männchen und in Werbung um die Weibchen. Dass sie mit dieser Strategie gut fahren, bewiesen Vaterschaftsanalysen: Die Männchen, die am wenigsten schliefen, hatten auch die meisten Nachkommen. „Die sexuelle Selektion fördert also bei den Graubruststrandläufern eine kurze Schlafdauer“, sagt Rattenborg.

Um herauszufinden, wie fliegende Vögel mit dem Schlafbedürfnis umgehen, haben sich Niels Rattenborg und seine Kollegen mit dem Neurophysiologen Alexei Vyssotski zusammengetan. Vyssotski entwickelt in Zürich kleine Messgeräte, die so leicht sind, dass Vögel sie auch im Flug tragen können. Die Geräte zeichnen Kopfhaltung und Flügelschlag auf und messen gleichzeitig die Hirnaktivität. Dazu kleben die Forscher Sensoren für die Spannungsschwankungen, die vom Gehirn

Inselidyll: Während der Freilandarbeit tauschen die Wissenschaftler ihre festen Wohnsitze gegen ein geräumiges Zelt (linkes Bild). Vom Camp aus startet Niels Rattenborg zu einem Streifzug über die Insel (rechts).



erzeugt werden, auf den Kopf der Tiere. Im Wachzustand und in den unterschiedlichen Schlafphasen ermitteln diese die elektrischen Aktivitäten von Millionen Nervenzellen und stellen daraus charakteristische Kurven in einem Elektroenzephalogramm (EEG) dar. Die Wissenschaftler hatten damit erstmals die Möglichkeit, das Wach- und Schlafverhalten fliegender Vögel zu untersuchen.

Als Studienobjekt wählten sie den Bindenfregattvogel (*Fregata minor*). Mit einem Gewicht von bis zu anderthalb Kilogramm und einer Flügelspannweite von mehr als zwei Metern ist er unter den Seevögeln einer der größten. Das Messgerät inklusive Batterien wiegt dagegen nur zwölf Gramm und stellt beim Fliegen kaum eine Belastung dar.

Fregattvögel verbringen einen Großteil ihrer Zeit in der Luft und sind an diesen Lebensstil perfekt angepasst. Meistens segeln sie ohne Flügelschlag über den Ozean und halten Ausschau nach Fliegenden Fischen und Kalmaren, die von Delfinen oder Raubfischen an die Wasseroberfläche getrieben werden.

Im Wasser dagegen sind die Flugkünstler ziemlich unbeholfen. „Ihr Gefieder ist nicht wasserabweisend und saugt sich voll. Außerdem haben sie sehr kleine Füße, die zum Schwimmen

nicht taugen“, sagt Rattenborg. Fregattvögel sind deshalb darauf angewiesen, ihre Beute aus der Luft zu fangen. Bei ihren ausgedehnten Jagdausflügen können sie sich auch nicht auf dem Wasser ausruhen, wie etwa Albatrosse das tun.

Rattenborg und Voirin arbeiteten für die Erforschung der Fregattvögel mit Sebastian Cruz zusammen, einem Seevogelexperten aus Ecuador. Gemeinsam schlugen sie ihr Lager auf Genovesa auf, einer kleinen, unbewohnten Insel des Galapagos-Archipels. Dort kampierten sie direkt neben einer Fregattvogel-Kolonie. „Wir hatten ein Küchenzelt sowie ein Laborzelt als Arbeitsplatz, geschlafen wurde in Hängematten unter freiem Himmel“, erzählt Voirin.

DIE WEIBCHEN SIND DIE BESSEREN PROBANDEN

Im Dienste der Schlafforschung verzichteten die Wissenschaftler ihrerseits auf Schlaf: Zunächst machten sie tagsüber die Nester ausfindig und kehrten dann nachts zurück, um die Vögel zu fangen. Auf diese Weise reduzierten sie die Störungen auf ein Minimum. Da die Tiere ihre Nester auf Büschen in maximal zweieinhalb Meter Höhe bauen, blieben den Forschern zumindest nächtliche Kletterpartien erspart. Da die Vögel auf Galapagos keine natür-

lichen Feinde haben, sind sie zudem Menschen gegenüber nicht scheu und daher leicht einzufangen.

Für ihre Studie wählten die Forscher weibliche Tiere aus. „Weil sie noch größer sind als die Männchen, ist es für sie leichter, die Geräte zu tragen“, sagt Rattenborg. „Zudem konnten wir bei den Weibchen im Gegensatz zu den störungsempfindlicheren Männchen sicher sein, dass sie immer wieder zu ihren Küken zurückkehren.“ Bei Fregattvögeln beteiligen sich gewöhnlich beide Partner an der Jungenaufzucht. Während ein Elternteil auf Nahrungssuche ist, schützt der andere das Nest vor Artgenossen, die sich nur zu gern über unbeaufsichtigte Jungtiere hermachen.

Um die Vogelweibchen mit den mobilen Messgeräten auszustatten, wurden sie kurz betäubt und ins Laborzelt gebracht. Rund eine halbe Stunde dauerte es, bis die Apparate mithilfe von Spezialkleber und Klebeband an Kopf und Rücken der Vögel befestigt waren. Zusätzlich zu den Geräten zur Messung von Gehirnaktivität, Kopfhaltung und Flügelschlägen brachten die Forscher auch GPS-Logger an, die den Standort und die Flughöhe festhielten. Nachdem sie sie so ausgestattet hatten, brachten die Forscher ihre gefiederten Probanden wieder zurück in die Nester.



Nun hieß es abwarten, bis die Fregattvögel zur Jagd aufbrachen. „Nachdem sie ausgeflogen waren, haben wir die Nester regelmäßig kontrolliert, um ihre Ankunft nicht zu verpassen“, sagt Voirin. Glücklicherweise lief alles nach Plan: Nach spätestens zehn Tagen waren die Vögel wieder zurück. Wie sich später herausstellte, hatten sie währenddessen bis zu 3000 Kilometer zurückgelegt.

Als Nächstes mussten die Wissenschaftler sie erneut einfangen, um an die Daten zu gelangen. Am Computer konnten die Forscher die Datenspeicher gleich vor Ort auslesen. Insgesamt hatten sie Daten von 14 Vögeln. Fünf davon waren so lange unterwegs gewesen, dass die Speicherkapazität der Geräte noch während des Flugs erschöpft war. Bei neun Tieren zeichneten die Apparate auch dann noch auf, als sie wieder auf ihren Nestern saßen. So konnten die Biologen das Schlafverhalten in der Luft und an Land vergleichen.

Zurück in Seewiesen betrachtet Rattenborg die aufgezeichneten EEG-Kurven. „Im Wachzustand sind die Ausschläge klein, dafür schwingen sie mit hoher Frequenz“, erklärt der Max-Planck-Forscher. Das Muster rührt daher, dass die Nervenzellen im Gehirn unsynchronisiert elektrische Signale abfeuern. Andere Kurven stammen aus dem Tiefschlaf und weisen stärkere Aus-

schläge und niedrigere Schwingungsfrequenzen auf. In diesem Zustand synchronisieren sich die Nervenzellen und sind abwechselnd gemeinsam aktiv und inaktiv. So entstehen langsam schwingende Gehirnwellen. Der Tiefschlaf wird daher auch als SW-Schlaf (*slow-wave sleep*) bezeichnet.

POWERNAPPING SORGT FÜR NEUE ENERGIE

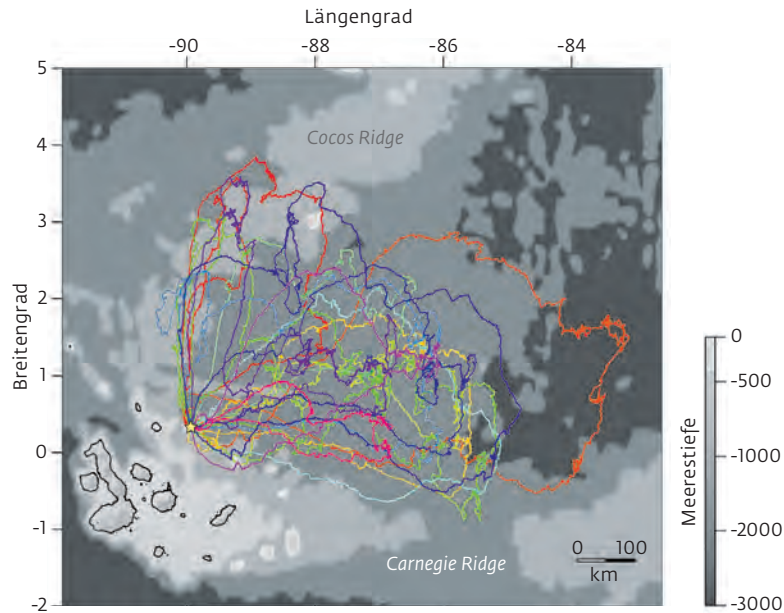
Die EEGs während des Fluges zeigen einen solchen langsamwelligen Schlaf. Das war der Beweis: Fregattvögel schlafen beim Fliegen, und das erstaunlicherweise nicht nur mit einer Gehirnhälfte, sondern manchmal sogar mit beiden gleichzeitig. „Aber obwohl sie auch fliegen können, wenn beide Gehirnhälften schlafen, bleibt meistens eine Seite wach, und zwar diejenige, die mit dem in Flugrichtung blickenden Auge verbunden ist. So vermeiden die Vögel vermutlich Kollisionen mit Artgenossen, die in derselben Luftströmung segeln.“

Meist schlummern die Tiere am frühen Abend, kurz nach Einbruch der Dunkelheit, wenn sie in ausreichender Höhe und aufsteigender Thermik fliegen. Das schützt vor Abstürzen. „Der kurze Schlaf am Abend ist wahrscheinlich so eine Art Powernap: Er könnte gerade so ausrei-

chen, um das Schlafdefizit während des Tages auszugleichen.“ Tagsüber sind die Vögel hellwach und richten ihre ganze Aufmerksamkeit auf die Nahrungssuche.

Neben dem langsamwelligen Schlaf registrierten die Messgeräte hin und wieder auch kurze Episoden von sogenanntem REM-Schlaf (*rapid eye movement*). Typisch für den REM-Schlaf sind EEG-Kurven mit niedrigen Ausschlägen und hohen Frequenzen, so wie sie auch bei wachen Vögeln auftreten. REM-Schlaf findet immer in beiden Gehirnhälften statt und kommt außer bei Vögeln auch bei Säugetieren einschließlich des Menschen vor. Bei Säugern dauern REM-Phasen bis zu einer Stunde. Währenddessen geht die Muskelspannung komplett verloren, und der Körper erschlafft. Vögel verbringen dagegen immer nur einige Sekunden im REM-Schlaf. Zwar lässt auch bei ihnen der Muskeltonus nach, sie können aber trotzdem noch stehen oder fliegen.

Welche Funktion der REM-Schlaf hat, ist bis heute ein Rätsel. Forscher gehen aber davon aus, dass er für die normale Entwicklung des Gehirns wichtig ist. Dafür spricht, dass die meisten Säugetierjungen mehr Zeit im REM-Schlaf zubringen als erwachsene Tiere. Bei neugeborenen Babys macht er die Hälfte der gesamten Schlafzeit aus, bei Erwachsenen nur noch ein Viertel. Bei Vögeln



Fregattvögel nutzen die Thermik, während sie auf der Suche nach Nahrung über den Ozean segeln. Das erfordert ihre volle Aufmerksamkeit. Ein kurzes Schläfchen gönnen sie sich meist nach Einbruch der Dunkelheit. Dabei halten sie das in Flugrichtung schauende Auge offen und die dazugehörige Gehirnhälfte wach (links). GPS-Logger ermöglichen es den Forschern, die Flugrouten genau zu verfolgen. Pro Tag legen die Vögel mehrere Hundert Kilometer zurück (rechts).

haben Niels Rattenborg und sein Team ein ganz ähnliches Muster gefunden. In einer Studie an jungen Schleiereulen stellten sie fest, dass sich auch bei Eulenküken der Anteil des REM-Schlafs mit dem Älterwerden verringert.

Bei fliegenden Fregattvögeln tritt also sowohl SW- als auch REM-Schlaf auf. Um sich in der Luft zu halten, ist es offenbar nicht nötig, einen Teil des Gehirns wach zu halten. Trotzdem gönnen sich die Vögel während des Fliegens kaum Schlaf: Innerhalb von 24 Stunden schliefen sie im Schnitt gerade einmal 42 Minuten, davon im Schnitt jeweils lediglich zwölf Sekunden am Stück. Der längste ununterbrochene Schlaf dauerte knapp sechs Minuten. An Land dagegen schlummerten die Tiere mehr als zwölf Stunden. Dabei waren die Schlafphasen nicht nur länger (52 Sekunden), sondern auch tiefer. Anscheinend holen die Tiere versäumten Schlaf nach, so wie auch wir Menschen das tun.

In einer früheren Studie hatten die Seewiesener Forscher gezeigt, dass Tauben ein Schlafdefizit auf ähnliche Weise kompensieren: Hielten die Wissenschaftler ihre Probanden von deren üblichem Mittagsschläfchen ab, so schliefen sie in der darauffolgenden Nacht intensiver. Im Gegensatz zu den Fregattvögeln wurden die Tauben schnell müde, wenn sie nur ein paar Stunden wach gehalten wurden. „Wir mussten sie eigentlich permanent sanft daran erinnern, wach zu bleiben.“

GESUCHT: EIN WUNDERMITTEL GEGEN DIE MÜDIGKEIT

Warum aber ruhen Fregattvögel in der Luft nicht länger, wenn das doch anscheinend problemlos möglich ist? „Eine frühere Studie hat gezeigt, dass sie günstigen Meeresströmungen folgen, um ergiebige Nahrungsquellen ausfindig zu machen“, sagt Rattenborg. „Möglicherweise bleiben sie auch nachts wach, um die Wasseroberfläche zu beobachten und morgens zum Fressen gleich an der richtigen Stelle zu sein.“ Das erfordert offensichtlich die volle Aufmerksamkeit beider Gehirnhälften, sonst würden die Vögel wahrscheinlich mehr schlafen.

Wie die Fregattvögel die negativen Effekte des Schlafmangels kompensieren, ist bislang ein Rätsel. Auch haben

die Wissenschaftler noch keine Antwort parat, warum es für uns Menschen so gut wie unmöglich ist, das Schlafbedürfnis zu unterdrücken. „Auch Tauben werden wie der Mensch müde, die Fregattvögel dagegen machen einfach weiter!“ Dass Menschen und Vögel, voneinander unabhängig, ganz ähnliche Schlafmuster entwickelt haben, lässt aber hoffen, aus den Erkenntnissen der Vogelschlafforschung auch etwas über den menschlichen Schlaf zu lernen.

Für sein Dachsammer-Projekt hatte Rattenborg sogar ein Stipendium vom US-Militär bekommen. Das vom Geldgeber insgeheim wohl erhoffte Wundermittel, um die Soldaten gegen Müdigkeit zu wappnen, kam dabei allerdings nicht heraus. „Von solch einer Substanz würden auch andere Berufsgruppen profitieren, zum Beispiel Rettungskräfte nach einer Naturkatastrophe“, sagt Rattenborg. Wäre es nicht auch für ihn als Wissenschaftler verlockend, weniger schlafen zu müssen und mehr forschen zu können? „Warum nicht?“, sagt er und lacht.

In jedem Fall hat seine Forschung bereits indirekt zu neuen Erkenntnissen über den menschlichen Schlaf geführt. Inspiriert von seiner Forschung mit den Enten haben Wissenschaftler kürzlich herausgefunden, dass Menschen eine Hirnhälfte teilweise wach



Oben Fliegen mit leichtem Gepäck: Das kleine Messgerät auf dem Kopf des Vogels zeichnet die Gehirnaktivität auf (oben).

Unten Die Kurven zeigen den Wachzustand (links) sowie den langsamwelligigen Schlaf einer (Mitte) oder beider Gehirnhälften (rechts).

halten, wenn sie in einer ungewohnten Umgebung schlafen – so wie die Enten, die am Rande der Gruppe sitzen, das nach außen gerichtete Auge offen halten. „Aus dem Schlafverhalten der Fregattvögel können wir deshalb künftig sicher auch etwas über unseren eigenen Schlaf lernen.“

Als Nächstes möchte Rattenborg Pfuhschnepfen mit mobilen Messgeräten ausstatten und ihre Reise von Alaska nach Neuseeland begleiten. „Anders als Fregattvögel schlagen sie aktiv mit den Flügeln“, sagt der Max-Planck-Forscher. Ob auch sie dabei schlafen? Um das herauszufinden, müssen die Forscher zunächst noch kleinere und leichtere Geräte entwickeln, denn Pfuhschnepfen sind deutlich kleiner als Fregattvögel. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Fregattvögel können während des Fluges schlafen. Dabei schlummert gewöhnlich nur eine Hirnhälfte, manchmal aber auch beide.**
- **In der Luft schlafen die Vögel nur etwa 42 Minuten pro Tag. Im Schnitt ist jede Schlafphase gerade mal zwölf Sekunden lang.**
- **Ihr Gehirn kann beim Fliegen in Tief- und REM-Schlaf fallen. Während bei Säugetieren die Muskulatur im REM-Schlaf völlig erschlafft, können Vögel selbst dann noch in der Luft segeln.**

GLOSSAR

REM-Schlaf: Schnell schwingende, dem Wachzustand vergleichbare Hirnaktivität. Für den REM-Schlaf typisch sind schnelle Augenbewegungen und eine verringerte Muskelspannung. Die Weckschwelle liegt sehr hoch, beim Menschen laufen die meisten Träume in dieser Phase ab. Die meisten Wissenschaftler gehen heute davon aus, dass der REM-Schlaf sehr spät in der Evolution entstanden ist und nur bei Säugetieren und Vögeln vorkommt. Seit Kurzem gibt es Hinweise darauf, dass auch manche Reptilien in REM-Schlaf fallen könnten.

SW-Schlaf: Der sogenannte *slow-wave sleep* oder langsamwellige Schlaf ist die Schlafphase mit der höchsten Weckschwelle – daher auch der umgangssprachliche Begriff Tiefschlaf. Typisch für den SW-Schlaf sind sogenannte Deltawellen (*slow waves*) mit einer Frequenz von weniger als vier Schwingungen pro Sekunde. Diese Wellen breiten sich nach und nach über das gesamte Gehirn aus. Es befinden sich also nicht alle Gehirnareale gleichzeitig im Tiefschlaf. Die Aktivitätswellen spielen wahrscheinlich eine Rolle bei der Verarbeitung von Informationen, die das Gehirn im Wachzustand aufgenommen hat.

Metronome, die den Tag regieren

Wie unterschiedlich die innere Uhr von Menschen ticken kann, dafür ist Ludwig II. von Bayern ein eindrucksvolles Beispiel: Historischen Quellen zufolge ging der Monarch üblicherweise nachts seinen Regierungsgeschäften nach, den Tag dagegen verschlief er weitgehend. Ob der Märchenkönig unter einer Störung litt, die seinen Schlaf-Wach-Rhythmus durcheinandergebracht hat, darüber kann zwar auch **Gregor Eichele** nur spekulieren. Zusammen mit seinem Team am **Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie** in Göttingen hat er aber viele neue Erkenntnisse darüber gewonnen, wie die natürlichen Taktgeber unseres Körpers funktionieren.

TEXT **KLAUS WILHELM**

Der Schlaf-Wach-Rhythmus ist untrennbar mit unserer inneren Uhr verbunden“, sagt Gregor Eichele, der am Göttinger Max-Planck-Institut die Abteilung „Gene und Verhalten“ leitet. Eichele weiß aus eigener Erfahrung, wie stark sich die innere Uhr auf das Wohlbefinden auswirken kann. Schließlich ist er selbst jahrelang regelmäßig zwischen Deutschland und den USA hin- und hergependelt. Die zirkadiane Uhr ist seit Langem eine seiner wissenschaftlichen Leidenschaften.

Dass Schlaf und innere Uhr eng miteinander zusammenhängen, das spüren Millionen von Menschen tagtäglich, wenn sie als Flugreisende innerhalb von wenigen Stunden mehrere Zeitzonen durchqueren. Eine häufige Folge: Die innere Uhr gerät aus dem Takt. Manche Menschen klagen bereits über Schlafstörungen, wenn nur die Uhr von der Sommerzeit um eine Stunde zurückgestellt wird. Selbst bei vermeintlich so geringfügigen Umstellungen kann es einige Tage dauern, bis die äußere und die innere Uhr wieder synchron laufen und die Betroffenen wie gewohnt schlafen.

„Obwohl Schlaf und innere Uhr miteinander zusammenhängen, sind sie grundverschieden: Während der Schlaf eine Leistung des ganzen Organismus darstellt, ist die innere Uhr eine Eigenschaft einzelner Zellen“, betont Gregor Eichele. Gleichzeitig beeinflussen sich beide gegenseitig. Ein Beispiel: Die Nervennetze und Substanzen, die den Schlaf regulieren, stehen unter Kontrolle der zirkadianen Uhr mit ihrem 24-Stunden-Rhythmus. Diese ist somit verantwortlich dafür, dass wir zur richtigen Zeit einschlafen können.

INNERE UHR GEHT ETWAS NACH

Der Begriff „zirkadian“ leitet sich ab von lateinisch *circa* (ungefähr) und *dies* (Tag). Er drückt aus, dass die innere Uhr nur annähernd im 24-Stunden-Takt schwingt. Ein Mensch kann zum Beispiel eine zirkadiane Uhr mit einem Rhythmus von 24,7 Stunden haben. Würde er über mehrere Wochen in einem gleichbleibend beleuchteten Raum leben, begänne er also täglich 42 Minuten später zu schlafen als am jeweiligen Vortag. Erst die Umweltbedingungen – an erster Stelle das Licht – kalibrieren

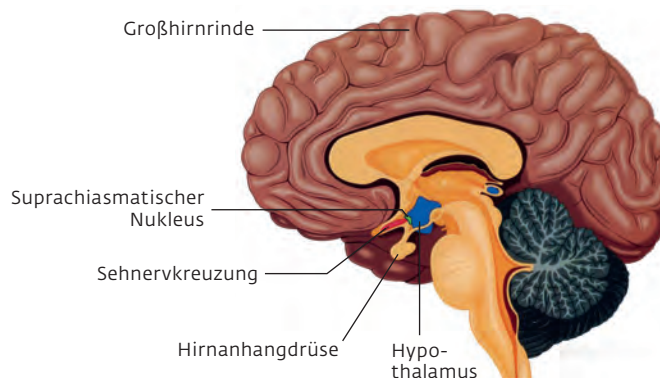
als Zeitgeber die innere Uhr immer wieder auf genau 24 Stunden.

Dieses umständlich anmutende System existiert, weil der tägliche Wechsel von Tag und Nacht nicht ausreicht, um die Abläufe in unserem Körper im Takt zu halten. Das wird beim Blick auf den Hell-Dunkel-Rhythmus unseres modernen Lebens sofort klar: Wenn unsere physiologischen Rhythmen allein eine Reaktion auf die An- oder Abwesenheit von Licht wären, dann hätte jeder verlängerte Abend mit all seinen künstlichen Lichtquellen katastrophale Auswirkungen auf unseren Stoffwechsel und den Schlaf-Wach-Rhythmus. Stattdessen signalisiert unsere innere Uhr, dass es sich hierbei um falsche äußere Zeitsignale handelt, und hält so den Organismus zeitlich stabil.

Entstanden ist die zirkadiane Uhr wahrscheinlich gleich zu Anbeginn der Evolution. Schon die allerersten Einzeller in den Urmeeren profitierten möglicherweise davon, wenn sie den Sonnenaufgang antizipieren und rechtzeitig in tiefere Wasserschichten abtauchen konnten. So entgingen sie der damals noch weitgehend ungefiltert auf die Erde treffenden UV-Strahlung der Son-



Der Lebensrhythmus der meisten Tiere folgt einer inneren Uhr. Der Taktgeber einer Maus beispielsweise ist von Natur aus so eingestellt, dass das Tier nachts aktiv ist und tagsüber ruht.



Links Gregor Eichele ist fasziniert von Uhren – insbesondere von den inneren Uhren, die die Abläufe in unseren Zellen und Organen im Takt halten. Dabei hat er wichtige Elemente des Räderwerks aus Molekülen aufgeklärt, das dem zirkadianen Rhythmus von Zellen zugrunde liegt.

Oben Der suprachiasmatische Nukleus ist der oberste Taktgeber im menschlichen Gehirn. Der rund einen Millimeter große Kern liegt oberhalb der Kreuzung der beiden Sehnerven und erhält von diesen über die Augen Informationen zu den Lichtverhältnissen. Auch die Hirnanhangdrüse beeinflusst mit ihren Hormonen die inneren Uhren des Körpers.

ne. In der Finsternis der Tiefsee signalisierte die Uhr den Mikroben dann wieder, wann es Zeit zum Auftauchen war.

Einmal in der Welt, haben fast alle Lebewesen das innere zirkadiane Uhrwerk beibehalten: Für Pflanzen ist es sinnvoll, dass sie nur tagsüber Fotosynthese betreiben. Bei tagaktiven Säugetieren wie dem Menschen steigt die Körpertemperatur bereits vor dem Aufwachen. Am Morgen erreicht die Ausschüttung des Stresshormons Cortisol ihren Höhepunkt und kurbelt so die körperliche und geistige Leistungsfähigkeit an. Auch Stoffwechsel, Muskelspannung, Nierenfunktion und Konzentrationsfähigkeit schwanken im Laufe eines Tages.

Jede einzelne Zelle, jedes Gewebe, jedes Organ bis hin zum Gesamtorganismus besitzt ein molekulares Uhrwerk – egal ob in Leber oder Niere, Herz oder Darm, Immunsystem oder Haut. „Wir verfügen also über einen regelrechten Uhrenladen“, erklärt Eichele – als Schweizer gewissermaßen prädestiniert für die Analyse solcher Instrumente. Damit all die Uhren immer dieselbe Zeit anzeigen, müssen sie permanent untereinander synchronisiert werden, jede einzelne Zelluhr ebenso wie die

Organuhren – und der gesamte Organismus mit dem 24-Stunden Hell-Dunkel-Zyklus der Umwelt.

Die wichtigste Uhr sitzt im Gehirn, im sogenannten suprachiasmatischen Nukleus. In diesem Kern sammeln sich beim Menschen 50000 eng miteinander verknüpfte Nervenzellen, die mit Neuronen diverser anderer Hirnregionen verschaltet sind. Über feine Nervenfasern empfängt der Kern Signale von spezialisierten Sinneszellen in den Augen. Trifft Licht auf ein lichtempfindliches Pigment in den Sinneszellen der Netzhaut, bilden diese ein elektrisches Signal und übermitteln es an den suprachiasmatischen Nukleus.

HIRNKERN GIBT DEN TAKT VOR

Ohne den suprachiasmatischen Nukleus verlieren beispielsweise Hamster ihren Tagesrhythmus. Wissenschaftler haben dies gemessen, indem sie den Tieren ein Laufrad in den Käfig stellten und die Umdrehungen des Rads als Maß für die Aktivität des Hamsters aufzeichneten. Normalerweise sind Hamster in erster Linie vor Sonnenauf- und nach Sonnenuntergang aktiv. Ohne suprachiasmatischen Nukleus betätigten

sie sich stattdessen sowohl tagsüber als auch nachts ähnlich häufig. Geschlafen haben die Tiere dagegen nicht mehr als üblich.

Dieser Befund legte den Schluss nahe, dass der Nukleus als oberster Taktgeber seine Informationen an alle anderen Uhren in den Zellen, Geweben und Organen des Körpers übermitteln und diese sowohl mit dem Tageslauf als auch untereinander synchronisiert. Doch nach jüngsten Versuchen wankt diese Theorie: Eicheles Team hat nämlich Mäuse genetisch so verändert, dass das wichtige Uhr-Gen BMAL1 im suprachiasmatischen Nukleus inaktiv ist. Der Unterschied zu den Studien an den Hamstern: Die Verbindungen vom und zum Nukleus werden nicht gekappt, sondern bleiben bestehen. Der Theorie zufolge müsste in der inneren Uhrenwelt der Tiere trotzdem ein Chaos ausbrechen.

Tut es aber nicht! „Es hat sich gezeigt, dass die anderen zirkadianen Uhren auch ohne die Zentraluhr im suprachiasmatischen Nukleus im Takt bleiben“, erklärt Eichele – zumindest unter der Bedingung, dass sich Helligkeit und Dunkelheit im 24-Stunden-Takt abwechseln. Fehlt den Mäusen das Uhr-Gen und leben sie dazu noch in

permanenter Dunkelheit, entsteht dagegen Unordnung: Sie haben dann Probleme, ihre inneren Uhren im Gleichtakt zu halten.

Der Körper braucht also zwingend den natürlichen Hell-Dunkel-Wechsel als Zeitgeber. Nahrungsaufnahme kann die zirkadiane Uhr zwar auch auf exakt 24 Stunden eichen – sie führt aber nur zu halbwegs synchronen inneren Zeitmessern.

Offenbar ist das Uhrensystem organisiert wie ein föderaler Staat, den die einzelnen Landesregierungen am Laufen halten können, auch wenn die Bundesregierung mal schwächelt. „Dieses System ist letzten Endes stabiler als ei-

nes, das sich ausschließlich auf den suprachiasmatischen Nukleus verlässt“, sagt Eichele.

Doch wie synchronisieren sich die inneren Uhren ohne den zentralen Schrittmacher im Gehirn? Eine Möglichkeit ist, dass die Körperuhren Hell-Dunkel-Informationen aus dem suprachiasmatischen Nukleus erhalten, denn Forscher haben belegt, dass Licht über das vegetative Nervensystem Uhr-Gene in Organen wie etwa der Leber aktivieren kann.

Fehlt der Nukleus, versiegen auch die Lichtsignale, die von den Augen in den Körper wandern. So kann das Licht das vegetative Nervensystem nicht mehr

beeinflussen – und infolgedessen auch nicht die Körperuhren. Da die Göttinger Wissenschaftler nicht den kompletten Nervenknäuel ausschalten, sondern nur ein einzelnes Uhr-Gen, können die Lichtsignale über den Nukleus weiter die übrigen Uhren im Körper erreichen und synchronisieren. Offenbar müssen die Signale nicht in seinen Uhrzellen vorverarbeitet werden.

Es ist aber auch möglich, dass andere wichtige Uhren im Gehirn direkt für den suprachiasmatischen Nukleus einspringen und die Körperuhren gleichschalten. Eine Kandidatin dafür wäre die Hirnanhangdrüse. Sie erhält ebenfalls die Lichtsignale aus den Augen. >

REGULIEREN FLIMMERHÄRCHEN IM GEHIRN UNSEREN SCHLAF?

Tief im menschlichen Gehirn verläuft ein Höhlensystem: vier „Ventrikel“ genannte Hohlräume, die durch Kanäle miteinander verbunden sind. In ihnen fließt die Hirnflüssigkeit. Sie enthält unter anderem Neuropeptide, die beispielsweise dafür sorgen, dass wir müde werden. Der an der inneren Uhr beteiligte suprachiasmatische Nukleus (siehe Text) liegt in der Nähe eines solchen Ventrikels. Wissenschaftler der Max-Planck-Institute für biophysikalische Chemie und für Dynamik und Selbstorganisation haben kürzlich herausgefunden, dass wimpernartige Fortsätze – sogenannte Zilien – auf den

Wandzellen der Ventrikel ihre Schlagrichtung und damit die Fließrichtung der Hirnflüssigkeit ändern können. Zu bestimmten Tageszeiten produzieren sie sogar Wirbel, die wie Barrieren wirken. Ob die Verteilung der Flüssigkeit und folglich die schlafauslösenden Neuropeptide tatsächlich einem zirkadianen Rhythmus folgen, steht noch nicht endgültig fest. Möglicherweise sind die Forscher mit ihrer Entdeckung einem völlig neuen Mechanismus auf der Spur, der nicht auf der Aktivität von Nervenzellen beruht, sondern rein auf der Aktivität der Wandzellen der Hirnventrikel.



Die Drüse an der Unterseite des Gehirns schüttet das Hormon ACTH ins Blut aus, von wo aus es in die Nebennieren gespült wird, wo es die Ausschüttung von Cortisol, Adrenalin und Noradrenalin auslöst.

Diese Stresshormone sind als wichtige Zeitgeber für die inneren Uhren bekannt. Eichele und sein Team haben entdeckt, dass die Mäuse mit defektem Uhr-Gen das Hormon Corticosteron im Tagesverlauf rhythmisch ausschütten – und zwar fast wie bei normalen Mäusen im Gleichtakt mit den anderen Körperuhren. Dieses Hormon entspricht dem Cortisol beim Menschen. „Fällt also der suprachiasmatische Nukleus als Taktgeber aus, synchronisiert womöglich Corticosteron die Körperuhren“, folgert Eichele. Das spräche dafür, dass

der innere Zeitmesser in den Nebennieren fast so bedeutend ist wie die Uhr im suprachiasmatischen Nukleus.

DER CHRONOTYP BESTIMMT, WANN MAN INS BETT GEHT

Aber nicht nur Licht, auch Schlaf beeinflusst die Uhren in den Geweben und Organen des Körpers. „Man muss dabei aber ungestört sein, darf keinen Stress haben und muss schlafen können, wann man will. Also entsprechend dem persönlichen Chronotyp, der bestimmt, ob man früh oder spät zu Bett gehen und eher kurz oder eher lang schlafen mag“, erklärt Henrik Oster von der Universität Lübeck, der bis Ende 2012 eine Forschungsgruppe am Göttinger Max-Planck-Institut geleitet hat.

Seit seiner Zeit in Göttingen erforscht Oster mit seinen Kollegen, wie Schlaf, innere Uhr und Stoffwechsel zusammenhängen. Dabei haben sie beispielsweise beobachtet, dass bei gestörtem Schlaf die Leber- und Fettzellen von Mäusen nicht mehr synchron ticken. Ob sich auch die Rhythmik der Zellen anderer Organe wie der Nieren entkoppelt, versuchen die Wissenschaftler gerade herauszufinden.

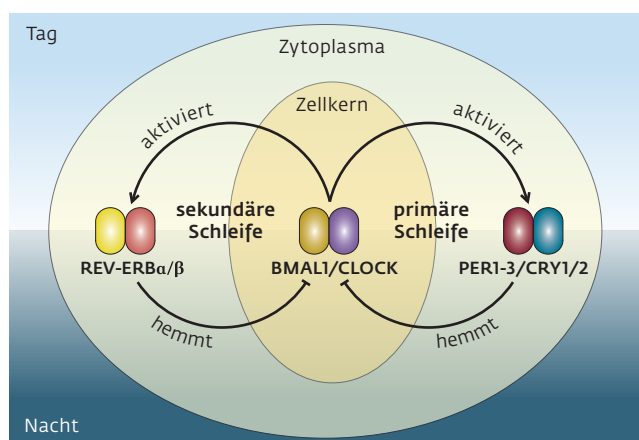
Vieles deutet zudem darauf hin, dass ein gestörter Schlaf über die innere Uhr auch den Stoffwechsel durcheinanderbringen kann. So hat Oster mit seinen Kollegen am Max-Planck-Institut den Schlafrhythmus und damit auch die innere Uhr von Mäusen aus dem Takt gebracht: Die Forscher hielten die Tiere morgens vom Einschlafen ab, indem sie

Links Henrik Oster hält seine Mäuse unter genau kontrollierten Hell-Dunkel-Bedingungen. Die Käfige stehen in Schränken mit programmierbarer Beleuchtungsdauer und -intensität. So kann er den Schlaf-Wach-Rhythmus der Tiere steuern.

Rechts oben, unten Mäuse sind sehr neugierig, ihre Neugier hält sie sogar vom Schlafen ab. Deshalb enthalten die Käfige Gegenstände, die die Tiere noch nicht kennen und die sie ausgiebig erkunden können – eine besonders stressarme Form des Schlafentzugs.



Fotos: Henrik Oster, Christiane Koch / AG Chronophysiologie (3)



Zwei Rückkopplungsschleifen steuern den zirkadianen Rhythmus einer Zelle durch ein Wechselspiel aus Genaktivierung und -hemmung: Die Proteine BMAL1 und CLOCK kurbeln jeden Morgen im Zellkern die Produktion von Cryptochrom(CRY)- und Period(PER)-Proteinen an. Diese lagern sich im Zellplasma zusammen und wandern im Verlauf des Nachmittags und Abends wieder zurück in den Zellkern, wo sie die BMAL1- und CLOCK-Proteine blockieren. Im Laufe der Nacht fällt die Menge an CRY und PER in der Zelle so weit ab, dass die Blockade von CLOCK und BMAL1 zu Ende geht und gegen Morgen eine neue Runde der CRY- und PER-Produktion beginnt. Dieser Kreislauf wird von einer weiteren Rückkopplungsschleife stabilisiert. Dabei stimulieren BMAL1 und CLOCK die Bildung von REV-ERB-Proteinen. Diese schalten dann im Verlauf des Tages die BMAL1- und CLOCK-Gene immer stärker ab. Dadurch geht auch ihre eigene Produktion wieder zurück, sodass am frühen Morgen BMAL1 und CLOCK erneut gebildet werden können.

den Tieren Spielzeug in die Käfige legten. Nach einigen Tagen zeigte sich, dass die Schlafstörung die innere Uhr peripherer Organe beeinflusst. Diese können dann wichtige Stoffwechselgene nicht mehr korrekt an- und abschalten.

Ein Beispiel für eine solche Stoffwechselstörung ist die sogenannte hormonsensitive Lipase. Normalerweise sorgt die zirkadiane Uhr dafür, dass dieses Fettzellenenzym in der Schlafphase aktiv ist. Es baut dann gespeicherte Fette ab, die der Körper braucht, um die Zeit ohne Nahrung zu überbrücken. Da die Lipase bei Schlafstörungen aber nicht mehr so aktiv ist, werden kaum Fette in den Körper freigesetzt. „Weil unter diesen Umständen der Blutzuckerspiegel fällt, kommt es zu einem Energiemangel: Die Tiere bekommen Hunger“, sagt Oster. Die Mäuse beginnen also zu fressen, was ihren Schlaf erst recht stört. So entsteht ein Teufelskreis, in dessen Verlauf die Tiere immer mehr Gewicht zulegen. Dazu kommt, dass Hormone des Magens die Uhr der Leber verstellen, wenn die Mäuse in der eigentlichen Schlafzeit fressen. Dies führt dazu, dass der Leberstoffwechsel immer weiter entleert.

Kann der Körper dieses Stoffwechselchaos irgendwie kompensieren? Die Antwort: unter bestimmten Umständen! Osters Team hat Mäuse beim Schlafen gestört und ihnen nur während ihrer normalen Wachphase Zugang zu Nahrung gewährt. Dann aber konnten sie so viel fressen, wie sie wollten. „Das hat die Aktivierung der Uhr-Gene in der Leber normalisiert“, sagt Oster. „Wann gegessen wird, scheint also ein ganz wichtiger Faktor bei der

Entwicklung von Übergewicht und Stoffwechselerkrankungen zu sein.“

Die Lübecker Forscher haben ebenfalls beobachtet, dass Uhr-Gene auch beim Menschen nach Schlafentzug Veränderungen im Stoffwechsel hervorrufen. Ob daraus aber wirklich Adipositas und Diabetes entstehen können, ist noch nicht belegt. Studien an Schichtarbeitern deuten allerdings darauf hin.

Die Experimente mit den Mäusen zeigen jedenfalls eindeutig, dass die richtige Taktung von Schlaf und Nahrungsaufnahme viele entgleiste Stoffwechsel-

vorgänge ausgleichen, vielleicht sogar teilweise rückgängig machen kann.

Nicht nur deshalb glaubt Oster, dass die Stabilisierung der inneren Rhythmik ein wichtiger Faktor bei der Behandlung von Stoffwechselerkrankungen sein kann. Schließlich folgen all diese Erkrankungen einem starken Tagesrhythmus und lassen sich durch Stress beeinflussen. Schlaf spielt dabei eine wichtige Rolle: „Wer ausreichend schläft, und dies auch zur richtigen Zeit“, meint Oster, „ist weniger anfällig für diese Erkrankungen.“

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Schlaf und innere Uhr hängen eng miteinander zusammen: Gerät die innere Uhr aus dem Tritt, können Schlafprobleme die Folge sein. Und wer schlecht oder unregelmäßig schläft, stört auch seine innere Uhr.
- Zellen und Organe folgen einer eigenen inneren Uhr. Der suprachiasmatische Nukleus, eine Ansammlung von Nervenzellen im Gehirn, ist ein zentraler Taktgeber für andere Uhren des Körpers. Diese funktionieren aber auch ohne ihn. Manche von ihnen erhalten dabei direkt Hell-Dunkel-Informationen über die Augen.
- Schlafstörungen können möglicherweise Stoffwechselerkrankungen auslösen, indem sie die Aktivität von Uhr-Genen durcheinanderbringen. Dadurch können Stoffwechselvorgänge in Unordnung geraten.

GLOSSAR

Nukleus: Ansammlung von Nervenzellen innerhalb des zentralen Nervensystems. Die Zellen eines Nukleus haben meistens dieselben oder zumindest ähnliche Aufgaben. Die Nuklei stellen neben der Anordnung in Schichten eine weitere Form dar, wie Nervenzellen im Gehirn angeordnet sein können. Im Wirbeltiergehirn gibt es mehrere Hundert solcher Kerne in tiefer gelegenen Bereichen. Sie sind dort umgeben von der sogenannten weißen Substanz, in der die Nervenfasern verlaufen.

Zirkadianer Rhythmus: Manche biologischen Vorgänge laufen in einem Rhythmus von ungefähr 24 Stunden ab. Gesteuert wird dieser Takt von Genen, die mit ihrer Aktivität Stoffwechselprozesse in Zellen und Organen bis hin zum Gesamtorganismus beeinflussen und damit auch Verhaltensweisen kontrollieren. Die Rhythmik ist selbsterregend, braucht also keine äußeren Taktgeber. Externe Einflüsse können den Takt der Körperuhren jedoch neu eichen. Bei tagaktiven Organismen ist der zirkadiane Rhythmus meist etwas länger als 24 Stunden, bei nachtaktiven etwas kürzer (Aschoff-Regel).

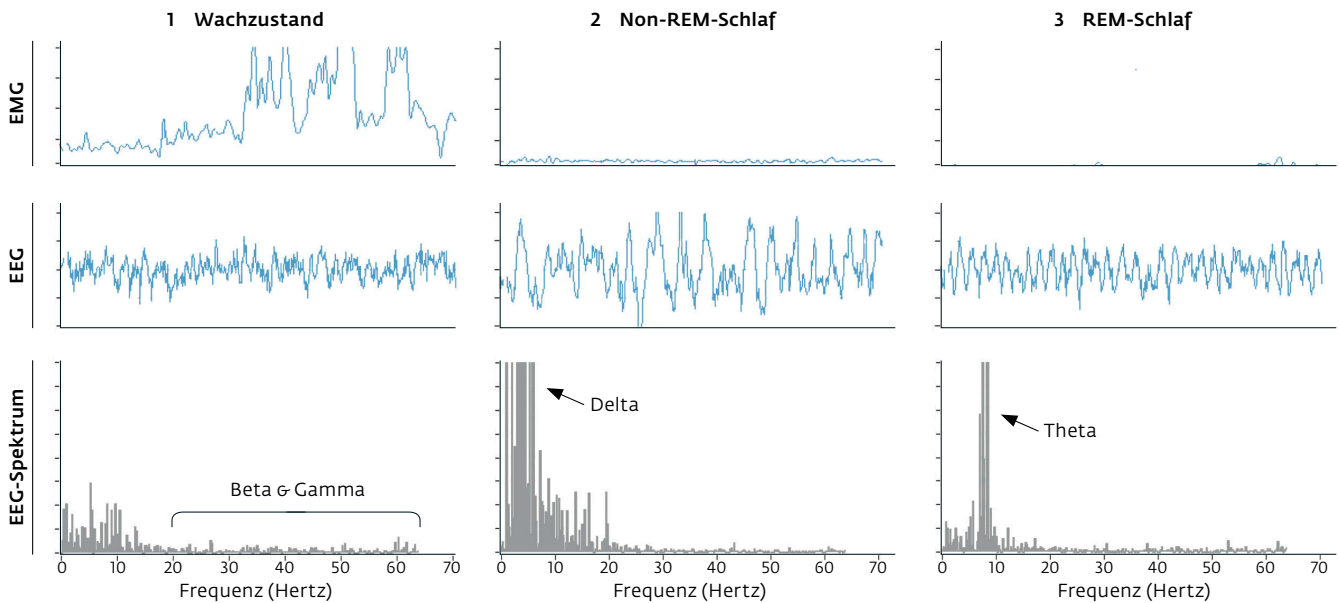
Hightech-Schlafmütze: Mit mehr als 100 Elektroden zeichnen Forscher auf der Kopfoberfläche die elektrischen Ströme während des Schlafs auf. Anhand der Gehirnaktivität lässt sich ein Schlafprofil erstellen.



Wenn das Gehirn auf Stand-by schaltet

Wer unausgeschlafen ist, für den sieht die Welt oft ziemlich trist aus. Hält die Müdigkeit über Wochen oder gar Monate an, kann die trübe Stimmung krankhaft und zu einer Depression werden. Umgekehrt gehen Depressionen auch häufig mit massiven Schlafstörungen einher. **Axel Steiger** untersucht mit seinem Team am **Max-Planck-Institut für Psychiatrie** in München den Zusammenhang zwischen Schlafstörungen und Depression. Dazu misst er die menschliche Gehirnaktivität im Schlaflabor.

TEXT **CATARINA PIETSCHMANN**



Oben Vermessung des Mäuseschlafs: Wache Mäuse (Spalte 1) bewegen sich viel, die Muskeln sind deshalb häufiger aktiv, hier die elektrischen Signale aus der Nackenmuskulatur (Elektromyogramm; oben). Die Nervenzellen des Gehirns feuern in unterschiedlichen Rhythmen mit einem breiten Frequenzspektrum (Mitte und unten). Im Non-REM-Schlaf (Spalte 2) ist die Skelettmuskulatur weitgehend stillgelegt (oben). Die Gehirnaktivität oszilliert mit hohen Amplituden, aber niedriger Frequenz (Deltawellen; Mitte und unten). Während des REM-Schlafs (Spalte 3) ist die Muskulatur völlig inaktiv (oben), bei der Gehirnaktivität herrschen Theta-Rhythmen vor (Mitte und unten).

Rechte Seite Im Schlaflabor des Max-Planck-Instituts für Psychiatrie zeichnet Michael Czisch die Gehirnaktivität seiner Probanden in einem Kernspintomografen auf. Mit dem Gerät kann der Wissenschaftler die Aktivität des schlafenden Gehirns sichtbar machen.

Stress im Job, Beziehungsprobleme oder der Umzug in eine andere Stadt können einem Menschen buchstäblich den Schlaf rauben. Dem Robert Koch-Institut zufolge hat jeder dritte Bundesbürger schon einmal unter Schlafstörungen gelitten. Meistens verschwinden Schlafstörungen wieder von selbst, sobald der Auslöser überstanden ist. Halten sie allerdings über Wochen und Monate an, sollten die Betroffenen einen Arzt zurate ziehen.

Schlechter Schlaf kann körperliche oder psychische Ursachen haben. „Schlafstörungen können Ursache und Folge von Depressionen sein, oder anders ausgedrückt: Sie sind ein Symptom und gleichzeitig ein Risikofaktor. So erhöhen sie beispielsweise das Depressionsrisiko massiv“, erklärt Axel Steiger, Oberarzt und Leiter der Ambulanz für Schlafmedizin am Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München-Schwabing.

Die traditionsreiche Klinik, deren Schwerpunkt die Folgeerkrankungen von Stress wie Depressionen, Schlaf- und Angststörungen sind, wurde 1917

als Deutsche Forschungsanstalt für Psychiatrie von Emil Kraepelin gegründet und 1924 in die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft eingegliedert. Sie vereint fünf Stationen mit insgesamt 120 Betten, eine Tagesklinik, diverse Spezialambulanzen und Forschungseinrichtungen unter einem Dach.

DÖSEN IM AUFTRAG DER WISSENSCHAFT

Die Patienten können freiwillig an wissenschaftlichen Studien teilnehmen – für Steiger, der seit 1991 die Forschungsgruppe Schlaf-Endokrinologie leitet, eine ideale Umgebung für seine Forschung. Der Mediziner untersucht mit seinem Team unter anderem den Zusammenhang zwischen Schlafmustern und nächtlicher Hormonausschüttung bei Depression. Während die Probanden eine Nacht im Schlaflabor verbringen, messen die Wissenschaftler die Hirn- und Muskelströme, zeichnen die Augenbewegungen auf und nehmen regelmäßig ein wenig Blut ab, um die Menge bestimmter Hormone darin zu analysieren.

Aus den Wellenmustern des Elektroenzephalogramms (EEG) schließen die Forscher zusammen mit den übrigen Messungen auf die Abfolge der verschiedenen Schlafstadien, das sogenannte Schlafprofil oder Hypnogramm. Es hat die Form einer Treppe und besteht aus mehreren Stufen: Der schlafende Mensch steigt zu Beginn der Nacht zu immer tieferem Schlaf hinab. Dabei nimmt die Amplitude der EEG-Wellen mit der Schlaftiefe zu. Im Wachzustand und im REM-Schlaf ist sie niedrig, im Tiefschlaf, der untersten Stufe der Treppe, ist sie hoch.

Auch die neueste Variante, das High-Density-EEG (HD-EEG), kommt am Institut bei der Untersuchung der Gehirnaktivität zum Einsatz. Dabei bekommt der Proband eine „Schlafmütze“ mit 118 feinen Elektroden – üblich sind normalerweise zehn – auf den Kopf gesetzt. Während er in dem schallisolierten Raum friedlich schlummert, senden Gehirn, Gesichtsmuskeln und Herz ständig Daten über feine Kabel an einen Computer. So bekommen die Forscher Einblicke in die Großhirnrinde und tiefer ge-



legene Teile wie das limbische System, den emotionalen Teil des Gehirns.

In den schematischen Darstellungen der Hypnogramme unterscheidet sich der durch schnelle Augenbewegungen (*rapid eye movement*) gekennzeichnete und oft traumreiche REM-Schlaf deutlich vom Non(Nicht)-REM-Schlaf. Er wird darin als Stufe unterhalb des Wachzustands, aber deutlich über dem Tiefschlaf dargestellt. Blutdruck und

Puls steigen dann an, die Skelettmuskulatur ist jedoch völlig entspannt. Vier, fünf, manchmal auch sechs oder mehr Zyklen von Tiefschlaf und REM-Schlaf pro Nacht sind die Regel. Tiefschlaf wiederum ist eine Komponente des Non-REM-Schlafs. Er ist bei gesunden jungen Menschen zu Beginn der Nacht am stärksten ausgeprägt, tritt dagegen am frühen Morgen nicht oder kaum mehr auf.

Direkt nach dem Einschlafen schlafen die meisten Menschen etwa 90 Minuten lang besonders tief. Dann kommt die erste REM-Phase. „Depressive Menschen fallen dagegen schneller, manchmal schon nach zehn Minuten, in den REM-Schlaf“, sagt Steiger. Außerdem ist die erste REM-Phase der Nacht bei Patienten mit Depression meist länger.

Legt man die Hormonkurven über die Schlafprofile, fällt auf, dass bei de-

LERNEN IM SCHLAF

Im Schlaf kommt der Körper nur äußerlich zur Ruhe, denn Schlaf ist ein aktiver Prozess: Der Stoffwechsel läuft auf Hochtouren, insbesondere Wachstums- und Regenerationsprozesse, Entgiftung und Wundheilung. Auch Teile des Gehirns sind jetzt hochaktiv. Sie verarbeiten die Reize, die das Gehirn am Tag aufgenommen hat, trennen die wichtigen Informationen von den belanglosen und verschieben sie vom Kurzzeit- ins Langzeitgedächtnis. Guter Schlaf fördert deshalb die Gedächtnisbildung.

Das Schlafbedürfnis nimmt im Laufe des Lebens stetig ab. Säuglinge schlafen in den ersten drei Monaten bis zu 17 Stun-

den am Tag. Dies liegt an den enormen Wachstums- und Reifungsprozessen im Gehirn während dieser Zeit. Nie wieder lernt der Mensch so viel wie in den ersten Wochen und Monaten seines Lebens. Drei- bis Fünfjährige kommen schon mit zehn bis 13 Stunden aus, und den 18- bis 78-Jährigen reichen meist sieben bis acht Stunden. Auch der Schlaf-Wach-Rhythmus verändert sich. Während Erwachsene meist nur nachts und in einem Stück schlummern, verteilen Neugeborene mehrere Schlafperioden über den Tagesverlauf. Nach einem Jahr schlafen die meisten Kleinkinder nachts bereits durch, und der Tagesschlaf reduziert sich zusehends.



Axel Steiger hat fast sein gesamtes Forscherleben dem Schlaf gewidmet. Er ist unter anderem Leiter der Ambulanz für Schlafmedizin am Max-Planck-Institut für Psychiatrie. Dort werden unterschiedliche Störungen diagnostiziert und behandelt, zum Beispiel nächtliche Schlaf- und Bewegungsstörungen, ungewöhnliche Verhaltensweisen im Schlaf (etwa Schlafwandeln) sowie nächtliche Angstattacken und Alpträume.

pressiven Patienten weniger Wachstumshormon ausgeschüttet wird als bei Gesunden. Auch die Cortisolwerte unterscheiden sich: Bei vielen Patienten steigen sie vor allem in der zweiten Nachthälfte viel stärker an.

Cortisol ist ein wichtiges Stresshormon. Seine Produktion wird vom Gehirn durch das Corticotropin freisetzen- de Hormon (CRH) reguliert. Bei einer Infektion etwa stimuliert CRH indirekt die Cortisolausschüttung in den Nebennieren. Das Cortisol aktiviert dann das Immunsystem. Dasselbe passiert bei Prüfungsstress oder einem hitzigen Streit. Hat sich die Situation beruhigt, kommen auch die Stresshormone wieder ins Lot. Das ausgeschüttete Cortisol bremst nun die CRH-Ausschüttung und damit seine eigene Produktion.

„Wir vermuten, dass dieser Rückkopplungsmechanismus bei Patienten mit Depression nicht richtig funktioniert, wahrscheinlich weil die Cortisolrezeptoren im Gehirn gestört sind, über die bei gesunden Personen die Ausschüttung des Hormons gedrosselt wird“, erklärt Steiger. Wenn die Depression wieder abklingt, dann sinkt zunächst der Cortisolspiegel, während das Schlafmuster noch eine Weile gestört bleibt.

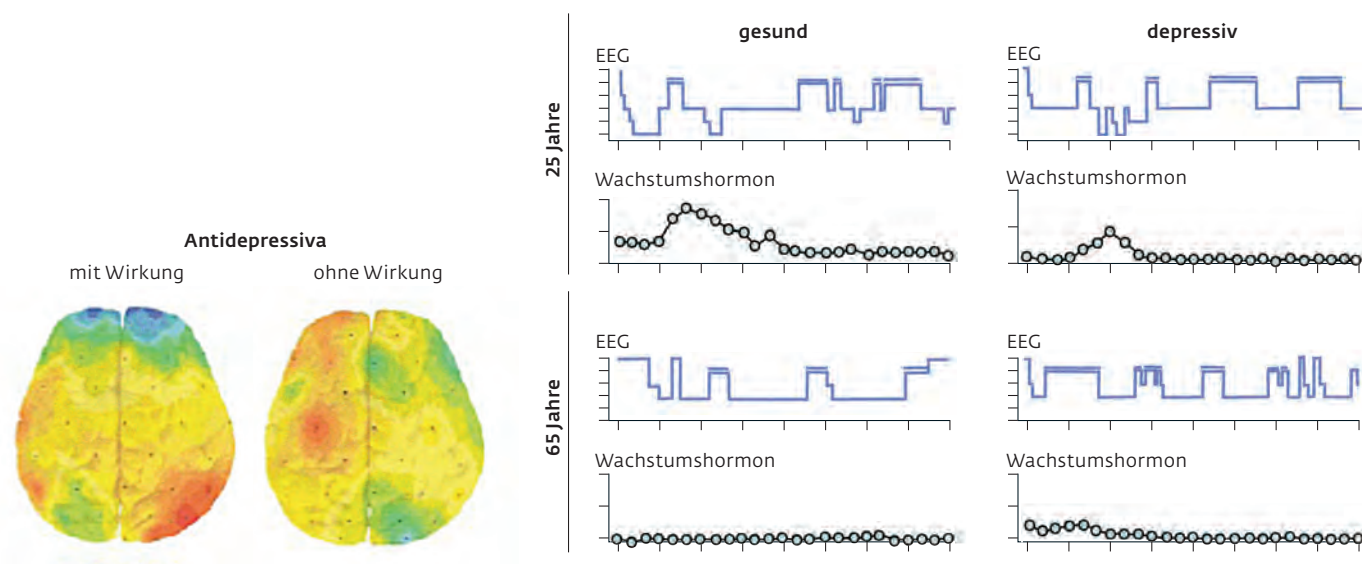
WECHSELSPIEL DER HORMONE IM FOKUS DER FORSCHER

Dieses Wechselspiel zwischen CRH und Cortisol läuft auch im Körper von Mäusen ab. Mayumi Kimura, die Leiterin der Einheit „Schlaf und Telemetrie“ am Institut, verwendet die kleinen Nagetiere, bei denen bestimmte Gene gezielt ausgeschaltet oder aktiviert wurden, um deren genaue Funktion zu studieren. Sowohl über längere Zeit gestresste als auch genetisch veränderte Mäuse, die im Gehirn mehr CRH als üblich bilden, fallen beim Schlafen schneller und öfter in den REM-Modus. Das macht sie zum idealen Tiermodell für Depression.

Aber gibt es denn wirklich depressive Mäuse? „Ob sie sich wirklich ähnlich wie menschliche Patienten fühlen, wissen wir natürlich nicht. Aber sie verhalten sich auf alle Fälle ähnlich wie depressive Patienten“, sagt Kimura. Zum Beispiel im „Forced Swim“-Test: Während gesunde Mäuse losschwimmen und länger durchzuhalten versuchen, geben „depressive“ Mäuse schneller auf. Und obwohl Mäuse generell öfter aufwachen und kaum länger als zehn Minuten am Stück schlafen, weist das REM-Schlafprofil von Mäusen mit erhöhter CRH-Ausschüttung verblüffende Ähnlichkeit mit jenem depressiver Patienten auf.

Zurück zum Menschen: Auffällig ist, dass das Schlafmuster von depressiven Patienten jenem gesunder älterer Menschen ähnelt. „Manche Depression ist tatsächlich wie frühes Altern“, bestätigt Steiger. Im Alter sind die Tiefschlafphasen seltener, ältere Menschen wachen zudem nachts öfter auf und schlafen insgesamt weniger.

Dass mehrheitlich Frauen depressiv werden, scheint auch kein Zufall zu sein: Hormonschwankungen während



Links Unterschiede in der „Cordance“: Nach der Behandlung mit den Antidepressiva Fluoxetin oder Venlafaxin zeigen depressive Patienten unterschiedliche Hirnaktivität. So ist nach einer Woche die Thetawellen-Aktivität in der präfrontalen Hirnrinde geringer bei Patienten, die auf die Wirkstoffe ansprechen (links, blau), als bei Patienten, bei denen die Substanzen keine Wirkung zeigen (rechts).

Rechts Schlafprofil und Hormonausschüttung ändern sich mit dem Alter: Während 25-Jährige nach dem Einschlafen schnell in Tiefschlaf fallen (links oben, EEG), dauert dies bei 65-Jährigen länger. Außerdem wird bei jungen Menschen nach dem Einschlafen Wachstumshormon ausgeschüttet (links, obere hellblaue Kurve), bei älteren dagegen nicht (ganz unten links). Bei jungen Menschen mit Depressionen (rechts oben) dauert es wie bei älteren Menschen länger, bis sie in Tiefschlaf fallen (EEG), ihr Gehirn schüttet zudem weniger Wachstumshormon aus (rechts, obere hellblaue Kurve).

des Zyklus, der Schwangerschaft und infolge der Menopause sind mitverantwortlich dafür, dass Frauen während ihrer fruchtbaren Phase zwei- bis dreimal häufiger an Depressionen erkranken als Männer. Auch in der Menopause gibt es ein erhöhtes Depressionsrisiko. Umgekehrt schützen die weiblichen Geschlechtshormone gegen Psychosen: Männer erkranken vermutlich aus diesem Grund früher im Leben an Schizophrenie als Frauen.

Dass neben Stress, Alter und Geschlecht auch bestimmte Gene anfällig für Depressionen machen, zeigt sich bei gesunden Personen mit erhöhtem Risiko für Depressionen. In einer früheren Studie haben Forscher am Max-Planck-Institut beobachtet, dass die Kinder und Geschwister depressiver Patienten in der ersten REM-Periode vermehrt schnelle Augenbewegungen aufwiesen, obwohl sie gesund waren. „Wir haben außerdem herausgefunden, dass gesunde Probanden auffällige Schlafmuster aufweisen können, wenn sie bestimmte Risikogene für Depression besitzen“, erklärt Axel Steiger. Für eines dieser Gene, das P2RX7, wurde in früheren Untersu-

chungen am Münchner Institut ein Zusammenhang mit unipolarer Depression gefunden.

MÄUSE MIT MENSCHLICHEM DEPRESSIONSGEN

Dass Risikogene für Depression das Schlafverhalten beeinflussen, konnten die Forscher auch an Mäusen beobachten: Mayumi Kimura und ihre Kollegen zeichneten den Schlaf der Tiere auf, die mit der menschlichen Version der P2RX7-Variante ausgestattet worden waren. Dabei stellten sie fest, dass die Mäuse deutliche Veränderungen in ihren EEG-Mustern zeigen, die denen depressiver Patienten ähneln. Mithilfe der genetisch veränderten Mäuse will Kimura nun die Wirkung neuer Antidepressiva erforschen.

Die Gene beeinflussen auch, wie gut ein Antidepressivum bei einem Patienten wirkt. Das am Institut erforschte Gen ABCB1 gibt es in zwei Varianten, die darüber entscheiden, wie effizient bestimmte Wirkstoffe die Blut-Hirnschranke überwinden. Inzwischen gibt es einen DNA-Test, mit dem der Arzt

vor Therapiebeginn testen kann, welche Wirkstoffklasse für seinen Patienten geeignet ist.

Es gibt also verschiedene Gene, die das Risiko erhöhen, an einer Depression zu erkranken. Deshalb vermuten die Forscher, dass je nach Gen auch unterschiedliche Formen der Depression existieren. Die psychiatrische Klassifikation von Depressionen basiert bisher auf den jeweils auftretenden Symptomen. Unterschiedliche Erkrankungen können aber dieselben Symptome auslösen. „Schlafprofile könnten bei einer Einteilung der Depressionstypen helfen. Den genauen Zusammenhang zwischen Schlafmustern und Genen bei Patienten kennen wir aber noch nicht“, sagt Steiger.

Schlaf kann jedoch nicht nur bei der Diagnose, sondern auch bei der Therapie eine Rolle spielen. So hat sich kurzzeitiger Schlafentzug vor allem in der zweiten Nachthälfte in der Psychiatrie als Segen erwiesen, denn er wirkt sehr schnell antidepressiv. „Wir praktizieren das an der Klinik mit Patientengruppen zweimal pro Woche. Die Teilnehmer stehen um halb drei in der Früh auf und gehen in Begleitung von Studenten spa-



Tommi Bauer wertet Blutproben von Probanden und Patienten aus. Die Hormonwerte im Blut liefern ihm Hinweise auf die Vorgänge in unserem Körper, während wir schlafen.

zieren. Dabei unterhalten sie sich oder verbringen die Zeit bis zum Morgen mit Gesellschaftsspielen“, schildert Steiger. Am folgenden Abend dürfen sie wieder wie gewohnt ins Bett.

Während einer durchwachten Nacht bildet der Körper mehr stimmungsaufhellende Stoffe wie Serotonin und Tryptophan als im Schlaf. Schlafstörungen sind also ein zweiseitiges Schwert: Einerseits sind sie ein Risikofaktor für Depressionen, andererseits wirkt Schlafentzug aber antidepressiv. „Für die Patienten ist es jedoch ein Lichtblick, weil wir ihnen so zeigen können, dass ihr Zustand keineswegs so hoffnungslos ist, wie sie denken“, erklärt Steiger. „Sie spüren: Mein Gehirn ist nicht unwiderföhrlich defekt.“

Schlafprofile liefern also Hinweise auf Depressionen und andere psychische Erkrankungen. Steiger hofft, dass Mediziner damit auch fröh erkennen können, ob ein Patient auf ein Antidepressivum ansprechen wird. „Bislang dauerte es vier bis fünf Wochen, bis wir wussten, ob der Patient auf ein Medikament anspricht oder nicht. Nun können wir bereits nach einwöchiger Therapie aus einem während des REM-Schlafs gewonnenen Parameter für die lokale Hirnaktivität („Cordance“)

einen Hinweis erhalten, ob es wirkt“, sagt Steiger.

Seit 30 Jahren hat es keinen neuen Durchbruch mehr bei der Behandlung von Depressionen mit Medikamenten gegeben. Eine genaue Klassifizierung

der verschiedenen Depressionsformen wird es einem Therapeuten aber vielleicht eines Tages ermöglichen, schneller das geeignete Medikament für seinen Patienten zu finden. Ein Schlüssel dafür liegt auch im Schlaf. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Schlafstörungen können Ursache und Folge einer Depression sein. Auffallende Schlafprofile können daher Hinweise auf Depressionen geben.
- Wissenschaftler wollen Schlafprofile heranziehen, um damit unterschiedliche Formen von Depressionen zu klassifizieren.
- Die Hormonausschüttung im Schlaf ist bei gesunden und depressiven Menschen verschieden. So steigen bei einer Depression die Cortisolwerte während der zweiten Nachthälfte stärker an – vermutlich weil die Rezeptormoleküle defekt sind, die bei gesunden Personen die Bildung des Hormons drosseln.

GLOSSAR

ABCB1-Gen: Das Gen ist in Zellen auf der Innenseite kleiner Blutgefäße im Gehirn aktiv. Es transportiert bestimmte Substanzen aktiv zurück ins Blut und verhindert so, dass diese ins Gehirn gelangen. Dazu gehören unter anderem verschiedene Antidepressiva. Die zwei existierenden Varianten des ABCB1-Gens erfüllen diese Aufgabe unterschiedlich effektiv. Mithilfe eines Tests kann bestimmt werden, welche Variante ein Patient besitzt und wie er föhrlich auf ein Antidepressivum ansprechen würde.

P2RX7-Gen: Das Gen enthält die Information für einen Calciumkanal in der Membran von Nerven- und Gliazellen verschiedener Hirnregionen. Es beeinflusst die Signalübertragung zwischen den Zellen und damit im Gehirn. Es gibt Hinweise, dass sowohl die unipolare als auch die bipolare Depression unter anderem auf Veränderungen in diesem Gen beruhen.

Am Anfang steht die Neugier.

3 Ausgaben und
unser Taschenset
für nur € 16,50



Das Magazin für
Naturwissenschaft & Technik

Jetzt im Miniabo testen
www.spektrum.de/aktion/mpf316

Erdähnlicher Planet bei Proxima Centauri

Astronomen entdecken einen Himmelskörper in der habitablen Zone um den nächstgelegenen Fixstern

Mit einer Entfernung von 4,24 Lichtjahren ist Proxima Centauri der nächste Stern außerhalb unseres Sonnensystems. Jetzt haben Astronomen, auch aus dem Max-Planck-Institut für Astronomie, einen Planeten gefunden, der Proxima Cen-

tauri einmal alle 11,2 Tage in einem Abstand von sieben Millionen Kilometern umkreist – innerhalb eines Bereichs, in dem es möglicherweise die richtigen Bedingungen für die Entstehung von Leben gibt. Der Proxima Centauri b genannte Himmelskörper besitzt etwa 1,3 Erdmassen. Aufgrund ständiger heftiger Ausbrüche auf seiner Oberfläche und der dadurch ausgelösten Helligkeitsschwankungen war der Mutterstern schon vor Jahren ins Visier der Forscher geraten. Die haben Proxima Centauri während 54 Nächten mit dem Instrument HARPS am 3,6-Meter-Teleskop der Europäischen Südsternwarte (ESO) untersucht. Der Planet verriet sich, weil er während seines Umlaufs an seinem Stern zerrt und auf diese Weise charakteristische Linienverschiebungen im Spektrum erzeugt. (www.mpg.de/10696754)

Blick auf eine neue Welt: Die künstlerische Darstellung zeigt den erdähnlichen Planeten um den mit 4,24 Lichtjahren nächstgelegenen Fixstern Proxima Centauri.



Massenpanik im Computer

Studie simuliert menschliches Verhalten bei der Evakuierung von Gebäuden

Wenn Menschen bei Anschlägen oder Bränden aus einem Gebäude fliehen, kommt es immer wieder zu Massenpanik. Was dabei genau passiert, ließ sich bisher kaum untersuchen. Daher haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung dafür nun gemeinsam mit einem internationalen Team ein virtuelles Szenario entwickelt. In der Studie ließen sie 36 Probanden parallel an Bildschirmen Avatare durch virtuelle Räume steuern. Wie die Forscher feststellten, entspricht das Verhalten in der Simulation weitgehend dem in der Wirklichkeit. So gingen die Teilnehmer wie in der Realität zu 95 Prozent nach rechts, um einander auszuweichen. Das Verhalten in einer Notsituation untersuchten die Forscher mittels der virtuellen Evakuierung eines unübersicht-

lichen Gebäudes. Durch zeitlichen und finanziellen Druck erzeugten sie bei den Probanden Stress. Dazu kamen schlechte Beleuchtung, rot blinkende Lämpchen und Feuer an verschlossenen Ausgangstüren. Die Auswertung zeigte, dass

Gedränge und Zusammenstöße sowie das Herdenverhalten bei Stress schnell zunahmen. Die Forscher hoffen, dass ihre Simulationen künftig helfen, Evakuierungspläne zu testen und zu optimieren. (www.mpg.de/10731913)



Drama in Duisburg: Tausende Loveparade-Besucher drängen sich am 24. Juli 2010 vor dem Tunnel, in dem sich eine Massenpanik ereignet hat.

Wörter sind kein Zufall

Für viele Begriffe werden auch in nicht verwandten Sprachen bestimmte Laute bevorzugt oder vermieden

Eine Lehrmeinung der Sprachwissenschaft ist offenbar nicht länger zu halten. Bisher gingen Linguisten davon aus, Laute seien in Wörtern größtenteils zufällig mit Bedeutungen verknüpft. Fälle wie etwa das M, das in vielen Sprachen im Wort für Mutter vorkommt, seien die seltene Ausnahme. Ein internationales Team, an dem Forscher der Max-Planck-Institute für Mathematik in den Naturwissenschaften und für Menschheitsgeschichte sowie der Universität Leipzig beteiligt waren, widerlegt diese Annahme nun mit einer statistischen Analyse in etwa zwei Dritteln der 6000

Sprachen, die es weltweit gibt. Demnach werden viele Bedeutungen auch in nicht miteinander verwandten Sprachen besonders oft oder besonders selten mit bestimmten Lauten verknüpft. Das gilt vor allem für Körperteile. So treten in den Wörtern für das Knie häufig die Buchstaben O, U, P, K und Q auf. Warum es solche Zusammenhänge gibt, können die Forscher nicht erklären. Linguisten verlieren nun ein Mittel, mit dem sie Sprachverwandtschaften nachwiesen. Als Beleg dafür dienten ihnen nämlich die gleichen Laut-Bedeutungs-Beziehungen. (www.mpg.de/10727086)

Menschen überall auf der Welt bevorzugen für viele Begriffe manche Laute und vermeiden andere.



Lockstoffe im Fliegenkot

Die Ausscheidungen von Essigfliegen enthalten Duftmoleküle, die Artgenossen den Weg zu reifen Früchten weisen

Drosophila melanogaster besitzt eine feine Nase. Der Duft reifen Obstes etwa verriet der Essigfliege den Weg zu Nahrung und Paarungspartnern. Sie isst die Früchte nämlich nicht nur, sondern paart sich dort auch und legt ihre Eier ab. Eine weitere für die Fliege bedeutsame Geruchsquelle ist bisher übersehen worden: ihr Kot. Ein Team des Max-Planck-Instituts für chemische Ökologie in Jena hat entdeckt, dass auch die Ausscheidungen der Essigfliegen Lockstoffe für ihre Artgenossen enthalten. Die Duftmoleküle unterscheiden sich zwischen Männchen und Weibchen – die Tiere können dadurch schon von Weitem erkennen, ob potenzielle Partner vor Ort sind. Außerdem profitieren die Insekten davon, wenn sich möglichst viele Artgenossen an dem Festmahl beteiligen. Denn die aus den Eiern schlüpfenden Fliegenlarven scheinen die Nahrung leichter aufnehmen zu können, wenn diese durch Mikroorganismen in den Hinterlassenschaften von Artgenossen vorverdaut wurde. Kot ist also ein wichtiges Kommunikationsin-

strument der Essigfliegen – und möglicherweise auch anderer Arten wie der Kirschessigfliege *Drosophila suzukii*. Sollte dieser schwer zu bekämpfende Schädling im Obst- und Weinbau gleichermaßen von den eigenen Fäkalien angezogen werden, könnte er damit in die Falle gelockt werden. (www.mpg.de/10733409)



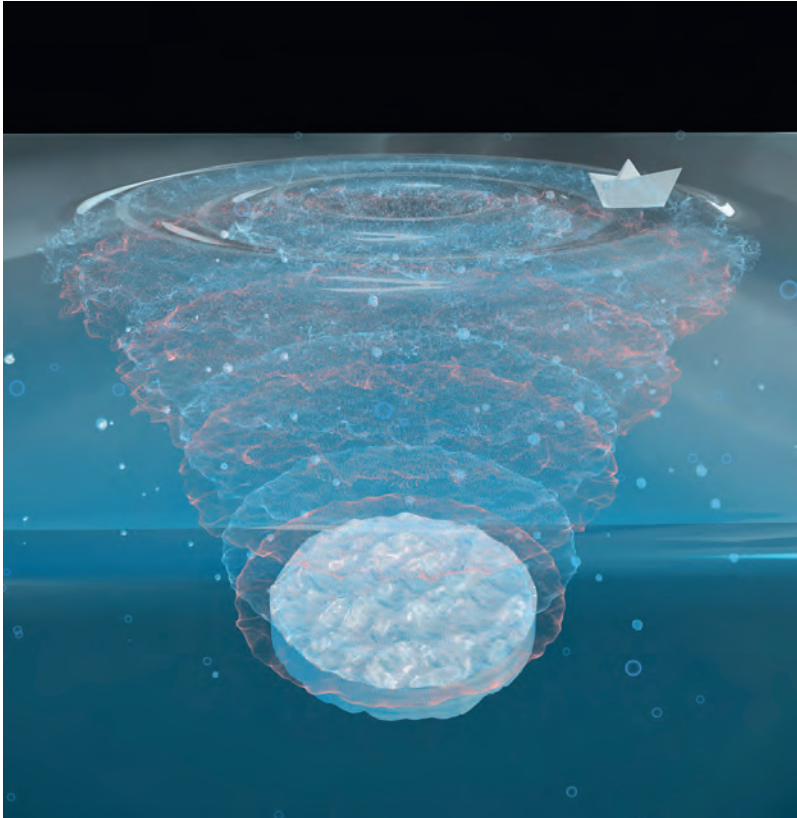
An dieser Heidelbeere haben sich bereits zahlreiche Essigfliegen gütlich getan. Die Vergrößerung zeigt kleine Kothäufchen, die die Fliegen nach dem Fressen hinterlassen haben. Der Duft des Kots macht das Obst für die Insekten noch verlockender.

Widerstandskraft hat ihren Preis

Fast die Hälfte unserer Gene können Ausgangspunkt von Erkrankungen sein: Wissenschaftler kennen heute 11000 Gene, die in krank machenden Varianten im menschlichen Erbgut vorkommen. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Evolutionsbiologie in Plön haben untersucht, warum sich solche Risikogene dauerhaft im Erbgut des Menschen halten können und nicht durch die Selektion beseitigt werden. Ihre Berechnungen deuten darauf hin, dass die fortwährende Anpassung an neue Krankheitserreger im Laufe unserer Evolution zwar die Zahl unserer Immungene erhöht hat, wir dafür aber auch einen Preis zahlen. Diese Vielfalt erstreckt sich den Forschern zufolge nämlich auch auf benachbarte DNA-Abschnitte und führt dazu, dass dort schädliche Genvarianten bestehen bleiben. Genetisch bedingte Erkrankungen können also auf den Kontakt mit Krankheitserregern zurückgehen, denen der Mensch im Laufe seiner Evolution begegnet ist. (www.mpg.de/10711606)

Hologramme mit Schall

Eine neue Möglichkeit, die Wellen dreidimensional zu modellieren, könnte Anwendungen in Technik und Medizin finden



Schall lässt sich künftig auf einfache Weise dreidimensional formen. Denn Forscher des Stuttgarter Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme und der Universität Stuttgart haben einen einfachen Weg gefunden, ein akustisches Hologramm zu erzeugen. Es funktioniert ganz ähnlich wie ein optisches Hologramm, das Lichtwellen gegeneinander verschiebt und auf diese Weise ein räumlich wirkendes Bild erzeugt. Bei dem akustischen Hologramm der Stuttgarter Forscher handelt es sich um ein Relief aus einem Kunststoff, durch den Schallwellen schneller wandern als durch die Umgebung. Wegen der variierenden Dicke des Materials verändert sich das Profil des Schalldrucks auf dem Weg durch das Kunststoffrelief. Mithilfe des maßgeschneiderten Schalldrucks lassen sich Teilchen, die zwischen einigen Mikrometern und wenigen Millimetern groß sein können, zu größeren Strukturen zusammenschieben. Die Technik könnte zudem die Ultraschalldiagnostik in der Medizin und Materialprüfung verfeinern. (www.mpg.de/10734140)

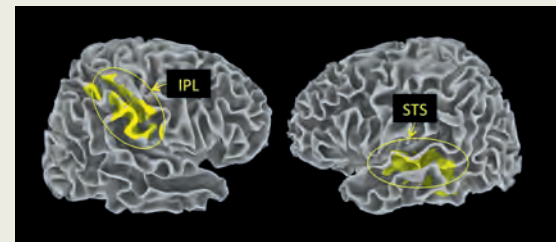
Schallgetriebener Wellenreiter: Mit einem Hologramm lässt sich auf einer Wasseroberfläche eine stehende Welle erzeugen, an der entlang ein Papierboot im Kreis surft.

Gut und Böse im Gehirn

Zwei Areale sind an Netzwerken beteiligt, die Situationen als positiv oder negativ bewerten

Manchmal werden uns Gemeinheiten mit einem Lächeln präsentiert – solche zweideutigen Situationen sind für unser Gehirn schwer zu deuten. Schon ein einzelner Satz kann je nach Tonfall unterschiedliche Bedeutung haben. Forscherinnen des Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig haben herausgefunden, wie das Gehirn diese Schwierigkeiten meistert. Demnach bestimmen zwei Netzwerke im Gehirn, wie wir eine Situation einschätzen. Das eine ist aktiv, wenn wir eine Szene als erfreulich empfinden, das andere bei negativen Eindrücken. Den Wechsel zwischen

beiden Empfindungen übernehmen wiederum zwei Bereiche innerhalb dieser Netzwerke. Der sogenannte *Sulcus temporalis superior* im Schläfenlappen ist für die Interpretation positiver Ereignisse zuständig, der *Lobus parietalis inferior* im Scheitellappen für negative. Die beiden Regionen scheinen sich miteinander darüber auszutauschen, welche von ihnen aktiviert oder inaktiviert wird. So legen sie vermutlich fest, ob in einer unklaren Situation eher positive oder negative Eindrücke überwiegen, und geben diese Information an andere Hirnbereiche weiter. (www.mpg.de/10680318)



Interpretationssache: Der *Lobus parietalis inferior* (IPL) im Scheitellappen bewertet negative, der *Sulcus temporalis superior* (STS) im Schläfenlappen positive Ereignisse. Beide Gebiete gehören zu zwei Netzwerken aus Nervenzellen, die dem Gehirn helfen, seine Umwelt zu beurteilen.

Kohlmeisen auf dem Land sind fitter

In städtischer Umgebung haben die Vögel weniger und kleinere Junge



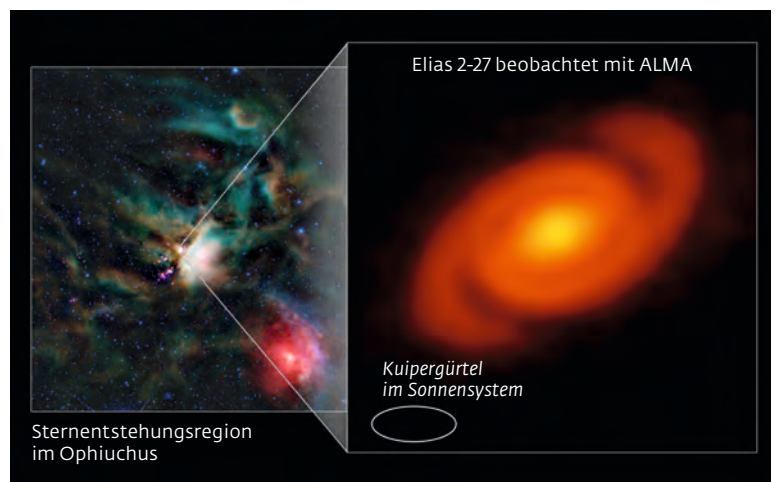
Kohlmeisen sind offenbar Landeier: In der Stadt beginnen sie zwar früher zu brüten, die Gelege sind aber kleiner, und die Jungtiere wiegen beim Ausfliegen weniger als ihre Altersgenossen auf dem Land. Wissenschaftlern vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen zufolge liegt es nicht an Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Licht oder Lärm, dass sich die Vögel auf dem Land leichter tun – und das, obwohl für drei der vier Umweltfaktoren unterschiedliche Werte zwischen Stadt und Land gemessen wurden. Die Studie zeigt, wie schwer sich die Auswirkungen der Verstädterung auf natürliche Ökosysteme exakt messen lassen. (www.mpg.de/10703215)

Im Fokus: Für die Untersuchung konnten Bürger eine Patenschaft für einen Nistkasten übernehmen und dessen Bewohner mithilfe einer Kamera live beobachten. Die Bilder der Kamera wurden dann direkt auf das Handy der Paten übertragen.

Spiralen helfen bei der Planetengeburt

Auch in einer protoplanetaren Scheibe um einen Stern existieren Dichtewellen

Wissenschaftler unter Leitung von Laura Pérez vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie haben eine auffällige Spiralarmstruktur in der Gas- und Staubscheibe um den 450 Lichtjahre entfernten jungen Stern Elias 2-27 entdeckt. Gewonnen haben sie das Bild mit dem größten Radioteleskop der Welt, dem aus 66 Antennen bestehenden ALMA (Atacama Large Millimeter Array) in den chilenischen Anden. Die Struktur umfasst die Materie nahe der Mittelebene der Scheibe – also jene Region, in der neue Planeten geboren werden können. Die Spiralen sind entweder Folge der Anwesenheit junger Planeten. Oder aber sie schaffen die Bedingungen, unter denen neue Planeten überhaupt erst entstehen; denn sie können Instabilitäten erzeugen, die zu Teilgebieten deutlich größerer Dichte führen und so zur Planetengeburt. Solche Dichtewellen kennen die Astronomen bislang von wesentlich größeren Objekten: Sie treten normalerweise in Spiralgalaxien auf. (www.mpg.de/10765229)



Im Kreißsaal der Sterne: Das linke Bild ist eine Infrarotaufnahme der Rho-Ophiuchi-Region in etwa 450 Lichtjahren Entfernung. Rechts die thermische Staubstrahlung aus der protoplanetaren Scheibe, die den jungen Stern Elias 2-27 umgibt.

Warmes Mittelmeer lässt Sahel ergrünen

Der menschengemachte Klimawandel trägt dazu bei, dass feuchte mediterrane Luft den westafrikanischen Monsun anfacht



Der Klimawandel kann auch zwiespältige Folgen haben. So führt die Erwärmung im Mittelmeerraum, die den dortigen Ländern seit etwa 20 Jahren größere Hitze und Trockenheit bringt, in der Sahelzone offenbar zu mehr Niederschlag. Wenn die Temperatur im Mittelmeer stärker steigt als in anderen Meeresregionen, gelangt zu Beginn des westafrikanischen Monsuns im Juni nämlich mehr feuchte Luft aus dem östlichen Mittelmeer an den Südrand der Sahara. Das haben Forscher des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg herausgefunden. Ihrer aktuellen Studie zufolge hängt von der Erwärmung des Mittelmeers vor allem im Vergleich zu den tropischen Meeren auch entscheidend ab, wie sich der Niederschlag in der Sahelzone künftig entwickeln wird. (www.mpg.de/10631374)

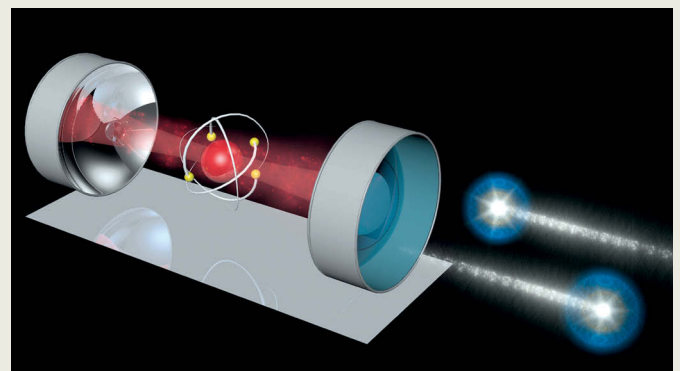
Die Sahelzone ist in den vergangenen 20 Jahren grüner geworden, weil der westafrikanische Monsun mehr Regen in die Region bringt.

Ein Quantenprozessor für einzelne Photonen

Mithilfe eines einzelnen Atoms zwischen zwei Spiegeln kann ein Lichtteilchen ein anderes schalten

Die Jedi Ritter der *Star Wars*-Saga führen einen unmöglichen Kampf. Das liegt nicht an der Überlegenheit des feindlichen Imperiums, sondern an der Physik. Denn mit Laserschwertern lässt sich nicht kämpfen wie mit metallenen Klingen: Lichtstrahlen spüren sich gegenseitig nicht. Damit ein Lichtstrahl einen anderen wahrnimmt, braucht es bisher ein relativ großes optisches Bauteil als Vermittler und sehr intensives Licht. Forscher des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik haben es nun geschafft, zwei einzelne Photonen miteinander in Kontakt zu bringen. Das gelang ihnen, indem sie beide Lichtteilchen mit einem einzelnen Atom, das sie mit einem Laser zwischen zwei Spiegeln in der Schwebe hielten, wechselwirken ließen. Dabei veränderte sich die Schwingungsrichtung des einen Photons abhängig von der Schwingungsrichtung des anderen. Mit ihren Experimenten lö-

sen die Forscher also nicht nur ein Problem der Jedi Ritter, sondern präsentieren auch einen Photonenschalter. Dieser eignet sich als Prozessor für einen künftigen Quantencomputer, der mit einzelnen Lichtteilchen rechnet. Einzelne Photonen sind dafür praktisch, weil sich mit ihnen Quanteninformation auch über große Strecken verschicken lässt. (www.mpg.de/10636194)

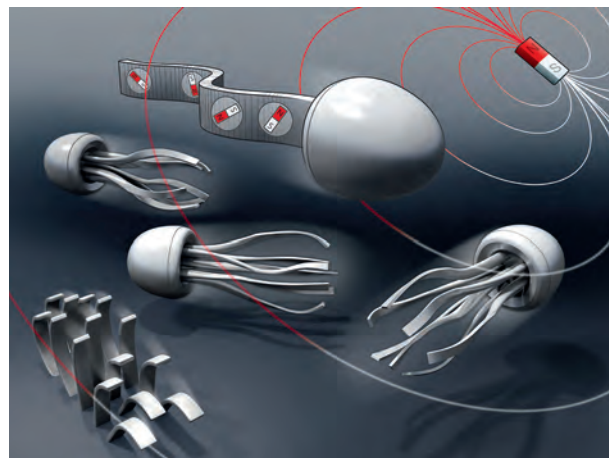


Ein universelles Quantengatter: Max-Planck-Physiker lassen zwei Photonen (rechts) miteinander wechselwirken, indem sie ein Atom in einem Resonator als Vermittler verwenden. Der Resonator besteht aus zwei Spiegeln, zwischen denen das Atom mit einem Laser festgehalten wird.

Mikroroboter mit Magnetantrieb

Gummistreifen, die sich in Magnetfeldern verformen lassen, könnten als Motoren für winzige Schwimmkörper dienen

Mikroroboter könnten einmal nach dem Vorbild von Spermien oder Pantoffeltierchen durch den menschlichen Körper schwimmen und dort etwa zielgenau Medikamente ausliefern. Forscher des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in Stuttgart haben für solche winzigen Schwimmkörper magnetisierbare Gummistreifen entwickelt, welche die Schwimmbewegungen natürlicher Geißeln, Zilien oder Tentakeln nachahmen. Die Silikonstreifen haben sie zu diesem Zweck mit magnetischen Partikeln versehen. Die komplexen Bewegungen der biomimetischen Bewegungsapparate treiben die Wissenschaftler mit einem Magnetfeld an, für dessen ausgeklügelte Steuerung sie eigens ein Computerprogramm geschrieben haben. Mikroroboter auf diese Weise gewissermaßen indirekt anzutreiben ist effektiver, als sie mit magnetischen Partikeln zu versehen und mit einem Magnetfeld direkt durch eine Flüssigkeit zu bewegen. Bauteile, die sich mit einem Magnetfeld gezielt verformen lassen, könnten auch in der Mikroverfahrenstechnik Anwendung finden, bei der chemische und physikalische Prozesse in sehr kleinem Maßstab ausgeführt werden. (www.mpg.de/10754143)



Magnetische Geißeln und Tentakeln: Mit winzigen magnetisierbaren Silikonstreifen lassen sich Roboter durch ein äußeres Magnetfeld wie Quallen, Bakterien oder Spermien fortbewegen.

Schlupfloch für Tumore

Krebszellen ruinieren Gefäßwände, damit sie den Blutkreislauf verlassen und Metastasen bilden können

Metastasen sind die häufigste Todesursache bei Krebserkrankungen. Solche Tochtergeschwulste entstehen, indem sich einzelne Zellen vom Tumor ablösen und vom Blutstrom in entfernte Körperregionen transportiert werden. Um ins umliegende Gewebe zu gelangen, müssen sie die Wand kleinerer Blutgefäße überwinden. Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Herz- und Lungenforschung in Bad Nauheim haben entdeckt, dass die Tumorzellen gezielt einzelne Zellen in der Gefäßwand abtöten. Diese geben dabei selbst das Signal für ihren eigenen Tod: Sie besitzen auf ihrer Oberfläche ein Rezeptormolekül mit dem Namen „Death Receptor 6“ (DR6). Der Kontakt mit einer Tumorzelle aktiviert den Rezeptor und tötet die Gefäßwandzelle. Die Krebszelle verschafft sich so Raum, den Blutstrom zu verlassen. Die Forscher konnten die Metastasen bei krebserkrankten Mäusen reduzieren, indem sie DR6 durch einen Hemmstoff blockierten. Bevor eine Blockade von DR6 aber bei Krebspatienten eingesetzt werden kann, muss geklärt werden, ob sich die Beobachtungen auf den Menschen übertragen lassen und ob eine solche Behandlung zu unerwünschten Nebenwirkungen führen kann. (www.mpg.de/10679240)

Klischees über Nationen steuern unser Handeln

Welchen Einfluss Klischees auf die internationale Zusammenarbeit haben, vernachlässigten ökonomische Theorien bisher. Um das herauszufinden, ließen Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern mehr als 1200 Menschen aus sechs Nationen online gegeneinander antreten. Dabei stellten sie die Probanden vor das sogenannte Gefangenen-Dilemma: Zwei Spieler, die sich nicht absprechen können, müssen sich für egoistisches oder kooperatives Verhalten entscheiden. Wer den Partner egoistisch einschätzt, verhält sich meist selbst egoistisch. Wer kooperatives Verhalten erwartet, kooperiert eher. Die Spieler kannten voneinander nur die Nationalität. Zusätzlich erfragten die Wissenschaftler die gegenseitigen Einschätzungen. Tatsächlich ließen sich die Teilnehmer stark von Vorurteilen leiten. US-Amerikaner etwa erwarteten eine hohe Kooperationsbereitschaft von Japanern, aber eine geringe von Israelis und agierten entsprechend. Israelis wiederum hielten Amerikaner für kooperativ und kooperierten selbst. Japaner beurteilten dagegen andere Nationen eher pessimistisch, weswegen sie sich meist egoistisch verhielten. So handelten die Spieler oft nach Stereotypen, die sich als falsch erwiesen. (www.mpg.de/10737550)

Der Archäologe des Universums

Er liebt Basketball und Literatur, seine wahre Leidenschaft aber ist die Kosmologie. Mit Teleskopen und Computern erforscht **Joe Hennawi** am Heidelberger **Max-Planck-Institut für Astronomie** – in einer Gruppe namens Enigma – die größten Strukturen des Weltalls. Dabei geht es um nicht weniger als die Enthüllung des kosmischen Netzes.

TEXT **THOMAS BÜHRKE**

So manche Astrophysikerkarriere beginnt mit dem Kauf eines Fernrohrs in jugendlichen Jahren. Nachts bestaunt der angehende Forscher die Ringe des Saturn und die Berge auf dem Mond. Nicht so Joe Hennawi: Er kam eher über glückliche Zufälle zur Astrophysik, hätte ebenso gut Schriftsteller oder Basketballprofi werden können. Heute leitet er am Max-Planck-Institut für Astronomie eine Forschergruppe mit dem geheimnisvollen Namen Enigma, hat vor sechs Jahren mit dem Sofja Kovalevskaja-Preis der Alexander von Humboldt-Stiftung eine der höchstdotierten deutschen Wissenschaftsauszeichnungen erhalten und in jüngster Vergangenheit mit einigen Entdeckungen für Aufsehen gesorgt. Doch der Reihe nach.

Sein Büro in dem Institut auf dem Heidelberger Königstuhl verrät nichts Besonderes, sieht man einmal von den geschätzt hundert leeren Wasserfla-

schen ab, die vor dem Fenster im Sonnenlicht glitzern. Astrophysik macht wohl durstig. Joe Hennawi beschäftigt sich mit dem strukturellen Aufbau des Universums und hat es oft mit großen Datenmengen zu tun, deren Auswertung effiziente Computeralgorithmen erfordert. „Big Data ist in unserem Metier ein großes Thema geworden“, sagt er und ergänzt: „Ein Drittel meiner Zeit widme ich der Theorie, zwei Drittel der Beobachtung an möglichst großen Teleskopen.“

Der Name Enigma seiner etwa 15 junge Leute umfassenden Gruppe steht für Exploring the Nature of the Inter- and Circum-galactic Media. Auch wenn sich das Akronym nicht auf den ersten Blick erschließt, so ist doch die Forschungsrichtung klar: Es geht um Gas, das die Galaxien umgibt und sich zwischen den riesigen Sternsystemen verteilt. Das hat einerseits einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Galaxien, zu denen auch unsere

Milchstraße gehört. Andererseits bildet das Gas zwischen den Sternsystemen ein gigantisches Netz, und dessen Struktur gibt Auskunft über die Entwicklung des Universums seit dem Urknall. Es sind die großen Fragen der Kosmologie, mit denen sich Hennawi beschäftigt. Dabei hat alles eher bescheiden und klein begonnen.

Seine Eltern sind aus Ägypten in die USA ausgewandert. Als Christen – ihr Name bedeutet „Familie des Johannes“ – hatten sie es in der Heimat nicht leicht. „Es gab aber auch wirtschaftliche Gründe für die Emigration“, sagt Hennawi, der im Jahr 1976 im kalifornischen Salinas nahe Monterey zur Welt kommt. Beide Eltern haben einen Wirtschaftsabschluss, später eröffnet der Vater einen eigenen Laden, in dem auch Joe viel Zeit verbringt.

Auf der Highschool bekommt der Junge gute Noten, für die Physikkurse interessiert er sich allerdings nicht. „Ich habe mich eher für Sport begeistert“, er-

A low-angle portrait of a man in a grey suit and light purple shirt, leaning on a glass railing. The background is a bright, modern interior with curved architectural elements and large windows. The man is smiling slightly and looking towards the camera.

„Kosmologie wird mein Gebiet
bleiben“, sagt Joe Hennawi,
Forschungsgruppenleiter am
Max-Planck-Institut für
Astronomie in Heidelberg.



» Immer wieder denkt er ans Aufhören, unternimmt eine Reise nach Ägypten, um seinen Wurzeln nachzuspüren. Aber letztlich beißt er sich durch und macht seinen Master.

innert er sich. Anschließend bewirbt er sich nicht an einer Universität, sondern geht in Salinas auf ein Junior College, das einen guten Ruf hat. Auch hier belegt Joe anfangs alle möglichen Kurse, spielt weiter mit Leidenschaft Basketball, erwägt sogar eine Profikarriere.

Die Wende bringt schließlich der Physiklehrer. „Der war super gut und hat mich begeistert, wir sind noch heute befreundet.“ Joe verabschiedet sich vom Traum eines Basketballstars und entschließt sich, Physik zu studieren. Und die Eltern? „Die fanden das nicht so gut, sie hätten lieber einen praktischen Beruf für mich gesehen, am liebsten als Ingenieur“, sagt Hennawi. Seine Schwester schlägt diesen Weg ein und arbeitet heute als Ingenieurin. Doch Joe bleibt bei seinem Entschluss.

Wegen seiner guten Noten bekommt er einen Studienplatz an der renommierten Stanford-Universität – eine riesige Chance für ihn. Allerdings gleich zu Be-

ginn Ernüchterung: „Ich hatte eine Grundvorlesung für Elektromagnetismus belegt, und am Ende der ersten Stunde war ich total frustriert: Ich dachte, ich kann gar nichts.“ Immer wieder denkt er ans Aufhören, unternimmt eine Reise nach Ägypten, um seinen Wurzeln nachzuspüren. Aber letztlich beißt er sich durch und macht seinen Master.

DAS ÄLTESTE ZEUGNIS AUS DER FRÜHZEIT DES WELTALLS

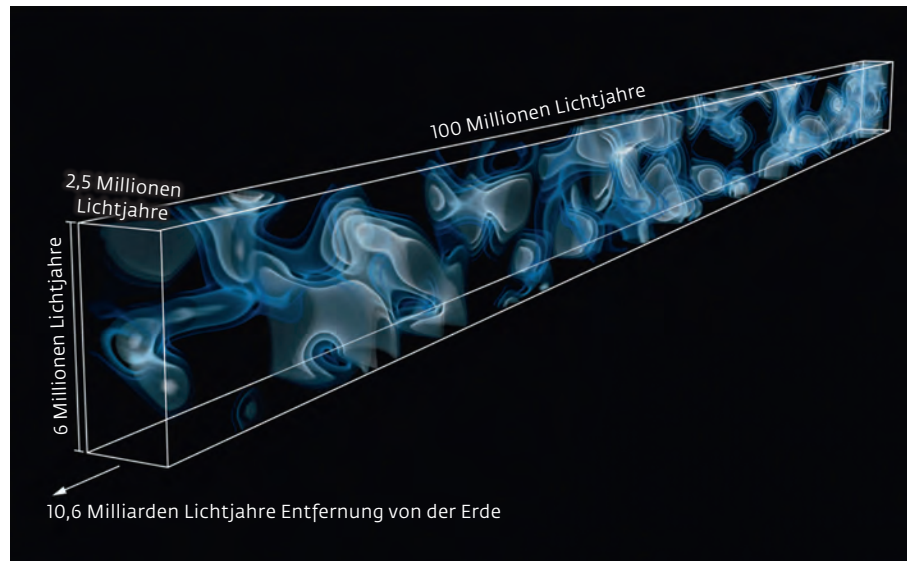
In Stanford lernt er auch Einsteins allgemeine Relativitätstheorie kennen, die für ihn im Folgenden immer wieder von besonderer Bedeutung sein wird. So arbeitet er kurzzeitig am Projekt Ligo mit – an jenem Detektor also, mit dem im September 2015 die spektakuläre Entdeckung einer Gravitationswelle gelang. „Vielleicht hätte ich besser dabei bleiben sollen“, sagt Joe Hennawi schmunzelnd.

Ausgestattet mit einem Stipendium wechselt er an die ebenso namhafte Universität von Princeton. Dort hat Albert Einstein bis zu seinem Lebensende gewirkt, dort arbeitet eine starke Kosmologiegruppe. Joe Hennawis Doktorvater David Spergel beschäftigt sich unter anderem mit Beobachtungsdaten eines Weltraumteleskops namens Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, mit dem die kosmische Hintergrundstrahlung untersucht worden war. Diese Strahlung gilt als das älteste Zeugnis des frühen Universums – und sie beinhaltet eine Fülle von Informationen über den Beginn der Welt: Kosmologie pur und an vorderster Front.

Joe Hennawi setzt sich mit der Theorie der Hintergrundstrahlung auseinander, wobei erneut der allgemeinen Relativitätstheorie eine recht bedeutende Rolle zukommt. Die Hintergrundstrahlung ist etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall entstanden, und sie erfüllt

Linke Seite Das All im Computer: Joe Hennawi beschäftigt sich mit den großen Strukturen im Universum – auch am Laptop in einer ruhigen Ecke des Instituts.

Rechts Querschnitt durch die Vergangenheit: In den Spektren von 24 lichtschwachen Galaxien hat das Team um Joe Hennawi die Wasserstofflinien des kosmischen Netzes identifiziert und daraus eine dreidimensionale Karte rekonstruiert, die einen kleinen Teil des Weltalls im Alter von nur knapp drei Milliarden Jahren zeigt. Je heller der Farbton, desto höher die Dichte des Wasserstoffgases.



den gesamten Himmel. Sie ist also nahezu 14 Milliarden Jahre lang im Universum unterwegs, ehe sie in die Teleskope der Astronomen gelangt. Auf diesem langen Weg hat sie einiges erlebt. So durchquerte sie unter anderem Gaswolken, die sich entweder in den Galaxien oder zwischen ihnen befanden, und sie wurde durch die Schwerkraft von ihrer geraden Ausbreitungsrichtung abgelenkt.

Diese kosmische Hintergrundstrahlung kommt also auf der Erde geringfügig verzerrt an, so als würde man sie durch eine Milchglasscheibe betrachten. Das ist einerseits ärgerlich, weil dadurch auch die Informationen aus dem frühen Universum entstellt sind. Andererseits bietet sich so eine einzigartige Möglichkeit, etwas über die Galaxien und die zwischen ihnen befindliche intergalaktische Materie zu erfahren. Genau das wird Hennawis Forschungsgebiet.

Gegen Ende seiner Doktorandenzeit bekommt er erstmals die Gelegenheit, selbst astronomische Beobachtungen vorzunehmen. „Allerdings habe ich die nicht auf einem hohen Berg am Teleskop, sondern im Keller unseres Institutsgebäudes ausgeführt“, erinnert er

sich etwas wehmütig. Das Teleskop steht in New Mexico und lässt sich ferngesteuert bedienen. Das hat sich geändert, heute reist Joe Hennawi zu den größten Observatorien der Erde auf Hawaii und in Chile.

STRUDELNDES GAS ERHITZT SICH AUF MEHRERE MILLIONEN GRAD

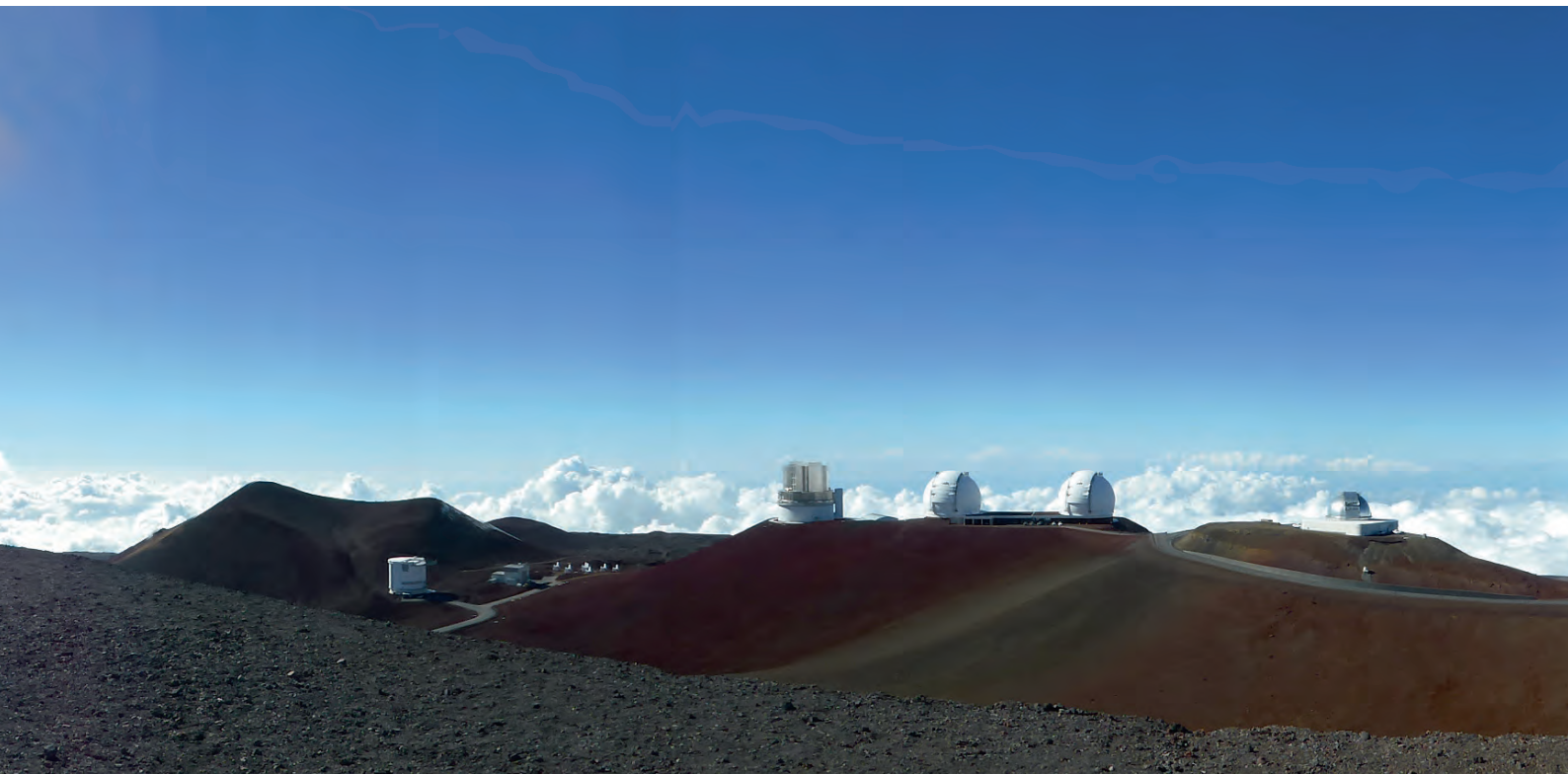
Obwohl das Teleskop in New Mexico nur Mittelklasse ist, stößt er dort auf Himmelskörper, die ihn bis heute beschäftigen: Quasare. Bei ihrer Entdeckung in den 1950er-Jahren nannte man sie quasistellare Objekte, weil sie wie Sterne punktförmig erscheinen. Allerdings wiesen viele andere Merkmale darauf hin, dass es sich nicht um Sterne handeln konnte. Im Jahr 1963 löste der Astronom Maarten Schmidt das Rätsel: Es handelte sich um die am weitesten entfernten und leuchtkräftigsten damals bekannten Himmelskörper.

Bald tauchte auch eine Theorie auf, wie die gigantischen Strahlungsquellen entstehen: Demnach ist ein Quasar das Zentrum einer jungen Galaxie, in der sich ein supermassereiches schwarzes Loch befindet. Aus der Um-

gebung zieht es Gas an, das sich zunächst in einer großen Scheibe um den Zentralkörper ansammelt und nach und nach in ihn hineinstürzt – ähnlich wie Wasser gurgelnd in einem Abfluss verschwindet. Bei diesem Vorgang erhitzt sich das Gas bis auf mehrere Millionen Grad und strahlt enorm hell: Ein Quasar sendet mehr als tausendmal mehr Licht aus als der gesamte Rest der Galaxie mit seinen bis zu Hunderten von Milliarden Sternen.

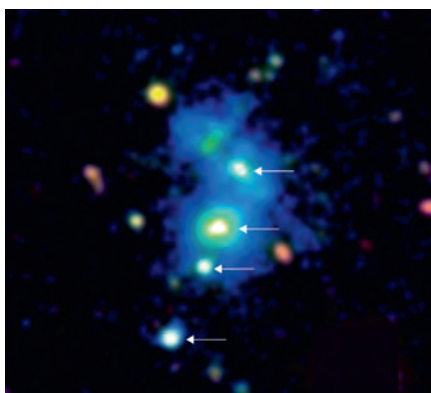
Diese Erklärung gilt heute als gesichert. Und da sich nach derzeitigem Wissen in nahezu jeder Galaxie ein zentrales, supermassereiches schwarzes Loch befindet, müsste eigentlich auch jede Galaxie gleichzeitig ein Quasar sein. Das ist aber bei Weitem nicht der Fall, im Gegenteil: Quasare sind eher selten. Der Grund: Die Quasaraktivität dauert nur rund zehn Millionen Jahre lang an. Gemessen an einem typischen Galaxienalter von mehr als zehn Milliarden Jahren ist das ein sehr kleiner Zeitraum. Es ist also ein unwahrscheinlicher Zufall, wenn Astronomen eine Galaxie gerade in ihrer Quasaphase sehen.

Mit Quasaren beschäftigt sich Joe Hennawi dann auch an der Universität



Oben Über den Wolken: Joe Hennawi arbeitet mit Daten der weltweit größten Fernrohre – wie sie etwa auf dem Mauna Kea auf Hawaii stehen. Im Innern der zwei weißen Kuppeln (im Bild auf dieser Seite) verbergen sich die beiden Keck-Teleskope mit Spiegeln von jeweils zehn Meter Durchmesser.

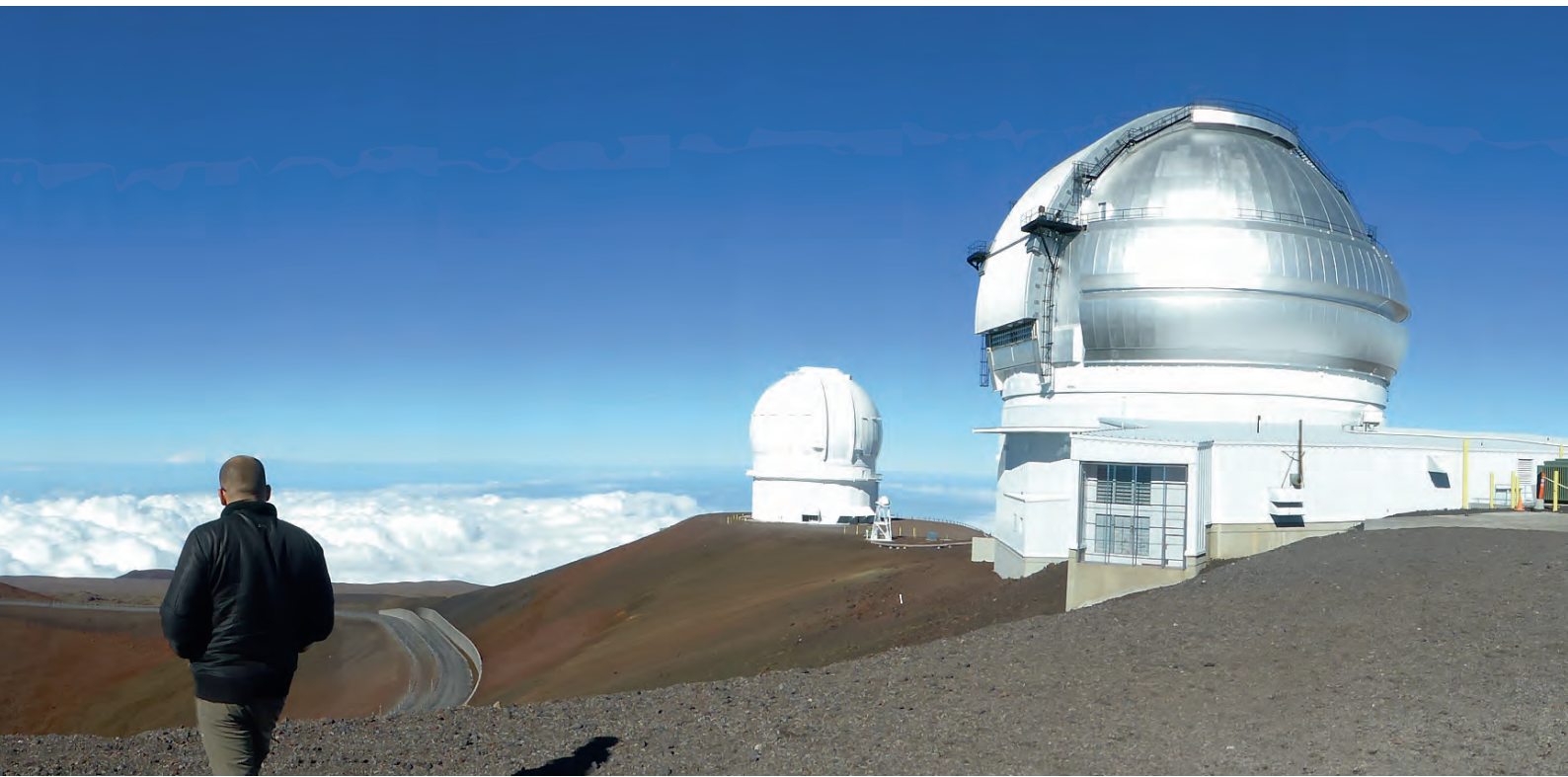
Unten Aufnahmen mit Seltenheitswert: Links ein Ausschnitt des kosmischen Netzwerks (türkisfarben) mit einer Ausdehnung von rund zwei Millionen Lichtjahren, das in der direkten Umgebung des Quasars UM 287 beobachtet wurde. Das Gas leuchtet dank desselben Effekts, dem auch Leuchtstoffröhren ihr Licht verdanken. Etwas kleiner, nämlich etwa eine Million Lichtjahre, ist der Nebel, in den die vier Quasare (Pfeile) auf dem rechten Foto eingebettet sind. Das Quartett ist eine Rarität, sein Licht benötigte zehn Milliarden Jahre, um zu uns zu gelangen.



von Berkeley in Kalifornien, wo er von 2004 bis 2009 als Hubble Fellow und dann als National Science Foundation Fellow unterstützt wird. „Dort habe ich gelernt, mit großen Datenmengen umzugehen“, erinnert sich der Forscher. Das ist in der heutigen Astrophysik so wichtig geworden, weil es viele Beobachtungsprojekte gibt, bei denen Teleskope Nacht für Nacht große Himmelsareale aufnehmen und dabei sehr viele, sehr lichtschwache Galaxien und andere Objekte aufspüren.

Eine solche Himmelsdurchmusterung, der Sloan Digital Sky Survey (SDSS), läuft seit dem Jahr 2000 im Apache Point Observatory in New Mexico. Mit einem eigens dafür gebauten Teleskop wurden auf einem Drittel der gesamten Himmelskugel Milliarden von Objekten durch mehrere Farbfilter abgebildet und mehr als drei Millionen Spektren aufgenommen. Das Ergebnis ist die bislang detaillierteste dreidimensionale Karte des Universums. Das Max-Planck-Institut für Astronomie ist seit Beginn des Projekts am SDSS beteiligt. Und auch Joe Hennawi nutzt diesen Datenschatz für seine Forschung.

Nach fünf Jahren in Berkeley wechselt er 2009 ans Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie. Zu-



» Die kosmologischen Modelle sagen vorher, dass das Universum von einer blasenartigen Struktur durchzogen ist, ähnlich wie ein Schweizer Käse.

nächst ist ihm die Stadt noch zu klein, weswegen er im umtriebigeren Frankfurt wohnt und täglich pendelt. Sehr wichtig ist es ihm von Anfang an, die deutsche Sprache zu lernen. Er nimmt einen zweijährigen Sprachkurs wahr, den die Humboldt-Gesellschaft ihren Preisträgern anbietet. Schließlich liest Hennawi sogar anspruchsvolle Literatur, von Frisch über Hesse bis Kafka. „Grass ist mir aber auf Deutsch zu schwierig“, sagt er. Und: „Wenn ich kein Astrophysiker geworden wäre, dann hätte ich gerne den Weg eines Schriftstellers eingeschlagen.“

Schon ein Jahr nach seiner Ankunft am Max-Planck-Institut bekommt er den Sofja Kovalevskaja-Preis der Humboldt-Stiftung. Das damit verbundene Fördergeld von fast 1,5 Millionen Euro nutzt er, um seine Forschergruppe zu erweitern. Und die wissenschaftlichen Erfolge lassen auch nicht lange auf sich warten.

Vor knapp drei Jahren entdeckt sein Team zusammen mit Kollegen der Universität von Santa Cruz einen Quasar, der von einem ungewöhnlichen Nebel umgeben ist. Ungewöhnlich an ihm ist unter anderem die Ausdehnung von etwa zwei Millionen Lichtjahren. Damit kann es sich nicht um die Galaxie handeln, in deren Zentrum der Quasar sitzt. „Es ist uns damit gelungen, einen Teil des kosmischen Netzes aufzunehmen“, erklärt Joe Hennawi (MAXPLANCK-FORSCHUNG 1/2014, Seite 41).

Die kosmologischen Modelle sagen vorher, dass das Universum von einer blasenartigen Struktur durchzogen ist, ähnlich wie ein Schweizer Käse. In den Wänden befinden sich Wasserstoffgas und Dunkle Materie. Galaxien wie unsere Milchstraße und auch die Quasare sitzen vor allem in den Kreuzungspunkten und langen Filamenten dieses Netzes.

Allerdings ist das Gas selbst in den Knoten so dünn verteilt, dass es sich bisher nicht direkt abbilden ließ. In diesem Fall wirkt der Quasar wie ein Scheinwerfer, der das umliegende Gas zum Leuchten anregt und so einen Teil des Netzes sichtbar macht. Diese Entdeckung wählt die Redaktion der Zeitschrift PHYSICS WORLD, die vom britischen Institute of Physics herausgegeben wird, in die „Top Ten Breakthroughs“ des Jahres 2014.

DAS QUASARLICHT WAR ZEHN MILLIARDEN JAHRE UNTERWEGS

Im vergangenen Jahr landen Hennawi und Kollegen einen weiteren Coup: Sie stoßen auf ein Quasarquartett, das ebenfalls von einem Wasserstoffnebel umgeben ist (MAXPLANCK-FORSCHUNG 2/2015, Seite 44). Um die Aufregung darüber zu verstehen, muss man sich



Forschung im Dialog: Mit seiner Kollegin Anna-Christina Eilers diskutiert Joe Hennawi die neuesten Ergebnisse. An seinem Fachgebiet fasziniert ihn, dass es sauber und klar durch die Formeln der allgemeinen Relativitätstheorie definiert ist.

klarmachen, dass heute zwar rund eine halbe Million Quasare bekannt, diese aber am Himmel weiträumig verteilt sind. Zwei Quasare in unmittelbarer Nachbarschaft zu finden, ist sehr selten. Derzeit sind nur hundert Quasarpaaire und ein einziges Quasartripel bekannt. „Die Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Zusammenballung von vier Quasaren auf so engem Raum liegt bei eins zu zehn Millionen“, erklärt Hennawi, der das Quartett aus diesem Grund „Jackpot-Nebel“ nennt. Reiner Zufall ist diese Gruppierung aber wohl nicht, denn diese Raumregion enthält auch mehrere Hundert Mal so viele Galaxien, wie die Forscher erwarten.

Auch diese Entdeckung erfährt besondere Aufmerksamkeit: Das US-Magazin *ASTRONOMY* setzt es auf Rang vier der Top-Five-Entdeckungen – knapp hinter dem Vorbeiflug der Sonde *Horizon* am Zwergplaneten Pluto. Besonders spannend werden diese Beobachtungen, wenn man bedenkt, dass das Licht

dieser Quasare zehn Milliarden Jahre im All unterwegs war, bevor es uns erreichte. Die Forscher sehen hier also das Universum so, wie es vor mehr als zehn Milliarden Jahren aussah, weniger als vier Milliarden Jahre nach dem Urknall. Die Astrophysiker betreiben gewissermaßen kosmische Archäologie.

NORMALE GALAXIEN DIENEN FORSCHERN ALS SCHEINWERFER

Es gibt noch eine weitere Methode, um das über Milliarden von Lichtjahren hinweg verzweigte kosmische Gewebe zu ergründen. Sie ähnelt entfernt der Computertomografie, bei der das Innere des menschlichen Körpers aus unterschiedlichen Richtungen mit Röntgenstrahlen durchleuchtet wird.

Dabei machen es sich die Astronomen zunutze, dass das Licht zum Beispiel eines weit entfernten Quasars auf seinem Weg zu uns mehrmals die Wände und Filamente des kosmischen Net-

zes durchquert. Jedes Mal verschluckt dabei das Wasserstoffgas einen kleinen Teil des Lichts. Zerlegt man das Quasarlicht in seine spektralen Anteile, so taucht die Wasserstoffabsorption bei einer ganz speziellen Wellenlänge als dunkle Linie im Spektrum auf.

Die beständige Ausdehnung des Weltalls bewirkt nun, dass diese Wasserstofflinie zu immer größeren Wellenlängen verschoben wird, je weiter die Wolke von uns entfernt ist. Hat das Quasarlicht auf dem Weg zu uns zehn solche Wolken durchquert, so findet man auch zehn Absorptionslinien bei verschiedenen Wellenlängen; und aus deren Positionen im Spektrum kann man die Entfernung der Wolke ermitteln. Auf diese Weise ist es möglich, die räumliche Verteilung des kosmischen Netzes und die Gasdichte darin zu ergründen.

Da Quasare aber bis auf die wenigen Ausnahmen der Mehrfachsysteme weit über den Himmel verteilt sind, können

die Forscher das Netz nur punktuell untersuchen. Anders sähe es aus, wenn man als „kosmische Scheinwerfer“ nicht Quasare, sondern die viel häufigeren normalen Galaxien verwenden würde. Das erschien lange Zeit unmöglich, weil diese in großer Entfernung zu lichtschwach sind. Umso größer ist die Überraschung, als Hennawis Postdoc Khee-Gan Lee ein solches Projekt angeht – und Erfolg hat.

Mit einem Zehn-Meter-Spiegelteleskop namens Keck I auf Hawaii nimmt das Team Spektren von 24 lichtschwachen Galaxien auf und identifiziert darin die Wasserstofflinien des kosmischen Netzes. „Auf diese Weise haben wir erstmals eine dreidimensionale Karte von einem kleinen Teil des Universums rekonstruiert, die bis in eine Zeit zurückreicht, als das Weltall nicht einmal drei Milliarden Jahre alt war“, erklärt Joe Hennawi. Dieses Projekt wird fortgesetzt. Mittlerweile haben die Wissenschaftler die Methode bereits auf hundert Galaxien erweitert.

Wie geht es wohl weiter, nach so vielen Erfolgen? „Kosmologie wird mein Gebiet bleiben“, sagt Joe Hennawi. „Sie ist sauber und klar durch die Formeln der Relativitätstheorie definiert, birgt aber noch viele Rätsel.“ Dunkle Materie könnte ein solches Zukunftsthema sein: „Bislang hat man kaum deren

quantenmechanische Eigenschaften in Betracht gezogen“, meint der Heidelberger Max-Planck-Forscher. „Auch die Rolle der Neutrinos bei der Strukturbildung im Universum interessiert mich.“ Die ganz großen Fragen also. Für Basketball bleibt da natürlich nicht viel Zeit übrig. ◀

GLOSSAR

Kosmische Hintergrundstrahlung: Sie wird auch als „Drei-Kelvin-Strahlung“ bezeichnet und im Mikrowellenbereich beobachtet. Sie entstand etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall, als das Universum durchsichtig wurde, sich Protonen und Elektronen verbanden und die Lichtteilchen (Photonen) von nun an ungehindert durch den Raum fliegen konnten. Die Hintergrundstrahlung trägt die Signatur aus der Epoche ihrer Entstehung in sich und ist daher ein wertvolles Instrument, um Struktur und physikalische Eigenschaften des ganz jungen Weltalls zu studieren.

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe: Der US-amerikanische Satellit, abgekürzt WMAP, wurde im Jahr 2001 gestartet und lieferte bis 2010 Daten. Seine Aufgabe war es, die Unregelmäßigkeiten in der kosmischen Hintergrundstrahlung zu kartieren. Aus den Messungen leiteten Forscher die Zusammensetzung des Universums ab: 4,6 Prozent konventionelle Materie, 23 Prozent Dunkle Materie und 72 Prozent Dunkle Energie. Diese Werte wurden von dem Nachfolgesatelliten Planck geringfügig korrigiert.

AcademiaNet

exzellente Wissenschaftlerinnen im Blick

Das Projekt

AcademiaNet ist eine Datenbank mit Profilen von über 2.100 exzellenter Forscherinnen aus allen Fachdisziplinen.

Unser Ziel

Frauen sind in wissenschaftlichen Führungspositionen unterrepräsentiert. Wir wollen Ihnen mit unserem Rechercheportal die Besetzung von Führungspositionen und Gremien mit Wissenschaftlerinnen erleichtern.

Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

nature **Spektrum**
der Wissenschaft

Sie wollen mehr erfahren?

www.academia-net.de



Mikroboote kommen in Fahrt

So manche medizinische Behandlung wäre effizienter, wenn Medikamente mit einem winzigen Roboter direkt zum Krankheitsherd transportiert werden könnten. **Peer Fischer** und seine Mitarbeiter am Stuttgarter **Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme** entwickeln Mikro- und Nanoschwimmer, die dies eines Tages ermöglichen sollen.

TEXT **KARL HÜBNER**

Es ist ein einfaches DIN-A4-Blatt, das neben der Labortür hängt: „Bitte nicht sauber machen.“ Das Reinigungspersonal dürfte sich freuen. Und die Nutzer des Labors sind viel entspannter, denn sie wissen: Wenn niemand Gegenstände herumräumt und über die Tische wischt, kann auch nichts Wichtiges abhandenkommen. So ist das, wenn sich Forscher mit Gegenständen beschäftigen, die mit dem bloßen Auge gar nicht zu erkennen sind. Daher schützt die Arbeitsgruppe „Mikro-, Nano- und Molekulare Systeme“ am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart zumindest eines ihrer Labore auf die genannte Weise.

Geleitet wird die Gruppe von Peer Fischer, der auch Professor an der Universität Stuttgart ist. Seine Forschung hat in den vergangenen Jahren einen kleinen Fuhrpark an Miniaturvehikeln hervorgebracht – Strukturen aus dem Mikro- oder sogar Nanokosmos, die sich auf die eine oder andere Weise gezielt

durch Flüssigkeiten bewegen können und von vielen bereits als winzige Roboter bezeichnet werden.

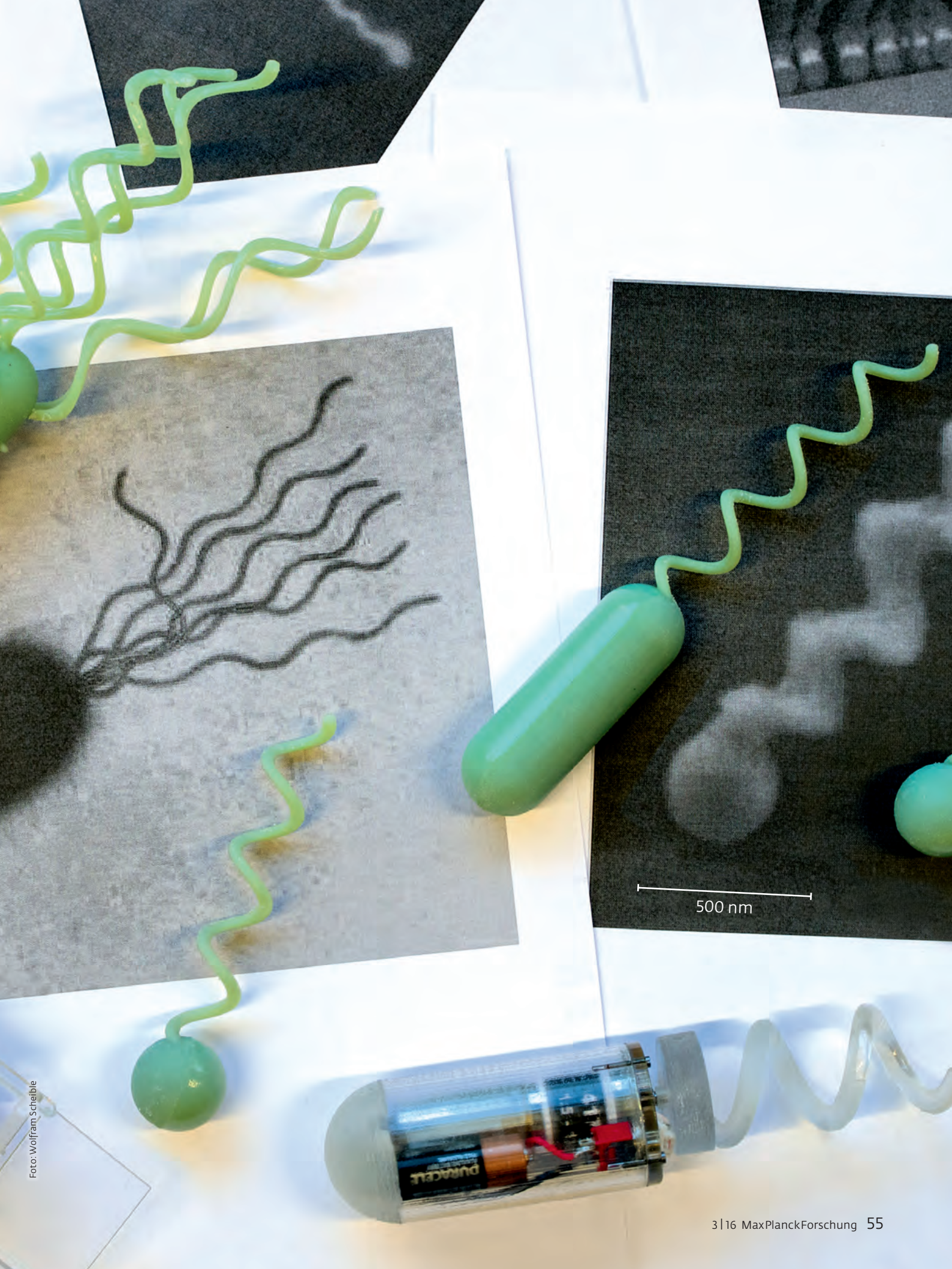
KEIN LIMIT, MASCHINEN BELIEBIG KLEIN ZU MACHEN

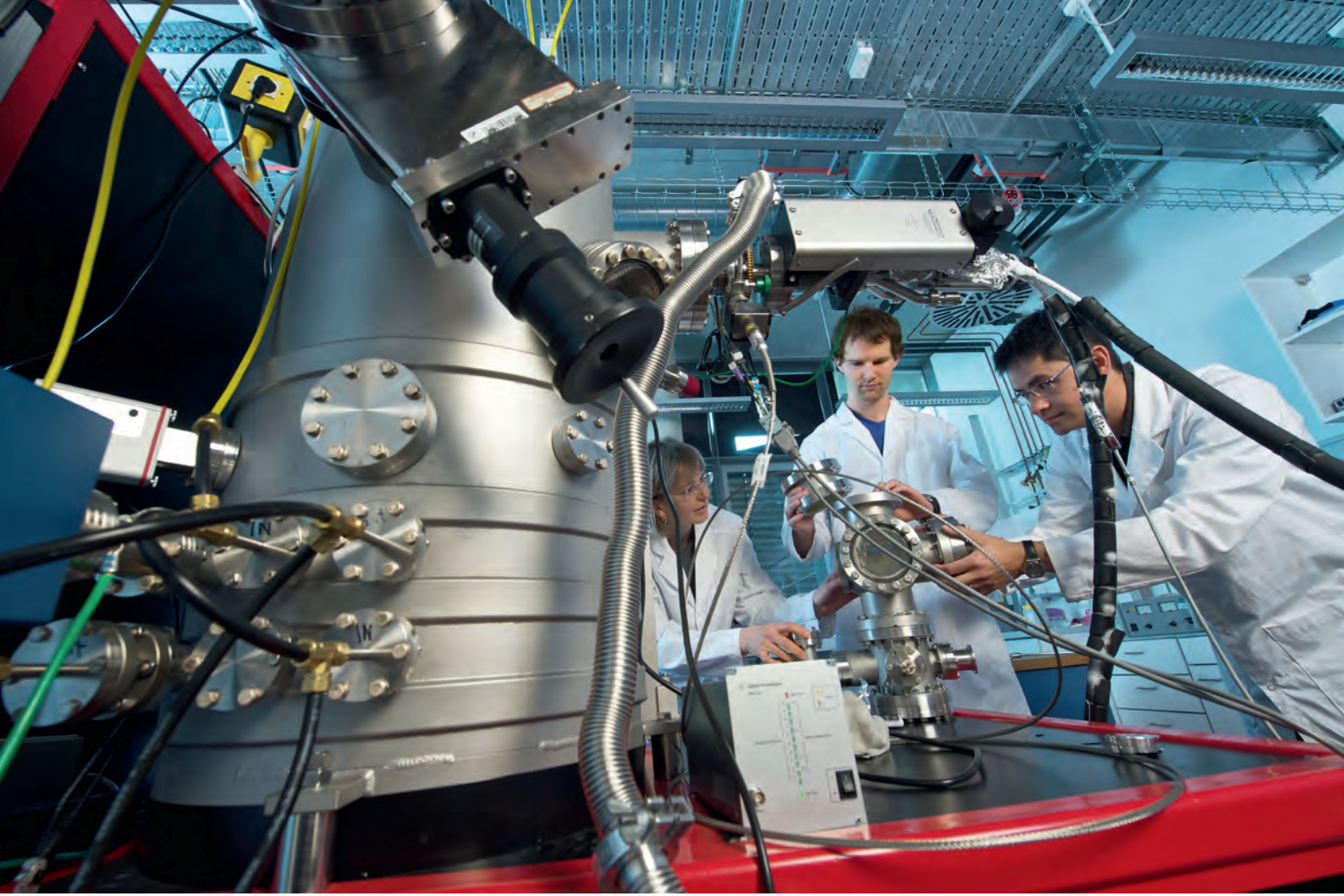
Wenn Fischer die Arbeit seines rund 20-köpfigen Teams und der externen akademischen Partner beschreibt, greift er gern auf eine fast 60 Jahre alte Vision von Richard P. Feynman zurück. Am 29. Dezember 1959 hielt der US-amerikanische Physiker einen Vortrag mit dem Titel: *There's Plenty of Room at the Bottom* – Es gibt viel Spielraum nach unten. Feynman meinte damit, dass es eigentlich kein Limit gebe, um Motoren, Maschinen und andere Dinge beliebig klein zu konstruieren. Wenn man so will, gab er damit den Startschuss für die Nanotechnik, lange bevor es diesen Begriff überhaupt gab.

Und Feynman hatte sehr konkrete Vorstellungen: „Obwohl es zunächst nach einer recht verrückten Idee klingt,

Es geht nur ums Prinzip: Die Bewegungsapparate etwa von Bakterien lassen sich für künstliche Mikro- und Nanoschwimmer nicht eins zu eins kopieren. Das zeigen Stuttgarter Forscher mit Modellen, in denen sie Batterien, Motoren und Platinen unterbringen. Weil dafür in winzigen Robotern kein Platz ist, setzen sie biologische Antriebe wie bei einer magnetisch angetriebenen Nanoschraube (ganz rechts) anders um.







Eine Produktionsstätte für Nanoroboter: Die Max-Planck-Forscher Conny Miksch, John Gibbs und Andrew Mark (von links) überprüfen die Vakuumanlage, in der komplexe Nanostrukturen Schicht für Schicht auf einen Silicium-Wafer aufgedampft werden.

wäre es meiner Meinung nach für die Chirurgie interessant, wenn man den Chirurgen sozusagen schlucken könnte. Man setzt ihn in die Blutbahn, er geht ins Herz hinein, sieht sich dort um, erkennt, welche Herzklappe die fehlerhafte ist, nimmt ein kleines Messer und schneidet sie heraus.“ Dies inspirierte auch Filmemacher. 1966 schickte Hollywood in *Die phantastische Reise* ein winziges U-Boot mit einem miniaturisierten Notfallteam an Bord durch die Adern eines Menschen, um in dessen Gehirn ein Blutgerinnsel zu entfernen.

Auch die Miniaturvehikel von Peer Fischers Arbeitsgruppe sollen sich im besten Falle eines Tages durch Gewebe, Schleimhäute, die Blut-Hirn-Schranke oder den Glaskörper des Auges bewegen. Sie werden dann zwar kaum verkleinerte Chirurgen an Bord haben, dafür aber vielleicht pharmazeutische Wirkstoffmoleküle, genetische Baupläne oder fernsteuerbares Operationsbe-

steck. In einen Zusammenhang mit der *Phantastischen Reise* will Fischer seine Arbeit dennoch nur ungern gebracht sehen. Zu viel in dem Film sei wissenschaftlich „äußerst fragwürdig“. So etwa „die aktive und kontrollierte Bewegung“ des Mini-U-Boots durch die Blutbahn. Und auch über eine Spitzengeschwindigkeit von 15 Knoten, das entspricht 30 Kilometern pro Stunde, kann Fischer nur schmunzeln: Solch ein Tempo ist für ein miniaturisiertes Tauchfahrzeug ziemlich unrealistisch.

EINE LA-OLA-WELLE AUF DEM WIMPERNTIERCHEN

In Hollywood musste man sich eben wenig Gedanken um physikalische Details in der Mikrowelt machen. Zum Beispiel um den Umstand, dass kleine Teilchen eine hohe Reibung erfahren, während ihre „Trägheit relativ unbedeutend wird“, wie es schon Richard Feynman in seinem Vortrag formuliert

hat. Hohe Reibung bei wenig Trägheit – das heißt nichts anderes, als dass ein Vehikel ohne Antrieb sofort zum Stehen kommt. Ein menschlicher Schwimmer gleitet nach einem Schwimmzug dank seiner Trägheit noch eine Zeit lang weiter durch das Wasser. Ein Bakterium aber, dessen Antrieb aussetzt, bewege sich gerade noch einen zehntel Nanometer weiter, so Peer Fischer. Denn wenn ein Bakterium in Wasser schwimmt, ist das ungefähr so, als müssten wir uns durch Teer schieben.

Und doch haben Einzeller offenbar Techniken entwickelt, um sich in diversen Flüssigkeiten aktiv zu bewegen. Viele Bakterien haben eine rotierende Geißel, die sie vorantreibt. Ein Spermium wiederum führt mit dem Schwanz eine Art Peitschenschlag aus, mit dem es sich von der Umgebung gleichsam abstößt.

Eine weitere Technik beherrschen Wimperntierchen. Diese Einzeller sind von zahllosen Härchen übersät, die sie in einer ausgeklügelten Choreografie bewe-

» Im Moment geht es Fischers Gruppe vor allem darum, Antriebsprinzipien zu finden und zu testen.

gen. Zeitlich aufeinander abgestimmt, machen die Härchen Bewegungen, die denen unserer Arme beim Brustschwimmen ähneln. Alle Härchen zusammen vollführen etwas wie eine La-Ola-Welle, die über den Körper des Wimperntierchens läuft und diesen vorantreibt.

Ausgerechnet dieser komplizierte Mechanismus inspirierte Peer Fischer und seine Mitarbeiter zum Antrieb für einen Mikroschwimmer. Eine direkte künstliche Kopie, so viel war schnell klar, würde dabei nicht möglich sein. „Es gibt schließlich keine elektronische Steuerung und auch keine Batterie, die klein genug wäre, um Gebilde in der Größe einzelner Härchen anzutreiben“, erklärt Fischer. „Was wir daher tun, ist: Wir versuchen die Essenz des Prinzips zu verstehen, zu vereinfachen und dann mit den uns möglichen Mitteln anzuwenden.“

In den Stuttgarter Labors wurde so aus der biologischen Vorlage, dem behaarten Einzeller, ein etwa einen Millimeter langer Zylinder aus einem besonderen Material – einem sogenannten Flüssigkristall-Elastomer: einem Kunststoff, der sowohl Merkmale einer Flüssigkeit als auch eines Kristalls aufweist. „Dabei handelt es sich um eine Art molekularen Muskel, in dem sich einzelne Abschnitte ausdehnen, sobald sie mit Licht einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt werden“, erklärt Fischer.

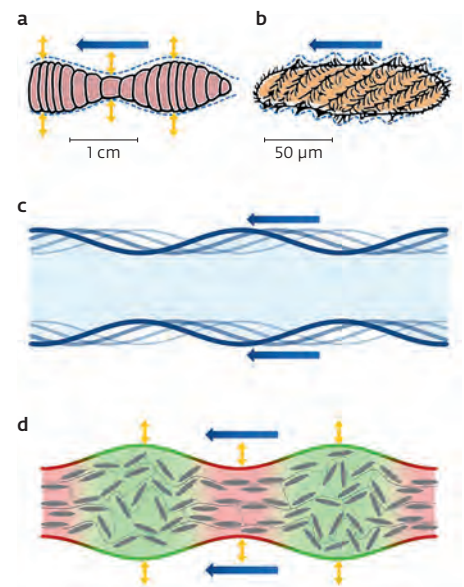
Konkret heißt das: Wo die Stuttgarter Forscher grünes Licht auf die Oberfläche strahlen, weitet sich der Zylinder. Verschwindet das Licht, so ziehen sich diese Bereiche wieder zusammen. Mithilfe eines komplexen Spiegelsystems führen die Stuttgarter Forscher daher in ihren Versuchen ein Gitter hauchdünner grüner Lichtstreifen über den winzigen Zylinder. Mit den Lichtstreifen

wandern wulstige Ringe über das Gefährt. Ähnlich wie bei der Peristaltik eines Regenwurms. Und so, wie dieser dabei die Erde hinter sich schiebt, drückt der pulsierende Zylinder die umgebende Wasser-Glycerin-Mischung an sich vorbei und bewegt sich darin fort. Tempo: rund ein Zentimeter pro Stunde.

Da ist das natürliche Wimperntierchen zwar noch um ein Vielfaches schneller. Das liege aber auch daran, dass es pro Sekunde einfach sehr viel mehr Wellen über seine Oberfläche schickt. Auf jeden Fall ist es den Forschern gelungen, das Fortbewegungsprinzip auf ihren Mikroschwimmer zu übertragen. Mehr noch: Dank ihres Spezialspiegels können sie das Lichtprofil beliebig variieren und damit auch die Bewegungsrichtung ihres zylindrischen U-Boot-Körpers ändern. So ließen sie ihn unter anderem die Umrisse eines Quadrats abschwimmen.

EINE MIKROMUSCHEL KÄME IM WASSER NICHT VOM FLECK

„Das war das erste Mal überhaupt, dass ein künstlicher Mikroschwimmer in der Lage war, Körperverformungen für seinen Antrieb zu nutzen, ohne dass von außen mechanische oder magnetische Kräfte einwirken mussten“, sagt Peer Fischer. Der winzige Schwimmbotter musste nur mit Licht bestrahlt werden. „Um solche Konstrukte aus lichtaktiven Flüssigkristall-Elastomeren auch in einem Organismus einzusetzen, werden sie vielleicht eines Tages einmal an die Enden von Glasfasern gesetzt“, erzählt Fischer. Dann vielleicht weniger als künstliche Mikroschwimmer, sondern als künstliche Muskeln, die am Ende eines Endoskops zum Beispiel weiche Roboterarme be-

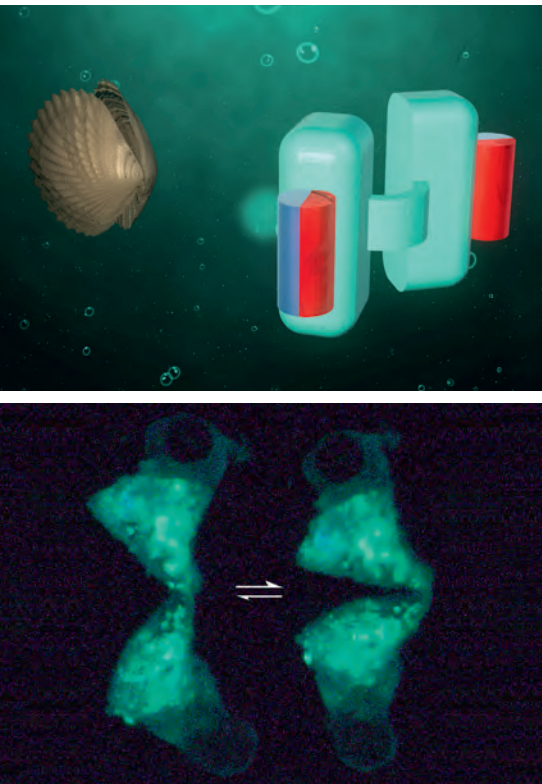


Die Natur als Vorlage: Durch die Peristaltik erzeugt ein Regenwurm (a) ebenso wie ein Wimperntierchen (b), das Härchen auf seiner Oberfläche koordiniert bewegt, eine Welle auf seiner Oberfläche (c). Dieses Prinzip setzen die Stuttgarter Forscher um, indem sie grüne Lichtstreifen über einen Kunststoffzylinder laufen lassen, der sich an den beleuchteten Stellen ausdehnt (d).

wegen könnten. Noch liegt das in weiter Ferne. Im Moment geht es Fischers Gruppe vor allem darum, Antriebsprinzipien zu finden und zu testen.

An einer Antriebsform arbeiteten die Forscher sogar, obwohl viele sie eigentlich für unmöglich hielten: jene der Jakobsmuschel. Diese schwimmt durchs Wasser, indem sie ihre beiden Schalenhälften gleichförmig auf- und zuklappt. Nun sind Jakobsmuscheln einige Zentimeter groß, und in dieser Dimension funktioniert das tadellos. Je kleiner eine solche Muschel aber würde,

» Antriebstechniken für kleinste künstliche Schwimmer zu finden ist eine Herausforderung für die Stuttgarter Forscher. Eine andere ist es, die Mikroschwimmer auf möglichst einfache Art herzustellen.



Nach dem Vorbild der Jakobsmuschel: Das Team um Peer Fischer hat einen Mikroschwimmer konstruiert, dessen beide Hälften durch ein Gelenk miteinander verbunden und mit Magneten versehen sind (oben). Indem die Forscher die beiden Hälften in einem Magnetfeld auf- und zuklappen (unten), bewegen sie die Mikromuschel durch biologische Flüssigkeiten.

desto mehr fiele die Reibung ins Gewicht. Das Wasser käme ihr immer zäher vor. Das gleichförmige Öffnen und Schließen der Schalen höbe sich dann unter dem Strich einfach auf – und eine Mikromuschel käme im Wasser überhaupt nicht vom Fleck. Diesen Zusammenhang formulierte Edward Purcell in einer Regel, die – nach dem englischen Namen für die Jakobsmuschel – Scallop-Theorem heißt.

ANDERS ALS WASSER: BIOLOGISCHE FLÜSSIGKEITEN

Diese Regel gilt nicht nur für das Auf- und Zuklappen zweier Muschelschalen, sondern ganz allgemein für spiegelsymmetrische Bewegungen in extrem zäher Umgebung. Im Mikrokosmos der Natur finden sich daher ausschließlich asymmetrische Antriebstechniken – die rotierende Bakteriengeißel etwa oder die Bewegungen der Härchen auf einem Wimperntierchen.

Trotzdem hatte sich Fischers Gruppe vorgenommen, Mikroschwimmer durch eine spiegelsymmetrische Motorik anzutreiben, weil die entsprechenden Bewegungsapparate meist auf einfacheren Mechanismen beruhen und sich mit weniger Aufwand herstellen lassen. Eine Chance für einen symmetrisch arbeitenden Antrieb sahen die Forscher, weil sich manche biologischen Flüssigkeiten anders verhalten als etwa Wasser. „In Gelenkflüssigkeit zum Beispiel oder im Glaskörper des Auges ordnen sich Moleküle der Hyaluronsäure zu netzwerkartigen Strukturen an, und genau das sorgt dafür, dass sich die Viskosität verändern kann“, erklärt Peer Fischer. Sobald sich ein Mikroschwimmer in diesen gelartigen Strukturen bewegt, nimmt die Viskosität ab, weil er

das Netzwerk aufricht. Verharrt er dagegen, werden die Bindungen zwischen den Molekülen sofort wieder geknüpft. Das Scallop-Theorem lässt sich in solchen Flüssigkeiten daher unterlaufen.

Das demonstrierte Fischers Team erstmals 2014: Die Forscher konstruierten einen etwa 0,3 Millimeter großen muschelartigen Körper, in dem die zwei Schalen über ein Gelenk miteinander verbunden sind. An die Schalen heften sie Mikromagnete. Setzten die Wissenschaftler die Mikromuschel nun einem äußeren Magnetfeld aus, klappten die Schalen zu. Schalteten sie das Magnetfeld wieder ab, so öffnete eine Art Rückstellmechanismus im Gelenk die künstliche Muschel wieder.

„Entscheidend ist, dass wir die Schalen sehr viel schneller öffnen, als wir sie schließen“, erklärt Fischer. „Dieser zeitlich asymmetrische Bewegungszyklus führt dazu, dass die umgebende Flüssigkeit beim Öffnen dünnflüssiger ist als während des langsamen Schließvorgangs.“ Daher legt die Muschel beim Öffnen der Schale eine größere Strecke zurück als beim Schließen. Unter dem Strich kommt sie also voran – aber nur in Flüssigkeiten, die sich wie etwa Gelenkflüssigkeit verhalten.

Antriebsprinzipien zu finden, die kleinste künstliche Schwimmer nach vorne bringen, ist die eine Herausforderung für die Stuttgarter Forscher. Eine andere ist es, Mikroschwimmer wie die winzige magnetgetriebene Muschel auf möglichst einfache Art herzustellen. Deren Schalen sollten einerseits möglichst dünn sein, müssen andererseits aber auch robust genug sein, um das ständige Auf- und Zuklappen in einer vergleichsweise zähen Umgebung auszuhalten. Als Material wählten die Forscher für die Mikromuschel schließlich



Staub stört: Im Reinraumlabor stellen die Forscher mithilfe der Fotolithografie Mikrostrukturen wie etwa eine Mikromuschel her. Dabei müssen sie selbst kleinste Verunreinigungen aus der Luft vermeiden.

ein solides Siloxan-Polymer, aus dem ein 3D-Drucker die winzige Struktur aufbaute, einschließlich des Gelenks, das gerade einmal 60 Mikrometer dünn war. Das entspricht in etwa dem Durchmesser eines menschlichen Haars.

Auch wenn es schon viel Präzision erforderte, die filigrane Muschelkopie herzustellen, ungleich schwieriger war es, das bisher kleinste Vehikel der Stuttgarter Flotte zu fertigen. Dabei handelt es sich um ein 400 Nanometer langes Schraubchen aus Quarzglas und etwas Nickel. Der korkenzieherartig gewundene Strang ist gerade einmal 70 Nanometer dick – und damit fast 1000 Mal dünner als ein menschliches Haar. Die diffizile Produktion gelang den Forschern schließlich nur dank eines Verfahrens, das sie selbst entwickelt hatten (siehe Kasten rechts).

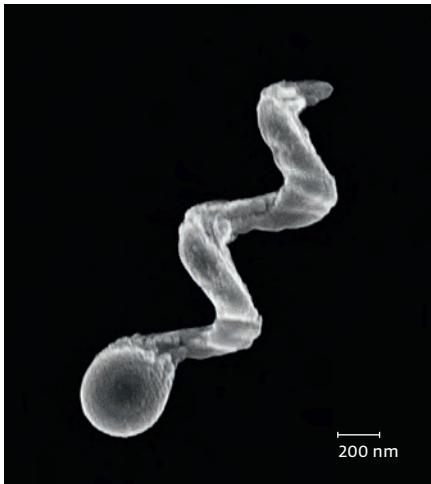
Dass die Stuttgarter Forscher überhaupt an Vehikeln tüfteln, die kleiner als jedes Bakterium sind, hat einen einfachen Grund: Sie suchen ein Schwimmgerät, das klein genug ist, um durch das

NANOBAUTEILE NACH MASS

Es ist nicht gerade trivial, im Bereich von Nanometern hochpräzise Bauteile wie eine korkenzieherähnliche Nanoschraube zu fertigen. Die Stuttgarter Max-Planck-Forscher bauen solche Nanostrukturen Schicht für Schicht auf: Zunächst überziehen sie einen Silicium-Wafer mit einem dichten Raster von nur acht Nanometer großen Goldpunkten. Den Wafer positionieren sie in einer Vakuumkammer, in der sie die gewünschten Materialien verdampfen. Die Substanzen fliegen nun zu dem Wafer, den die Forscher so positionieren, dass die Teilchen nicht die Wafer-Oberfläche, sondern nur die Golderhebungen treffen können und sich dort abscheiden. (Ganz so wie eine schräg stehende Abendsonne in den Bergen nur noch die Bergrücken und -gipfel anstrahlt, nicht aber die Talsohlen.) Auf diese Weise wachsen feine, sauber voneinander getrennte Strukturen.

Indem die Forscher den Wafer während des Abscheidenvorgangs in verschiedene Richtungen drehen – sie müssen nur darauf achten, dass die verdampften Substanzen nicht auf die Wafer-Oberfläche gelangen –, können sie auch komplexe Geometrien erzeugen. So entsteht die korkenzieherähnliche Nanoschraube, indem sie den Wafer kontinuierlich drehen. Wenn sie den Wafer abrupt kippen, knickt die aufgedampfte Struktur ab, sodass Zickzackformen möglich werden. Da die Strukturen Atomlage für Atomlage wachsen, können die Stuttgarter Forscher den Prozess jederzeit unterbrechen und mit einem anderen Material fortsetzen. Auf diese Weise gelingt es ihnen beispielsweise, magnetisches Nickel in eine Nanostruktur einzubauen, die ansonsten aus Siliciumdioxid oder Titandioxid besteht.

» Zum ersten Mal ist es gelungen, einen Mikroschwimmer durch ein zähes biologisches Medium zu manövrieren.



Ein Öffner für die Magenschleimhaut: Die korkenzieherförmige Mikroschraube aus Quarzglas beschichten die Stuttgarter Forscher mit Enzymen, mit deren Hilfe die Schleimhaut lokal verflüssigt wird. So kann das Vehikel durch das gelartige Netzwerk schwimmen.

dreidimensionale Hyaluronsäure-Netzwerk zu schwimmen, ohne dass dieses aufgebrochen werden muss. „So ein Schwimmer muss natürlich kleiner sein als die molekulare Maschenweite dieser Netzwerke, und die liegt bei wenigen Hundert Nanometern“, so Fischer.

Für ihr schraubenförmiges Design bedienten sich die Forscher einmal mehr einer Vorlage aus der Natur, nämlich der Bakteriengeißel. Diese funktioniert so ähnlich wie ein Korkenzieher, nur dass sich die Mikroben damit durch Flüssigkeiten statt durch Kork bohren. Genau das kann auch die Stuttgarter Nanoschraube. Für die notwendige Rotation sorgt wiederum ein von außen angelegtes Magnetfeld, das auf das Nickel in der Schraube wirkt.

Ihren Nanoschwimmer setzten die Forscher in eine Modellflüssigkeit aus

Wasser und Hyaluronsäure, schalteten das Magnetfeld ein und – freuten sich. Im Mikroskop konnten sie verfolgen, wie souverän sich das Schraubchen seinen Weg bahnte. Dass dies wirklich an der Winzigkeit des Vehikels lag, bewies der Vergleich mit einer Schraube im Mikrometermaßstab. Diese saß schon nach wenigen Umdrehungen unverkennbar fest.

EIN U-BOOT MIT EINGEBAUTEM SCHLEIMLÖSER

Durch die Maschen zu schlüpfen, ist eine Möglichkeit, ein eng geknüpftes Molekülnetzwerk zu durchdringen. Die Stuttgarter hatten aber noch eine weitere Idee, wie das gelingen könnte. Ist es möglich, die gelartige Struktur einfach chemisch aufzulösen, sie also quasi zu verflüssigen? Das könnte zum Beispiel interessant sein, um mit einem schwimmenden Vehikel Medikamente durch die Schleimhaut des Magens, des Darms oder der Lunge direkt zu Krankheitsherden zu transportieren.

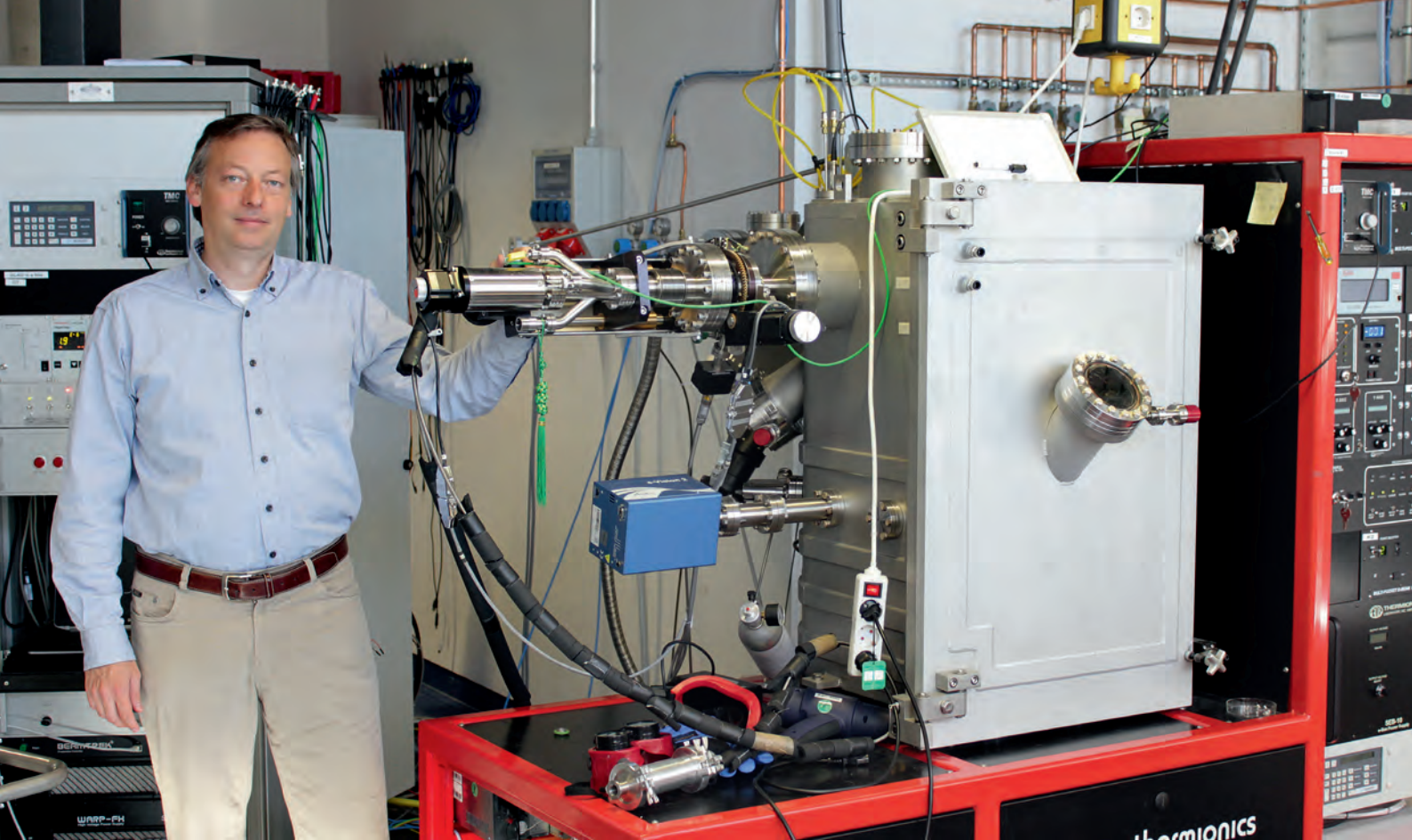
Um ein winziges U-Boot mit eingebautem Schleimlöser zu entwerfen, half den Forschern einmal mehr ein Blick in die Natur. Den entscheidenden Wink lieferte nämlich ein Bakterium namens *Helicobacter pylori*. Wer davon schon einmal gehört hat, verbindet damit sicher nichts Gutes. Denn seit etwa 25 Jahren ist bekannt, dass *H. pylori* in der menschlichen Magenwand Entzündungen und Geschwüre hervorrufen kann. Es gelingt ihm also, sich einen Weg durch die Magenschleimhaut zu bahnen, und zwar indem es ein Enzym namens Urease absondert. Dieses zerlegt den in der Magenflüssigkeit vorkommenden Harnstoff. Dabei wird Ammoniak freigesetzt – eine basische Substanz, die den pH-Wert im ansonsten

sauren Milieu des Magens lokal in die Höhe treibt. Dabei bricht das gelartige Netzwerk der Moleküle in der Magenschleimhaut auf, und die Bakterien können hindurchschwimmen.

Diesen Effekt ahmte Fischers Team nach und konstruierte dafür eine Glaschraube – ähnlich der schon erwähnten Nanoschraube, nur größer. Das Gewinde beschichteten die Forscher mit Urease. Auch dieser Schwimmer enthielt etwas Nickel, um ihn per Magnetfeld rotieren lassen zu können. Diesen enzymbeschichteten Mikroroboter testete das Team schließlich in einem Milieu aus Schweinemagensschleimhaut – und konnte ihn in der Tat hindurchfahren. Auch dies eine Premiere: „Zum ersten Mal ist es damit gelungen, einen Mikroschwimmer durch ein zähes biologisches Medium zu manövrieren“, sagt Peer Fischer sichtlich erfreut.

Das Beispiel der Urease zeigt, dass auch der Griff in die chemische Trickkiste Möglichkeiten für die Bewegung von Mikroschwimmern eröffnet. Davon wollen die Stuttgarter in Zukunft noch häufiger Gebrauch machen. So möchten sie Minivehikel entwickeln, die ihren Vortrieb autonom erzeugen. Bei allen bisherigen Projekten mussten die Forscher noch von außen einwirken, um die U-Boote in Bewegung zu versetzen, sei es mit Magnetfeldern oder mit Licht. „Wenn wir unsere Nanoroboter mit einem chemischen Brennstoff ausrüsten könnten, dann hätten sie den Motor sozusagen mit an Bord“, sagt Peer Fischer.

Einen ersten Ansatz gibt es dafür bereits. Und zwar in Form einer Mikrokugel, die zwei Gesichter trägt. Auf der einen Hälfte ist die Oberfläche mit einem Katalysator bestückt, auf der anderen nicht. In einer Flüssigkeit mit einer Substanz, bei welcher der Katalysator



Am Steuer der Nanoproduktion: Indem die Forscher einen Silicium-Wafer in der Vakuumanlage kippen und drehen, wenn sie Material aufdampfen, erzeugen sie Nanostrukturen in Form von Schrauben oder Zickzacklinien. Peer Fischer hält den Manipulator, mit dem sich der Wafer justieren lässt.

eine chemische Reaktion auslöst, treibt dieser janusköpfige Partikel sich selbst an. Denn in der Umgebung der Kugelhälfte mit dem Katalysator verändert die chemische Reaktion die Konzentrationen der daran beteiligten Substanzen. Im Vergleich zur Umgebung der anderen Kugelhälfte ergibt sich also ein Konzentrationsunterschied.

„Wie bei der Osmose will das System diesen Konzentrationsunterschied ausgleichen“, erläutert Peer Fischer. Das heißt, die Substanzen bewegen sich an der Mikrokugel entlang, erzeugen dabei eine Kraft und schieben das Kügelchen parallel zum Konzentrationsgefälle vorwärts. Fischer und seine Mitarbeiter würden dieses Prinzip nun gerne auf biologische Umgebungen übertragen und den bislang metallischen Katalysator durch geeignete Enzyme ersetzen. Am Ende könnte dann eine Art biologisches Chemotaxi mit eigenem Antrieb stehen. Und wenn solch ein Gefährt künftig einmal in den Stuttgarter Labors unterwegs ist, wird das Reinigungspersonal mitunter wieder draußen bleiben müssen. Sicher ist sicher. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Mikro- und Nanoroboter, die sich durch den Körper manövrieren lassen und Wirkstoffe zu Krankheitsherden bringen, könnten medizinische Therapien effizienter machen.
- Stuttgarter Max-Planck-Forscher entwerfen Antriebe für solche winzigen Vehikel und entwickeln Methoden, um sie herzustellen.
- Dabei ahmen sie Mechanismen aus der Natur nach – etwa die konzertierte Bewegung der Härchen eines Wimperntierchens oder die schleimlösende Wirkung von *Helicobacter pylori* – und setzen sie mit den technisch möglichen Mitteln um.

GLOSSAR

Flüssigkristall-Elastomer: Ein Kunststoff, der sich elastisch verformen lässt und dabei die Struktur eines Flüssigkristalls aufweist. Flüssigkristalle sind zwar flüssig, ihre Moleküle bilden jedoch keine ungeordnete Struktur wie Flüssigkeiten, sondern ordnen sich zumindest in einer Dimension mit einer bevorzugten Orientierung an, was sie Kristallen ähneln lässt.

pH-Wert: Ein Maß dafür, wie sauer oder basisch eine Flüssigkeit ist. In saurem Milieu ist der pH-Wert niedrig, in basischem hoch.

Scallop-Theorem: Dieser Regel zufolge lassen sich sehr kleine Schwimmkörper in den meisten Flüssigkeiten wie etwa in Wasser nicht durch symmetrische Bewegungen antreiben. Sie können sich also nicht wie zum Beispiel eine Jakobsmuschel (englisch *scallop*) fortbewegen. Denn bei Nano- und Mikroschwimmern ist der Effekt der Reibung viel größer als die Wirkung der Trägheit, sodass symmetrische Bewegungen den Schwimmer genauso weit vor- wie zurückbewegen. Allerdings lässt sich diese Regel in gelartigen biologischen Flüssigkeiten unterlaufen.

Heiße Luft im Orient

Der Nahe Osten und Nordafrika werden derzeit von bewaffneten Konflikten und politischen Krisen erschüttert. Doch selbst wenn diese gelöst würden, dürften viele Menschen dort bald gezwungen sein, ihre Heimat zu verlassen. **Jos Lelieveld**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Chemie** in Mainz, und seine Mitarbeiter prognostizieren der Region einen drastischen Klimawandel und eine zunehmende Verschmutzung der Luft etwa durch Feinstaub.

TEXT **PETER HERGERSBERG**

Hitze und Trockenheit: Faten sieht darin auch einen Grund, warum es in Syrien zu Demonstrationen kam, die rasch zum Bürgerkrieg eskalierten. Die syrische Bäuerin schilderte der **NEW YORK TIMES** 2013, was in den Jahren vor den Protesten geschehen war: Auf ihrem Ackerland hätten sie und ihr Mann Getreide und Gemüse angebaut und dank der Regenfälle immer gute Ernten eingeholt. „Doch dann kam es plötzlich zu der Dürre“, sagte Faten, die nicht mit ihrem vollen Namen zitiert werden wollte. „Das Land wurde zu einer Wüste.“

Dann erzählte sie wütend davon, wie die Regierung ihre Bitten um Hilfe ignoriert habe. Ihrer Familie blieb wie unzähligen anderen Landwirten nichts anderes übrig, als in eine Stadt zu ziehen und dort Arbeit zu suchen. Rund eine Million Menschen verließen während der Dürre ihre Heimat. Vor allem junge Männer, die studieren oder heiraten wollten, seien davon hart getroffen worden. Auch die Dürre und die Arbeitslosigkeit hätten die Menschen folglich zur Revolution getrieben: „Als dann die ersten ‚Allahu akbar‘-Rufe ertönten, haben wir uns alle der Revolution angeschlossen – sofort.“

„Klimatische Faktoren sind im Syrien-Konflikt vermutlich nicht die wichtigsten Aspekte“, sagt Jos Lelieveld, Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. „Aber die jahrelange Dürre und die Ernteausfälle haben auch zum Unmut der Menschen beigetragen, der zu dem schrecklichen Bürgerkrieg führte.“ US-amerikanische Klimaforscher kamen im Fachmagazin **PNAS** zum gleichen Schluss – bei aller Vorsicht, mit der die Ursachen von Bürgerkriegen analysiert werden müssten. So wurde der Krieg in Syrien, obwohl er vor allem politische, ethnische und religiöse Ursachen hat, zum Me-



Ein Grund zu gehen: Zunehmende Hitze und Sandstürme könnten Menschen in vielen Regionen des Nahen Ostens und Nordafrikas zwingen, ihre Heimat zu verlassen.

netekel für das Unheil, welches der Klimawandel gerade in Ländern des Nahen Ostens und des nördlichen Afrika nach sich ziehen kann. Wenn die Erderwärmung dem Leben der Menschen die Grundlage entzieht, sind bewaffnete Konflikte, Flucht und Vertreibung beinahe unausweichlich.

Die Anzeichen, dass es so kommen wird, mehren sich. Denn in den letzten Jahren wurden im Nahen Osten regelmäßig Hitzerekorde gebrochen. „Im Irak hat man in diesem Sommer alle Beschäftigten des öffentlichen Dienstes nach Hause geschickt, weil es einfach zu heiß zum Arbeiten war“, sagt

Lelieveld. Und das ist erst der Anfang. Erschreckend deutlich machte das bereits eine Studie, die der Mainzer Max-Planck-Forscher im Jahr 2013 gemeinsam mit Forschern des Zypern-Instituts in Nikosia, wo er auch eine Professur innehat, veröffentlichte.

26 KLIMAMODELLE LIEFERTEN DIESELBEN ERGEBNISSE

Darin berechneten die Forscher mit einem regionalen Klimamodell für 18 Städte des östlichen Mittelmeerraums und des Nahen Ostens – von Athen bis Riad –, wie die Extremtemperaturen

dort steigen werden. Diese Vorhersagen untermauerten und erweiterten sie kürzlich für die gesamte Region, die sich gut mit dem etwas angestaubten Begriff des Orients umreißen lässt. Sie simulierten, welche Temperaturen dort für die Zeiträume von 2046 bis 2065 und von 2081 bis 2100 zu erwarten sind, und zwar einmal für die Sommermonate Juni, Juli und August und einmal für die Monate Dezember, Januar und Februar.

Alle 26 Klimamodelle, mit denen die Forscher rechneten und auf deren Vorhersagen auch der Bericht des Weltklimarates beruht, lieferten dabei die-



Links Jos Lelieveld möchte mit seiner Forschung die wissenschaftliche Basis legen, um den Klimawandel noch einzudämmen oder zumindest seine Folgen abzumildern.

Rechts Im Nahen Osten und in Nordafrika gibt es wie etwa in Kuwait (oben) heute schon Sandstürme und heiße Tage. Bis zur Mitte des Jahrhunderts werden die durchschnittlichen Temperaturen im Winter um etwa 2,5 Grad Celsius (unten links) und im Sommer um etwa fünf Grad Celsius steigen (unten rechts), wenn die weltweiten Treibhausgasemissionen weiter zunehmen wie bisher. In den punktierten Gebieten stimmen die Modellrechnungen fast vollständig überein; die Kreuzschraffur steht für eine weitgehende Übereinstimmung.

selbe Erkenntnis: Weiten Teilen des Nahen Ostens und Nordafrikas steht eine extrem heiße Zukunft bevor. Demnach wirkt sich der Klimawandel von Marokko bis Iran und von der Türkei bis nach Saudi-Arabien ebenso wie im Süden Europas am stärksten in den ohnehin sehr heißen Sommermonaten Juni, Juli und August aus. Darin unterscheidet sich diese Region von vielen anderen Teilen der Welt, in denen sich die Erderwärmung im Winter am deutlichsten bemerkbar macht.

In einigen Gegenden werden die durchschnittlichen Sommertemperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts den Rechnungen zufolge um etwa vier Grad Celsius steigen – selbst wenn sich die globale Durchschnittstemperatur, wie es sich die Staatengemeinschaft auf den jüngsten Weltklimagipfeln zum Ziel gesetzt hat, lediglich um zwei Grad erhöht. Setzt die Menschheit Treibhausgase weiter wie bisher frei, dann wird die Durchschnittstemperatur zwischen 2081 und 2100 sogar um mehr als sechs Grad höher liegen als um die zurückliegende Jahrtausendwende.

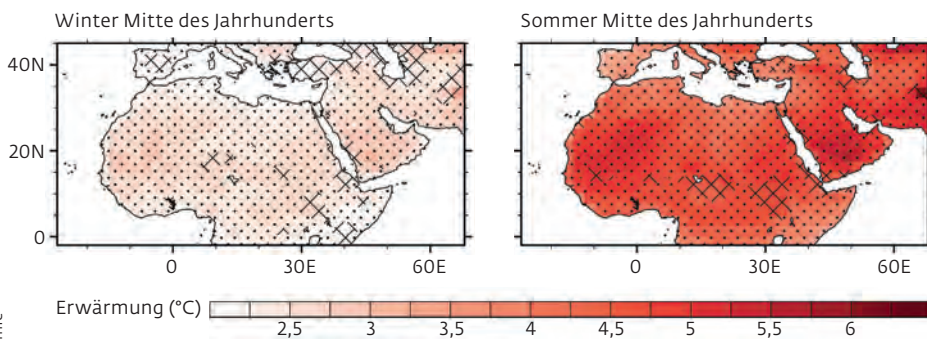
Was das bedeutet, kommt im nüchternen Wert der durchschnittlichen Erwärmung kaum zum Ausdruck. Um das Jahr 2000 erreichte die Temperatur tagsüber an manchen Tagen immerhin schon 43 Grad, fiel nachts aber immer unter 30 Grad. Diese Temperaturen muten geradezu mild an im Vergleich zu dem, was kommen wird. Denn die Temperaturen werden an besonders heißen Tagen schon in der Mitte des Jahrhunderts tagsüber auf etwa 47 Grad steigen und nachts nicht unter 30 Grad sinken.

200 UNGEWÖHNLICH HEISSE TAGE PRO JAHR

Schafft es die Menschheit, die Kohlendioxidemissionen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu senken, werden die Extremtemperaturen ab 2050 etwa auf diesem Niveau verharren. Wenn die Menschen jedoch weiter ungebremsst Treibhausgase in die Atmosphäre blasen, wird es gegen Ende des Jahrhunderts an den schlimmsten Tagen mittags sogar bis zu 50 Grad heiß sein und auch nachts noch über 34 Grad.

Außerdem werden sich Hitzewellen häufen. Wenn die Menschheit ihre Kohlendioxidemissionen nicht drosselt, dann werden Perioden extremer Hitze zehnmal so häufig auftreten wie zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Diese Phasen werden außerdem auch deutlich länger andauern. „Die Menschen im Nahen Osten und im nördlichen Afrika müssen dann gegen Ende des 21. Jahrhunderts mit etwa 200 ungewöhnlich heißen Tagen pro Jahr rechnen“, erklärt Panos Hadjinicolaou, ein Klimaforscher des Zypern-Instituts. Und selbst wenn von 2040 an weltweit weniger Treibhausgase freigesetzt werden, werden Hitzewellen um die Mitte dieses Jahrhunderts den ganzen Sommer über anhalten.

In den Jahren zwischen 1986 und 2005 haben extrem heiße Temperaturen die Menschen noch nicht länger als ungefähr zwei Wochen am Stück gequält. Allerdings belegen meteorologische Daten, dass sich die Anzahl der extrem heißen Tage in den vergangenen Jahrzehnten bereits mehr als verdoppelt hat.



Nun sind Prognosen immer mit Ungewissheiten verbunden. Bei den Vorhersagen, die das Forscherteam für den Nahen Osten und Nordafrika getroffen hat, sind die Unsicherheiten jedoch sehr klein. Denn die Forscher testeten die Zuverlässigkeit der Modellrechnungen, indem sie für den Nahen Osten und für Nordafrika den Temperaturverlauf auch für die Zeit von 1986 bis 2005 simulierten. Diesen reproduzierten die Modelle ziemlich genau.

Auch die Entwicklung, dass Menschen bei extremen Temperaturen ihre Heimat verlassen müssen, ist natürlich nicht mit absoluter Sicherheit vorherzusagen. Doch ab wann Temperaturen

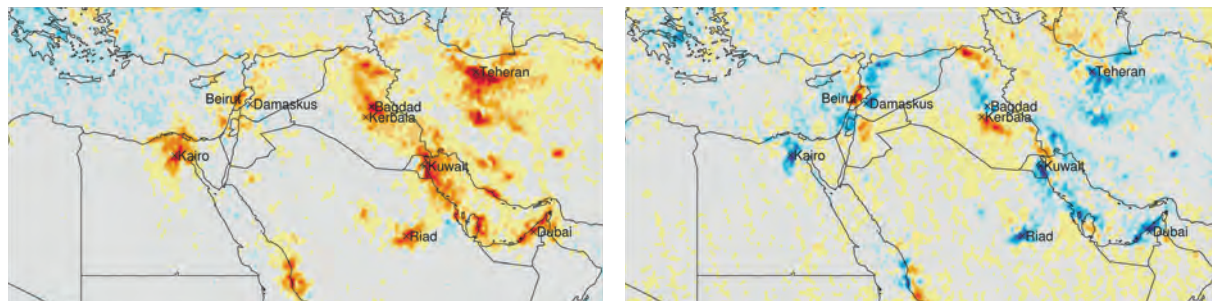
nicht mehr auszuhalten sind, ist nicht nur eine Sache des persönlichen Empfindens, sondern auch der Physik. Wenn die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit nämlich zu stark ansteigen, kann der Mensch seinen Körper allein mit der Verdunstungskühlung seines Schweißes nicht mehr auf 37 Grad temperieren.

Wie zwei Forscher der Loyola Marymount University in Los Angeles und des MIT in Cambridge kürzlich ausgerechnet haben, wird dies gegen Ende des Jahrhunderts am Persischen Golf immer häufiger der Fall sein. Denn in der Nähe des Wassers ist die Luftfeuchtigkeit hoch, und zudem werden dort auch nach den Berechnungen der bei-

den US-Forscher in einigen Gebieten Tageshöchsttemperaturen von über 50 Grad Celsius erreicht. Und das ist nicht nur eine Prognose für die ferne Zukunft. So wurde etwa in Kuwait bereits im Sommer 2016 eine Rekordtemperatur von 54 Grad gemessen.

Jos Lelieveld ist sich deshalb sicher: „Der Klimawandel wird die Lebensumstände im Nahen Osten und in Nordafrika weiter deutlich verschlechtern. Lang andauernde Hitzewellen und Sandstürme können einige Gebiete unbewohnbar machen, was sicher zum Migrationsdruck beitragen wird.“

Durch die zunehmende Hitze und Trockenheit werden heftige Winde künftig mehr Staub aufwirbeln. Und das setzt Menschen nicht nur dann einer steigenden Lebensgefahr aus, wenn sie in einen Sand- und Staubsturm hineingeraten. Die Stürme sind auch der wichtigste Grund, warum die Konzentrationen an Feinstaub in Saudi-Arabien, Irak und Syrien bereits in den vergangenen Jahren stark gestiegen sind: zwischen 2000 und 2015 um 70 Prozent. Dies hat ein Forscherteam, an dem neben Wissenschaft-



Zeichen der Krise: Während die Stickstoffdioxid-Emissionen von 2005 bis 2010 fast im ganzen Nahen Osten stiegen (links), sind sie zwischen 2010 und 2014 in vielen Regionen gesunken (rechts). Die Farben stehen für die Änderungen der Konzentration an Stickstoffdioxid während des betrachteten Zeitraums – gelb und rot bedeuten eine Erhöhung, blau eine Erniedrigung der Konzentration.

lern des Mainzer Max-Planck-Instituts wieder Forscher des Zypern-Instituts, aber auch der saudi-arabischen König-Abdullah-Universität beteiligt waren, anhand von Satellitendaten nachgewiesen. Feinstaub ist einer der garstigsten Luftschadstoffe, weil er Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie Lungenkrebs verursacht.

Die Zone vom südlichen und östlichen Mittelmeer bis hin zur Golfregion wird durch Hitze, Trockenheit und eine Luft, die das Atmen zur Gesundheitsgefahr macht, zu einem Brennpunkt des Klimawandels. Das treibt Jos Lelieveld um. „Ich möchte mit meiner Forschung die wissenschaftliche Basis für wichtige Entscheidungen legen“, sagt der Max-Planck-Direktor. Nur wenn die Wissenschaftler die Veränderungen gründlich belegt und verstanden haben, können sie die Informationen liefern, damit Politiker den Klimawandel noch eindämmen oder seine Folgen zumindest abmildern können.

Mit seiner nebenamtlichen Position am Zypern-Institut hat Jos Lelieveld ein Standbein in einer Gegend, in der die Erderwärmung eine ganz heiße Angelegenheit ist. „Zypern gehört zwar zur Europäischen Union, ist dem Nahen Osten aber viel näher als Europa“, sagt der Wissenschaftler. Den Standort nutzte Lelieveld in den vergangenen Jahren, um mit seinen Kollegen in Nikosia immer wieder Untersuchungen zum Klimawandel und zur Luftbelastung in der Region anzuschließen. Dabei kooperieren die Forscher regelmäßig mit Kollegen aus anderen betroffenen Ländern: etwa aus

Jordanien, Ägypten, Israel, dem Libanon und Saudi-Arabien. „Auf diese Weise wachsen in diesen Ländern auch das Wissen und das Bewusstsein dafür, wie gravierend die Veränderungen und ihre Folgen sind“, sagt Lelieveld.

WENIGER STICKOXIDE, WO MENSCHEN FLIEHEN MUSSTEN

So werteten die Mitarbeiter des Mainzer Max-Planck-Instituts gemeinsam mit einem Forscher der König-Abdullah-Universität Satellitendaten aus, um herauszufinden, wie sich die Stickoxidkonzentrationen im Nahen Osten zwischen 2005 und 2014 entwickelten. Bis zum Jahr 2010 nahmen die Stickoxidemissionen demnach fast überall in der Region zu.

Dass die Konzentrationen danach in vielen Gebieten sanken, war aber nur selten ein gutes Zeichen. Das geschah nämlich vor allem dort, wo bewaffnete Konflikte und politische Krisen das Wirtschaftsleben abwürgten und Menschen fliehen mussten. Im Gegenzug

stieg die Stickoxidbelastung an den Orten stark, an denen die Vertriebenen Zuflucht suchten. „Es ist sehr tragisch, dass die beobachteten Negativtrends der Stickoxidemissionen zum Teil mit humanitären Katastrophen einhergehen“, sagt Jos Lelieveld. Nur in wenigen Ausnahmen wie etwa in Israel und am Persischen Golf führten strengere Umweltgesetze zu einer Reduktion der Stickoxide in der Luft.

Jos Lelieveld möchte mit seiner Arbeit dazu beitragen, dass auch andere Regierungen mit Umweltpolitik auf die langfristigen Bedrohungen durch Luftverschmutzung und Klimawandel reagieren können. Er denkt dabei an eine Zukunft, in der die akuten Krisen und Konflikte ein Ende gefunden haben: „Natürlich stehen in einigen Ländern der Region andere Probleme im Moment höher auf der Tagesordnung.“ Hoffentlich bleibt das nicht mehr lange so – auch damit es dann noch Möglichkeiten gibt, der sengenden Hitze und einer krank machenden Luft etwas entgegenzusetzen. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Der Klimawandel bewirkt im Nahen Osten und in Nordafrika bereits heute längere Hitzeperioden und höhere Extremtemperaturen. Diese Effekte werden sich bis zur Mitte des Jahrhunderts verstärken.
- Durch den Klimawandel steigen auch die Ozonwerte und die Feinstaubkonzentrationen.
- Extreme Hitzewellen und zunehmende Luftbelastung könnten dazu führen, dass Menschen in vielen Gegenden des Nahen Ostens und Nordafrikas nicht mehr leben können.

„Die Politik muss in Anpassung investieren“

Walter Kälin ist emeritierter Professor für öffentliches Recht der Universität Bern. Er engagiert sich in Fragen der Menschenrechte vor allem im Zusammenhang mit Migration und Flucht. Unter anderem wirkte er als Repräsentant des UN-Generalsekretärs für Menschenrechte intern Vertriebener und als Vertreter der Präsidenschaft der Nansen-Initiative zu grenzüberschreitender Katastrophenflucht. Wir sprachen mit ihm über den Einfluss von Klimaveränderungen auf Migration und die Möglichkeiten, Menschen vor Klimaflucht zu bewahren.

Herr Professor Kälin, welche Rolle spielen Klimaveränderungen heute als Migrationsgrund?

Walter Kälin: Wir wissen, dass seit dem Jahr 2008 jährlich etwa 22 Millionen Menschen wegen plötzlicher Wetterereignisse wie Stürmen oder Überschwemmungen zumindest vorübergehend fliehen mussten. Wir wissen aber nicht, wie viele davon im Ausland Zuflucht suchen. Auch die Zahl jener, die wegen schleichender Umweltveränderungen wie Dürren oder Ansteigen des Meeresspiegels zu uns kommen, ist nicht bekannt. Denn keiner wird eine Dürre als Asylgrund angeben, weil das geltende Recht nur Kriegsflüchtlingen und politisch Verfolgten Schutz gewährt.

Müssen wir in den kommenden Jahrzehnten mit deutlich mehr Klimaflüchtlingen aus Nordafrika und dem Nahen Osten rechnen, weil es dort zu heiß wird?

Zunächst einmal möchte ich sagen, dass der Begriff Klimaflüchtling in den Sozial- und Rechtswissenschaften inzwischen kaum noch verwendet wird.

Warum?

Diese Menschen sind nicht Flüchtlinge im Rechtssinn, weil es am Element der Verfolgung und Gefährdung durch menschliche Gewalt fehlt. Zudem ist es ein Begriff, den auch viele Betroffene ablehnen. Ich habe kürzlich an Konsultationen auf der Pazifikinsel Kiribati teilgenommen. Dort hat uns eine Vertreterin einer Nichtregierungsorganisation sehr deutlich gesagt: „Wir wollen nicht Flüchtlinge werden! Flüchtlinge sind ausgegrenzt und auf humanitäre Hilfe angewiesen. Auch wenn wir unsere Inseln verlassen müssen, wollen wir wählen können, wann und wohin wir gehen.“ Statt von Klimaflüchtlingen sprechen wir von Disaster Displaced Persons...

...von Personen, die durch Katastrophen vertrieben werden. Worin genau liegt der Unterschied in der Begrifflichkeit?

Der Begriff der Katastrophe berücksichtigt den Faktor Mensch. Denn eine Naturkatastrophe ist definiert als ein Ereignis mit Schäden, die von einem Staat oder der Bevölkerung nicht mehr bewältigt werden können. Flucht in solchen Situationen ist immer multikausal und hängt damit auch von menschlichen Faktoren ab.

Was bedeutet das für die Frage, ob der Klimawandel und extreme Hitzewellen in Nordafrika und im Nahen Osten dort zu mehr Migration führen?

Die Zahl der Katastrophenvertriebenen wird zwar sicherlich zunehmen, vor allem wenn wir nichts tun, genaue Prognosen sind aber schwierig. Denn die Gründe für Wanderungsbewegungen sind sehr vielfältig. Klimaveränderungen führen als sol-



Walter Kälin

che nicht direkt zu dauerhafter Migration. Entscheidend ist, wie vulnerabel, also wie verletzlich, Menschen gegenüber Klimaveränderungen sind und wie gut sie sich daran anpassen können. In den reichen Golfstaaten, in denen sich das Leben schon heute größtenteils in gekühlten Räumen abspielt, werden sich die Menschen auf Hitzewellen viel eher einstellen können als eine arme Bevölkerung in entlegenen Regionen, wo Hitze und Trockenheit zu Gesundheitsschäden und Problemen in der Landwirtschaft führen. Je vulnerabler Menschen sind, desto eher werden sie weggehen.

Arme Menschen werden von Klimaveränderungen also zur Migration gezwungen?

Auch hier muss man differenzieren. Um wegzugehen, braucht es auch gewisse Mittel, die gerade den Ärmsten der Armen fehlen. Sie bleiben zurück. >



Magere Jahre: Zwischen 2007 und 2010 herrschte in Syrien eine Dürre, die das Leben der Landwirte extrem erschwerte. Etwa eine Million von ihnen gaben ihre Betriebe schließlich auf und zogen in Städte.

Was können die Länder etwa in Nordafrika oder im Nahen Osten und die Weltgemeinschaft tun, um die Menschen vor den Folgen des Klimawandels zu schützen?

Wenn Menschen desto eher migrieren, je vulnerabler sie sind, gibt uns das auch die Chance zur Intervention. Wir können die Vulnerabilität verringern und die Anpassungsfähigkeit der Menschen verbessern. Ich appelliere an die Politik, in Anpassung zu investieren. Da kann viel gemacht werden.

Was genau?

Für stark steigende Hitze gibt es noch keine ausgefeilten Pläne, aber es ist denkbar, die Häuser so zu verändern, dass es in ihnen kühl bleibt. Und die Sonnenenergie, die es in den betroffenen Regionen reichlich gibt, ließe sich für die Klimatisierung nutzen. Mit veränderten Bewässerungsmethoden und trockenresistenteren Pflanzen könnte sich die Landwirtschaft auch auf zunehmende Dürren einstellen.

Aber all das ist doch nur bis zu einem gewissen Grad möglich.

Das ist sicher richtig. Daher muss auch Migration eine Anpassungsmaßnahme sein. Wir brauchen legale Migrationsmöglichkeiten. Längerfristig wird Menschen von tief liegenden Pazifikinseln als Folge der ansteigenden Meeresspiegel nur die permanente Auswanderung oder Umsiedlung bleiben. Bereits heute erteilt etwa Australien solchen Menschen temporäre Arbeitsbewilligungen, damit ihre Familien mit dem verdienten Geld besser mit den Folgen des Klimawandels umgehen können. Die Migration kann also auch in zirkulärer Form stattfinden...

Das heißt?

Von zirkulärer Migration spricht man, wenn Menschen für eine begrenzte Zeit migrieren, um den Folgen einer Naturkatastrophe wie etwa eines Sturms, einer Überschwemmung oder einer Dürre zu entge-

hen. Das können Monate oder Jahre sein. Dafür müssen entsprechende Programme aufgelegt werden. Auch für Menschen, die ihre Heimat dauerhaft verlassen müssen.

Ist es sinnvoll, für diese Menschen ähnliche globale Regelungen zu schaffen, wie sie die Genfer Flüchtlingskonvention für Menschen getroffen hat, die vor bewaffneten Konflikten fliehen?

Ich halte eine globale Konvention für nicht realistisch. Es ist auch schwierig, Regelungen zu finden, die gleichzeitig für den Pazifik und Nordafrika sinnvoll sind. 50 Staaten haben aber schon Regelungen, nach denen sie Menschen nach großen Katastrophen in ihrer Nachbarschaft aufnehmen können. Es wäre wichtig, diese Regelungen zu harmonisieren, um überregionale Maßnahmen ergreifen zu können. Längerfristig kann man darauf aufbauen.

Interview: Peter Hergersberg

Wissen Sie, wie man „Berufungsliste“, „Blockseminar“ oder „Präsenzstudium“ ins Englische übersetzt?
Oder welche Entsprechung der Ausdruck „die Anerkennung von Studien- und Prüfungsleistungen beantragen“ im Englischen findet? **Dirk Siepmann | Wörterbuch Hochschule | Forschung, Lehre und Management | Deutsch – Englisch | Englisch – Deutsch**



Gebundene Ausgabe, 2. unveränderte Auflage 2016, 476 S., 19,90 € (D) inkl. Porto, für DHV-Mitglieder zum Sonderpreis von 17,90 € inkl. Porto | **Zu bestellen über:** Deutscher Hochschulverband, Rheinallee 18-20, 53173 Bonn, Tel. 0228 9026666, Fax 0228 9026680 oder per Mail: dhv@hochschulverband.de

Dirk Siepmann ist Professor für Fachdidaktik des Englischen an der Universität Osnabrück. Er verfügt über eine jahrzehntelange Erfahrung in Fremdsprachendidaktik, Übersetzungswissenschaft und Lexikographie.

**DEUTSCHER
HOCHSCHUL
VERBAND**



Mauritius

Ein Meer von Verbindungen

Schiffe waren lange Zeit die schnellsten Verkehrsmittel, und sie konnten Menschen und Güter in großer Zahl transportieren. So wurden Meere zu einem Kontakt- und Handelsraum für unterschiedliche Nationen. Hafenstädte dienen noch heute als Knotenpunkte und bilden Schmelztiegel verschiedener Kulturen. Am Beispiel des Indischen Ozeans erforschen **Burkhard Schnepel** und sein Team am **Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung**, wie sich über das Wasser hinweg vielfältige Netzwerke entwickelt haben.

TEXT **TINA HEIDBORN**

Wasser auf rund 70 Millionen Quadratkilometern, annähernd 15 Prozent der Erdoberfläche: Der Indische Ozean verbindet im Süden das afrikanische Kap der Guten Hoffnung und Perth an der australischen Westküste mit dem pakistanischen Karatschi und Kalkutta, Indien, im Norden. Dazwischen Inseln und Inselgruppen in der Weite des drittgrößten Ozeans der Welt. Es ist nicht gerade ein kleines Untersuchungsgebiet, das sich Burkhard Schnepel vorgenommen hat. Schnepel ist Professor für Ethnologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und Fellow am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung, wo er die Arbeitsgruppe „Connectivity in Motion: Port Cities of the Indian Ocean“ leitet.

Burkhard Schnepel interessiert am Indischen Ozean vor allem das, was das Wasser möglich macht: „Seit 3000 Jahren befahren Menschen diesen Raum“, sagt er. „Er hat nicht nur eine riesige Fläche, sondern auch eine lange Geschichte.“ Der Indische Ozean ist für den Ethnologen und seine Projektmitarbeiter ein Begegnungsraum.

Aufgrund der regelmäßigen Monsunwinde – nach dem Muster Südwest-Monsun im Sommer, Nordost-Monsun im Winter – war der Indische Ozean schon im Zeitalter der Segelschifffahrt gut navigierbar. Man kann ihn, historisch und ethnologisch betrachtet, als einen in der Geschichte geschaffenen Kontakt- und Handelsraum auffassen, als „maritime Seidenstraße“. Als die Europäer ab dem 16. Jahrhundert verstärkt dort aufkreuzten, waren diese Handelsmöglichkeiten ein Hauptfaktor: ein Meer voller Routen, die sich zwischen Afrika und Asien erstrecken. Burkhard Schnepel hat bereits über beide Kontinente gearbeitet. So hat er seine Doktorarbeit an der Universität Oxford über das Volk der Schiluk im Südsudan geschrieben, bevor er sich in seinen nächsten Feldforschungen und Projekten Ostindien zuwandte. Und jetzt also der übergreifende Ansatz der „Indian Ocean Studies“. Der Ozean gibt den Untersuchungsrahmen vor, doch um den Bewegungen auf ihm nachzugehen, müssen sich die Wissenschaftler auf einzelne Punkte konzentrieren und die Details ins Auge fassen: Kleine Inseln und Hafenstädte sind ein Schwerpunkt in dem Projekt. >





Der Ethnologe Burkhard Schnepel (ganz rechts) erforscht die Insel Mauritius als Hub, also als Knotenpunkt: Hier sammelt sich Wissen verschiedener Kulturen etwa über die Wirkung von Kräutern (links). Zuwanderer schufen eigene Traditionen wie den Tanz- und Musikstil Sega (rechts). Heute ist die Ebene Cybercity südlich der Hauptstadt Port Louis eine Schnittstelle für schnelle Glasfaserkabel (rechte Seite, Mitte).

Burkhard Schnepel beschäftigt sich mit einer Insel, die im Westen vor allem als Urlaubsziel wahrgenommen wird: Mauritius. Für seine Feldforschungen besucht der Wissenschaftler den Inselstaat seit Jahren regelmäßig, genauer gesagt: die Hauptinsel Mauritius und deren Haupt- und Hafenstadt Port Louis. Entscheidend ist dabei für ihn der Aspekt des wichtigen Knotenpunkts – „Hub“ ist die dafür übliche, aus dem Englischen entlehnte Bezeichnung.

Was aber macht eine Insel zu einem Hub? Ein wichtiger Faktor ist die Lage: Angefangen hat Mauritius als eine unbewohnte, aber für Seefahrer nützliche Insel im Nichts des Indischen Ozeans, auf der Strecke zwischen Ostafrika im Westen und Indien im Osten. Auch wenn die Insel auf Karten arabischer Seefahrer schon ab dem 10. Jahrhundert verzeichnet gewesen sein soll, waren die ersten Europäer, die Mauritius „entdeckten“, zu Anfang des 16. Jahrhunderts die Portugiesen. Hier konnten sie frische Nahrung an Bord ihrer Schiffe nehmen und Wasser auffüllen, der Besatzung ein bisschen Erholung gönnen und die Ausrüstung wieder auf Vordermann bringen.

Erst die Niederländer ließen sich 130 Jahre später als Kolonialherren nieder, später siedelten sich die Franzosen

an, noch später eroberten die Briten die Insel. Mit der Zeit wuchs die Bedeutung von Mauritius als Umschlagplatz: Es war Zwischenstation für Textilien und Gewürze aus Indien und für Porzellan aus China ebenso wie für Sklaven und Elfenbein aus Afrika, wichtig für die jeweiligen Ostindien-Kompanien der europäischen Kolonisatoren. Die Schiffe transportierten jedoch nicht nur Menschen und Waren über den Indischen Ozean. „Sie brachten auch Ideen mit, Sprachen, kulturelle und religiöse Einflüsse und bestimmte Vorstellungen“, sagt Burkhard Schnepel.

ZUCKERROHR WURDE EINST AUF DIE INSEL GESCHMUGGELT

Und das ist ein weiterer Grund, warum sich Mauritius zu einem Hub entwickelte: In den letzten knapp 300 Jahren kamen Menschen aus den verschiedensten Kulturen auf die Insel. Sie begründeten eine ungewöhnlich große Vielfalt auf engem Raum, Ethnologen wie Politiker bezeichnen dies gern als *unity in diversity*: Bis heute existieren verschiedene Religionen und Kulturen mehr oder weniger eigenständig nebeneinander. Sprachen und Dialekte aus Nord- und Südindien oder China sind auf der Insel ebenso zu hören wie – bei

offiziellen Anlässen – Französisch und Englisch. Hauptverständigungssprache der Mauritier untereinander jedoch ist Morisyen, eine ganz eigene Kreolsprache, die sich auf Basis des Französischen und der anderen hier miteinander in Kontakt getretenen Sprachen entwickelt hat. Bis heute ist die Vielsprachigkeit eine Art Standortvorteil des Eilands.

Nach Burkhard Schnepels Überzeugung zeichnen sich Hubs außerdem durch eine hohe Energie aus, sie verändern die Dinge, die sie weiterleiten, transformieren sie und werten sie auf. Der Ethnologe Schnepel kann dafür historische und aktuelle Beispiele geben: Bis Ende der 1960er-Jahre war das Hauptexportgut der Insel Zucker. Doch Zuckerrohrpflanzen kamen ursprünglich auf Mauritius gar nicht vor – sie waren von Südasien auf die Insel geschmuggelt worden. Nur aus diesem Grund konnte Mauritius überhaupt anfangen, Zucker auszuführen. Hinzu kommt: Hier wurden die ertragreichsten Sorten kultiviert und damit transformiert, bevor sie die Insel wieder verließen. Seit ihrer Unabhängigkeit im März 1968 hat die Insel einen beachtlichen wirtschaftlichen Wandel durchlaufen. Die traditionelle Auffassung, die Gesellschaft auf Mauritius sei durch



die seit Jahrhunderten betriebenen Zuckerrohrplantagenwirtschaft definiert, teilt der Hallenser Ethnologe nicht. „Mittlerweile versteht sich Mauritius selbst als ein Hub und vermarktet sich auch so. Nicht mehr nur im maritimen Sektoren, sondern davon ausgehend auch in anderen Bereichen“, sagt er.

Ein wichtiger Faktor des insularen Wirtschaftslebens ist mittlerweile die Textilverarbeitung: Stoffe aus Indien und Bangladesch werden hierher importiert. Förderlich ist dabei, dass zwei Drittel der Mauritier indischstämmig sind. Hilfreich ist auch, dass die Regierung ganz gezielt gute Rahmenbedingungen für die Weiterverarbeitung geschaffen hat – eine steuerlich extrem begünstigte Exporthandelszone. Das Geld für den Aufbau der Textilfabriken stammt überwiegend von reich gewordenen französischen bzw. französischstämmigen Zuckerbaronen – Franko-Mauritier stellen rund zwei Prozent der Bevölkerung. Dazu kommen Investitionen von außerhalb – wieder einmal übers Meer. In den 1970er-Jahren suchten Hongkong-Chinesen einen sicheren Hafen für ihr Geld abseits der Kronkolonie, da für 1997 deren Unabhängigkeit bevorstand. Auf Mauritius halfen ihnen die traditionellen Verbindungen zu Sino-Mauritiern – also Ein-

wohnern mit chinesischen Wurzeln, die ungefähr drei Prozent der Bevölkerung stellen.

Amerikanische und europäische Hersteller finden auf der Insel also gute Bedingungen und auch das notwendige Know-how vor, um hier auf hohem Niveau Textilien weiterverarbeiten zu lassen. So wird aus den importierten Stoffen Luxuskleidung namhafter internationaler Marken – gefertigt ausschließlich für den Export in den Westen. Die einheimischen Arbeitskräfte können sich die Textilien und Accessoires, die sie produzieren und veredeln, jedenfalls nicht leisten. Es sind oftmals indo-mauritische Frauen und Kreolinnen, also Nachfahrinnen afrikanischer Sklaven, aus den ärmsten Bevölkerungsschichten.

Auf seine traditionellen Stärken – gute Verflechtung und Kommunikation in viele verschiedene Richtungen – setzt Mauritius auch im sich schnell wandelnden Zeitalter der Digitalisierung. „Dort, wo jetzt die neue sogenannte Ebene Cybercity steht, waren im Jahr 2000 noch Zuckerrohrplantagen“, erzählt Schnepel. Heute führen einige der schnellsten Glasfaserkabel zu der kleinen Insel im Indischen Ozean. Der Bereich „International Communication Technology“ hat rund 12 000 Arbeitsplätze in den

letzten Jahren geschaffen, die Profilierung als „International Financial Service Hub“ seit Anfang der 1990er Jahre sogar rund 15 000 neue Jobs. Vor allem Inder nutzen den wichtigen Bankensektor des Landes für ihre Transaktionen und Geschäfte mit Afrika. Aber auch für europäische und amerikanische Firmen ist die Insel ein guter Ausgangspunkt für Geschäfte in beide Hauptrichtungen über das Meer. „Sicher gibt es Missstände, aber Mauritius ist seit der Unabhängigkeit eine Demokratie mit freier Presse und politischen Kontrollmechanismen“, erläutert der Ethnologe Burkhard Schnepel. So hat sich Mauritius auch im 21. Jahrhundert als temporärer Ankerplatz und Umschlaghafen für globale Geschäfte behauptet.

HAFENSTÄDTE ENTSTANDEN AUS DER VERNETZUNG

Von Mauritius 5500 Kilometer weiter Richtung Nordosten über die riesige Wasserfläche nach Südostasien: immer noch derselbe Ozean, jedoch eine andere Region, in die sich seit dem Herbst 2014 Mareike Pampus vertieft. Sie promoviert bei Burkhard Schnepel im Rahmen des Forschungsprojekts „Connectivity in Motion“. Aber ist es tatsächlich möglich, den riesigen Raum



des Indischen Ozeans als eine Einheit zu betrachten und unter dieser Prämisse zu erforschen?

„Man kann sich natürlich fragen, ob es nicht sinnvoller wäre, die einzelnen maritimen Regionen gesondert zu betrachten, denn rund um den Ozean kommen sehr viele unterschiedliche Sprachen, Kulturen, Staaten vor“, räumt der Ethnologe Burkhard Schnepel ein. Es gebe sogar Wissenschaftler, die aus diesem Grund davon abraten, von dem *einen* Indischen Ozean zu sprechen. Doch wer den Blick auf die Verknüpfungen und Verbindungen richtet, wen das Meer als eine von Menschen geschaffene Kontaktzone interessiert, der muss vom Meer aufs Land blicken. Vom Ozean aus auf unterschiedliche Küsten- und Kulturräume, an denen man anlanden kann. Es geht Burkhard Schnepel in seinem Forschungsansatz auch darum, in dieser „maritimen“ Dimension einen neuen Blickwinkel auf die angrenzenden Landflächen zu eröffnen.

Mareike Pampus hat ihren persönlichen Anknüpfungspunkt gefunden: Sie arbeitet über die Hafenstadt George Town auf der Insel Penang, heute ein Teil des Staates Malaysia. „In unserem Projekt sind Hafenstädte deshalb wichtig, weil sie oft durch Austausch und

Vernetzungen entstanden sind“, sagt sie. „Das Neue an unserem Ansatz ist, dass wir sie nicht so stark als Ausgangspunkt für Verbindungen sehen – das schon auch –, aber vor allem als Ergebnis von Vernetzungen.“

FÜNF MUSKATNÜSSE WAREN EIN GANZES HAUS WERT

Die Briten verstanden den Indischen Ozean als *mare liberum*, als freies Meer, das allen Zugang bietet und grade nicht aufgeteilt sein sollte in abgesteckte Zugehörigkeiten der Anrainer. Um sich in diesem auf Offenheit beruhenden wirtschaftlichen Wettkampf gut zu positionieren, sicherten sie sich im Osten des Indischen Ozeans strategisch wichtige Handelsplätze: Zum Beispiel siedelte sich Ende des 18. Jahrhunderts an der nordöstlichen Spitze der Insel Penang die britische Ostindien-Kompanie an: in Person des Kaufmanns und Seefahrers Francis Light. Er gründete dort mit George Town zunächst weniger eine Stadt als vielmehr einen Freihafen mit angeschlossener kleiner Siedlung, um hier am äußerst lukrativen Gewürzhandel teilzuhaben. „Für fünf Muskatnüsse konnte man sich zur damaligen Zeit ein Haus in London kaufen“, erzählt Mareike Pampus.

Die Insel Penang liegt am nördlichen Ende der Straße von Malakka, damals wie heute eine der meistbefahrenen Wasserstraßen der Welt. Bereits zu antiken Zeiten verband diese maritime Route China und Indien. Im 16. Jahrhundert kamen als erste Europäer die Portugiesen, wenig später Holländer, Franzosen und Briten, um sich ebenfalls in dieses gewachsene Austauschgeflecht hineinzubegeben und die Verbreitungs- und Transportwege für die kostbaren Güter Südasiens weiter nach Westen auszudehnen. In das bereits vorhandene Netzwerk fügten sie neue, eigene Anknüpfungspunkte ein – beispielsweise George Town.

Andere folgten: „Das Vorbild George Town lässt sich bis nach Singapur und sogar bis an die Küste Australiens verfolgen“, erklärt Doktorandin Mareike Pampus. Rund 600 Kilometer von George Town entfernt legte einige Jahrzehnte später, Anfang des 19. Jahrhunderts, ebenfalls ein Angestellter der britischen Ostindien-Kompanie eine weitere wichtige Hafenstadt an: Singapur. Stadtgründer Thomas Stamford Raffles war zuvor Generalgouverneur von George Town gewesen. Eine ähnliche historische Linie lässt sich von George Town bis nach Australien ziehen: Der Sohn des George-Town-Gründers Francis

George Town auf der malaysischen Insel Penang ist ein Schmelztiegel der Religionen: In der als „Street of Harmony“ bekannten Straße finden sich auf wenigen Hundert Metern unter anderem eine Moschee, ein Hindutempel und eine christliche Kirche (linke Seite, von links). Zusätzlich wird gelegentlich eine Statue der von Taoisten und Buddhisten verehrten Göttin der Barmherzigkeit, Kuan Yin, aufgestellt, um Spenden zu sammeln (rechts).



Light, William Light, der die ersten sechs Jahre seines Lebens in George Town verbrachte, gründete mit Adelaide eine weitere Hafenstadt am Indischen Ozean. „So bewegt sich die Vorstellung von einer Stadt über das Meer“, sagt Mareike Pampus.

Natürlich waren es nicht die Briten im Alleingang: In George Town siedelten sich mit den europäischen Kolonialherren vor allem Chinesen an; noch heute sind 80 Prozent der Einwohner von George Town chinesischstämmig. Aber sie kamen meistens nicht direkt aus China, sondern hatten vorher zum Beispiel in dem unweit gelegenen Handelszentrum Malakka oder aber in Indonesien gelebt, ganz ähnlich wie die hinzuziehenden Inder. Auch George Town ist wie so viele andere Kontaktorte am Indischen Ozean vielfältig in Sprache, Kultur und Religion. Auch hier findet sich wieder *unity in diversity*, die sich sprachlich bis heute hält und sich sogar in speziellen Begrifflichkeiten abbildet: Beispielsweise gehören zu den Bewohnern George Towns „Jawi Peranakan“ mit südindisch-malaiischen Vorfahren. Das Wort für „Kind“ (*anak*) steckt in dieser Bezeichnung. Ein über Jahrhunderte nachvollziehbares Heiratsmuster lässt sich ethnologisch so beschreiben: Einheimische Frauen be-

kommen Nachkommen mit Männern, die als Handelsleute aus fremden Regionen hinzuziehen.

Ein Sonderfall in George Town sind die „Baba-Nyonya“, im Englischen ist die Bezeichnung „Straits Chinese“ gebräuchlich. Diese besondere Gruppe geht auf eine Umstrukturierung der britischen Kolonialverwaltung zurück: Im Jahre 1826 fassten die Briten ihre drei Kolonialbesitzungen an der Wasserstraße von Malakka – George Town, Malakka und Singapur – zu den „Siedlungen entlang der Wasserstraße“ zusammen, den „Straits Settlements“.

KULTURELLE VIELFALT GILT ALS UNESCO-WELTERBE

Chinesen, die in diesen Straits Settlements geboren waren und sich mit dieser Herkunft sehr stark identifizierten, hatten oft eine britische Schulbildung durchlaufen und waren britisch sozialisiert. Das prädestinierte sie dafür, als Geschäftsleute besonders erfolgreich mit den Engländern der Ostindien-Kompanie zu kooperieren. „Auch wenn sie aussahen wie Chinesen, waren sie doch in hohem Maße westlich geprägt“, erzählt die Ethnologin Mareike Pampus. Noch heute sind die Baba-Nyonya eine eigene Gruppe inner-

halb der Bevölkerung George Towns, mit einer eigenen kulturellen Identität und Kreolsprache.

Wer bin ich? Wer waren meine Vorfahren, woher und wie sind sie hierhergekommen? Wie sehe ich mich selbst und meine kulturelle Prägung? Diesen und ähnlichen Fragen geht Mareike Pampus bei ihren Forschungsaufenthalten in George Town nach, nun zum zweiten Mal für sechs Monate. Sie versucht, mit den Einheimischen ins Gespräch zu kommen, führt lange Interviews, manchmal mehrfach mit denselben Personen. Es geht weniger um Abfrage als vielmehr um das Erzählen lassen individueller Geschichten. Ziel ist ein genauer Blick auf die ganz spezielle Situation, auf die Menschen in einer Hafenstadt im Indischen Ozean mit ihrem kulturellen und historischen Erbe.

Die Auseinandersetzung mit den vielgestaltigen Wurzeln und Verbindungen erlebt im Raum des Indischen Ozeans gerade einen Aufschwung. George Town ist 2008 ebenso wie Malakka in die Weltkulturerbe-Liste der UNESCO aufgenommen worden als herausragendes Zeugnis der mehr als 500 Jahre alten Handels- und Kulturverflechtungen, die sich entlang der Wasserstraße von Malakka entwickelt haben. Die vielfältigen Einflüsse aus Asien



Für ihre Promotion führt Mareike Pampus (großes Bild, links) im malaysischen George Town Gespräche mit Einwohnern unterschiedlicher Herkunft, um deren jeweilige kulturelle Prägung zu erforschen. Eine wichtige Gruppierung sind die „Baba-Nyonya“, Nachkommen chinesischer Einwanderer, die ihre eigenen Traditionen pflegen (kleines Bild).

und Europa hätten zu einem einzigartigen multikulturellen Erbe in diesen Städten beigetragen, so die Begründung der UNESCO. Reiseführer von George Town beschreiben buddhistische Tempel neben hinduistischen Schreinen, Kirchen neben Moscheen.

Auf Mauritius ist Burkhard Schnepel gerade bei einem Forschungsaufenthalt im Frühling einem inseltypischen Musikstil und Tanz nachgegangen: dem Sega. Tourismus-Anbieter bewerben ihn gern als Ausdruck des heiteren Lebensgefühls auf Mauritius. Ursprünglich auf die Insel gebracht haben ihn afrikanische Sklaven, die im 18. Jahrhundert auf den Zuckerrohrplantagen schufteten. Wurde er früher nur heimlich und hauptsächlich von kreolischen Mauritiern gesungen und getanzt, identifizieren sich heute alle Insulaner, also auch die Franko-, Sino-, und Indo-Mauritier, übergreifend mit ihm. Mehr als 20 verschiedene Ausprägungen haben sich entwickelt, die Burkhard Schnepel ethnologisch erforscht: moderne ebenso wie traditionelle Varianten, die auch in der Schule unterrichtet werden, Mischformen wie Seggae (aus Sega und Reggae) oder auch jene Variante, die als

landestypisch gilt: Sega tipik oder Sega typique. Dieser traditionellere Sega ist vor Kurzem von der UNESCO zum Teil des immateriellen Weltkulturerbes erklärt worden – eine Tradition, die der Austausch zwischen und das Zusammenleben von Menschen im Indischen Ozean hervorgebracht haben.

Auch wenn der drittgrößte Ozean der Welt überwiegend auf der Südhalbkugel liegt und, von Deutschland aus gesehen, weit weg ist – Burkhard Schnepel hat den Eindruck, dass die Region auch hierzulande verstärkt ins Bewusstsein rückt. Zumindest die deutsche Politik zeigt ein zunehmendes Interesse. „Für

Deutschland und Europa ist es höchste Zeit, die Region des Indischen Ozeans genauer in den Blick zu nehmen“, befand der deutsche Außenminister Frank-Walter Steinmeier im Juni 2015 auf einer von ihm organisierten Konferenz in Berlin. Das Tagungsthema lautete: „The Indian Ocean – A Maritime Region on the Rise“. Gute Zeiten also für den Ethnologen Burkhard Schnepel und sein Team am Max-Planck-Institut in Halle, um die riesige Region im Aufwind genauer in den Blick zu nehmen und ihr Forschungsgebiet, die „Indian Ocean Studies“, in der deutschen Wissenschaftslandschaft zu verankern. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Betrachtet man den Indischen Ozean als Einheit, lassen sich sogenannte Hubs identifizieren: Orte, die als Knotenpunkte unterschiedliche Anrainer und deren Kulturen verbinden.
- Kennzeichnend für einen Hub sind die Lage – etwa an einem Kreuzungspunkt wichtiger Schifffahrtsrouten –, eine große Vielfalt an Sprachen und Kulturen sowie die Eigenschaft, Waren vor dem Weiterleiten zu transformieren und aufzuwerten.
- Die Hallenser Wissenschaftler erforschen als Beispiele unter anderem die Insel Mauritius und die malaysische Hafenstadt George Town.

Für Forscher, Entdecker, Wissenschaftler
– und solche, die es werden wollen:

Junge Wissenschaft



Das einzige europäische Wissenschaftsmagazin mit begutachteten Beiträgen junger Nachwuchsforscher.

Wissenschaftliche Erstveröffentlichungen und das Neueste aus Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik.

Nur im Abo. Viermal im Jahr News aus Forschung und Technik, Veranstaltungen, Porträts, Studien- und Berufsprofile.

Vorteilsabo sichern!

abo@verlag-jungewissenschaft.de

Stichwort: „Vorteilsabo“

Leseprobe anfordern!

leseprobe@verlag-jungewissenschaft.de
oder per Fax 0211 / 74 95 64-29

Vorteilsabo
nur **20,-€***

für Schüler, Studenten, Referendare und Lehrer
(4 Ausgaben für 20,00 EUR statt 30,00 EUR)*
*zzgl. Versandkosten

www.verlag-jungewissenschaft.de

Kohle – flüssig gemacht

Im Jahr 1925 entdeckten **Franz Fischer** und **Hans Tropsch** am **Kaiser-Wilhelm-Institut für Kohlenforschung** in Mülheim an der Ruhr, wie man Kohle in Benzin verwandelt. Heute erlebt die Fischer-Tropsch-Synthese eine Renaissance, denn sie veredelt längst nicht nur Kohle. Auch Erdgas, Biomasse und sogar Hausmüll lassen sich damit zur Treibstoffherzeugung nutzen.

TEXT **ELKE MAIER**

Schwindendes Erdöl macht erfindetisch. Mittlerweile schaffen es Chemiker, die unterschiedlichsten kohlenstoffhaltigen Rohstoffe in hochwertige Flüssigkraftstoffe zu verwandeln. Manche Fluggesellschaften experimentieren sogar mit Kerosin aus Haushaltsabfällen. Die Methode, mit der die Umwandlung gelingt, ist dabei weder ein Werk der Alchemie, noch ist sie neu. Sie wurde vor mehr als 90 Jahren am Kaiser-Wilhelm-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr entwickelt.

Das Mülheimer Institut öffnete am 27. Juli 1914 seine Pforten. Erklär-

tes Ziel war die „Vermehrung des inneren Wertes der Kohle“. Erster Direktor wurde Franz Fischer – ein Mann, der als „erfinderischer Kopf“ und „sehr gewandter Experimentator“ galt. Fischer hatte Chemie studiert und nach nur vier Semestern mit 22 Jahren promoviert. Als er den Posten in Mülheim annahm, war er 36 Jahre alt und hatte in der Forschung bereits eine steile Karriere hinter sich.

Anfangs ging es am Institut vor allem darum, die deutsche Kriegswirtschaft zu unterstützen, etwa durch die Gewinnung von Treibstoffen für Automobile, Panzer und Flugzeuge. Erdöl war Mangelware, Kohle gab es dagegen reichlich. Sie musste nur verflüssigt werden. Chemisch gesehen, waren dazu folgende Schritte notwendig: Zunächst mussten die Verbindungen zwischen den Kohlenwasserstoffmolekülen aufgebrochen werden, die der Kohle ihre Festigkeit verleihen. Anschließend galt es, daraus die Kohlenwasserstoffketten des flüssigen Kraftstoffs zusammenzusetzen.

Der deutsche Chemiker Friedrich Bergius hatte bereits im Jahr 1913 einen Weg gefunden, der ihm 1931 sogar den Nobelpreis bescherte. Das Bergius-Verfahren hat allerdings gravierende Nachteile: Zum einen kann es nur geologisch junge Kohlenarten, etwa Braunkohlen, verflüssigen, nicht aber die geologisch älteren, energiereicheren Steinkohlen. Zum anderen funktioniert die Methode nur unter enormem Druck, was für technische Probleme sorgt.

Franz Fischer schwebte daher eine „Synthese von Ölen aus Gasen“ vor. In der Theorie klang alles ganz einfach: In einem zweistufigen Prozess wollte er zunächst Kohlenstaub mit Wasser-



Packten die Kohle in den Tank: Franz Fischer (links) und Hans Tropsch.

dampf und Sauerstoff erhitzen, um alle Kohlenstoffverbindungen zu knacken und ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff zu erzeugen – das sogenannte Synthesegas. Im zweiten Schritt sollte dieses Gas über einen Katalysator geleitet werden. An dessen Oberfläche würden sich die Moleküle zu komplexen Kohlenwasserstoffen zusammenfinden.

Wie so oft steckte aber auch hier der Teufel im Detail – genauer: im Katalysator. Dessen Aufgabe war es, die ansonsten viel zu träge ablaufende Reaktion anzukurbeln und außerdem dafür zu sorgen, dass die ge-

wünschten Endprodukte herauskamen. Die Fahndung nach einem geeigneten Material glich der sprichwörtlichen Suche nach der Nadel im Heuhaufen.

Anfang der 1920er-Jahre wurden die Experimente zur Gassynthese ausgebaut. Mit von der Partie war Hans Tropsch, laut einem Kollegen ein „überdurchschnittlich tüchtiger“ Chemiker und „Meister im Gebrauch des Rechenschiebers bei schwierigen Ausrechnungen“. Er war von Franz Fischer angeworben und mit der Leitung der Abteilung „Gaskatalysen“ betraut worden.

In speziellen Hochdruckapparaturen nahmen die Wissenschaftler zahllose Reihenuntersuchungen vor. Dabei drehten sie an mehreren Rädchen gleichzeitig und variierten nicht nur den Katalysator, sondern auch Temperatur und Druck. Denn alles zusammen bestimmte, was bei der Reaktion herauskam.

Monate später zeigte sich ein erster Lichtblick. In den Apparaturen fanden die Forscher Reaktionsgemische, die unter anderem Alkohole, Aldehyde und Ketone enthielten. Die Chemiker bezeichneten die Mixtur einfachheitshalber als „Synthol“. Als Katalysator dienten diesmal Eisenfeilspäne, welche die Forscher mit Kalium- oder Rubidiumhydroxid imprägniert hatten.

Institutsmitarbeiter Carl Zerbe machte mit dem mühsam und nur in winzigen Mengen gewonnenen Motorbetriebsstoff erste Fahrversuche auf einem 4-PS-NSU-Motorrad, Modell 1922. „Synthol war allerdings noch kein hochwertiger Kraftstoff“, erklärt Matthias Haenel, emeritierter Professor am Mülheimer Institut. „Es

enthielt noch viele sauerstoffhaltige Verbindungen, die zu Korrosion am Motor führen.“

Die Suche ging also weiter und stellte die Geduld der Forscher auf die Probe. Einige Katalysatoren verloren schon nach kurzer Zeit ihre Aktivität, andere lieferten als Endprodukt nur Wasser. Manche Katalysatorfüllung mussten die Chemiker wegen der massiven Kohlenstoffabscheidung mit Hammer und Meißel wieder aus den Rohren klopfen.

Eine Wende bahnte sich schließlich Anfang des Jahres 1925 an. In Mülheim traf ein Magazin mit dem Artikel eines gewissen Georges Patart ein. Der bekannte Fachkollege aus Frankreich beschrieb darin, wie sich mithilfe eines Zinkoxidkatalysators Methanol – eine einfache Verbindung mit einem Kohlenstoffatom – synthetisieren lässt. Sofort machten sich die Mülheimer Wissenschaftler daran, das Versuchsprotokoll nachzukochen. Und gleich im ersten Anlauf waren sie erfolgreich. Die Forscher staunten über die „glatte, einheitliche Bildung von Methanol an dem nahezu unverändert bleibenden weißen Zinkoxid“.

GEO, Ausgabe 3/1983



Etwa vom Jahre 2020 an – also in nur 40 Jahren – wird die Kohle die Hauptrolle übernehmen und dem Erdöl nur noch eine Chargenrolle zufallen.

Von da an hielten sie sich an den Patart'schen Katalysator. Ließen sich damit auch langkettige Kohlenwasserstoffe herstellen? Die Forscher experimentierten mit Zinkoxid unter Zugabe weiterer Stoffe, die sie für geeignet hielten. Dass sie damit richtiglagen, zeigte sich am 25. Mai 1925: An jenem Tag gelang es erstmals, bei Normaldruck höhere Kohlenwasserstoffe zu synthetisieren. Als Stein der Weisen entpuppte sich ein Gemisch aus Eisen- und Zinkoxid. Noch besser eignen sich allerdings Eisen- und Kobaltkatalysatoren, wie sich später zeigen sollte. Am 20. Juli 1925 meldeten Franz Fischer und Hans Tropsch ihre Methode zum Patent an.

Die erste Industrieanlage, die nach dem Mülheimer Verfahren arbeitete, ging Mitte der 1930er-Jahre in Oberhausen in Betrieb. Anfang der 1940er-Jahre stellten neun deutsche Produktionsstätten jährlich insgesamt rund 600 000 Tonnen flüssige Kohlenwasserstoffe her. Die Primärprodukte der Fischer-Tropsch-Synthese dienten dabei längst nicht nur der Treibstoffgewinnung. Man konnte sie etwa auch zu Schmierfetten, Seife oder Waschmittel weiterverarbeiten. Sogar künstliche Butter ließ sich daraus zaubern.

Erfinder des synthetischen Speisefetts war der Chemiker Arthur Imhausen. Im Zweiten Weltkrieg wurde auf dem Afrikafeldzug und in den U-Booten fast nur Imhausens Fett gegessen. Es war bekömmlich, wurde nicht ranzig und soll gar nicht übel geschmeckt haben. Experten bestätigten, dass der tägliche Genuss von bis zu 100 Gramm „harmlos ist und keinerlei Reizerscheinungen oder Störungen hervorruft“. So wurde die Kreation als erstes synthetisches Nahrungsmittel für die menschliche Ernährung freigegeben.

Nach dem Krieg waren die Fischer-Tropsch-Produkte und damit auch die künstliche Butter jedoch bald wieder vom Tisch. Mit



Siegeszug des Synthesebenzins: Vor der Ruhrchemie AG in Oberhausen-Holten warten Waggons mit Fischer-Tropsch-Kraftstoffen auf die Abfahrt.

ihren Pendants auf Erdölbasis konnten die synthetischen Kraftstoffe aus Kohle nicht mithalten. Die Anlagen wurden demontiert. Erst die Ölkrise in den 1970er-Jahren verhalf dem Verfahren in Deutschland zu einem kurzen Revival.

Franz Fischer und Hans Tropsch erlebten die wechselvolle Zukunft ihrer Erfindung nicht mehr. Fischer zog im Ruhestand nach München, wo er im Bombenkrieg zweimal seinen gesamten Besitz verlor. Er litt an Unterernährung und starb als 70-jähriger im Hungerjahr 1947. Tropsch ging nach seiner Mülheimer Zeit zunächst nach Prag und später nach Chicago. Krankheitsbedingt kehrte er 1935 nach Deutschland zurück, wo er kurz darauf mit nur 45 Jahren starb.

Die Entwicklung der beiden Chemiker machte nach dem Krieg zunächst in Südafrika Furore. Wegen seiner Apartheidspolitik war das Land mit Sanktionen belegt und von Erdöllieferungen ausgeschlossen. Dafür gab es dort Kohle en masse. Die Regierung setzte daher auf das Fischer-Tropsch-Verfahren und gründete im Jahr 1950 einen Konzern, der mittlerweile als South African Synthetic Oil Limited (Sasol) firmiert. Noch heute liefert das Unternehmen rund ein Drittel der am Kap verkauften Kraftstoffe. Zusätzlich verarbeitet es heute neben Kohle auch Erdgas.

Mittlerweile erlebt die Methode jedoch auch in anderen Ländern eine Renaissance. „Der große Vorteil ist, dass sich prinzipiell jedes kohlenstoffhaltige Ausgangsmaterial dafür eignet, also auch Erdgas, Biomasse und sogar Hausmüll“, sagt Ferdi Schüth, Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung. „Das Verfahren liefert außerdem sehr reine, schwefelfreie Kraftstoffe.“

Das macht man sich etwa in Katar zunutze, wo Ende 2011 Shell Pearl GTL in Betrieb ging, die weltgrößte Gas-to-Liquids (GtL)-Anlage. Sie verwandelt billiges Erdgas in hochwertige Flüssigtreibstoffe. Die Jahresproduktion liegt bei rund 5,6 Millionen Tonnen – mehr als neunmal so viel, wie Anfang der 1940er-Jahre in ganz Deutschland produziert wurde. Der synthetische Dieselmotorkraftstoff aus der Wüste ist auch an Tankstellen hierzulande zu haben.

In Deutschland wird sich der Bau von Fischer-Tropsch-Anlagen dagegen erst dann wieder lohnen, wenn der Ölpreis steigt: „Bei 40 Dollar pro Barrel ist die Produktion momentan unrentabel“, sagt Schüth. Doch auch wenn sich bisher immer wieder neue Quellen auftun – irgendwann werden die Erdölvorräte zur Neige gehen. Dann könnte die Mülheimer Methode auch bei uns wiederbelebt werden. Ob auch Imhausens Brotaufstrich zu neuen Ehren kommt, ist allerdings fraglich.



Demokratie muss Schule machen

Lothar Krappmann, Christian Petry (Hrsg.), **Worauf Kinder und Jugendliche ein Recht haben**, Kinderrechte, Demokratie und Schule: ein Manifest

304 Seiten, Debus Pädagogik Verlag, Schwalbach 2016, 29,90 Euro

Nach der Kinderrechtskonvention der Vereinten Nationen, die in Deutschland seit 1992 geltendes Recht ist, stehen jedem Kind die „Vorbereitung auf ein verantwortungsbewusstes Leben“ und die „Förderung seiner Entwicklung in größtmöglichem Umfang“ zu. Kaum einer dürfte diesen grundsätzlichen Maximen widersprechen. Aber kaum einer begreift sie so konkret als Aufforderung für eine Reform unserer Schulen wie der Soziologe Lothar Krappmann, der bis 2001 am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung tätig war. Nun hat er, zusammen mit dem Lehrer und Geschäftsführer der Stiftungs- und Fördergemeinschaft Modellprojekte, Christian Petry, ein Buch herausgebracht, welches er selbst als „Manifest“ bezeichnet, Kinderrechte und Demokratie in der Schule wirklich zu verankern.

In einem 40-seitigen Plädoyer – dem eigentlichen Manifest – belegt Krappmann anfangs sehr temperamentvoll, dass die Kinderrechtskonvention als Richtschnur für Reformen der Institution Schule durchaus praxistauglich ist. „Dass Kinder eine ihren Grundrechten und ihrer Lebensplanung und -gestaltung angemessene Leistung von der Schule einfordern können, geht bereits daraus hervor, dass sie alle ohne Ausnahme der Schulpflicht unterworfen sind“, so Krappmann.

Heranwachsende müssten dort von Erwachsenen, mit denen sie eine Beziehung gegenseitigen Respekts verbindet, und im Team mit Gleichaltrigen, mit denen sie nicht allein aus Praktikabilitätsgründen in

Lerngruppen zusammengefasst werden, Fähigkeiten für eine Zukunft entwickeln, deren Gestalt noch ungewiss ist. Zugleich müssten sie lernen, Teil unserer demokratischen Gesellschaft zu werden.

Lothar Krappmann genügt es nicht, wenn Schülerinnen und Schüler allein tradierte Sachinformationen übermittelt bekommen und ihr Recht sich auf den Schutz vor vielerlei Gefahren beschränkt. Wie man ein guter Mitmensch und engagierter Bürger sein kann, darf aus seiner Sicht nicht allein in Nebenfächern wie Politische Bildung und Religion behandelt, sondern muss – ergänzend zur Familie – im sozialen Raum Schule erfahren werden. Kinder bräuchten dort generell eine „Kultur des Aufwachsens“, die von Anerkennung, Gehör, Meinungsfreiheit und Mitverantwortung geprägt ist.

Vor allem bei wichtigen Entscheidungen dürfe die Meinung der Kinder nicht übergangen werden: „Schulinnenpolitisch“ sollten Klassenräte und Schülerparlamente gestärkt werden, „schulaußenpolitisch“ bedürfe es einer Öffnung der Schulen gegenüber dem Gemeinwesen. Selbstverständlich müssten Heranwachsende vieles noch lernen, deshalb haben sie auch ein Recht darauf, dass Erwachsene sie an ihrem Erfahrungsvorsprung teilhaben lassen.

Im größeren Teil des Buchs zeigen namhafte Bildungsexperten, engagierte Lehrer, Wissenschaftler und Stiftungsmitarbeiter zunächst, was in vielen Schulen heute im Argen liegt. In den folgenden Kapiteln erläutern sie, welche pädagogischen

Aufgaben zu bearbeiten sind, wo man praktisch ansetzen kann und wie Partnerschaften in die Gesellschaft hinein für die Entwicklung einer kindergerechten Schule von Nutzen sind.

So sieht Wolfgang Edelstein, wie Krappmann Emeritus des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung, das „rigide Gerüst eines kleinschrittigen Stundenplans mit Segmenten von jeweils 45 Minuten“ als prinzipielles Hindernis für soziale Lernprozesse. Vor allem aber prangert er die frühe Selektion nach der 4. Grundschulklasse als Verletzung des Kindeswohls an. Der Psychologe Hacı-Halil Uslucan von der Universität Duisburg-Essen plädiert dafür, das Kapital der Mehrsprachigkeit nicht zu verschenken und auch Schülern mit (noch) schlechten Deutschkenntnissen verantwortungsvolle Aufgaben zu übertragen – um die Grundschule endlich als Übungsfeld gelingender Integration für Kinder mit einer Zuwanderungsgeschichte zu nutzen.

In einem sehr inspirierenden Vorwort arbeitet zuvor Gesine Schwan heraus, dass Kinderrechte alles andere als harmlos sind. In ihren Augen beinhalten sie vor allem ein Recht auf Nonkonformismus, auf eigenständiges Denken und damit auf eine Erziehung, die aus Kindern mehr als „marktkonforme Subjekte“ macht. So gesehen sind Kinderrechte geradezu subversiv: Es steht Kindern und Jugendlichen zu, in der Schule das Rüstzeug für die Gestaltung dessen zu bekommen, was die antiken Philosophen als gutes Leben bezeichneten.

Adelheid Müller-Lissner



Der Affe mit dem Wahnsinnsgen

Elizabeth Kolbert, **Das sechste Sterben**, Wie der Mensch Naturgeschichte schreibt

312 Seiten, Suhrkamp Verlag, Berlin 2015, 24,95 Euro

Die Essenz des Weißwangen-Kleidervogels passt in ein kleines Plastikröhrchen. Die letzten Zellen, die von dieser wohl im Jahr 2004 ausgestorbenen Art noch existieren, lagern bei minus 195 Grad Celsius im „Frozen Zoo“ nördlich von San Diego. Von den meisten anderen der rund tausend Spezies, die dort ebenfalls konserviert sind, gibt es zurzeit noch lebende Vertreter – möglicherweise aber nicht mehr lange.

In jüngster Zeit ist die Aussterberate von Pflanzen und Tieren sprunghaft angestiegen. Experten schließen daraus, dass wir uns bereits mitten in einem Massenaussterben befinden – dem sechsten in der Geschichte unseres Planeten. Doch anders als bei den fünf großen Sterben der Vergangenheit ist der derzeitige Artenschwund nicht die Folge von Naturereignissen wie Eiszeiten, Vulkanausbrüchen oder Meteoriteneinschlägen. Diesmal ist er menschengemacht.

Von der derzeitigen Zerstörung der Biosphäre und der Rolle, die der Mensch dabei spielt, handelt das Buch der Wissenschaftsjournalistin Elizabeth Kolbert. Die Autorin schrieb früher für die New York Times, seit 1999 arbeitet sie für das Magazin THE NEW YORKER. Das *Sechste Sterben* wurde im vergangenen Jahr mit dem Pulitzerpreis in der Kategorie Sachbuch ausgezeichnet.

Den ersten Teil ihres Werks widmet Kolbert vor allem den großen Aussterbereignissen der Vergangenheit und der Geschichte ihrer Erforschung. Den größten Kahlschlag in der Lebewelt verursachte dabei nicht der Meteorit, der gegen Ende der

Kreidezeit vor etwa 65 Millionen Jahren den Dinosauriern den Garaus machte. Viel verheerender war das Artensterben am Ende des Perms vor rund 250 Millionen Jahren, bei dem beinahe alles vielzellige Leben ausgelöscht worden wäre. Ursache war wahrscheinlich ein Klimawandel. Kolbert erzählt auch von dem französischen Naturforscher Georges Cuvier, der Mitte des 18. Jahrhunderts anhand von Fossilien als Erster überhaupt erkannte, dass Arten aussterben können und dass es eine Welt gab, „die der unseren vorherging“.

Im zweiten Teil des Buchs wendet sich Elizabeth Kolbert dem aktuellen Geschehen zu. Dazu reist sie zu den Schauplätzen des Artensterbens und begleitet Forscher bei der Freilandarbeit. Zunächst geht es nach Panama, wo Zoologen dem rätselhaften Amphibiensterben auf der Spur sind. Der kleine, goldgelbe Stummelfußfrosch gilt dort als Glücksbringer, und sein Konterfei war schon auf Lotterielosen zu finden.

Dabei hat das kleine Tier selbst ein schlechtes Los gezogen: Es überlebt nur noch in den desinfizierten Terrarien eines Artenschutzzentrums, in der Natur ist es vor Kurzem ausgestorben. Schuld ist der pathogene Chytridpilz, welcher sich im Schlepptau des Menschen rund um den Globus ausgebreitet hat und Amphibien zu der am stärksten bedrohten Wirbeltiergruppe der Welt macht.

Auf der Suche nach Hinweisen für das sechste Sterben und seine Ursachen unternimmt die Autorin weite Reisen – nach Island und Italien, nach Peru und Australi-

en. Doch auch gleich vor ihrer eigenen Haustür in der Nähe der US-Stadt Albany wird Kolbert fündig: In einer Höhle stößt sie gemeinsam mit Wildbiologen auf Tausende von Fledermauskadavern. Diese weisen Spuren des Weißnasen-Syndroms auf, einer tödlichen Krankheit, die ebenfalls von einem eingeschleppten Pilz verursacht wird.

Nicht zuletzt stattet Kolbert auch dem Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig einen Besuch ab. Zwar vermutet sie dort keinen Hotspot des Artensterbens, doch hat Institutsdirektor Svante Pääbo vielleicht eine Erklärung dafür parat, was *Homo sapiens* so ungemein erfolgreich und expansionsfreudig macht. Möglicherweise, so Pääbo, sei es nur „irgendeine ungewöhnliche Mutation“, die es erlaubt hat, dass Menschen das gesamte Ökosystem der Erde auf den Kopf stellen. Mittels Genomanalyse ist der Paläogenetiker dem „Wahnsinnsgen“ auf der Spur.

Über das Thema Artensterben ist viel geschrieben worden, trotzdem stellen sich beim Lesen von Kolberts Buch keine Ermüdungserscheinungen ein. Mit ihrer Mischung aus Reportage, Erzählung und sachlicher Hintergrundinformation schafft es die Autorin, das Thema fesselnd zu verpacken und gleichzeitig eine Fülle von Information zu vermitteln. Sie schreibt nüchtern, klar und verständlich, teils mit trockenem Humor und ohne zu belehren – was das Buch umso eindringlicher macht.

Elke Maier



Vom freien Willen

Julian Baggini, **Ich denke, also will ich**, Eine Philosophie des freien Willens

272 Seiten, dtv, München 2016, 20 Euro

Einer der größten und schönsten Streits zwischen verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen ist seit vielen Jahren jener um die menschliche Willensfreiheit. Stark vereinfacht sehen die zwei oppositionellen Lager so aus: Das eine geht davon aus, dass der Mensch durchaus freie Entscheidungen treffen kann, oftmals aufgrund eines komplexen Zusammenspiels von Reflexionen, Moral und manchmal auch dem Metaphysischen. Vertreter des anderen Lagers finden, wir Menschen sind von Grund auf determiniert, weil jede unserer Handlungen physische Ursachen in Gehirn und Körper hat.

In die äußerst leidenschaftlich geführte Diskussion rund um die Willensfreiheit schaltet sich nun der britische Philosoph Julian Baggini mit seinem aktuellen Buch *Ich denke, also will ich* ein. Für den Autor geht es beim freien Willen zunächst nicht um etwas Absolutes. Stattdessen präsentiert er den freien Willen als graduell. Das hängt auch damit zusammen, dass Baggini davon ausgeht, dass das Konzept eines freien Willens durchaus mit den Ergebnissen der Naturwissenschaften vereinbar ist. Denn auch für ihn als Philosophen sei klar, dass die Willensfreiheit natürlich in einer Bezie-

hung zu neuronalen Ereignissen, der Genetik und den Umwelteinflüssen steht.

Der freie Wille äußere sich vor allem als „freie Wahl“ im Sinne einer bewussten Wahl oder einer Wahl, „die jederzeit hätte auch anders ausfallen können“. Frei sein heiße außerdem, „dass unsere Entscheidungen, Handlungen, Überzeugungen und Werte unsere eigenen sind“. Es sei aber gerade „nicht das Vermögen [...], sein Leben und seine Entscheidungen von einem absoluten Nullpunkt aus ständig neu zu setzen“. Als ein Beispiel bringt Baggini den Heiratsantrag: In der Entscheidung für oder gegen den Antrag seien wir aufgrund unserer komplexen Wertvorstellungen und individuellen Prägungen nicht völlig frei, aber wir würden sie im Normalfall frei von Zwang treffen.

Julian Baggini will darüber hinaus zeigen, dass eine „absolute Verantwortlichkeit“ und der aktuelle Begriff der Freiheit, „die immer und überall die Wahl haben“ wolle, nicht erstrebenswert sind. Die „reale Freiheit“ sei wertvoll genug – und könne überhaupt nur in Verbindung mit politischer Freiheit Entfaltung erfahren. Baggini beleuchtet damit einen wichtigen Aspekt, der in der Debatte um die Willensfreiheit bislang eher nachrangig ist: Nicht

nur, dass wir in freien politischen Strukturen unseren freien Willen frei ausüben können; auch fördert politische Freiheit erst die Fähigkeit zum kritischen Denken.

In diesem Punkt ist Bagginis Studie wirklich innovativ und relevant. Auch sein Insistieren darauf, dass wir den Menschen als komplexes Wesen sehen, das eben nicht abgekoppelt durch sein Gehirn, seine körperlichen Prozesse oder seinen Geist gesteuert wird, ist ein durchaus attraktiver Debattenbeitrag. Sein genereller Versuch hingegen, auf eine Art Überwindung beider Diskussionspole – Determinismus und absolute Willensfreiheit – hinzuwirken, erscheint insgesamt eher schwammig.

Klar ist Bagginis Wissenschaftskritik. So lässt er sich unter anderem über die Methodik und das Forschungsinteresse der Neurowissenschaftler/innen aus: „Wenn Sie nach neuronalen Ursachen von Handlungen suchen, dann werden Sie auch nichts anderes finden als neuronale Ursachen.“ Aber auch an der eigenen Disziplin, insbesondere an der analytischen Philosophie, hat Baggini einiges auszusetzen. Vor allem ruft er grundsätzlich zu einer größeren geistigen Beweglichkeit in der Debatte über (Willens-)Freiheit auf.

Anne-Kathrin Weber

Weitere Empfehlungen

- Fred Pearce, **Die neuen Wilden**, Wie es mit fremden Tieren und Pflanzen gelingt, die Natur zu retten, 320 Seiten, Oekom Verlag, München 2016, 22,95 Euro
- Marc-Denis Weitze, Wolfgang M. Heckl, **Wissenschaftskommunikation**, Schlüsselideen, Akteure, Fallbeispiele, 308 Seiten, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 2016, 14,99 Euro

Standorte

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

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Impressum

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

Redaktionsanschrift

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

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung

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

Redaktion

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

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

Gestaltung

Julia Kessler, Sandra Koch
Voßstraße 9
81543 München
Telefon: 089 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 85 000 Exemplare (**MaxPlanckResearch**: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in **MaxPlanckForschung** vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der **Max-Planck-Gesellschaft** und ihrer Organe interpretiert werden.

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 83 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 22 200 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6 000 fest angestellte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2016 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