

Ausgabe 03 | 2022

MAX PLANCK

Forschung

MOLEKULARBIOLOGIE

Ein Kopierer fürs Erbgut

ASTRONOMIE

Das Universum in neuem Licht

BIOGEOCHEMIE

Die überdüngte Erde



GEHEN ODER BLEIBEN?

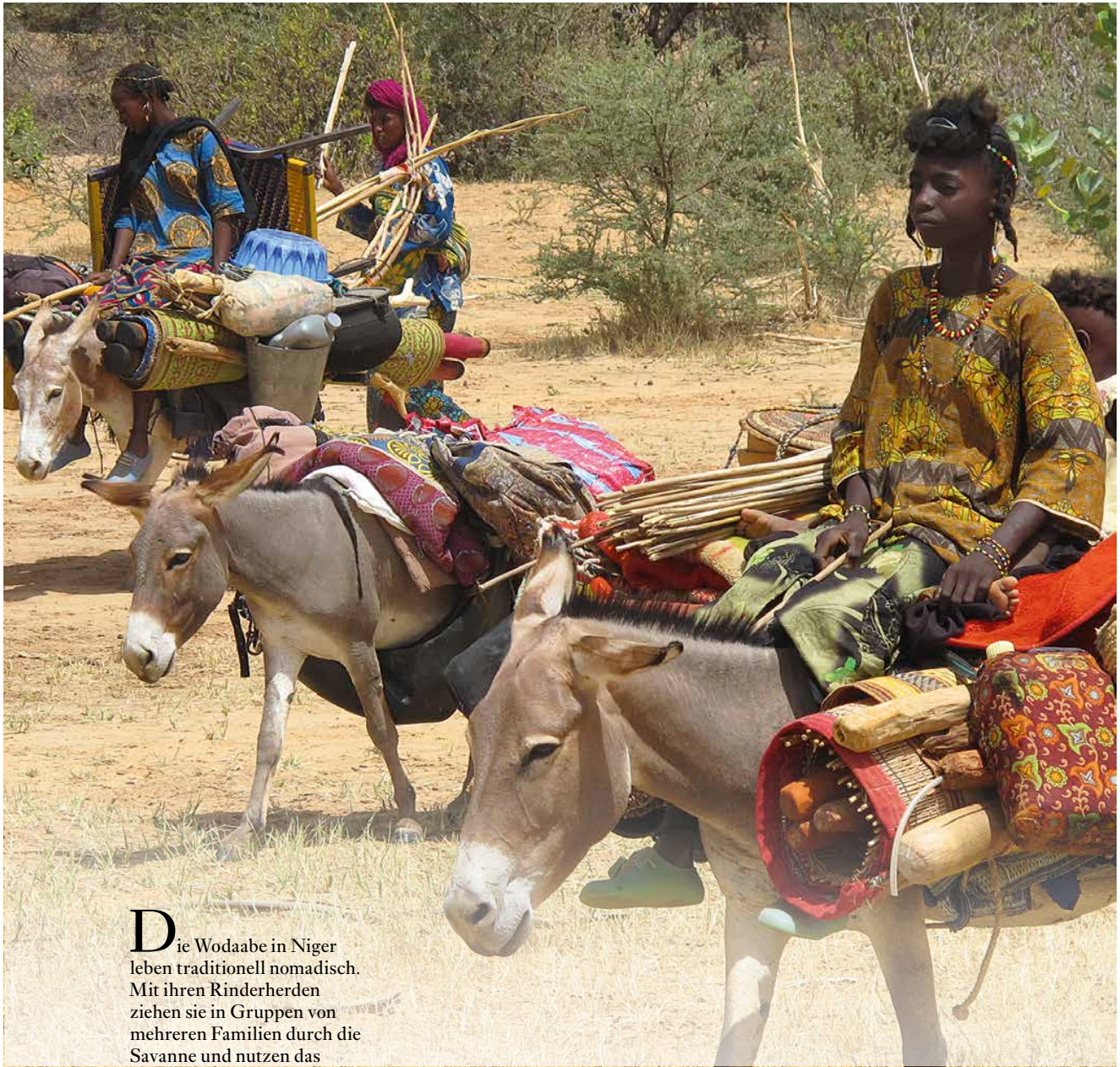


FOTO: FLORIAN KÖHLER/MPI FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG

Die Wodaabe in Niger leben traditionell nomadisch. Mit ihren Rinderherden ziehen sie in Gruppen von mehreren Familien durch die Savanne und nutzen das karge Land auf nachhaltige Weise. Doch seit einer verheerenden Dürre in den 1980er-Jahren haben sich Teile der Volksgruppe in Städten angesiedelt, um dort Geld zu verdienen. Trotzdem bleiben das Hirtenleben für die Wodaabe Identifikationspunkt und die Savanne Sehnsuchtsort.

EDITORIAL

Liebe Leserin, lieber Leser

Mobil zu sein, ist ein Grundbedürfnis vieler Menschen. Das zeigen bei uns etwa die aktuellen Diskussionen um den Preis von Benzin und Diesel, um öffentliche Verkehrsmittel oder Urlaubsflüge. Wir vergessen dabei leicht, dass die Menschheit schon vor der Erfindung von Motoren den Drang hatte, sich fortzubewegen, den Ort zu wechseln und oft auch Neuland zu betreten.

Dabei ist Mobilität kein rein menschliches Phänomen, Tiere sind ebenfalls über weite Strecken unterwegs: Gnus und Rentiere, Wale, Fische und Meeresschildkröten und natürlich viele Vögel legen Jahr für Jahr Hunderte oder gar Tausende Kilometer zurück. Sie folgen dabei einem genetischen Programm, das Forschende des Max-Planck-Instituts für Evolutionsbiologie am Beispiel der Mönchsgrasmücken genauer untersuchen. Dabei haben sie herausgefunden: Nicht nur ob ein Vogel im Herbst wegzieht, sondern auch wohin, ist in den Genen festgelegt.

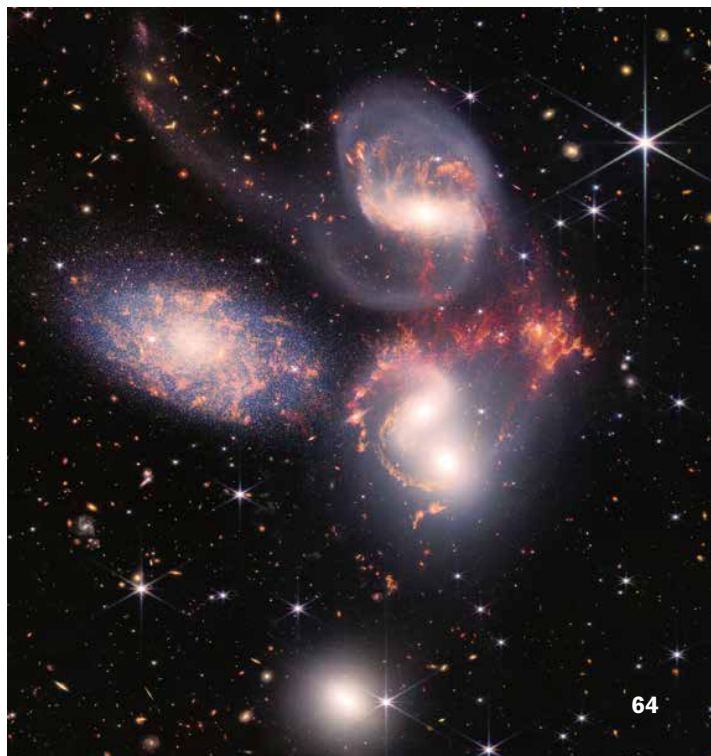
Menschen können zumindest teilweise frei entscheiden, wo sie sich aufhalten möchten. Doch die Lebensumstände lassen oftmals wenig Spielraum. Wenn traditionell nomadisch lebende Volksgruppen wie die Wodaabe in Niger durch eine Dürre den Großteil ihrer Herden verlieren, müssen sie andere Wege finden, ihren Lebensunterhalt zu bestreiten. Viele Wodaabe haben sich in den vergangenen Jahrzehnten Arbeit in Städten gesucht. Mit dem Geld unterstützen sie die nomadische Viehwirtschaft auf dem Land, wie ein Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für ethnologische Forschung beobachtet hat. Mit dieser Strategie streuen sie finanzielle Risiken und sichern ihre Einkünfte.

Innerhalb der Europäischen Union dürfen sich die Bürgerinnen und Bürger der Mitgliedsstaaten aussuchen, wo sie leben und arbeiten. Für viele ist es eine Entscheidung fürs Leben, wenn sie ihre ursprüngliche Heimat verlassen. Wie es den Migrantinnen und Migranten im Alter geht, hat ein Team des Max-Planck-Instituts für Sozialrecht und Sozialpolitik analysiert. Die Bilanz fällt unterschiedlich aus – je nachdem, ob man das Wohlbefinden mit den Daheimgebliebenen vergleicht oder mit den Mitmenschen in der neuen Heimat.

Die Frage „Bleiben oder gehen?“ stellt sich also in den unterschiedlichsten Kontexten immer wieder neu. Falls Sie gerade ebenfalls vor dieser Wahl stehen, empfehlen wir: Nehmen Sie sich die Zeit zum Lesen – ob zu Hause oder unterwegs.

In jedem Fall wünschen wir eine bewegende Lektüre!

Ihr Redaktionsteam



BILDER: LUISA JUNG FÜR MPG (LINKS OBEN); KATRIN BINNER FÜR MPG (RECHTS OBEN); ISTOCK (LINKS UNTEN); ESA / CSA / STSCI / NASA (RECHTS UNTEN)

38 | *HOFFUNGSVOLL*

Auf der Suche nach einem besseren Leben verlassen viele Menschen ihre Heimat.

44 | *GENUSSVOLL*

Thomas Vilgis erforscht die Physik von Nahrungsmitteln, etwa ihre Textur.

60 | *GEFAHRVOLL*

Quantencomputer bergen Sicherheitsrisiken für die Onlinekommunikation.

64 | *GEHEIMNISVOLL*

Das neue James-Webb-Teleskop liefert fantastische Bilder von fernen Galaxien.

03 | EDITORIAL

06 | ORTE DER FORSCHUNG

Freie-Elektronen-Laser in Berlin

08 | KURZ NOTIERT

14 | ZUR SACHE

Eine Diagnose digitaler Krankheiten

Im Internet und in den sozialen Medien werden Hate Speech, Propaganda und Desinformation zunehmend zum Problem. Nötig wäre eine Diagnose der tiefer liegenden Ursachen. Diese sollte Anleihen bei der Medizin nehmen.

20 | INFOGRAFIK

Masken schützen!

IM FOKUS

Gehen oder bleiben?

22 | Zwischen Stadt und Savanne

Nie lange an einem Ort – so war seit jeher der Alltag der Wodaabe, einer traditionell nomadischen Bevölkerungsgruppe in Niger. Doch seit den 1980er-Jahren lassen sich immer mehr von ihnen in den Städten nieder. Wie verändert sich dadurch das Leben der Wodaabe?

30 | Heimweh, das in den Genen liegt

Diesen Herbst brechen weltweit wieder Milliarden Vögel in ihre Winter- oder Sommerquartiere auf. Doch wohin genau? Winzige Sensoren sollen verraten, wo die Vögel den Winter über waren.

38 | Eine Entscheidung fürs Leben

Migration verändert die Gesellschaftsstruktur in Europa seit Jahrzehnten massiv. Doch wie fühlt es sich eigentlich an, in einem neuen Land älter zu werden? Und zahlt sich das Wagnis Migration für die Menschen letztlich aus?

44 | BESUCH BEI

Thomas Vilgis

52 | ZWEITER BLICK

WISSEN AUS

54 | Ein Kopierer fürs Erbgut

Mit einem unverständlichen Code kann eine Zelle nichts anfangen. Ein Enzym schreibt den DNA-Code um, sodass aus einem Gen ein Protein entstehen kann.

60 | Quantensicher

Bei Quantencomputern werden heutige Verschlüsselungstechniken schlagartig unsicher. Es braucht Methoden der sogenannten Post-Quanten-Kryptografie.

64 | Das Universum in neuem Licht

Das James-Webb-Teleskop liefert Bilder von Galaxien ebenso wie turbulente Ansichten von Geburt und Tod der Sterne. Auch die Spektren von Exoplaneten haben es in sich.

72 | Die überdüngte Erde

Kein Tier, keine Pflanze und kein Einzeller kommt ohne Stickstoff aus, doch der Mensch bringt immer mehr davon in Umlauf – mit Folgen für Gesundheit und Umwelt.

78 | POST AUS...

Big Bear Lake, USA

80 | NEU ERSCIENEN

82 | FÜNF FRAGEN

Zur Energiekrise

83 | IMPRESSUM

GEOMAX

Anders wirtschaften –
Wachstumsmodelle
in der Ökonomie



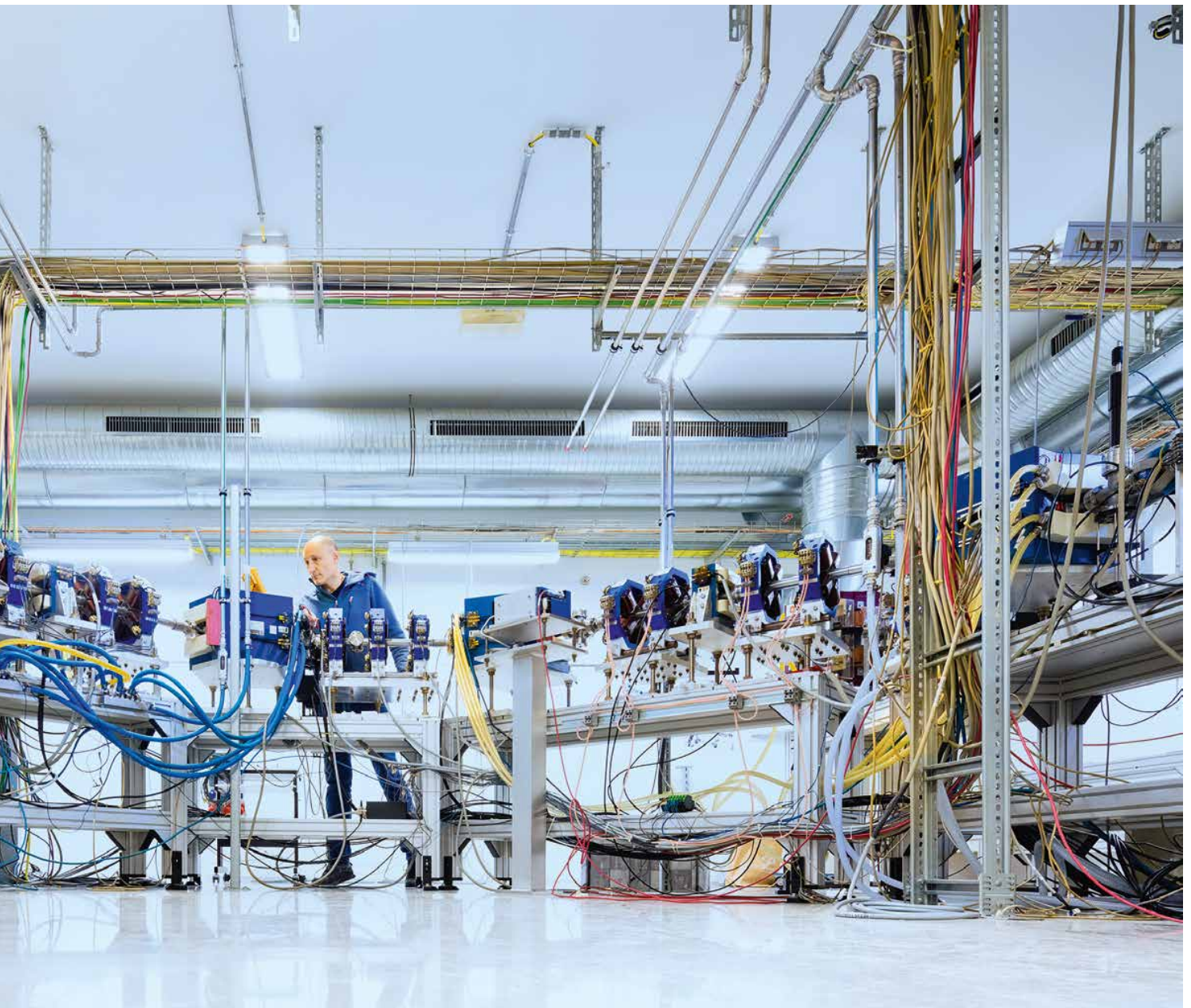
6 Die Frage, „was die Welt im Innersten zusammenhält“, trieb schon Goethes Faust um. Seitdem ist einige Zeit vergangen, doch die Kräfte, die die Welt auf molekularer Ebene zusammenhalten, sind auch heute noch Gegenstand aktueller Forschung. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Fritz-Haber-Institut (FHI) in Berlin interessiert zum Beispiel, welche Kräfte in Molekülen zwischen den Atomen wirken.

Jedes Molekül hat ein eigenes, typisches Schwingungsspektrum – gleichsam einen Fingerabdruck, der mithilfe von laserartiger Infrarotstrahlung ermittelt werden kann. Das Mittel der Wahl, um solch intensive Infrarotstrahlung mit einstellbarer Wellenlänge zu erzeugen, ist ein Freie-Elektronen-Laser (FEL): In einem Vakuum werden Elektronen zunächst auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Diese energiereichen Elektronen durchlaufen dann im sogenannten Undulator sehr starke Magnetfelder, die sie in eine wellenförmige Bewegung versetzen. Dies führt dazu, dass die Elektronen Photonen abstrahlen – und zwar in einem gebündelten, intensiven Strahl. Freie-Elektronen-Laser können im Prinzip elektromagnetische Strahlung fast jeder Wellenlänge erzeugen. Oft geht es dabei um möglichst kurzwellige Strahlung im Röntgenbereich. Für die Versuche am FHI wird dagegen langwellige Strahlung im Infrarotbereich benötigt und erzeugt.

Hier überprüft der Elektronikingenieur Marco De Pas die Anschlüsse der Elektromagneten, mit denen der Elektronenstrahl auf seinem Weg zwischen dem Beschleuniger und dem Undulator umgelenkt wird. Die Szene erinnert an eine Bühne, auf der der Schlagzeuger hinter seinen Instrumenten steht. Da wie dort muss alles ganz genau aufeinander abgestimmt sein, damit das Ergebnis passt.



ORTE DER FORSCHUNG



7

FOTO: FHI/JUERGEN LOESEL

AUSGEZEICHNET ★



FOTO: FRIEDRICH REINHOLD

ANTHONY HYMAN

Der Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft 2022 geht an den Direktor am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik Anthony Hyman. Der britische Zellbiologe entdeckte mit seinem Team kurzlebige, tröpfchenähnliche Kondensate von Proteinen in Zellen. Der gestörte Abbau dieser Kondensate kann Krankheiten wie ALS oder Alzheimer nach sich ziehen, ihre Erforschung eröffnet daher auch neue Therapieansätze. Der mit einer Million dotierte Körber-Preis zählt zu den weltweit höchstdotierten Forschungsauszeichnungen und unterstützt die Preisträger bei ihren weiteren Arbeiten.

8

NEUE PHASE IM FUSIONSEXPERIMENT

Die Fusionsanlage Wendelstein 7-X in Greifswald, die zum Max-Planck-Institut für Plasmaphysik gehört, ist nach den ersten beiden Experimentierphasen weiter ausgebaut worden. Dieser Schritt ermöglicht es, in der Anlage bei höherer Heizleistung bis zu dreißig Minuten lange Plasmapulse zu erzeugen und so die Fähigkeit zum Dauerbetrieb zu demonstrieren. Damit ist Wendelstein 7-X nun endgültig fertiggestellt. Eine wassergekühlte Innenverkleidung und das neue Herzstück, ein wassergekühlter Divertor, komplettieren die Anlage. Divertoren entfernen Verunreinigungen aus dem Plasma und sollen in einem zukünftigen Fusionskraftwerk die

Wärme für die Stromerzeugung abführen. Ein Probebetrieb mit der neuen Technik ist im September angelaufen, die wissenschaftliche Experimentierphase soll im November beginnen. Zum Abschluss der Ausbaurbeiten besuchten die Bundesforschungsministerin Bettina Stark-Watzinger und Bettina Martin, Wissenschaftsministerin in Mecklenburg-Vorpommern, im August die Anlage. „Wendelstein 7-X ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einem kommerziellen Fusionskraftwerk“, sagte Stark-Watzinger. „Sollte der Transfer in die Anwendung gelingen, so wäre das eine Innovation von unglaublicher Tragweite.“

www.mpg.de/19076267



FOTO: MAGNUS SCHULT

Hoher Besuch: Landeswissenschaftsministerin Bettina Martin, Max-Planck-Direktorin Sibylle Günter und Bundesforschungsministerin Bettina Stark-Watzinger (von links) vor der Fusionsanlage Wendelstein 7-X in Greifswald.

GRÜNDUNGSPREIS FÜR AVATAR-FIRMA

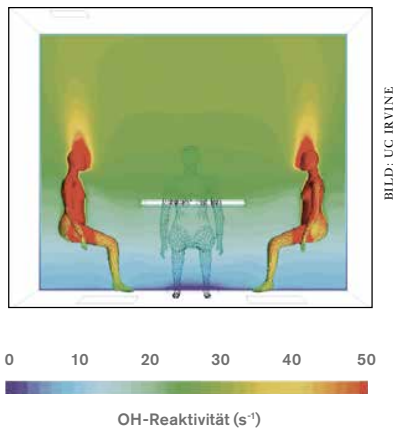
Der diesjährige Max-Planck-Gründungspreis des Stifterverbandes geht an das Start-up Meshcapade aus dem Cyber Valley in der Region Stuttgart-Tübingen. Die Firma entwickelt Techniken zur dreidimensionalen Körpermodellierung aus dem Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme weiter. Ziel ist es, mithilfe von Bildern, sensorgestützten Geräten, Körpermaßen und ähnlichen Daten realistische menschliche Figuren in einem leicht zugänglichen 3D-Format zu erstellen. Die daraus re-

sultierenden Avatare verfügen über Mimik, sie können realistische Bewegungen ausführen und sind mit allen gängigen 3D-Visualisierungsprogrammen kompatibel. Die Technologie kann in der Mode-, Gaming- und Filmindustrie eingesetzt werden. Sie birgt aber zudem ein enormes Potenzial für die Medizin und für das Gesundheitswesen, weil reale Menschen lebensecht in 3D nachgebildet werden können. Michael Black, Direktor am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme, hat die

Firma Meshcapade im Jahr 2018 gemeinsam mit seinen Mitarbeitenden Naureen Mahmood und Talha Zaman gegründet. Max-Planck-Präsident Martin Stratmann bewertet die Verleihung des Preises an das Start-up als ein positives Signal für das Cyber Valley: „Ich hoffe, dass die Prämierung mithelfen kann, andere ausgründungswillige Forschende zu motivieren, damit sich das Cyber Valley zu einem ‚Start-up Valley‘ entwickeln kann.“

www.mpg.de/18470794

An der menschlichen Haut entstehen Hydroxylradikale OH, die mit organischen Substanzen in der Luft reagieren. Besonders hoch ist die Reaktivität (angegeben pro Sekunde) direkt am Menschen.



RADIKALE IN DER AURA

Menschen beeinflussen die Chemie in Innenräumen in bisher unbekannter Weise. Wie ein Team um Forschende des Max-Planck-Instituts für Chemie herausgefunden hat, reagiert Ozon, das mit der Außenluft in Gebäude gelangt, mit Fetten, vor allem Squalen, auf der menschlichen Haut zu Hydroxylradikalen. Diese Moleküle erzeugen ein oxidatives Feld um jeden Menschen, denn sie verändern organische Substanzen in der Luft oder bauen sie sogar ab. Auf diese Weise befreien Hydroxylradikale die Luft einerseits von möglicherweise schädlichen Substanzen. Andererseits können sie auch Stoffe erzeugen, die potenziell gesundheitsschädlich sind. Wie sich die radikalische Aura des Menschen unterm Strich auf die Gesundheit auswirkt, muss daher in weiteren Studien geklärt werden. www.mpg.de/19155908



Bereits ein einstündiger Spaziergang in der Natur reduziert die mit Stress verbundene Gehirntätigkeit.

INS GRÜNE, DEM GEHIRN ZULIEBE

In einer Stadt zu leben ist ein bekannter Risikofaktor für psychische Störungen. Die Amygdala, eine zentrale Hirnregion, die an der Stressverarbeitung beteiligt ist, ist bei Menschen, die in ländlichen Gebieten leben, nachweislich weniger aktiv als bei Stadtbewohnern. Bislang war unklar, ob die ländliche Umgebung tatsächlich diesen Effekt verursacht oder ob sich die Menschen, die ein Leben auf dem Land wählen, von vornherein von jenen in der Stadt unterscheiden. Um den Kausalzusammenhang aufzudecken, untersuchten Wissenschaftlerinnen des Max-Planck-Instituts für

Bildungsforschung mithilfe funktionseller Magnetresonanztomografie 63 gesunde Testpersonen jeweils vor und nach einem einstündigen Spaziergang. Ein Teil der Probandengruppe war im Grunewald unterwegs, der andere auf einer Berliner Einkaufsstraße. Und tatsächlich zeigte sich, dass die Aktivität in der Amygdala nach dem Spaziergang in der Natur abgenommen hatte. Das deutet darauf hin, dass schon ein recht kurzer Aufenthalt von sechzig Minuten in der Natur positive Auswirkungen auf jene Gehirnregionen hat, die in Beziehung zu Stress stehen.

www.mpg.de/19179857



Für Menschen ist es schwierig, im tropischen Regenwald zu überleben. Trotzdem finden Forschende dort immer mehr Hinweise auf prähistorische Siedlungen.

EXPANSION DURCH DEN REGENWALD

10 Die Bantu-Expansion – eine gigantische Migrationsbewegung von Bantu-Sprachen sprechenden Menschen – hat zahlreiche afrikanische Regionen südlich der Sahara sprachlich und kulturell nachhaltig verändert. Die Vorfahren heute lebender Bantu-Sprecher lebten vor 5000 bis 6000 Jahren in einem Gebiet nahe der Grenze zwischen Nigeria und Kamerun und betrieben dort Landwirtschaft. Bislang nahm man an, dass es für diese Menschen nahezu unmöglich war, ihren Siedlungsraum durch den zentralafrikanischen Regenwald hindurch auszubreiten. Man vermutete, dass erst ein Savannenkorridor, der sich vor etwa 2500

Jahren bildete, die Migration ermöglicht habe. Ein Team des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie hat nun anhand linguistischer Daten und mithilfe neuartiger computergestützter Methoden berechnet, dass die Ausbreitung nach Süden bereits vor etwa 4000 Jahren stattgefunden haben muss – also lange bevor sich der Korridor durch den Regenwald öffnete. Diese Ergebnisse bestätigen andere aktuelle Erkenntnisse, wonach Menschen sich im Verlauf ihrer Geschichte immer wieder überraschend gut an die Lebensbedingungen in tropischen Wäldern anpassen konnten.

www.mpg.de/19012522

SPIONAGE MIT DER KITA-APP

Apps, die Kindertagesstätten unterstützen, weisen teils gravierende Datenschutz- und Sicherheitsmängel auf. Das hat die Analyse eines Teams ergeben, an dem Forschende des Bochumer Max-Planck-Instituts für Sicherheit und Privatsphäre beteiligt waren. Kita-Apps sollen den Alltag in Kindertagesstätten erleichtern. Eltern können darüber beispielsweise Berichte über die Entwicklung ihres Kindes abrufen oder mit Erzieherinnen und Erziehern kommunizieren. Die Forschenden untersuchten 42 dieser Apps aus Europa und den USA im Hinblick auf Sicherheit und Datenschutz. Dabei stellten sie fest, dass mehrere Anwendungen ohne Einverständnis von Nutzerinnen und Nutzern deren persönliche Daten abgriffen und diese mit Drittanbietern teilten. Bei einigen Apps konnten die Forschenden auch auf private Fotos der Kinder zugreifen. Auf Kita-Apps zu verzichten, sei jedoch nicht hilfreich, da Eltern und das Kita-Personal dann Messengerdienste nutzen würden, bei denen andere gravierende Datenschutzprobleme bestehen. Fachleute sollten allerdings Richtlinien und Checklisten für Kita-Apps erstellen, auf deren Grundlage beispielsweise staatliche Stellen Empfehlungen für Trägervereine der Kitas geben könnten.

www.mpg.de/18943015

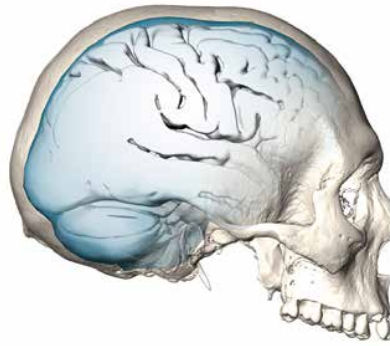
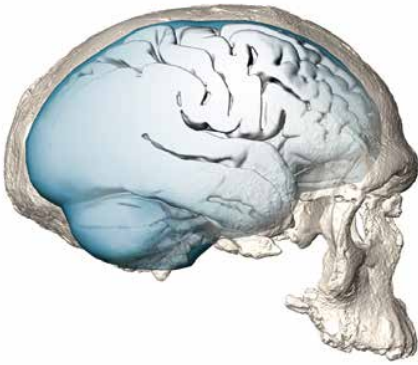
EINE NASE FÜR GEFÄLSCHTES PARFUM

Um gefälschte Parfums zu entlarven oder kranke Pflanzen zu identifizieren, bietet sich künftig eine neue Technik an. Forschende des Mainzer Max-Planck-Instituts für Chemie und der Johannes Gutenberg-Universität Mainz haben eine Methode entwickelt, um sehr genau die chirale Signatur flüchtiger organischer Substanzen zu bestimmen. „Chiral“ leitet sich vom griechischen Wort für Hand ab und bedeutet, dass eine Subs-

tanz – wie die Hände – in zwei spiegelbildlichen Versionen vorliegt. Aus der chiralen Signatur lässt sich ablesen, in welchem Verhältnis ein Parfum oder die Ausdünstung einer Pflanze die zwei Varianten enthält. Viele Biomoleküle sind chiral, wobei die zwei Varianten vieler chiraler Substanzen *biologisch*, etwa auf den Geruchssinn, sehr verschieden wirken. Manche Biomoleküle kommen in der Natur auch nur in einer Variante vor, so-

dass gefälschte Parfums, die synthetische statt natürlicher Komponenten enthalten, an der Signatur zu erkennen sind. Die Mainzer Forschenden messen dafür die Richtung, in der die Komponenten ihrer Proben die Schwingungsebene von polarisiertem Licht drehen – die einzige *physikalische* Eigenschaft, in der sich die beiden Varianten chiraler Verbindungen unterscheiden.

www.mpg.de/18853420



Schädel und Gehirn des Neandertalers (links) und des modernen Menschen (rechts).

MEHR HIRN

Der ausgestorbene Neandertaler besaß zwar ein ähnlich großes Gehirn wie der moderne Mensch, möglicherweise aber weniger Nervenzellen in einer Region, die für höhere geistige Fähigkeiten wichtig ist. Einem internationalen Forscherteam am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik in Dresden zufolge kommt im sogenannten Frontallappen unserer Großhirnrinde eine Proteinvariante besonders häufig vor, die die Produktion von mehr Vorläufern von Nervenzellen ermöglicht. Das sogenannte **TKTL1**-Protein wird im menschlichen Fötus vor allem in basalen radialen Gliazellen produziert, die den Großteil der Nervenzellen in diesem Teil des Gehirns produzieren. Es ermöglicht die Bildung von mehr Fettmolekülen für die Zellmembran dieser Vorläuferzellen. Die Proteinvarianten des modernen Menschen und des Neandertalers unterscheiden sich zwar nur in einer einzigen Aminosäure – dieser winzige Unterschied könnte aber die geistigen Fähigkeiten des modernen Menschen verbessert haben.

www.mpg.de/19177059

WETTEIFERN AN DER MÜLLTonne

Im Süden Sydneys herrscht ein Streit um den Müll: Die Bewohner wollen ihre Nachbarschaft frei davon halten, Gelbhaubenkakadus wollen ihn fressen. Die Vögel haben gelernt, die Deckel von Mülltonnen umzuklappen, um an den Inhalt zu gelangen. Sobald ein Kakadu eine Mülltonne geöffnet hat, kommen andere hinzu und versuchen, auch etwas Nahrhaftes abzubekommen. Dabei verteilen die Vögel den Müll großzügig in der Gegend. Forschende des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie in Konstanz haben beobachtet, dass Mensch und Tier ihr Verhalten aneinander anpassen. Die Anwohner versuchen,

die Vögel auf unterschiedliche Weise vom Inhalt der Tonnen fernzuhalten: Sie blockieren etwa die Scharniere der Deckel oder beschweren die Abdeckungen mit Steinen. Bislang haben es die Vögel jedoch noch immer geschafft, die Menschen erneut auszutricksen. Steine zum Beispiel greifen sie einfach mit dem Schnabel und schieben sie mit voller Kraft von den Tonnen. Wer das Rennen um die Kontrolle über die Mülltonnen gewinnen wird, lässt sich nicht vorher-sagen. Die ersten Schlösser zur Abwehr der Kakadus gibt es in Sydney aber bereits zu kaufen.

www.mpg.de/19191786



Cleverer Vogel: Ein Gelbhaubenkakadu bugsiert einen Stein von einer Mülltonne.

FOTO: MPI FÜR VERHALTENSBIOLOGIE/
CHRISTIAN ZIEGLER

Ein Totenkopfschwärmer wird mit einem winzigen Sender ausgestattet. Das Gewicht des Geräts beträgt weniger als 15 Prozent des Körpergewichts – und damit weniger als das, was ein ausgewachsener Falter in einer Nacht an Nahrung zu sich nimmt.

DIE LANGE REISE DER SCHWÄRMER

Wie Zugvögel pendeln viele Insekten während eines Jahres zwischen Brut- und Überwinterungsgebieten und legen dabei gewaltige Strecken zurück. Eine Studie des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie hat ergeben, dass Totenkopfschwärmer – ein großer, nachtaktiver Falter – auf ihrem Zug selbst bei ungünstigen Windverhältnissen vollkommen gerade Flugbahnen einhalten können. Forschende des Instituts verfolgten in einem Flugzeug 14 mit Funksendern ausgestattete Totenkopfschwärmer von Konstanz über bis zu 80 Kilometer hinweg Richtung Alpen – die bisher längste Strecke, die ein Insekt in freier Wildbahn je durchgängig beobachtet werden konnte. Die Falter fliegen bei Rückenwind hoch und lassen sich von der Strömung tragen. Bei starkem Gegen- oder Seitenwind hingegen fliegen sie niedrig und erhöhen ihre Geschwindigkeit, um die Kontrolle über den Kurs zu behalten. Totenkopfschwärmer fliegen über mehrere Generationen jedes Jahr bis zu 4000 Kilometer von Europa nach Afrika. Jedes Individuum legt nur einen Teil der Strecke zurück und vermehrt sich am Ende seiner Reise, so dass die nächste Generation weiterwandern kann.

www.mpg.de/19069567

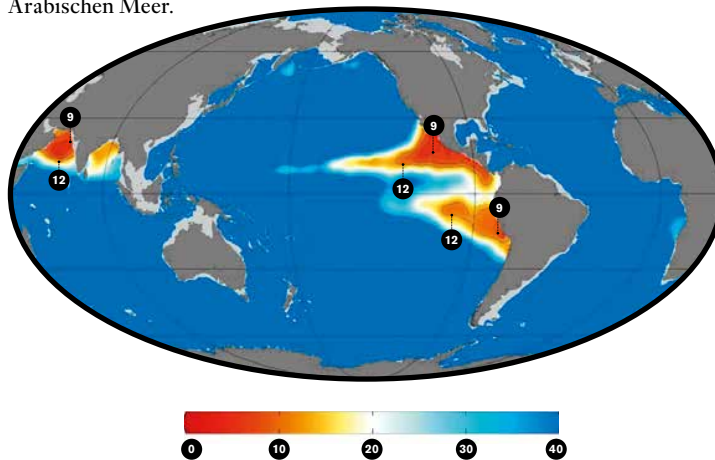
WARMZEITEN SORGEN FÜR SAUERSTOFF

12

Wenn der Sauerstoff knapp wird, hat es das Leben schwer. Das gilt für Bergregionen über 7000 Meter Höhe genauso wie für sauerstoffarme Gewässer, etwa in tropischen Regionen an der Westküste Amerikas. Die sauerstoffarmen Meeresregionen, in denen fast nur spezialisierte Mikroben oder Quallen überleben, haben sich in den vergangenen 50 Jahren ausgeweitet. Diese Entwicklung erklärte die Geoforschung bislang mit der Erderwärmung, wodurch das Meerwasser unter anderem weniger Sauerstoff aufnehmen könne. Doch mittel- oder langfristig könnte der Klimawandel dazu führen, dass die sauerstoffarmen Zonen in den Meeren schrumpfen: Genau das passierte in zwei vergangenen Warmphasen der Erdneuzeit, nämlich vor etwa 16 und vor 50 Millionen Jahren, wie ein internationales Team um Forschende des Max-Planck-Instituts für Chemie anhand von Sedimentbohrkernen aus tropischen Meeresregionen herausfand. Der Grund dafür könnte in verschiedenen Mechanismen liegen, in denen die veränderte Durchmischung tiefer und oberflächennaher Ozeanschichten eine Rolle spielt. Diese Durchmischung könnte vor Ort auftreten, wo sie kurzfristig Wirkung entfaltet, oder im Südpolarmeer, was langfristige Folgen hat. Daher ist noch unklar, in welchem Zeitraum die menschengemachte Erderwärmung dazu führen könnte, dass die sauerstoffarmen Meeresregionen schrumpfen.

www.mpg.de/19160776

Gebiete mit geringem Sauerstoffgehalt (rot), angegeben in Mikromol pro Kilogramm, gibt es etwa an der Westküste Amerikas, im Golf von Bengalen und im Arabischen Meer.



Sauerstoffkonzentration ($\mu\text{mol/kg}$) in 350 Meter Tiefe

BILD: A. AUERSET/MPI FÜR CHEMIE



Die Baltische Meerassel (*Idotea balthica*) auf der Rotalge *Gracilaria gracilis*.

FOTO: WILFRIED THOMAS, STATION BIOLOGIQUE DE ROSCOFF (SBR)

BIENEN DES MEERES

An Land leisten Bienen, Kolibris, ja sogar Fledermäuse und Eidechsen wichtige Dienste bei der Befruchtung von Pflanzen. Ein internationales Team, darunter Forschende des Max-Planck-Instituts für Biologie Tübingen, hat nun entdeckt, dass auch im Meer Tiere als Bestäuber unterwegs sind. Die Baltische Meerassel versteckt sich in den Büscheln einer Rotalge und ernährt sich von dort wachsenden Mikroalgen. Dafür zeigt sich die Assel erkenntlich: Wenn sie an einer männlichen Alge frisst, klebt das auf der Blattoberfläche der Algen wachsende Sperma an ihrem Körper fest. Bei

Kontakt mit einer weiblichen Alge heften sich die Spermien beim Vorbeistreichen an die weiblichen Fortpflanzungsorgane und bestäuben diese. Für die Rotalge ist die Hilfe des ameisengroßen Krustentiers sehr wichtig, denn ihre Spermien können sich nicht selbstständig bewegen. Ohne die Asseln würde es also von günstigen Wasserströmungen und der örtlichen Nähe männlicher und weiblicher Algen abhängen, ob diese sich fortpflanzen können. Die Forschenden wollen nun herausfinden, ob auch andere Algenarten in vergleichbarer Form bestäubt werden.

www.mpg.de/19004298

278

verschiedene Moleküle wurden bisher im All entdeckt.

DESINFEKTIONSMITTEL IM ALL

Seit einem halben Jahrhundert fahnden Forschende mit Radioteleskopen nach Molekülen im Universum. Bisher hatten sich in den Spektren die Fingerabdrücke von 276 verschiedenen Substanzen gefunden. Jetzt gab es wieder Zuwachs in der Datenbank: Mit dem Antennenverbund Alma entdeckte ein Team unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in einer Gaswolke namens Sagittarius B2 den Alkohol Propanol und sein Isomer Isopropanol – eine

chemische Verbindung mit gleicher Summenformel, aber unterschiedlicher Struktur. Diesen Stoff dürften manche buchstäblich schon einmal in der Hand gehabt haben: Er dient unter anderem dazu, die Haut oder Flächen zu desinfizieren. Die Beobachtung gelang im Rahmen einer Langzeitstudie, in der die chemische Zusammensetzung der Molekülwolke mit hoher Winkelauflösung untersucht wird. Sagittarius B2 liegt nahe dem galaktischen Zentrum und gleicht ei-

nem kosmischen Kreißsaal, in dem Sterne geboren werden. Propanol ist das größte bisher im interstellaren Raum entdeckte Alkoholmolekül. Die Größe machte die Suche allerdings nicht einfacher, denn es emittiert viele Spektrallinien bei verschiedenen Frequenzen. Und in einer Quelle wie Sagittarius B2 gibt es so viele Moleküle, dass sich ihre Spektren überschneiden und es schwierig war, die einzelnen Fingerabdrücke zu identifizieren.

www.mpg.de/18883838

EINE DIAGNOSE DIGITALER KRANKHEITEN

Im Internet und in den sozialen Medien werden Hate Speech, Propaganda und Desinformation zunehmend zum Problem. Alle Bemühungen, die unerwünschten Inhalte durch Regeln oder Gesetze in den Griff zu kriegen, sind bisher gescheitert. Notwendig wäre eine Diagnose der tiefer liegenden Ursachen, meinen Johanna Rinceanu und Randall Stephenson. Dabei sollte die juristische Herangehensweise Anleihen bei der Medizin nehmen.

14

Was haben eine medizinische Diagnose und die moderne Internetregulierung gemeinsam?

Der deutsche Arzt Rudolf Virchow erklärte 1848: „Die Medizin ist eine soziale Wissenschaft, und die Politik ist weiter nichts als Medizin im Großen.“ Als Begründer der modernen Pathologie und der Sozialmedizin wandte sich Virchow gegen die im 19. Jahrhundert aufkommenden Tendenzen, den Menschen auf die biologischen Funktionen und genetischen Bestimmungen zu reduzieren. Als leidenschaftlicher Verfechter sozialer Reformen vertrat er die Ansicht, die gesamte Gesellschaft müsse durch politisches Handeln verändert werden, damit die Medizin ihre zentrale Aufgabe erfüllen könne: Gesundheit zu fördern und Krankheiten zu bekämpfen. So entstand ein Grundprinzip der modernen Medizin.

Nach Virchows Vision sollte es zum ärztlichen Berufsbild gehören, die komplexen Zusammenhänge zwischen gesellschaftlich-politischen Belastungen und körperlichen Gebrechen aufzudecken. Er betrachtete die Ärzte als „die natürlichen Anwälte der Armen“. So verschob er die Rollen von Ärzten und Juristen aus seiner tiefen Überzeugung heraus, dass die Erkenntnisse der Medizin auf die gesellschaftliche Ordnung übertragen werden sollten. Bleibt man im Bild von Ärzten als „natürlichen Anwälten“

—>

ZUR SACHE

JOHANNA
RINCEANU
&
RANDALL
STEPHENSON



ILLUSTRATION: SOPHIE KETTERER FÜR MPG

Johanna Rinceanu forscht als Senior Researcher in der strafrechtlichen Abteilung des Max-Planck-Instituts zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht in Freiburg im Breisgau. Sie studierte Rechtswissenschaften in Freiburg und Washington D.C. Im Jahr 2007 promovierte sie an der Humboldt-Universität zu Berlin. Ihre Schwerpunkte liegen in den Bereichen Strafprozessrecht, Rechtsvergleichung und Menschenrechte.

Randall Stephenson ist Experte für den Verfassungsvergleich und die Sanktionierung von Diffamierung an der Schnittstelle von Pressefreiheit, Demokratietheorie und *networked accountability*. Im Jahr 2017 promovierte er an der University of Oxford, seit 2019 ist er Senior Researcher in der Abteilung Öffentliches Recht des Max-Planck-Instituts zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht.

ELON MUSK HATTE WOHL DAS AUSMASS DER PROBLEME IN DER DIGITALEN MEDIENLAND- SCHAFT UNTER- SCHÄTZT

der Gesellschaft und von Politikern als „natürlichen Anthropologen“, dann kann man Juristen als „natürliche Diagnostiker“ auffassen.

Radikale Durchbrüche in der theoretischen Physik führten im 20. Jahrhundert in vielen Forschungsbereichen zu neuen Perspektiven. So entwickelte der US-amerikanische Psychiater George Engel 1960 sein innovatives biopsychosoziales Modell von Gesundheit und Krankheit. Nach Engels Ansicht befand sich die Ärzteschaft in einer Krise, da sie an einem veralteten biomedizinischen Modell festhielt, das ihrem wissenschaftlichen Auftrag und ihrer sozialen Verantwortung nicht mehr gerecht wurde. Stattdessen plädierte Engel für ein neues Paradigma, das einen dynamischeren, ganzheitlichen Ansatz verfolgte. Wie Virchow vor ihm wünschte sich Engel einen Wandel in der medizinischen Forschung hin zu einer stärkeren Verschränkung biologischer, psychologischer und sozialer Faktoren. Auch er hielt soziopolitische Einflüsse für wesentlich – als Ursache und auch für die Diagnose von Krankheiten.

Systemorientierte Forschungsansätze, wie die hier kurz vorgestellten, sind in der Medienwelt des 21. Jahrhunderts wichtiger denn je. Ein anschauliches Beispiel ist die von Elon Musk geplante 44-Milliarden-Dollar-Übernahme der Social-Networking-Plattform Twitter. Musks erklärte Absicht war es, der zunehmenden Bedrohung der Meinungs- und Pressefreiheit entgegenzuwirken. Dabei hatte er wohl die grundlegende Beschaffenheit und das Ausmaß der Probleme in der modernen digitalen Medienlandschaft unterschätzt: Twitter ist – wie andere Social-Media-Plattformen, etwa Facebook, Youtube und Instagram – zunehmend anfällig für besorgniserregende Onlineinhalte wie Hate Speech, Belästigung, Rassismus, Rechtsextremismus, Propaganda, Desinformation und Fake News.

Der offizielle Grund für die Rücknahme des Deals waren zwar falsche Angaben über die Zahl der gefälschten Twitterkonten. Man sollte sich aber vor Augen führen, dass zunehmend regulatorische Herausforderungen dem gut gemeinten Vorhaben entgegenstehen, Pressefreiheit und andere Grund- und Menschenrechte uneingeschränkt zuzusichern – sei es in Form gesetzlicher Vorschriften in verschiedenen Ländern oder durch selbst gesetzte Regeln der sozialen Medien. Letztere sind eine Besonderheit der digital vernetzten Sphäre. So verbieten etwa *community guidelines* Gewaltandrohung und Hate Speech, gezielte Attacken gegen Einzelpersonen oder die Unterstützung oder Verherrlichung von Terrorismus, organisierter Kriminalität und gewalttätigen Gruppen. Verstöße gegen diese Kommunikationsregeln führen in der Regel dazu, dass die Social-Media-Plattformen die entsprechenden Inhalte entfernen oder sperren. Doch trotz zahlreicher Bemühungen vonseiten der Betreiber und des Staates scheinen Hate Speech, Onlinegewalt und Fake News unaufhaltsam.

DAS GESETZ ZWINGT SOCIAL MEDIA-PLATT- FORMEN IN DIE UNERWÜNSCHTE ROLLE VON GATEKEEPERN

Eine mögliche Erklärung für das Scheitern der Internetregulierung ist, dass die rechtlichen Vorschriften – egal ob auf nationaler, supra- oder internationaler Ebene – Hate Speech, Rechtsextremismus und Fake News nicht als Symptome einer tiefer liegenden Krankheit behandeln, sondern als eigenständige Erkrankungen. Ein Beispiel ist das kürzlich verabschiedete EU-Gesetz über digitale Dienste, das darauf abzielt, die nationalen Gesetze in der Europäischen Union zur Regulierung illegaler Onlineinhalte zu harmonisieren: Das Ergebnis dieses reduktionistischen Ansatzes ist eine fragmentierte und letztlich ineffektive Strategie. Wie Virchow und Engel zu ihrer Zeit sollten wir unsere moderne, digital vernetzte Sphäre als ein selbstreferenzielles und selbststabilisierendes System betrachten, das konzentrierte und koordinierte Antworten von seinen Arzt-Anwälten, Politiker-Anthropologen und Juristen-Diagnostikern erfordert.

Virchows wegweisendes Konzept, wonach sich die Rollen von Ärzten und Anwälten ergänzen, wird bestärkt durch auffällige Gemeinsamkeiten zwischen der medizinischen Diagnose und der sogenannten juristischen Funktionalität – der vorherrschenden Methode der Rechtsvergleichung. Die Rechtsvergleichung hat aufgrund der globalen Reichweite der digitalen Kommunikationstechnologie und der Internetregulierung hier an Bedeutung gewonnen. Ein anschauliches Beispiel dafür ist das weltweit erste Gesetz in diesem Bereich, das deutsche Netzwerkdurchsetzungsgesetz, das Social-Media-Plattformen dazu verpflichtet, illegale Onlineinhalte zu identifizieren und zu entfernen. Es wurde übereilt in Rechtsordnungen mit grundlegend anderen verfassungsrechtlichen Kontexten übertragen. Länder wie Weißrussland, Äthiopien, Indien, Kenia, Malaysia, die Philippinen und Russland haben die deutsche Gesetzgebung übernommen, um Social-Media-Plattformen zu verpflichten, „ungesetzliche“ politische Onlineinhalte in unangemessen kurzen Fristen zu löschen oder zu sperren, ohne dabei die Unterschiede zwischen den Rechtssystemen zu berücksichtigen. Wenn Betreiber den Verpflichtungen nicht nachkommen, müssen sie mit exorbitanten Geldbußen rechnen. Eine solche restriktive Internetregulierung zwingt private Social-Media-Plattformen in die unerwünschte Rolle von Internet-Gatekeepern an der Schwelle von Grund- und Menschenrechten – eine Rolle, die eigentlich Juristen vorbehalten bleiben sollte. Das bedroht zunehmend die Gewissens-, Religions- und Meinungsfreiheit.

Das Funktionalitätsprinzip der Rechtsvergleichung könnte in Zukunft helfen, die Regulierung in diesem Bereich zu verbessern. Ähnlich wie das ganzheitliche medizinische Vorgehen bei der Bekämpfung von Krankheiten zielt das Funktionalitätsprinzip im Recht darauf ab, größere gesellschaftspolitische Zusammenhänge aufzudecken, die hinter den formalen Unterschieden der jeweiligen Rechtssysteme stehen. Dabei geht die Methode der Funktionalität zunächst von einer detaillierten Beschreibung der Besonderheiten des einzelnen Problems und seiner Lösungen in unterschiedlichen Staaten

→

ES GEHT DARUM,
DEN GRAD AN
UNGEWISSHEIT
ZU VERRINGERN,
UM THERA-
PEUTISCHE
MASSNAHMEN
ZU ERGREIFEN

aus. So kann Hate Speech in Deutschland beispielsweise den Tatbestand der Volksverhetzung erfüllen oder als Beleidigung oder üble Nachrede bestraft werden. Im Gegensatz dazu fällt in den USA Hate Speech unter den Ersten Zusatzartikel der Verfassung (*freedom of speech*) und kann damit – in der Regel – strafrechtlich nicht verfolgt werden. Auf der Basis solcher Beschreibungen entwirft die Methode der Funktionalität dann ein übergreifendes System mit dem Ziel, gemeinsame gesellschaftspolitische Probleme hinreichend ähnlicher Rechtsordnungen aufzudecken. Dadurch können wir die Ursachen für die Schwierigkeiten bei der Onlineregulierung besser diagnostizieren.

Die methodischen Ähnlichkeiten zwischen Funktionalität und medizinischer Diagnose lassen sich besser verstehen, wenn man beide genauer vergleicht. Betrachtet man die medizinische Diagnose als kontinuierlichen Prozess, in dem Informationen über die zugrunde liegenden Funktionsstörungen gesammelt, zusammengeführt und interpretiert werden, zeigen sich die Übereinstimmungen mit dem juristischen Vorgehen. Beide Prozesse laufen unter der Bedingung der Unsicherheit ab, und die diagnostische Aufgabe besteht nicht darin, Gewissheit zu erlangen, sondern darin, den Grad der Ungewissheit so weit zu verringern, dass rechtzeitig wirksame therapeutische Maßnahmen ergriffen werden können.

Eine zweite Gemeinsamkeit besteht in der Art und Weise, wie Entscheidungen getroffen werden. Im Bereich der Medizin spricht man von der ärztlichen Kernkompetenz des *clinical reasoning*: Gemeint sind die Denk- und Entscheidungsprozesse, die für die angemessene Bewertung und Behandlung der medizinischen Probleme erforderlich sind. Ganz ähnlich beinhaltet die Funktionalität einen Prozess kritischer Reflexion, um die gemeinsamen Ziele unterschiedlicher rechtlicher Regelungen aufzudecken, die durch Unterschiede in der Rechtslehre verdeckt werden. Dabei umfasst die juristische Vorgehensweise erstens die Beschaffung von Daten über die nationalen Rechtssysteme und deren institutionellen Kontext, zweitens die Bewertung von Unterschieden und Ähnlichkeiten zwischen den jeweiligen Rechtssystemen und drittens die Aktualisierung von Arbeitshypothesen, um rechtliche Unterschiede aus der Perspektive gemeinsamer Regulierungsziele neu zu betrachten. Sobald dieser Prozess weit genug fortgeschritten ist, um die Unsicherheit der Leithypothese zu verringern, können Gesetzesreformen vorgeschlagen werden.

Wie im Bereich der Diagnostik hängt der Erfolg der Funktionalität letztendlich davon ab, dass wir unser Verständnis der jeweiligen Phänomene verbessern, indem wir unseren Fokus auf Systeme und einen größeren Kontext legen. Unabhängig davon, ob es sich um eine medizinische Diagnose oder eine funktionalistische Konstruktion von Systemen handelt, erfordert dies, dass der Arzt-Anwalt und der Jurist-Diagnostiker übermä-

Big reduktionistische Methoden vermeidet und stattdessen ein „Gesamt-bild“ konstruiert sowie komplexe kausale Zusammenhänge und ihre Auswirkungen auf Einzelpersonen oder auf Gesellschaftssysteme aufzeigt.

Welche Lehren lassen sich aus dem Vergleich zwischen medizinischer Diagnose und Internetregulierung ziehen?

Erstens: Anstatt nach starren rechtlichen Regeln und Grundsätzen zu suchen, sollte mithilfe rechtsvergleichender Methoden ein flexibler juristischer Rahmen geschaffen werden, der den realen Herausforderungen der digitalen Medien gerecht wird. In Anbetracht des einzigartigen institutionellen und medialen Kontextes jedes Landes ist es nicht ratsam, Vorschriften durch Übersetzung oder Rechtstransplantation zu universalisieren oder mit anderen Rechtssystemen zu harmonisieren. Solche Ansätze können von nicht demokratischen Staaten missbraucht werden und dort ohne angemessene verfassungsrechtliche und rechtliche Garantien leicht zu staatlicher Propaganda und Onlinezensur führen.

Zweitens sollten Onlineregulierungsbehörden starr kategorisierte, übermäßig reduktionistische Ansätze aufgeben. So gibt es beispielsweise keine international anerkannte Definition von Hate Speech, die für alle Rechtsordnungen gleichermaßen gelten kann. Aufstrebende Metadisziplinen wie die Medienökologie können unsere Regulierungsbemühungen unterstützen, indem sie die Verknüpfungen und gegenseitigen Abhängigkeiten komplexer Phänomene wie Hate Speech und Online-gewalt aufzeigen. Wenn wir die zugrunde liegende Struktur und Dynamiken aufdecken, können wir besser zwischen Symptomen und Ursachen unterscheiden und so unsere diagnostischen Bemühungen und regulatorischen Maßnahmen präziser und effektiver gestalten.

WIR BRAUCHEN EINE „NETIQUETTE“ DER TOLERANZ, DER GLEICH- BERECHTIGUNG UND DES RESPEKTS VOR DER VIELFALT

Schließlich muss die heutige Generation von Juristen-Diagnostikern – in Anlehnung an Rudolf Virchow selbst – die Realitäten und die Struktur unseres heutigen Medienumfelds hinterfragen; ein entscheidender erster Schritt zur Diagnose der wahren Natur der sozialen Missstände, auf die unsere globalen Regulierungsbemühungen letztlich abzielen. Ebenso wichtig ist, dass ein flexibler, aktualisierter Ansatz zur Medienregulierung von einer „Netiquette“ der Toleranz, des Pluralismus, der Gleichberechtigung und des Respekts vor der Vielfalt begleitet wird. Notwendig sind auch ein Dialog zwischen den Gruppen, aktiver Widerspruch gegen Hasskommentare und eine an den Grund- und Menschenrechten orientierte Bildung. Nichts von alledem können wir erreichen, ohne die Lehren unserer wissenschaftlichen Vorgänger zu beherzigen.

19



MASKEN SCHÜTZEN!

20

Wie weit sich virushaltige Aerosoltröpfchen einer Person ohne Maske ① in geschlossenen Innenräumen verbreiten, hängt von der Größe der Partikel ab. Kleine Tröpfchen lassen sich auch noch in mehreren Metern Entfernung nachweisen. Eine OP-Maske ② filtert einen Großteil der Tröpfchen aus der ausgeatmeten Luft; vor allem an den Wangen strömen trotzdem noch zahlreiche Partikel in die Umgebung. Bei einer FFP2-Maske ③ entweichen vor allem an den Nasenflügeln einige Partikel, was sich dadurch minimieren lässt, dass der Nasenbügel an die Nase angepasst wird.

~ 3 m
90°

GRAFIK: GCO

ANSTECKUNGSRISIKO



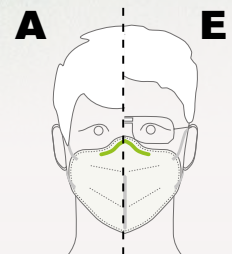
20 min



0 m

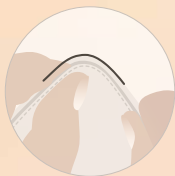
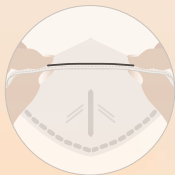
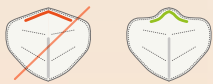
Auf jeden Fall gut geschützt: Masken reduzieren das Ansteckungsrisiko deutlich. Wie stark, hängt davon ab, welche Mund-Nasen-Bedeckung die ansteckende (A, jeweils links) und die empfängliche (E, jeweils rechts) Person tragen und ob die Masken gut (grüner Nasenbügel) oder schlecht

(roter Nasenbügel) sitzen. Die Prozentzahlen geben die Wahrscheinlichkeit einer Infektion nach 20 Minuten wieder, wenn die Personen direkt beieinanderstehen. Am wichtigsten ist, dass die ansteckende Person eine FFP2-Maske trägt, die möglichst gut sitzen sollte.



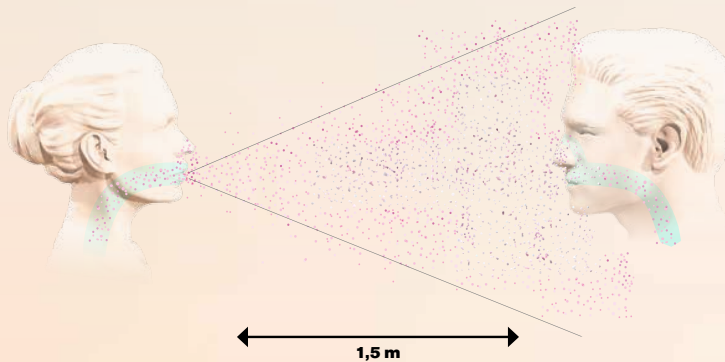
< 0,1 %

DAMIT DIE MASKE RICHTIG SITZT




Damit eine FFP2-Maske an der Nase gut anliegt, sollte der Nasenbügel in der Mitte etwa über einen Finger gebogen und anschließend in eine angedeutete W-Form gebracht werden.

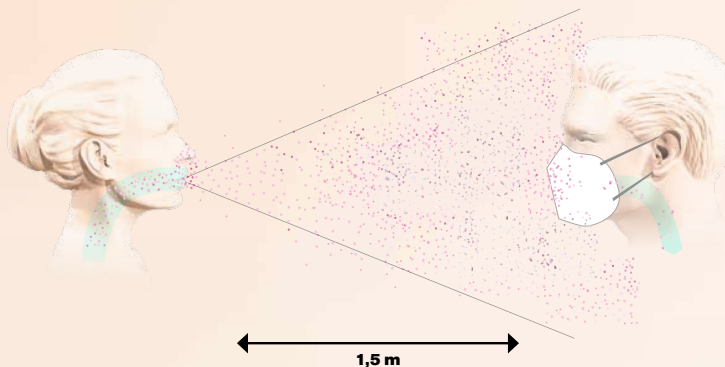
DAS RISIKO OHNE MASKE



Sehr ansteckend: Bei den Omikronvarianten des Coronavirus Sars-CoV-2 liegt das maximale Infektionsrisiko bereits nach drei Minuten bei mehr als 99 Prozent, wenn eine nicht infizierte Person mit 1,5 Meter Abstand im Atemkegel eines Virusträgers steht.

 **> 99 %**
3 min

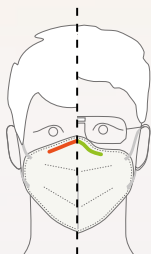
DAS RISIKO MIT MASKE



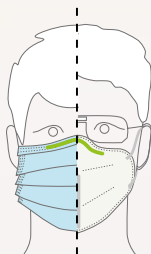
Besser als nichts: Wenn die infizierte Person keine Maske trägt, beträgt das Ansteckungsrisiko für eine nicht infizierte Person mit einer gut sitzenden FFP2-Maske in 1,5 Meter Abstand nach 20 Minuten etwa 20 Prozent und nach 60 Minuten etwa 50 Prozent.

 **~ 20 %**
20 min

 **~ 50 %**
60 min



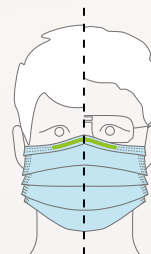
0,5 %



0,8 %



2,8 %



7,6 %

IM FOKUS

GEHEN ODER BLEIBEN?

22 | Zwischen Stadt und Savanne

30 | Heimweh, das in den Genen liegt

38 | Eine Entscheidung fürs Leben

22

Im Aufbruch:
Zwei Wodaabe-
Frauen ver-
laden Teile ihres
mobilen
Hirtenlagers.
Esel tragen die
meisten Lasten,
vereinzelt
kommen aber
auch Motorräder
zum Einsatz.



FOTO: FLORIAN KÖHLER/MPI FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG

ZWISCHEN STADT UND SAVANNE

TEXT: MECHTHILD ZIMMERMANN

23

Nie lange an einem Ort – so war seit jeher der Alltag der Wodaabe, einer traditionell nomadischen Bevölkerungsgruppe in Niger. Doch seit den 1980er-Jahren lassen sich immer mehr von ihnen in den Städten nieder, um dort zu arbeiten. Florian Köhler, Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung in Halle, hat beobachtet, wie sich dadurch das Leben der Wodaabe verändert.

Nano, Taafa and Maalam Buuyo sind Brüder. Und obwohl alle drei unterschiedliche Lebenswege eingeschlagen haben, verfolgen sie doch ein gemeinsames Ziel. Sie gehören den Wodaabe an, einer traditionell nomadischen Gemeinschaft. Die Brüder sind in der Savanne aufgewachsen, sind von Weide zu Weide gezogen mit ihren Herden von Zeburindern, genügsamen Tieren mit langen, geschwungenen Hörnern. Was die Gruppe sonst besaß, hatte auf wenigen Eseln Platz. Das Leben war bestimmt vom Rhythmus der Jahreszeiten, von der Suche nach Wasser und Weidegründen, vom Wohl der Tiere. Als Buben haben die drei zusammen Ziegen gehütet und später, als Jugendliche, mit den Altersgenossen bei Clanfesten den Geerewol getanzt – eine Tradition, für welche die Wodaabe auch außerhalb Afrikas bekannt geworden sind.

Verstreute Gruppen, vielfältig vernetzt

Seither hat sich das Leben der drei Brüder ganz unterschiedlich entwickelt. Maalam, der Jüngste, lebt weiter als Hirte in der Region Damergou und versorgt die Herden der Familie. Die beiden anderen sind zum Arbeiten in die Stadt gezogen: Nano wohnt rund 150 Kilometer entfernt von Maalam, in Zinder, der zweitgrößten nigrischen Stadt, und kehrt sehr häufig aufs Land zurück. Taafa hingegen lebt in Nigers äußerstem Südosten, in der Stadt Diffa, mehr als 600 Kilometer entfernt von den Verwandten. Trotzdem pflegt auch er enge Kontakte zur Familie. „So verschieden die Biografien der drei wirken – sie ergänzen einander“, sagt Florian Köhler, Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung. „Wirtschaftlich betrachtet, ist das eine Strategie der Diversifizierung: Die beiden Brüder in der Stadt erschließen neue Einkommensquellen, um die finanziellen Risiken zu streuen und die Einkünfte der Familie aufzubessern, während sich der dritte um die Herden kümmert.“

Taafa Buuyo war der Erste aus der Ethnie der Wodaabe, den Köhler kennenlernte – und das rein zufällig. Als Entwicklungshelfer war der Forscher 2004 ins nigrische Diffa gekommen. Für das Haus, das er mietete, beschäftigte er einen Wachmann: Taafa Buuyo, der mit Frau und Kindern in einem kleinen Haus auf dem Grundstück wohnte. „Die Sicherheitslage in Diffa war damals recht entspannt“, erklärt Köhler, „aber es war einfach üblich, dass Ausländer aus dem Westen Wachleute einstellten.“ So lernte er die Wodaabe-Familie bald näher kennen. Nach drei Jahren in Diffa arbeitete Köhler in einem weiteren Entwicklungsprojekt, diesmal in der Stadt Zinder. Und wieder gab es einen Wodaabe-Wachmann – Baji Buuyo, ein Halbbruder von Taafa. Mit der Zeit wuchs Köhlers wissenschaftliches Interesse an den Nomaden und ihrem Leben zwischen

Stadt und Savanne. Im Jahr 2010 entschied sich der Ethnologe, die Veränderungen in der Gesellschaft der Wodaabe systematisch zu erforschen. Eine zentrale Frage war: Wie verändern sich die Zugehörigkeit und der soziale Zusammenhalt, die Mobilität sowie das Verhältnis zu anderen Ethnien, wenn sich ein Teil der Gruppe längerfristig in Städten ansiedelt?

Den Wodaabe gehören nach Schätzungen aus den 1990er-Jahren rund 100 000 Menschen an, die sich in fünfzehn Clans unterteilen. In der Savanne leben diese Clans jeweils verstreut in kleinen Gemeinschaften, die aber untereinander vielfältig vernetzt sind. Als zwischen 1983 und 1985 eine verheerende Dürre die Sahelzone heimsuchte, mussten viele Nomaden ihr bisheriges Leben aufgeben. Zahllose Tiere starben, ihre Besitzer ließen sich am Rande größerer Siedlungen nieder – auch weil Hilfsgüter vom Staat und von internationalen Organisationen damals nur in Städten und Dörfern ausgegeben wurden.

Inzwischen haben einige Wodaabe wieder Herden aufgebaut. Andere sind in den Städten geblieben. Auch auf dem Land hat sich vieles verändert. Die Bevölkerung in Niger ist seit Mitte der 1980er-Jahre von knapp sieben Millionen auf mehr als fünfundzwanzig Millionen gewachsen. Der Bevölkerungsdruck führt dazu, dass immer mehr Flächen landwirtschaftlich genutzt werden. Wo einstmals offenes Weideland war, gibt es heute Äcker. Für die Hirten wird es eng. Diese Veränderungen gefährden die Existenz der Wodaabe, sagt Florian Köhler: „Insofern sichert das Einkommen in der Stadt das Überleben auch auf dem Land.“ Köhler war es jedoch wichtig, in seiner Forschung nicht die Probleme in den Vordergrund zu stellen, sondern den aktiven Umgang der Menschen damit, ihre Strategien und Lösungsansätze.

Für seine Untersuchung hat der Wissenschaftler fünfzehn Monate mit einer Wodaabe-Gruppe gelebt. Das entspricht dem Ideal der ethnologischen Forschung, wonach Forschende möglichst für mindestens einen Jahreszyklus am sozialen und kulturellen Leben der untersuchten Gemeinschaft teilnehmen sollen. Ziel ist, ein möglichst tiefes Verständnis von den gemein-

„Wodaabe nehmen die Stadt als dreckig und einengend wahr.“

FLORIAN KÖHLER



Stadtleben mit Privilegien: Dieser Wodaabe-Wachmann (Mitte) kann mit Frau und Kindern auf dem Grundstück seines Arbeitgebers wohnen.

schaftlichen Strukturen, den Denk- und Handlungsweisen zu bekommen – jedoch ohne diese zu bewerten. Für Florian Köhler hieß das: Er lernte Fulfulde, die Sprache der Wodaabe, er wohnte in einfachen Verhältnissen mit ihnen in der Stadt ebenso wie in der Savanne, und er reiste gemeinsam mit ihnen auf offenen Lastwagen, auf Motorrädern, Kamelen, in Buschtaxis und zu Fuß.

In Zinder, einem der Hauptorte von Köhlers Forschung, lebt eine größere Gruppe Wodaabe. Anders als vor der großen Dürre, als Migration in die Städte ein saisonales Phänomen war, lassen sich die jungen Männer heute längerfristig in der Stadt nieder. In Florian Köhlers Untersuchungsgruppe arbeiten die meisten als Wachleute teils bei ausländischen Geschäftsleuten oder Entwicklungshelfern, teils auf Märkten oder in Läden. Viele haben ihre Frauen und Kinder in die Stadt mitgenommen. Die Frauen verdienen ebenfalls Geld: mit Haareflechten oder Hirsestampfen oder als Haushaltshilfen bei wohlhabenderen Familien. Die

Lebensverhältnisse sind sehr unterschiedlich: Wer als Wachmann bei Privatleuten arbeitet, kann mit seiner Familie oftmals in einem kleinen Haus auf dem Grundstück wohnen. Für andere ist es schwieriger, eine Bleibe zu finden: Sie campieren auf ungenutzten Freiflächen am Stadtrand oder auf Baustellen, wo der Eigentümer sie duldet, da ihre Anwesenheit das Risiko verringert, dass Baumaterialien gestohlen werden. „Wenn es möglich ist, halten die Wodaabe dort auch ein paar Ziegen, sie bauen Hirse oder Bohnen an“, erzählt Florian Köhler, „das ist in nigrischen Städten durchaus üblich.“

Unabhängig von der konkreten Wohnsituation verbinden die Wodaabe mit der Stadt vor allem negative Eigenschaften. Sie nehmen die städtische Umgebung als dreckig und ungesund wahr und fühlen sich dort eingekengt. Das positive Gegenstück zur Stadt bildet das offene Weideland der Savanne. Damit identifizieren sich die meisten Wodaabe in den Städten weiterhin, selbst wenn sie schon Jahre oder Jahrzehnte nicht





FOTO: FLORIAN KÖHLER/MPI FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG

26

Improvisierte Unterkunft: Manche Wodaabe leben in der Stadt auf Baugrundstücken, auf denen die Arbeiten pausieren, was in Niger öfter mal vorkommt.

mehr dort leben. Die Gemeinschaft des Hirtenlagers, aus dem sie stammen, bleibt für sie „Heimat“ – auch wenn das kein fester Ort ist, sondern eine soziale Gruppe, die ihrerseits mobil ist. Die tiefe Verbundenheit der Herkunftsgemeinschaft bleibt erhalten, unabhängig davon, ob ihre Mitglieder in der Stadt oder auf dem Land leben. Einige städtische Wodaabe besitzen auch selbst Rinder: Sie beauftragen Verwandte, die Tiere zu kaufen und sich um sie zu kümmern. Die Investitionen reichen zwar oft nicht, um größere Herden aufzubauen. Aber für Köhler sind sie Ausdruck der Verbundenheit mit dem Hirtenleben und zugleich eine Unterstützung für die Verwandten, die weiterhin nomadisch leben.

Für den Austausch der verstreut lebenden Gemeinschaften spielen mittlerweile Handys eine wichtige Rolle. Das Mobilfunknetz in Niger wurde in den letzten Jahren immer besser ausgebaut, teilweise auch in eher dünn besiedelten Gegenden. Auf Märkten in ländlichen Regionen sorgen generatorbetriebene Ladegeräte für den nötigen Strom. Handys ermöglichen es den nomadisch lebenden Gruppen, sich gegenseitig über die Situation der Weiden in verschiedenen Gebieten zu informieren, über den Zustand von Wasserstellen oder

über Marktpreise für Tiere oder Hirse. Diejenigen, die in der Stadt leben, können dank Mobilfunk quasi jederzeit mit den Verwandten auf dem Land telefonieren. Eine Wodaabe-Frau, die sich mit ihrem Mann in der Stadt niedergelassen hat, erzählte Florian Köhler, Handys hätten für sie eine wichtige Rolle gespielt, ein Leben fern von ihrer Herkunftsgemeinschaft zu akzeptieren. Die Mobiltelefone ersetzen jedoch nicht die häufigen gegenseitigen Besuche von Verwandten in der Stadt und auf dem Land – im Gegenteil, sie werden auch genutzt, um größere Treffen zu organisieren.

**„Die meisten kehren
so oft wie möglich ins
Hirtenlager zurück.“**

FLORIAN KÖHLER

Viele Wodaabe sind außerordentlich mobil – obwohl die wenigsten von ihnen einen Führerschein oder gar ein eigenes Auto besitzen. Schon aus der Tradition des nomadischen Lebens heraus sind sie es gewohnt, regelmäßig den Ort zu wechseln. Viele Wodaabe in der Stadt, auch wenn sie schon sehr lange dort leben, versuchen, so häufig wie möglich ins Hirtenlager zurückzukehren – gerne auch für längere Zeiträume. Frauen und Kinder verbringen oft die gesamten Schulferien während der sommerlichen Regenzeit dort. Dann helfen etwa die Buben ihren Cousins beim Ziegenhüten und bleiben auf diese Weise in Kontakt mit dem Nomadenleben. Umgekehrt besuchen die Verwandten vom Land auch oft Familienmitglieder in der Stadt.

Mobilität in Niger funktioniert allerdings etwas anders als in Europa: Es gibt keine Eisenbahn, und der Staat betreibt kaum öffentliche Verkehrsmittel. Von den rund 20000 Kilometern Straßennetz sind nach Zahlen von 2014 nur 4800 Kilometer geteert. Trotzdem ist die nigrische Bevölkerung insgesamt sehr mobil. Von Kleinunternehmern betriebene Sammeltaxis – je nach Bedarf und Straßenbeschaffenheit Minivans, Land

Rover, Lastwagen oder alte Unimogs mit offener Ladefläche – verbinden Städte und Dörfer untereinander. Auf diese Weise existiert ein funktionierendes Transportsystem für Menschen und Waren – wenn auch meist ein wenig komfortables, wie Florian Köhler am eigenen Leib erfahren hat. Auf dem Land sind nach wie vor auch Kamele, Esel und Ochsenkarren wichtige Verkehrsmittel.

Neue Kontakte zu anderen Ethnien

Auch wenn die Bindung der städtischen Wodaabe an ihre Herkunftsgemeinschaft eng ist, bringt das dauerhafte enge Zusammenleben in der Stadt neue Kontakte zu Angehörigen anderer Ethnien mit sich. Aus europäischer Sicht mag es erstaunlich sein, dass verschiedene ethnische Gruppen mit unterschiedlichen Sprachen und Kulturen dauerhaft auf ein und demselben Gebiet leben. In Europa hat die Entwicklung im 19. und 20. Jahrhundert zu kulturell und sprachlich weitgehend einheitlichen Staaten geführt. Auf anderen Kontinenten, insbesondere in Afrika, ist das Neben- und Miteinander verschiedener Ethnien hingegen selbstverständlich. Und anders als man es bei uns oft wahrnimmt, funktioniert das Zusammenleben häufig weitgehend friedlich. Trotz der engen Nachbarschaft vermischen sich die Gruppen kaum. Das hat laut Florian Köhler verschiedene Gründe: „Der Zusammenhalt innerhalb der Gemeinschaft spielt eine Rolle, aber auch die Bindung an die eigene Kultur und eigene Regeln – besonders Heiratsregeln, die Ehen innerhalb der eigenen Ethnie vorgeben.“ Das alles sorgt dafür, dass sich die Gruppen voneinander abgrenzen. Zugleich besetzen die unterschiedlichen Ethnien wirtschaftlich und gesellschaftlich unterschiedliche Nischen.

In Niger halten beispielsweise die Wodaabe traditionell vor allem Rinder, daneben gibt es andere nomadisch lebende Ethnien, die Kamele oder Schafe züchten, sowie sesshafte Ethnien, die überwiegend Ackerbau oder Handel treiben. „Die Komplementarität hilft, Streit zu vermeiden und zugleich die Ethnien durch Tausch oder Handel in Kontakt zu halten“, sagt Köhler. Allerdings gibt es auch hier Konflikte, insbesondere zwi-



Kaum Nutzfläche: Niger ist etwa doppelt so groß wie Frankreich, zwei Drittel des Landes sind jedoch Wüste. Die Bevölkerung lebt größtenteils im Süden, wo Landwirtschaft möglich ist. Florian Köhler hat seine Forschung auf die Savannengebiete im Südosten Nigers fokussiert.

GRAFIK: GCO NACH MPI FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG



Hirtenleben in der Stadt:
Viele Wodaabe halten auch in
der Stadt einige Tiere,
um sich selbst zu versorgen.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Seit den 1980er-Jahren siedeln Angehörige der Wodaabe, einer traditionell nomadischen Ethnie, zunehmend in Städten und finanzieren auf diese Weise das nomadische Leben in der Savanne mit.

In der Stadt gibt es eine stärkere Annäherung an andere Ethnien und eine teilweise Angleichung an die Mehrheitskultur.

Zugleich stehen die Migranten in engem Kontakt mit den Verwandten auf dem Land und pflegen dadurch auch Traditionen weiter.

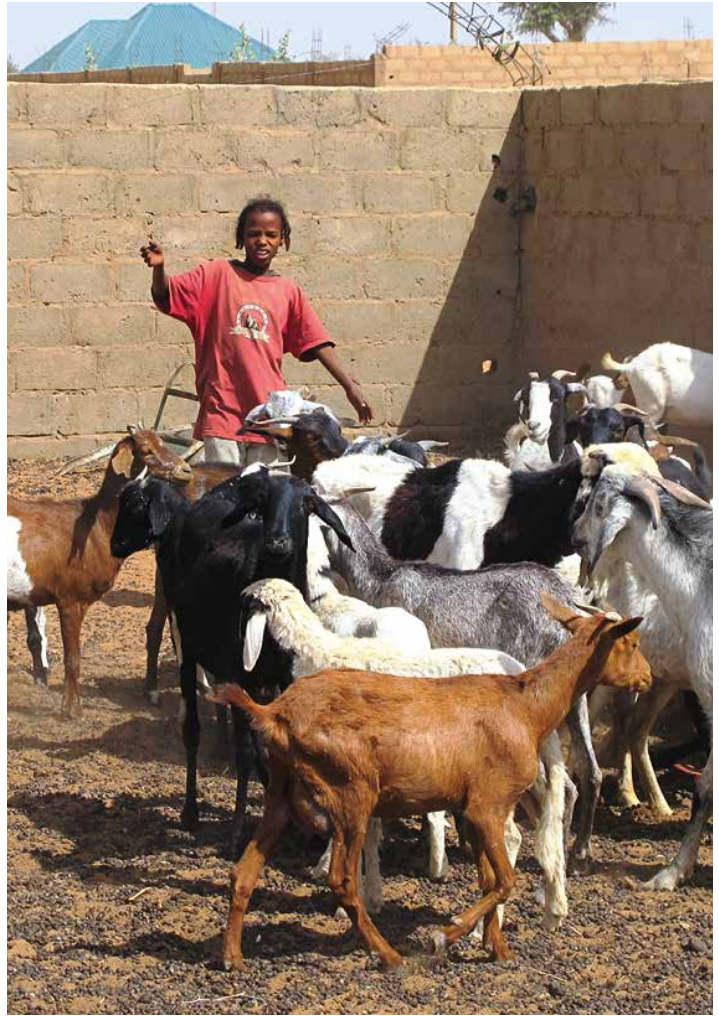


FOTO: FLORIAN KÖHLER/MPI FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG

schen Ackerbauern und Viehhaltern. So kommt es immer wieder vor, dass Tiere in die Felder eindringen und die angebauten Pflanzen fressen oder zertrampeln.

Begegnungen in spöttisch-scherzender Weise

Eine regionale Besonderheit in den Beziehungen unterschiedlicher Ethnien in Niger sind die sogenannten *joking relationships*. Sie wurden sogar 2014 von der Unesco als immaterielles Kulturerbe geschützt. So begegnen sich etwa die Kanuri, eine ethnische Gruppe, die vorwiegend Ackerbau betreibt, und die Wodaabe generell in dieser spöttisch-scherzenden Weise. Alle Mitglieder der jeweiligen Ethnien, selbst wenn sie einander fremd sind, tauschen Provokationen und Frotzeleien aus, wenn sie sich treffen. Dabei spielen sie auf Klischees über die jeweils anderen

an. Für Köhler hat das gemeinsame Scherzen eine Doppelfunktion: „Einerseits setzt man sich damit von den anderen ab, indem man bestimmte Charakteristika von ihnen witzig und pointiert betont. Andererseits stellt genau das eine Beziehung her, weil der Spott reziprok ist und der gemeinsame Humor verbindet.“ In den Städten, wo die Wodaabe in fester Nachbarschaft zu anderen Gruppen leben, verändern sich auch die Beziehungen. Vor allem die Frauen knüpfen Netzwerke in der direkten Umgebung. So ist es beispielsweise üblich, Essen mit Nachbarn und Bekannten zu teilen, wie der Max-Planck-Forscher berichtet. Die Kinder integrieren sich naturgemäß am stärksten. In der Schule entstehen fast zwangsläufig Freundschaften zwischen verschiedenen Ethnien. Auf diese Weise lernen sich auch die Eltern besser kennen. Die Nähe beeinflusst jedoch auch die Kultur. In der Schule sprechen Wodaabe-Kinder zumeist die Mehrheitssprache Hausa, und viele geben ethnische Besonderheiten auf, etwa die traditionellen Frisuren: Um dem Spott ihrer Mit-



Drei Brüder, ein Ziel: Maalam Buuyo (links) lebt als Hirte von Viehhaltung, Nano und Taafa (Mitte und rechts) arbeiten als Wachleute in zwei verschiedenen Städten. Damit finanzieren sie gemeinsam die Großfamilie.

schüler zu entgehen, verzichten die Mädchen auf den charakteristischen Haarknoten an der Stirn, und die Buben schneiden sich die traditionellen Zöpfe ab, manchmal auch ohne Zustimmung ihrer Eltern. Die Frisur ist allerdings fester Bestandteil des Wodaabe-Schönheitsideals und damit wichtig, um an kulturellen Ereignissen wie den Geerewol-Tanzwettbewerben teilzunehmen. Köhler hat jedoch beobachtet, dass die jungen Männer das Problem pragmatisch lösen, indem sie aus ihren abgeschnittenen Zöpfen Haarteile fertigen und damit bei den Tänzen mitmachen.

Allerdings lassen sich nicht alle Widersprüche zwischen Stadt und Land so leicht überbrücken. Je länger die Wodaabe in den Städten leben, desto stärker wird der Einfluss der städtischen Mehrheitsgesellschaft: Wodaabe passen sich nicht nur äußerlich zunehmend an, auch die Einstellung gegenüber bestimmten moralischen Fragen ändert sich. „Eine besondere Rolle spielt dabei die islamische Religion“, sagt Florian Köhler. „Zwar gehören

fast alle Wodaabe nominell dem Islam an, doch auf dem Land sind die Regeln etwa zu Eheschließungen oder Geschlechtsverkehr vor der Ehe meist noch eher von der eigenen Tradition bestimmt.“ Der städtische Einfluss führt zum Beispiel dazu, dass junge Frauen dazu angehalten werden, einen Schleier zu tragen und nachts nicht mehr aus dem Haus zu gehen.

Translokale Gemeinschaften auch bei uns

„Inzwischen“, sagt Florian Köhler, „ist die Identität der Wodaabe als Ethnie gleichermaßen vom Leben in der Savanne wie von dem in der Stadt geprägt. Vor allem junge Menschen, die in der Stadt aufgewachsen sind, bewegen sich dort ebenso selbstverständlich wie im ländlichen Hirtenlager und schaffen durch beständige Mobilität, durch Kommunikation und Austausch komplexe Verbindungen zwischen diesen beiden Sphären.“ Der Ethnologe spricht in diesem Kontext von der translokalen Dimension der städtischen Migration. Translokalität ist ein sozialwissenschaftliches Konzept, das seit einigen Jahren an Bedeutung gewinnt. Demnach sind soziale Bindungen zwischen Menschen nicht zwangsläufig an einen Ort gebunden, sondern bestehen gerade dank moderner Kommunikations- und Transportmittel auch über größere Entfernungen hinweg. Damit unterscheiden sich translokale Beziehungen von der klassischen Dorfgemeinschaft, deren Mitglieder zugleich an den Heimatort und an die dort ansässigen Menschen gebunden sind. Eine Besonderheit bei den Wodaabe ist, dass sie als nomadische Ethnie von jeher eine translokale Gemeinschaft bilden. Soziale Verbindung über eine gewisse Entfernung hinweg aufrechtzuerhalten, ist daher nichts Neues für sie – so Köhlers Beobachtung: Dass die Wodaabe mit Mobilität und der zeitweisen Trennung der sozialen Gruppe kulturell vertraut sind, hilft ihnen, die Verbundenheit der Gemeinschaft auch zwischen Stadt und Savanne zu bewahren.

Das Beispiel der Wodaabe kann auch für uns in Europa neue Perspektiven auf das Zusammenleben von Menschen aus verschiedenen Ländern oder Kulturen geben. So halten viele Migrantinnen und Migranten hier ebenfalls Kontakt zu ihrer Herkunftsgemeinschaft, zu ihrer Sprache und Kultur. Gleichzeitig sind sie ein aktiver Teil unserer Gesellschaft – beides zugleich ist möglich. Darüber hinaus zeigt sich: Auch bei Menschen, die nicht migriert sind, dehnt sich inzwischen der Freundes- und Verwandtenkreis über weitere Entfernungen hinweg aus. Translokalität wird für viele von uns immer alltäglicher. Vielleicht kann uns diese Gemeinsamkeit helfen, mehr Verständnis für Menschen mit Migrationsgeschichte zu entwickeln und den Begriff von Heimat etwas großzügiger zu fassen.

**„Heute prägen Stadt und
Savanne gleichermaßen
die Identität.“**

FLORIAN KÖHLER

www.mpg.de/podcasts/gehen-oder-bleiben



Männchen und Weibchen der Mönchsgrasmücke sind leicht zu unterscheiden: Während die Männchen eine schwarze, an die Kopfbedeckung von Mönchen erinnernde Kappe besitzen, ist der Scheitel der Weibchen braun gefärbt.

HEIMWEH, DAS IN DEN GENEN LIEGT

TEXT: CATARINA PIETSCHMANN

Diesen Herbst brechen auf der Nordhalbkugel wieder Millionen Vögel in ihre Winterquartiere auf. Einigen davon wird Miriam Liedvogel besonders fest die Daumen drücken, dass sie im nächsten Frühjahr heil zurückkehren. Die Wissenschaftlerin am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön hat ihnen nämlich ein wenig Gepäck mitgegeben: sogenannte Geolokatoren. Die winzigen Sensoren sollen ihr verraten, wo die Vögel den Winter über waren.

Durch die geöffneten Fenster dringt ein vielstimmiges Konzert. Laut und selbstbewusst, als verstünden die Musiker genau, dass es hier im Hause nur um sie geht. In den Bäumen und Büschen des Wäldchens, welches das Institut für Vogelkunde in Wilhelmshaven umgibt, sitzen Singvögel aller Art. Auch etliche Mönchsgrasmücken-Männchen, leicht erkennbar an ihrer schwarzen Federkappe, zwitschern da mit. Die Weibchen sind unterdessen noch mit der Aufzucht ihrer Jungen beschäftigt.

Es ist Mitte Juli, und die Jungvögel ahnen nicht, dass es bald auf große Reise gehen wird: gen Süden, bis nach Nordafrika, wo es im Winter angenehm warm ist und es jede Menge Insekten gibt. Sie werden nachts unterwegs sein – allein, denn ihre Eltern fliegen oft schon zwei Wochen früher los. Trotzdem werden die Jungen genau wissen, wo es langgeht und wo ihr Winterquartier sein wird. Seit zwei Jahren ist Miriam Liedvogel Direktorin der außeruniversitären Forschungseinrichtung, die mit der renommierten Vogelwarte Helgoland über einen zweiten Standort verfügt. Hier und am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön, wo ein Teil ihrer Arbeitsgruppe forscht, untersucht die 44-Jährige die genetischen Grundlagen des Orientierungs- und Navigationsvermögens von Zugvögeln.

Stipendien für die Erforschung des Vogelzugs

Liedvogels Interesse für den Vogelzug erwachte während eines freiwilligen ökologischen Jahres, das sie nach dem Abitur an der Küste Ostfrieslands verbrachte. Danach studierte sie Biologie und promovierte an der Universität Oldenburg. Zunächst hat sie als Marie-Curie-Stipendiatin Gene erforscht, die den Biorhythmus von Tieren steuern. So ist sie als Stipendiatin der Alexander von Humboldt-Stiftung im schwedischen Lund zur Genetik des Vogelzugs gekommen. Und diese Stiftung hat sie schließlich mit einem Rückkehrstipendium wieder zurück nach Deutschland geholt. Seit 2014 leitet Liedvogel ihre eigene Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön.

Die Lust am Ziehen – sei es über Land, durchs Wasser oder durch die Luft – ist im Tierreich weit verbreitet. Vögel besitzen diesen Drang, aber auch Fledermäuse, Schmetterlinge, Fische, Meeresschildkröten, Wale und natürlich große Säugetiere wie Bisons, Büffel, Gnus und Rentiere. Sie alle folgen einem genetischen Programm, welches von einer Generation an die nächste weitergegeben wird. Solche „Zuggene“ sind in diesen Tieren wahrscheinlich unabhängig voneinander entstanden, verloren gegangen und wieder neu entstanden – forciert beispielsweise durch sich verändernde klimatische Bedingungen wie etwa Eiszeiten. Miriam Liedvogel möchte herausfinden, welche Gene

Im östlichen Mitteleuropa brütende Mönchsgrasmücken ziehen Richtung Südosten, weiter westlich brütende fliegen nach Südwesten. Vögel aus dem Grenzgebiet zwischen West- und Ostziehern (Zugscheide: gestrichelte Linie) fliegen direkt nach Süden und überqueren die Alpen, das Mittelmeer und oft auch die Sahara an ihrer breitesten Stelle. Die Brutgebiete der in Großbritannien überwinternden Vögel sind über ganz Europa verteilt.

GRAPHIK: GGO

Mönchsgrasmücke mit Geolokator auf dem Rücken. Das Messgerät ist so klein und leicht, dass es den Vogel nicht behindert. Eine Fotozelle misst und speichert die Lichtintensität am jeweiligen Aufenthaltsort des Tiers. Aus den Daten lässt sich dann die Flugroute rekonstruieren.



FOTO: ARTE FRANCE / LA COMPAGNIE DES TAXI-BROUSSE / CLAIR-OBSCUR PRODUCTIONS / RTBF - 2018

es sind, die den Vogelzug steuern. Das Zugverhalten der Mönchsgrasmücken bietet sich dafür hervorragend an, denn die Vögel zeigen die ganze Palette des Zugverhaltens: Die in Skandinavien brütenden Tiere ziehen über lange Strecken. In Mitteleuropa sind sie dagegen Mittelstreckenzieher. Manche spanische Populationen wiederum begeben sich nur auf die Kurzstrecke, andere Populationen in Spanien bleiben gleich ganz an Ort und Stelle. Und selbst innerhalb einer Population machen nicht alle Individuen dasselbe. Ob ein Vogel einer solchen Teilzieherpopulation individuell von Jahr zu Jahr neu entscheidet, ob er wegfliht oder lieber doch vor Ort überwintert, das ist noch eine offene Frage. Miriam Liedvogel will deshalb herausfinden, ob eine Mönchsgrasmücke einer Teilzieherpopulation, die im einen Jahr zieht, dies immer wieder tut. Weitere Erkenntnisse hierzu erhofft sie sich von Rotkehlchen. Auch diese Vögel sind Teilzieher: Ein Teil der Population fliegt im Winter gen Süden, der andere Teil überwintert vor Ort. Dafür verbringen Artgenossen aus Skandinavien den Winter bei uns.

„Am härtesten trifft die Klimakrise die Langstreckenzieher. Falls sie im Herbst zu spät losfliegen, kann es schon zu kalt sein, und sie erfrieren auf dem Zug.“

MIRIAM LIEDVOGEL

Mönchsgrasmücken sind auch deshalb ein gutes Modell für den Vogelzug, weil ihre Zugstrategie nicht nur hinsichtlich der Distanz variiert, sondern auch hinsichtlich der Richtung: Im Osten lebende Tiere ziehen im Herbst nach Südosten und umfliegen das Mittelmeer südöstlich, im Westen lebende Mönchsgrasmücken fliegen südwestlich daran vorbei. Auf diese Weise entsteht eine sogenannte Zugscheide – keine klar erkennbare Grenze, sondern ein schmaler Streifen, in dem sich West- und Ostzieher auch vermischen. Dieser Streifen verläuft zwischen Berlin und Prag in Nord-Süd-Richtung quer durch Mitteleuropa. Liedvogels Team hat herausgefunden, dass Brutvögel entlang der Zugscheide einen „Mittelweg“ wählen: Sie fliegen direkt nach Süden und überqueren die Alpen, das Mittelmeer und oft auch die Sahara – und diese an einer sehr viel breiteren Stelle, als wenn die Alpen und das Mittelmeer östlich oder westlich umflogen werden.

Seit wenigen Jahrzehnten entwickelt sich außerdem eine gänzlich neue Flugroute: nach Großbritannien. Doch dazu später mehr. Dass Singvögel der Drang zu ziehen und der Routenplan von ihren Eltern vererbt wird, ist schon länger bekannt: Peter Berthold, bis 2004 Direktor am Max-Planck-Institut in Radolfzell am Bodensee, hat das in den 1990er-Jahren mit aufwendigen Zucht- und Kreuzungsversuchen herausgefunden. Sein Team hatte Elternvögel aus Populationen westlich und östlich der „Zugscheide“ untereinander verpaart und die Jungvögel von Hand aufgezogen. Sobald die Eltern in Freiheit in ihre Winterquartiere aufbrachen, wurden die Vögel im Käfig unruhig. Ohne dass sie die Orientierungspräferenzen ihrer Eltern kannten, versuchten die Jungvögel, es diesen gleichzutun: Sie flatterten aufgeregt in dieselbe Richtung, in die auch ihre Eltern abhoben. Kreuzte man Vögel beider Populationen miteinander und mischte dadurch die für die Flugrichtung verantwortlichen Gene, so wählten die Nachkommen den Mittelweg, also den direkten Weg nach Süden.

Vögel mit Fahrtenschreiber auf dem Rücken

Liedvogels Forschung baut auf Bertholds Arbeiten auf. Nur untersucht sie die Tiere meist nicht mehr unter kontrollierten Bedingungen im Käfig, sondern in der freien Natur. Aber woher weiß sie, welche Zugrichtung eine frei lebende Mönchsgrasmücke im Herbst gewählt und wo sie den Winter verbracht hat? „Die kleinsten GPS-Ortungssender wiegen immer noch drei Gramm und sind deshalb für die etwa zwanzig Gramm leichten Singvögel weiterhin zu schwer. Deshalb befestigen wir Geolokatoren auf dem Rücken der Vögel“, erklärt die Forscherin. Diese winzigen „Fahrtenschreiber“ sind 0,5 Gramm leichte Fotozellen mit Speicherkarte; sie zeichnen die Lichtintensität und damit die Tages- und Nachtlänge sowie die exakte Zeit auf. Anhand dieser auf dem Geolokator gespeicherten Daten können die Forschenden später mit einer Genauigkeit von fünfzig Kilometern zu jedem Zeitpunkt entlang des Zugs den jeweiligen Aufenthaltsort der Vögel bestimmen und so die Route rekonstruieren. „Wann der Zug startete, wo der Vogel entlangflog, wo und wie lange er pausierte, wo sein Winterquartier war und wann er wieder zurückgeflogen ist – das alles wissen wir aber erst, wenn wir die Tiere im nächsten Frühjahr wieder eingefangen und die auf dem Chip gespeicherten Daten analysiert haben“, erklärt Liedvogel. Die Forschenden müssen also darauf hoffen, dass ihre Vögel in ihr Brutgebiet zurückkehren – was die meisten auch tun. Und dann müssen sie an die Daten gelangen, denn die sind ja weiterhin auf dem Geolokator gespeichert. Es kann einiges an Aufwand bedeuten, bis ein Vogel ins Netz geht. Dann nehmen ihm die Forschenden den Geolokator ab, lesen die Daten aus und analysieren anhand einer Blutprobe sein Erbgut.



Miriam Liedvogel mit weiblicher Mönchsgrasmücke. Die Forscherin will herausfinden, welche Gene das Zugverhalten des Vogels steuern. Am Institut leben die Vögel in großen Volieren, damit ihr Verhalten unter kontrollierten Bedingungen untersucht werden kann.



Mit einer Antenne orten Miriam Liedvogel und Georg Manthey die Signale einer aus ihrem Winterquartier zurückgekehrten Mönchsgrasmücke. Nachdem sie den Vogel gefangen und ihm das Messgerät abgenommen haben, entlassen sie ihn wieder in die Freiheit.

Auf diese Weise finden die Forschenden 20 bis 25 Prozent der Geolokatoren wieder. Bislang haben sie ausschließlich die Routen ausgewachsener Tiere verfolgt, die schon einmal erfolgreich Richtung Süden geflogen und zurückgekehrt waren. „Wir wüssten gerne, wie Jungvögel beim allerersten Mal in ihre Winterquartiere fliegen, was sie dabei lernen und wie sich dieses zusätzlich zur vererbten Information neu erworbene Wissen auf die nächsten Routen auswirkt“, sagt Liedvogel. „Doch die Sterblichkeit im ersten Jahr ist einfach zu hoch.“ Damit ein Zugvogel Jahr für Jahr zum Flug in sein Winterquartier aufbrechen kann, hat er jedes Mal eine Menge Vorbereitungen zu treffen: Zunächst mausert er sich rechtzeitig, damit alle Federn frisch und für den langen Flug unverbraucht sind. Gleichzeitig frisst er sich Fettreserven an. So stellen Mönchsgrasmücken im Herbst von Insekten auf Früchte als Nahrung um und legen sich einen Energievorrat für die lange Reise an. Viele Singvogelarten ändern zudem ihren Biorhythmus von tag- zu nachtaktiv. In der Kühle der Nacht verbrauchen sie weniger Energie, um ihren Körper abzukühlen, und damit auch Flüssigkeit. Zudem sind sie sicherer vor Greifvögeln.



Wenige Gene als Schalter für das Zugverhalten

36

Möglicherweise steuern nur einige wenige Gene all diese Vorgänge. Aber diese wirken dann umso stärker. „Ich vermute, ein oder zwei Hauptschalter koordinieren ein komplexes Netzwerk weiterer Vorgänge“, sagt Miriam Liedvogel. Das Gen für das Neuropeptid Y wäre ein Kandidat für einen solchen Schalter. Der Botenstoff steuert Appetit und Futteraufnahme. „Wird wenig davon produziert, bleibt der Vogel schlank. Gibt es viel, steigt der Appetit, und es kann viel Fett eingelagert werden.“

Das Fett-Anfressen könnte der Dominostein sein, der die ganze Kaskade anstößt. Bleibt der Impuls aus, fehlt das Signal aufzubrechen. Manche in Spanien brütende Populationen ziehen gar nicht mehr und bleiben das gesamte Jahr über im Brutgebiet. Sie lagern auch während der Zugzeit keine vergleichbaren Fettreserven an wie ihre ziehenden Artgenossen.

Wenn eine Mönchsgrasmücke zum Zug aufbricht, kennt sie instinktiv die Richtung, wie die Versuche von Peter Berthold gezeigt haben. Da sie nachts fliegt, kann sie die Sterne als Orientierungshilfe nutzen. Außerdem besitzt sie einen Magnetkompass, um die Richtung zu halten. Andere, meist am Tag ziehende Arten folgen auffäl-

ligen Landschaftselementen wie Flüssen, Eisenbahnstrecken oder Küstenlinien. Sie erinnern sich an gute Rastplätze und nehmen diese als Zwischenstopp in ihre Flugplanung auf. Doch wie findet der kleine Vogel seinen Weg, wenn er allein am Nachthimmel fliegt? Er orientiert sich am Rotationsmuster der Sterne und am Magnetfeld der Erde – selbst dann, wenn der Himmel bewölkt ist. Für das Nachtsehen gibt es den Erkenntnissen der Forschenden zufolge einen eigenen Bereich im Vorderhirn des Vogels. „Da Vögel das Magnetfeld der Erde offenbar über die Augen wahrnehmen, ist dieses Gebiet wahrscheinlich auch an der Magnetfeldorientierung beteiligt“, erklärt Miriam Liedvogel. Der Magnetsinn scheint die wichtigste Orientierungshilfe zu sein. Möglicherweise erben die Vögel eine Art Magnetgedächtnis von ihren Eltern: „Hier ist es richtig, hier muss ich landen.“ Und bei der Rückkehr: „Hier komme ich her.“ Auch der Geruchssinn kann eine Rolle spielen. Und wenn Landmarken verschwinden wie zum Beispiel dieses Jahr der trockengefallene Po in Norditalien? Kein Problem, denn das „Navi“ der Zugvögel hat ein Back-up. „Wenn ein Navigationssystem ausfällt, springen die Magnetkarte und der Sternenkompass ein.“

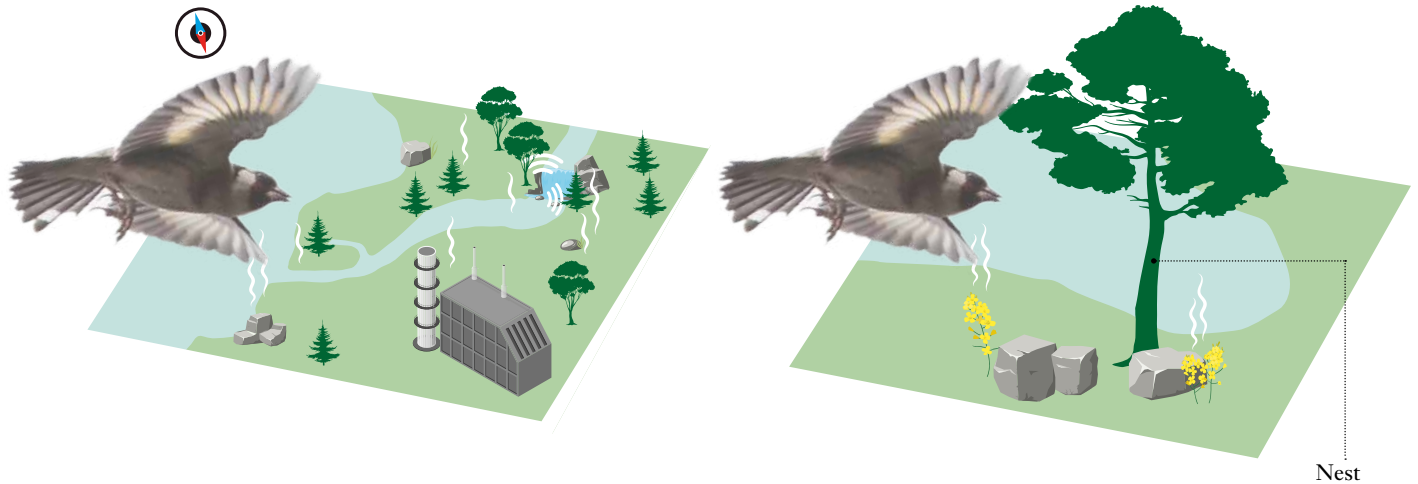
Leider ist die Nacht in vielen Gebieten der Erde heute nicht mehr dunkel.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob und wohin ein Vogel im Herbst zieht, wird ihm von seinen Eltern vererbt. Die Gene, die das Zugverhalten steuern, sind jedoch noch unbekannt.

Für den Zug ändern Vögel ihr Verhalten und ihren Stoffwechsel. Die Anpassungen werden von verschiedenen Genen gesteuert. Diese wiederum werden möglicherweise durch einige wenige Kontrollgene reguliert.

GRAPHIK: GCO NACH MOURITSEN, H. LONG-DISTANCE NAVIGATION AND MAGNETORECEPTION IN MIGRATORY ANIMALS. NATURE 558, 30–39 (2018).



Vögel können auf einem Langstreckenflug verschiedene Navigationshilfen nutzen: Zunächst orientieren sie sich am Sonnenstand und am Sternenhimmel sowie am Erdmagnetfeld (links). Sobald das Zielgebiet erreicht ist, liefern Gerüche, auffällige Landschaftsmerkmale, die Geräuschkulisse sowie auch der Magnetkompass wichtige Hinweise (Mitte). Um sich innerhalb ihres Brutgebiets zu orientieren und beispielsweise ihr Nest zu finden, verlassen sich Vögel auf Landschaftsstrukturen wie Bäume oder Gewässer sowie ihren Geruchssinn (rechts).

Landmarken, an denen sich die Vögel bisher orientiert haben, werden nun von der Lichtverschmutzung durch den Menschen überstrahlt. Zugvögel kommen dadurch leicht vom Kurs ab. „In den USA liegen während der Zugperioden regelmäßig Tausende tote Vögel am Fuß von Wolkenkratzern“, erzählt Miriam Liedvogel.

Der weltweite Rückgang der Insekten und die Klimakrise lassen die Bestände vieler Zugvogelarten rund um den Globus ebenfalls einbrechen. „Am härtesten trifft es die Langstreckenzieher, denn bei ihnen ist das Zugprogramm am stärksten genetisch fixiert. Falls sie im Herbst zu spät losfliegen, kann es schon zu kalt sein, und sie erfrieren auf dem Zug.“ Kurz- und Mittelstreckenzieher wie die Mönchsgrasmücke kommen mit solchen Veränderungen besser zurecht. Wegen der milden Winter kehren die Mönchsgrasmücken inzwischen drei Wochen früher aus dem Süden nach Norddeutschland zurück. „Das ist gut für sie, denn die Eichen treiben heute früher aus. Damit sind auch die Falterraupen, die sich von den Blättern ernähren, zeitiger im Jahr als Aufzuchtfutter für die Jungen verfügbar“, erklärt Liedvogel.

In Großbritannien locken milde Winter

Wie schnell sich die Vögel an neue Verhältnisse anpassen können, zeigen noch tiefgreifendere Veränderungen, mit denen die Tiere auf das wärmer werdende Klima reagieren. Seit den 1960er-Jahren beobachten

Ornithologen, dass immer mehr Mönchsgrasmücken nicht gen Süden fliegen, sondern nach Nordwesten abbiegen. In den Parkanlagen und Gärten Großbritanniens locken nämlich infolge des Golfstroms milde Winter – und Extrafutter: Die als Vogelliebhaber bekannten Briten bestücken Jahr für Jahr unzählige Futterhäuschen und backen sogar spezielle *bird cakes*. Hinzu kommt die deutlich kürzere Flugdistanz. „Eine Studie, bei der auch viele begeisterte Ehrenamtliche mitgemacht haben, hat ergeben, dass die in Großbritannien überwinternden Vögel ihre Fettreserven deutlich schneller auffüllen können und zehn Tage früher in ihre Brutgebiete aufbrechen als ihre im Süden überwinternden Artgenossen. Dadurch könnten sie sich die besten Territorien zum Brüten aussuchen“, vermutet Liedvogel.

Das Überwintern in Gärten kann sogar den Körperbau beeinflussen: In Gärten lebende Mönchsgrasmücken besitzen breitere Schnäbel und rundere Flügelspitzen. Gründe dafür könnten sein, dass die in den Gärten lebenden Vögel andere Nahrung zu sich nehmen und so besser manövrieren können und insgesamt kürzere Flugdistanzen fliegen. Die Mönchsgrasmücke scheint also ihr Verhalten und ihre Physiologie rasch an neue Bedingungen anzupassen. Das kommt ihr offenbar gegenwärtig zugute: Im Gegensatz zu vielen anderen Vogelarten wie beispielsweise dem Trauerschnäpper sind die Bestände der Mönchsgrasmücke in Deutschland stabil und nehmen sogar leicht zu. Flexibilität und Anpassungsfähigkeit könnten ihr auch zukünftig das Überleben in unsicheren Zeiten garantieren.

🔊 www.mpg.de/podcasts/gehen-oder-bleiben



EINE ENTSCHEIDUNG FÜRS LEBEN

TEXT: SABINE FISCHER

Migration verändert die Gesellschaftsstruktur in Europa seit Jahrzehnten massiv. Doch wie fühlt es sich eigentlich an, in einem neuen Land älter zu werden? Und zahlt sich das Wagnis Migration für die Menschen letztlich aus? Diesen Fragen sind Stefan Gruber und Gregor Sand am Max-Planck-Institut für Sozialrecht und Sozialpolitik nachgegangen.

Für Barbara und Andrzej Klimczyk ist Deutschland eine Geschichte, die an einer Autobahnausfahrt begann. Eigentlich wollte das Ehepaar 1986, nach zwei Jahren in Algerien, in seine Heimat nach Polen zurückfahren. Doch auf dem Rückweg entschieden sich die beiden anders – und trafen damit eine Entscheidung für ihr ganzes Leben.

„Wir hatten viele gute Jahre in Polen“, erinnert sich Barbara Klimczyk, heute in ihren Siebzigern, und blättert in einem dunkelgrünen Fotoalbum. Gemeinsam mit ihrem Mann Andrzej sitzt sie in ihrem Wohnzimmer in Gerlingen, Baden-Württemberg, in einem Polstersessel, den sie vor vielen Jahren aus dem Elternhaus in Gliwice, Oberschlesien, nach Deutschland gebracht hat. In dem Album auf ihrem Schoß bewahrt sie viele Erinnerungen an die Zeit in ihrem Heimatland auf: Fotos, auf denen sie im kurzen Kleid selbstbewusst vor dem Traualtar steht. Eine Nahaufnahme lachender Freundinnen an einer großen Festtafel. Bilder, die Andrzej einst von ihrer gemeinsamen kleinen Tochter beim Spielen machte. In Polen arbeitete er als Architekt und Cartoonist, sie war an der Universität tätig und beschäftigte sich mit russischer Literatur. Ihr Freundeskreis bestand aus Schöngeistern und Menschen mit einem Sinn für Kunst – ein Leben, geprägt von intellektuellem Austausch.

40 Doch als 1981 in Polen das Kriegsrecht ausgerufen wurde, änderte sich der Alltag des Paares schlagartig. Die Wirtschaft lag brach, irgendwann konnte man im Supermarkt nicht einmal mehr Kaffee kaufen. Andrzej's kritische Zeichnungen wurden vor jeder Veröffentlichung so bearbeitet, dass ihre Aussagen völlig verloren gingen. „Dazu kam, dass die Luft im Industrienebel von Gliwice voll von Schwermetallen und Dämpfen waren. So sollte unsere Tochter nicht aufwachsen“, sagt Andrzej Klimczyk und fügt hinzu: „Wir haben von einem Tag auf den anderen im Kriegszustand gelebt. Dabei sind wir Menschen, die Freiheit brauchen.“ Der Schritt, nach einem Arbeitsaufenthalt in Algerien die Ausfahrt in Deutschland zu nehmen, fiel den beiden vor diesem Hintergrund also nicht schwer. Ihre Hoffnung: ein Leben in Freiheit in einem demokratischen System.

Hoffnung auf bessere Lebensumstände

Ähnliche Abwägungen wie das Ehepaar Klimczyk treffen viele Menschen, die sich dazu entscheiden, ihr Heimatland zu verlassen. „Eine der Hauptmotivationen für Migration ist die Hoffnung, das eigene Wohlbefinden und die eigenen Lebensumstände zu verbessern“, erklärt Stefan Gruber vom Max-Planck-Institut für Sozialrecht und Sozialpolitik. Gemeinsam mit seinem Kollegen Gregor Sand beschäftigt er sich im Rahmen zweier Studien mit der Frage, wie sich die Entschei-

dung, das Heimatland zu verlassen, im Laufe eines Lebens auf die Menschen auswirkt, die sie getroffen haben. Die beiden Wissenschaftler sind speziell der Frage auf den Grund gegangen, ob sich Migrantinnen und Migranten im Alter von über fünfzig Jahren in ihrer neuen Heimat wohlfühlen.

„Wir haben von einem Tag auf den anderen im Kriegszustand gelebt. Dabei sind wir Menschen, die Freiheit brauchen.“

ANDRZEJ KLIMCZYK

Den Wunsch nach einer neuen Zukunft hatte auch Domagoj Vlastic, als er Mitte der 1990er-Jahre das erste Mal nach Deutschland kam. Bei ihm war es der Jugoslawienkrieg, der sein Leben massiv erschütterte: Vier Jahre lang wurde der gebürtige Kroatier zwangsweise als Soldat verpflichtet. Eine Erfahrung, die nicht nur seine Lebensplanung auf den Kopf stellte, sondern auch Spuren hinterließ. Nach seinem Militäreinsatz kamen bei Vlastic die Schlafstörungen. Die Traumata. Die Sehnsucht nach einem besseren Leben. Bevor der Krieg seine Pläne durcheinanderwirbelte, hatte Domagoj Vlastic in seinem Heimatort im heutigen Kroatien Aussichten auf eine Karriere als Profifußballer gehabt. Genau diese Perspektive eröffnete ihm nun den Weg in ein neues Leben: „Ich bekam glücklicherweise die Chance, für einen Fußballverein ins Ausland zu gehen“, erinnert er sich.

Über Umwege gelangte der damals 23-Jährige schließlich an einen Vertrag bei einem Fußballverein in Radolfzell am Bodensee und kam so das erste Mal in Berührung mit einer Kultur, die ihm bis dahin vollkommen fremd war. „Ich sprach kein Wort Deutsch, das war am Anfang wirklich schwierig“, sagt er. Heute ist seine Aussprache geprägt von einer Mischung aus kantig osteuropäischer Betonung und weichem, rundem Schwäbisch. Daran, sein Leben von nun an in Deutschland zu verbringen, dachte er damals noch nicht. Der Schritt ins Ausland bedeutete für ihn zunächst einmal eine Perspektive auf ein besseres Leben. Seit Jahrzehnten verändert Migration die Gesellschaftsstrukturen in Europa. Mehr als jede vierte Person in Deutschland hat laut einer Auswertung der Bundeszentrale für politische Bildung 2020 einen Migrationshintergrund – eine Zahl, die geradezu sinnbildlich für das Ausmaß von Migrationsbewegungen in und nach Europa steht. Viele Migrantinnen und

—>

FOTO: VERENA MÜLLER FÜR MPG



41

Angekommen: Barbara und Andrzej Klimczyk immigrierten 1986 nach Deutschland. Ihr Interesse für Kunst und Literatur hat ihnen geholfen, hier einen Freundeskreis aufzubauen.



Neu im Club: Mitte der 1990er-Jahre kam Domagoj Vlasic als Fußballspieler aus Kroatien zum FC Radolfzell an den Bodensee. Das Zeitungsbild ist ein Andenken an damals.

42

Migranten leben viele Jahre in ihrem neuen Heimatland, machen dort Erfahrungen und prägen die Gesellschaft oft entscheidend mit. Doch wie fühlt es sich an, in einem Land älter zu werden, in dem man nicht geboren wurde? Kommen die Menschen in ihrer neuen Heimat wirklich an? Wie stehen sie zu ihrer früheren Entscheidung auszuwandern? Und hat sich das Ganze für sie wirklich ausgezahlt?

Die Antworten, welche die Wissenschaftler im Rahmen ihrer beiden Studien auf diese Fragen gefunden haben, sind eindrücklich: Vergleicht man das Wohlbefinden von Menschen, die von einem europäischen Land in ein anderes migriert sind, mit dem Wohlbefinden jener, die im jeweiligen Herkunftsland geblieben sind, zeigen sich positive Effekte der Migration: „Migrierte Personen – wir haben uns auf innereuropäische Migration beschränkt – weisen ein signifikant höheres Wohlbefinden auf als Menschen, die nicht ausgewandert sind. Hier scheint sich die Migrationsentscheidung in den meisten Fällen gelohnt zu haben“, sagt Gruber.

„Dass wir nach Deutschland gekommen sind, betrachten wir heute als richtig“, sagt auch Andrzej Klimczyk. Und das, obwohl die junge Familie, die 1986 als Spätaussiedler in Deutschland anerkannt wurde, keinen ganz einfachen Start hatte. Zwar spricht Barbara Klimczyk, die zur deutschen Minderheit in Oberschlesien gehörte, schon seit ihrer Kindheit neben Polnisch auch Deutsch. Trotzdem dauerte es eine Weile, bis sich das Paar in der neuen Heimat eingelebt hatte. Nach Stationen im Grenzdurchgangslager Friedland und in Aachen fand Andrzej in Stuttgart schließlich

einen Job als Architekt, Barbara brachte dort anderen Ausgesiedelten Deutsch bei. Auch die Liebe zu Kunst und Kultur begannen sie hier wieder auszuleben: „Wir gehen gerne in Kunstaussstellungen und zu Lesungen, besonders im tollen Stuttgarter Literaturhaus. So haben wir uns allmählich mit Menschen vernetzt. Das hat uns das Ankommen viel leichter gemacht“, sagt Barbara Klimczyk.

Dass er sich in Deutschland zu Hause fühlt, merkte Domagoj Vlasic hingegen geradezu beiläufig. Eine Zeit lang lebte er nahe der Schweizer Grenze und unternahm immer wieder Ausflüge in das Nachbarland. Dort kam ihm schließlich eine Erkenntnis: „Ich dachte mir jedes Mal: Nein, das sind einfach nicht meine Leute. Es ist zwar schön hier, aber ich will auch gerne wieder zurück nach Hause – und damit meinte ich Deutschland“, so Vlasic. Nach den Erkenntnissen von Stefan Gruber und Gregor Sand hängt dieses Gefühl des Angekommenseins von vielen Faktoren ab. Für seine Untersuchungen nutzt das Forschungsduo Ergebnisse aus dem Survey of Health, Ageing and Retirement in Europe (SHARE), für den 105 000 Menschen aus elf europäischen Ländern zu verschiedenen Themen befragt wurden. Rund acht Prozent von ihnen gelten als Migrantinnen und Migranten – sie leben zum Zeitpunkt der SHARE-Interviews also in einem Land, in dem sie nicht geboren wurden. „Der Datensatz beschränkt sich nicht exklusiv auf Menschen, die migriert sind, die Personenzahl ist jedoch groß genug, dass man sinnvolle Schlüsse ziehen kann“, erläutert Gruber. Besonders spannend: Die meisten Menschen, die im SHARE-Datensatz einen Migrationshintergrund aufweisen, sind bereits vor langer Zeit ausgewandert. Durchschnittlich leben sie seit vierzig Jahren in ihrer neuen Heimat – für Grubers und Sands Forschungsanliegen optimal: „Ob sich ihre Lebensumstände verbessert haben, kann man messen – im ökonomischen und im nichtökonomischen Bereich“, so Sand.

„Je wohler sich Menschen in einem Land fühlen, desto besser sind sie integriert.“

STEFAN GRUBER

Dazu nahmen die Wissenschaftler im Datensatz den sogenannten CASP-Index unter die Lupe – eine Skala, die anhand der Faktoren Kontrolle, Autonomie, Selbstverwirklichung und Freude (*control, autonomy, self-realization, pleasure*) die Lebensqualität von Menschen misst. „Es werden dafür zwölf Items abgefragt. Zum Beispiel, ob die Personen sich auf den nächsten Tag freuen oder ob sie das Gefühl haben, die Kontrolle

über ihr Leben zu haben und Dinge tun zu können, auf die sie Lust haben“, erklärt Stefan Gruber.

Dafür, dass die Menschen im Alter in ihrer neuen Heimat glücklich sind, seien individuelle und soziale Aspekte ebenso entscheidend wie die finanzielle Situation: „Es ist wichtig, welche Position die Menschen mit ihrem Einkommen im Zielland erreicht haben“, so Gregor Sand. Genau hier liegt eine entscheidende Einschränkung, was die positiven Effekte von Migration angeht: Auch wenn Migrantinnen und Migranten meist deutlich zufriedener sind als Menschen in ihrem Herkunfts-

land, fällt der Vergleich mit den Einheimischen in ihrem Zielland oftmals negativ aus. Wer ausgewandert ist, dessen Wohlergehen ist im Durchschnitt messbar geringer als das eines Menschen, der im Land aufgewachsen ist. „Hier spielt die finanzielle Situation eine große Rolle“, sagt Gruber. „Aber auch andere Faktoren – etwa ob die Personen die Staatsbürgerschaft des Landes haben – beeinflussen, wie glücklich sie heute sind.“

Schaut man genauer hin, weisen die Ergebnisse zudem einige Feinheiten auf. Vor allem mit Blick auf die Herkunft und das Alter der Befragten erkennen die Wissenschaftler deutliche Abweichungen: „Wenn etwa jemand aus Nord- oder Zentraleuropa nach Schweden auswandert, unterscheidet sich sein Wohlbefinden nicht signifikant von dem der Einheimischen“, so Sand. Der Unterschied zwischen Einheimischen und Eingewanderten zeige sich vor allem bei Menschen aus süd- oder osteuropäischen Ländern. Und er ist wesentlich vom Alter der befragten Personen abhängig. Kurz gesagt: Je älter sie werden, desto kleiner wird der Unterschied. Das liege allerdings nicht daran, dass Migrantinnen und Migranten im hohen Alter glücklicher würden, sondern

sei eher darauf zurückzuführen, dass andere Faktoren entscheidender werden als die Migration, so Gruber und Sand. „Das Wohlbefinden sinkt bei allen Befragten mit zunehmendem Alter, bei den Einheimischen im Verhältnis stärker als bei den migrierten Personen, sodass sich die fallenden Kurven beider Gruppen langsam annähern“, sagt Gregor Sand.

Wie zufrieden Menschen aus dem Ausland in einer Gesellschaft werden können, hängt zumeist auch entscheidend von der Integrationspolitik des jeweiligen Landes ab. Wie hoch sind die Hürden? Wie offen ist der Zugang zum Arbeitsmarkt und zum Gesundheitswesen? Zu Bildung, Kultur, Staatsbürgerschaft? „Um diesen Einfluss zu verstehen, haben wir auch die Integrationspolitik verschiedener Länder unter die Lupe genommen“, so Gruber. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist eindeutig:

Länder, die eine offene Integrationspolitik betreiben, tragen mit diesem Kurs aktiv dazu bei, dass sich die Lücke in Sachen Zufriedenheit zwischen Eingewanderten und Einheimischen schließt.

„Für uns lassen sich daraus drei große Lehren für bessere Integration ziehen“, schließt Stefan Gruber. Um für ein höheres Wohlbefinden zu sorgen, sei es zum einen wichtig, dass Länder für Migrierte und Einheimische auf dem Arbeitsmarkt die gleichen Zugangsmöglichkeiten schaffen. Außerdem sollten sie den Zugang zur Staatsbürgerschaft möglichst leicht machen und Möglichkeiten bieten, die Familien der Migrantinnen und Migranten ohne hohe bürokratische Hürden nachzuholen. Diese Empfehlungen an die Politik haben laut den beiden Wissenschaftlern konkrete Auswirkungen auf die Gesellschaft. Denn je wohler sich Menschen in einem Land fühlen, desto besser sind sie integriert – und desto stärker engagieren sie sich, tragen zur Gesellschaft bei und prägen diese mit. Das habe unter anderem zur Folge, dass Sozialsysteme entlastet werden, und gestalte das Zusammenleben vielfältiger, so Gruber und Sand.

Überzeugte Europäer, weltoffen und interessiert

Sich in der Gesellschaft optimal einbringen zu können, ist auch für Barbara und Andrzej Klimczyk wichtig. Beide sehen sich als Europäer, sind weltoffen und interessiert. „Wir haben hier die Möglichkeit, Menschen und Dinge kennenzulernen, die wir sonst nicht gehabt hätten“, sagt Andrzej Klimczyk. Heute engagieren sie sich in der deutsch-polnischen Gesellschaft und haben sich auch in Gerlingen einen vielseitig interessierten Freundeskreis aufgebaut, der – bis auf einige enge Beziehungen aus Jugendtagen – zum Großteil aus Menschen in ihrer direkten Umgebung besteht.

Domagoj Vlasic hat sich in Deutschland inzwischen ebenfalls einen großen Freundeskreis und eine eigene Familie aufgebaut. Wenn er sein Leben mit dem seiner Bekannten vergleicht, schaut er in beide Richtungen: Wie geht es ihm im Vergleich zu seinen deutschen Nachbarinnen und Nachbarn? Und wo steht er im Vergleich zu Bekannten in Kroatien? Beide Male ist er zufrieden mit dem, was er erreicht hat. „Ich bin glücklich hier. Aber langsam wünsche ich mir etwas weniger Hektik in meinem Leben – die Möglichkeit, mit meinen eigenen Händen Gemüse anzubauen, mich zu entspannen“, sagt er. Seinen Lebensabend möchte er deshalb gemeinsam mit seiner Ehefrau gerne in Kroatien verbringen, in der Nähe des ehemaligen Bauernhofs seiner Eltern. Ein dauerhafter Abschied von Deutschland solle das allerdings nicht werden. „Das Land ist mein Zuhause geworden. Spätestens wenn es im Winter in Kroatien langweilig wird, werde ich wohl wieder auf den Weihnachtsmarkt nach Deutschland fahren.“

🔗 www.mpg.de/podcasts/gehen-oder-bleiben

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Wer innerhalb Europas auswandert, profitiert im Vergleich zu den Daheimgebliebenen: Migrantinnen und Migranten sind im Durchschnitt finanziell besser gestellt und zufriedener als ihre ehemaligen Landsleute.

Im Vergleich zur angestammten Bevölkerung haben Eingewanderte allerdings oft weniger Geld und fühlen sich weniger wohl.

Die Politik kann zur Zufriedenheit beitragen, indem sie den Zugang zu Arbeitsmarkt und Staatsbürgerschaft öffnet und Familiennachzug erleichtert. Davon profitiert auch die Gesellschaft insgesamt.

Qualle kross, Milchmayo und vegane Wurst mit Knack – das sind Spezialitäten aus dem Labor von Thomas A. Vilgis. Der Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz geht das Kochen mit wissenschaftlicher Präzision an und hat so die perfekte Synthese seiner beiden Leidenschaften gefunden.

TEXT: CATARINA PIETSCHMANN

Pfifferlinge mit Knödeln, dazwischen gewürfelte Möhren, noch leicht knackig. „Es ist immer wichtig, unterschiedliche Texturen im Mund zu haben. Da ist mehr los auf der Zunge“, sagt Thomas Vilgis und seziert mit der Gabel weiter das Pilzgericht. „Die Möhren sind noch ordentlich von Hand geschnitten. Schöne Unregelmäßigkeiten. So liebe ich das!“ Wer mit Vilgis essen geht, kommt nicht umhin zu fragen, was diesem dabei auffällt, und spürt dem eigenen Mundgefühl nach. Der Mann ist weder Starkoch noch Ernährungsphysiologe oder Lebensmittelchemiker, sondern theoretischer Physiker. Aber er weiß genau, wovon er spricht. Thomas Vilgis leitet am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz noch bis zum Jahr 2024 die Gruppe „Weiche Materie, Lebensmittelphysik“. Sein Team und er gehen den Strukturen von Nahrungsmitteln auf den Grund und erforschen neuartige Lebensmittel. Exakte Wissenschaft ist aber nur eine Seite von Thomas Vilgis. Neben unzähligen Fachpublikationen hat der 67-Jährige inzwischen mehr als zwanzig populäre Bücher geschrieben, in denen es um die Wissenschaft des Kochens, ungewöhnliche Geschmackserlebnisse und – natürlich – Rezepte geht. Im Frühjahr erschien *Der Genussforscher*, angelehnt an seinen Samstagnachmittags-Podcast beim SWR, *Kochen mit Genussforscher Prof. Thomas*

Vilgis (ein Rezept zum Download inklusive). Gerade kommt sein neuestes Werk in die Buchläden – *Noch mehr Kochen für Angeber. Die geheimen Tricks der Sterneküche* –, und sein Standardwerk, *Aroma. Die Kunst des Würzens*, liegt inzwischen bereits in der fünften Auflage vor. Mitherausgeber des *Journal Culinair*, der Zeitschrift für Kultur und Wissenschaft des Essens, ist er auch noch. Herr Professor! Wie konnte das passieren?

Thomas Vilgis lacht. „Ach, das war eine seltsame Geschichte. Mit weicher Materie hatte ich schon lange zu tun. Anfangs waren es Kautschuk und andere Polymere, später Kolloide, dann Proteine. Ich war ein typischer Papier- und Bleistift-Theoretiker – aber dann entwickelten sich die Computersimulationen rasend schnell. Damit ließen sich in der theoretischen Physik bald besser Grenzen ausloten, als es auf dem Papier über viele Näherungen möglich war.“ Selbst mit dem Simulieren beginnen wollte er nicht, nicht zuletzt weil sich bereits ein anderes Fenster geöffnet hatte. Es gab den Blick frei auf Töpfe, aus denen unwiderstehliche Aromen waberten, auf unerforschte Texturen von Lebensmitteln ... Das alles wartete im Grunde nur darauf, von ihm analysiert und verstanden zu werden. Mit schuld daran war Gastrokritiker Wolfram Siebeck, dessen *Zeit*-Kolumne Vilgis, selbst leidenschaftlicher Hobbykoch, las. Als Siebeck sich einmal über eine spezielle Art des Pizzabackens ausbotte, schrieb Vilgis einen Leserbrief: Was Siebeck da ausprobiert habe, sei ja physikalisch eh unsinnig gewesen, denn ... Wenig später fragte der Chefredakteur von *Essen & Trinken* an, ob Vilgis nicht eine regelmäßige Kolumne zu „Essen und Naturwissenschaften“ schreiben könne. 1999 war das. Muschelmousse, Melonenkaviar – die Molekularküche zog damals auch in Deutschlands Haute Cuisine ein. „Man experimentierte wild

—>

BESUCH BEI

THOMAS
VILGIS

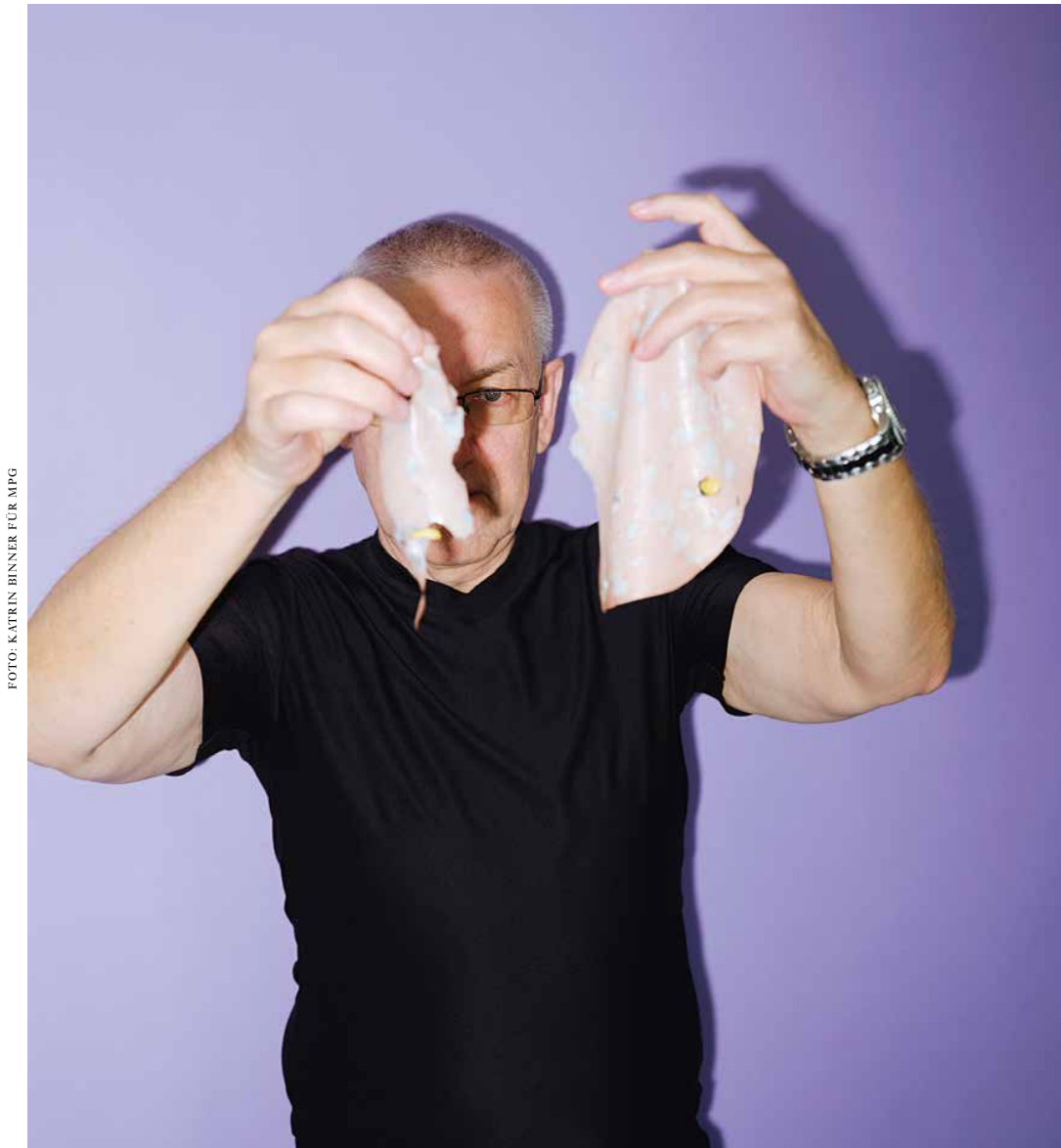


FOTO: KATRIN BINNER FÜR MPG

45

Zerreißprobe: Thomas Vilgis untersucht die physikalischen Eigenschaften von Lebensmitteln, auch den Unterschied in den Texturen von Mortadella und veganer Wurst.

mit Gelier- und Verdickungsmitteln – alles reinste Polymerphysik.“ Thomas Vilgis lernte den französischen Physikochemiker Hervé This kennen, dessen Buch *Rätsel der Kochkunst, naturwissenschaftlich erklärt* damals gerade Furore machte. „Wir wurden bald dicke Freunde und diskutieren seither immer wieder.“

Lebensmittel und ihre Zubereitungsarten physikalisch analysieren? Warum nicht! „Ich war damals schon am Max-Planck-Institut und hab das mal anklingen

lassen. Man war gleich Feuer und Flamme. Ich bekam einen Etat, zwei Laborräume und kaufte unser erstes Rheometer.“ Ein Gerät, mit dem sich Elastizität, Fließverhalten, Scherkräfte eines Materials bestimmen lassen. Es besteht aus einer feststehenden und einer beweglichen Platte, zwischen die beiden wird die Probe gelegt. „Richtig los ging es dann, als ein Hersteller von Maschinen für die Lebensmittelproduktion anfragte, ob wir für ihn die Fließeigenschaften von Pastateig untersuchen könnten“, erzählt Vilgis. Das Forschungsprojekt sicherte eine



FOTO: KATRIN BINNER

Der richtige Riecher:
Durch den physikalischen
Zugang hat Thomas
Vilgis schon manches
Rezept mit einer Prise
Wissenschaft verfeinert.

Postdoc-Stelle für zwei Jahre. Neben der Industrie kommen auch Doktoranden oft mit spannenden Ideen auf ihn zu. Und meist treibt ihn schlicht die eigene Neugier. Zum Beispiel bei der Frage, was das Mundgefühl von Kaviar ausmacht. „Ich hab mir ein wenig Kaviar und Forelleneier zum Vergleich besorgt und beides unter eine vorübergehend zum Texturanalysator umgebaute Universalprüfmaschine gelegt.“ Darin drückt ein Stempel langsam, aber stetig von oben auf die Probe. Das entspricht ziemlich genau dem, was zwischen Gaumen und Zunge passiert, während Kaviar im Mund „prozessiert“ wird. Anfangs zeigt sich die hohe Elastizität der Eihüllen, dann ihr Aufplatzen, wenn die Kraft plötzlich abfällt. „In diesem Moment werden die ganzen Aromen explosionsartig im Mund freigesetzt.“ Kollagen und Elastin in der winzigen Eihülle bilden ein ganz spezielles Netzwerk, fand Vilgis heraus. „Um die Rissausbreitung und das Platzen zu beschreiben, hab ich mein altes Wissen von der Theorie der Gummielastizität wieder ausgepackt.“

Zuckerersatzstoffe, vegetarische und vegane Produkte, aktuelle Foodtrends – Vilgis' Themen kommen aus allen Richtungen. Darunter manch

men – Polymerphysik par excellence. Dadurch wird dem Tier ebenfalls Wasser entzogen, und es schrumpft zu einer flachen Scheibe, die anschließend nachgetrocknet wird. „Man erhält so einen krossen, salzigen Chip, der sich gut zum Aperitif macht oder als Texturelement bei bestimmten Gerichten.“

Manchmal geht's im Institut zu wie in einer Experimentierküche. Mayonnaise wird gewöhnlich mit Ei gemacht. Als Emulgator lässt sich aber auch Milch verwenden, wie Masterstudentin Katja Braun erforschte. „Wir nahmen etwas Milch und träufelten dann unter starkem Rühren langsam das Öl dazu.“ Zu Hause hatte Vilgis das schon ein paarmal probiert. Doch wie stabil bleibt diese Emulsion? Wie groß sind die Öltröpfchen in der Milchmayo? „Für das Projekt haben wir transparente Rheometerplatten angeschafft. So konnten wir genau sehen, ab welchen Schergeschwindigkeiten die Öltröpfchen deformiert werden und zu fusionieren beginnen. Dabei veränderte sich die Viskosität.“ Es ist der Moment, in dem die Mayonnaise im Mund plötzlich flüssiger wird. Eine Milchmayo (ohne Zusatzstoffe) bleibt gekühlt sieben Tage stabil. Es geht auch vegan, ganz hervor-

47

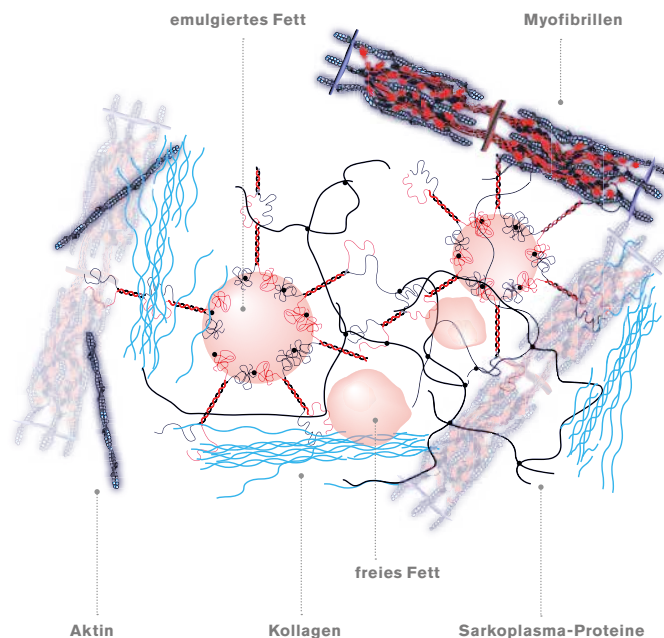
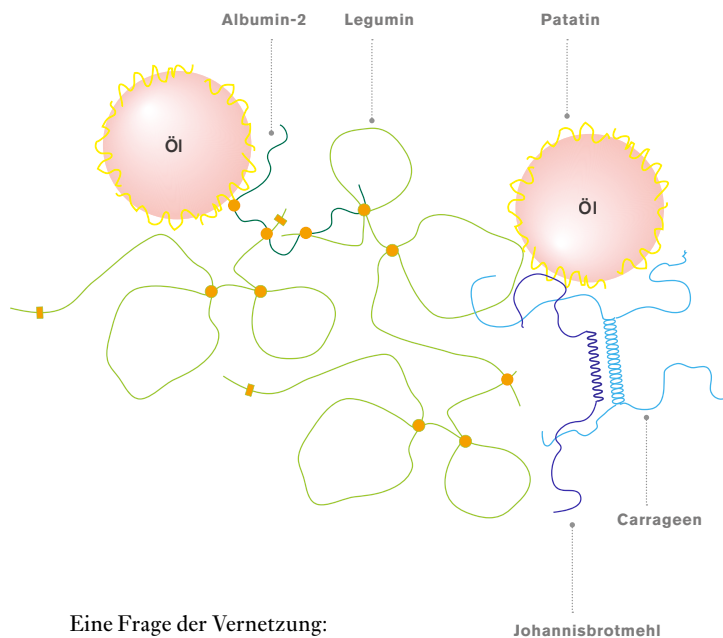
„Mir war klar: Aromachemiker lachen sich über meine Systematik einen Ast. Aber in der Küche kann man damit etwas anfangen.“

Skurriles, wie die Quallenchips, an denen er zusammen mit der Dänin Mie Pedersen forscht. In Asien, wo traditionell Nesseltiere gegessen werden, legt man diese nach dem Fang in eine Mischung aus Kochsalz, Kalziumchlorid und Aluminiumsalzen. „Durch Anlagerung der ein-, zwei- und dreiwertigen Ionen ziehen sich die Proteine zusammen, und die Qualle wird entwässert. Eine Art Gelatinegummi entsteht, aber recht crunchy“, erklärt Vilgis. Aluminiumsalze stehen im Verdacht, Alzheimer zu begünstigen, und so probierte Mie Pedersen etwas Neues aus: Statt in Salz legte sie die Tiere in 96-prozentigen Alkohol. Quallenproteine binden viel Wasser, sind aber in Alkohol schlecht löslich und ballen sich zusam-

ragend sogar – mit Sojamilch. Hafermilch dagegen floppte, aus rein physikalischen Gründen.

Schon als kleiner Junge guckte Thomas Vilgis seiner Mutter gern beim Kochen in die Töpfe. Was aß er als Knirps am liebsten? „Leberwoschtbrot mittags und Leberwoschtbrot abends“, erinnert er sich schmunzelnd. „Diese Phase wurde dann abgelöst durch Schokoladenbrot mittags und abends, aber auch Linseneintopf, Pichelsteiner Topf und saure Kutteln.“ Ende der 1960er-Jahre nahm er in der Schule an einer Koch-AG teil, geleitet von der Wirtin des „Ochsenwirt“, einer urigen Gaststätte in Oberkochen, seiner Geburtsstadt. „Die ersten Gastarbeiter aus Italien waren bereits im Ländle,

—>



Eine Frage der Vernetzung: Das typische Mundgefühl, das Fleischwurst (rechts) erzeugt, entsteht durch die engmaschige Verknüpfung von Myosin- und Sarkoplasmaproteinen (schwarze Punkte). Das Kollagen bewirkt zudem ein teils elastisches und teils viskoses Verhalten. Diesen Effekt sowie die Fähigkeit des Kollagens, Wasser zu binden, versucht man in veganer Wurst (links) über Xanthan, Carrageen oder andere Bindemittel nachzuahmen. Da sich die Bindemittel aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften jedoch von den chemisch vernetzten Pflanzenproteinen trennen, lässt sich vegane Wurst gewöhnlich stärker dehnen als Fleischwurst.

und so kochten wir mal Baschta Schutta“ – Pasta asciutta, Nudeln mit Hackfleischsoße. „Für mich ein faszinierender, neuer Geschmack. Das kam dann auch zu Hause auf den Tisch.“

Während die Foodprojekte am Institut ins Laufen kamen, fragte Stiftung Warrentest an, ob Vilgis nicht ein Buch mitschreiben könne, wie man Aromen in der Küche am besten nutzt. Wissenschaftlich fundiert natürlich! „Als Physiker hatte ich von Aroma- und Duftstoffen null Ahnung. Also hab ich erst einmal viel Originalliteratur gelesen.“ Tausende verschiedener Aromen galt es irgendwie in den Griff zu kriegen. Doch wie? Gibt es bestimmte Aromatypen? Offenbar. „Was man im Früh-

ling bei den Blüten riecht, sind chemisch gesehen alles azyklische Terpene. Zwar duften Blüten je nach Pflanzenart unterschiedlich, doch der Grundgeruch ist gleich. Genauso ist es bei den Schwefelverbindungen in Knoblauch, Zwiebel, Kohl.“ Kräuterartige Aromen basieren auf zyklischen Terpenen. Und so geht es weiter durch acht Aromatypen, die Vilgis farblich codierte. Halt! Es gibt noch einen neunten. Für geruchlose Substanzen, die nicht die Geschmacksknospen für süß, sauer, salzig, bitter und umami reizen – sondern den Trigeminusnerv. Wie das scharfe Capsaicin im Chili oder Oxalsäure, die das stumpfe, adstringierende Mundgefühl von Sauerampfer, Spinat

und Rhabarber ausmacht. „Mir war klar: Aromachemiker lachen sich über meine Systematik einen Ast. Aber in der Küche kann man damit etwas anfangen.“ 2014 erschien jedoch eine wichtige Publikation ebenjener Experten der TU München. Sie hatten nach Hauptaromen in Lebensmitteln und deren Ursprung gesucht und bestätigten nun indirekt, dass Vilgis mit seiner Intuition ganz richtig gelegen hatte. „Puh!“

Die Natur ist verspielt und komplex, und so vereint fast jedes Gewürz, jedes Kraut, Gemüse oder Obst mehrere Aromagruppen in sich. Anhand von Vilgis' Farbcode lässt sich leicht erkennen, welche. Auch welche Gewürze, etwa Knoblauch und Zwiebel, einander ähneln und den Geschmack unterstreichen – Fachleute sprechen von Food-Pairing – oder aber spannende Kontraste, Food-Completing genannt, bilden. Weil sie Aromen mitbringen, die etwa dem Knoblauch fehlen – wie Zitronengras, Ingwer oder Thymian. Aromen ändern sich mit der Verarbeitung – und deren Temperatur. Es kann also einen großen Unterschied machen, ob etwas roh, gekocht, gebraten oder fermentiert gegessen wird. Normaler Zucker zum Beispiel ist einfach nur süß. Wird er in der Pfanne auf über 150 Grad Celsius erhitzt und geschmolzen, entsteht Karamell – aromatisch und knackig. Genau, auch Texturen verändern sich! „Texturen bestimmen wesentlich das Mundgefühl eines Lebensmittels“, betont Vilgis. Sie zu analysieren und zu verändern, gehört zu seinem Metier. So fand sein Team kürzlich heraus, was den zarten Schmelz ei-

ner Foie gras ausmacht und wie man diesen ohne Tierquälerei nachbauen kann – aus Lebern von Gänsen, die nicht gestopft wurden. Doch wie, das bleibt vorerst noch geheim.

Überhaupt nachhaltigere Lebensmittel: Hauptthema in letzter Zeit sei Wurstersatz. Praktisch, dass die Fleischwurst eines bekannten Herstellers zugleich als Original, als vegetarische Version (mit Eiklar) und vegan (mit Kartoffel- und Erbsenprotein) im Kühlregal liegt. „Ich wollte wissen, was den Unterschied macht, und hab zwei Doktorandinnen zu einem Friday-Afternoon-Experiment überredet.“ Daraus entwickelte sich nach und nach eine umfassende Studie, die im *Journal Physics of Fluids* publiziert wurde. Im Rheometer verhielten sich die Proben nahezu gleich, bei Zugexperimenten jedoch zeigten sich eklatante Unterschiede: Während die echte Wurst anfangs sehr elastisch war und dann bald riss, ließ sich die vegane schier endlos dehnen. „Bei den meisten Herstellern wird et-

Bereut hat er den Wechsel zur Lebensmittelphysik nie. „Im Gegenteil! Es war die beste Entscheidung meines Lebens“, sagt Thomas Vilgis. „Physikalische Methoden lassen sich hier gut einsetzen, es gibt eine unmittelbare Anwendung – und ich profitiere auch persönlich davon.“ Denn bei Familie Vilgis zu Hause wird jeden Abend gekocht. „Ein Blick in den Kühlschrank, die Aromabibliothek im Kopf auf volle Leistung, Textur- und Kochphysikprogramme laufen nebenher. Dann geht’s los.“ Seine Frau übernimmt die Vorspeise, er das Hauptgericht. Danach gibt es noch ein winziges Stück Käse, ein Dessert (oft Obstiges) und zum Abschluss ein Stückchen Schokolade. Man sieht es ihm nicht an. Kein Wunder, denn er macht „ein wenig Spocht“: Fast täglich nach dem Aufstehen 100 Liegestütze, 100 Sit-ups und sonntags ausgiebiges Krafttraining. Im Institut bewegt er sich stets mit „überhöhter Geschwindigkeit“, rennt die Treppen rauf wie runter. Auch im Sitzen und Stehen zappele er rum, spanne mal diesen, mal jenen

„Convenience-Food und Tiefkühlware kommen bei mir nur zu wissenschaftlichen Zwecken auf den Teller.“

49

was zusammengemischt und nur darauf geachtet, ob es schmeckt. Die Emulgiereigenschaften der Muskelproteine vom Tier unterscheiden sich aber von denen der Pflanzen.“ Auf Basis der Experimente entwickelte das Team Modelle zur Mikrostruktur von Wurst und Wurstersatz, die erklären, wie verschiedene Proteine das mechanische Verhalten und damit das Mundgefühl beeinflussen. Entscheidend für den typischen Knack beim Biss in die Wurst ist das Netzwerk, das die Proteine bilden. Proteine von Sonnenblumen haben dafür eine bessere Struktur als jene von Erbsen. Inzwischen hat die Firma übrigens das Rezept ihrer fleischlosen Würste entsprechend angepasst. Allerdings hält Vilgis es beinahe für verwerflich, dass häufig reines Protein als Fleischersatz eingesetzt wird. „Faserstoffe, Polyphenole, Vitamine, Ballaststoffe – alles wird entsorgt! Das ist Blödsinn und macht auch weniger satt.“

Muskel an. Das sei gut für die „kleine Muskulatur“, meint seine persönliche Physiotherapeutin – und langjährige Ehepartnerin.

Kennengelernt haben sie sich in Ulm, wo er Physik studierte. Seither gehen sie jeden Samstag gemeinsam zum Wochenmarkt. Vilgis’ Ernährungsgrundsätze: nur frische und saisonale Lebensmittel. Zwischendurch knabbern? Nie und nimmer! Nie ganz satt essen. Vielfalt macht satt – nicht die Menge. „Convenience-Food und Tiefkühlware kommen bei mir nur zu wissenschaftlichen Zwecken auf den Teller.“ Obwohl... Es gibt etwas, da wird er schwach. Früher, daheim auf der Schwäbischen Alb, gab es ja keinen frischen Fisch. Also kamen Fischstäbchen oder „Quadratfisch“ in die Pfanne. „Ich hab’s geliebt! Wenn es das bei uns in der Cafeteria gibt, steh ich ganz vorn in der Schlange und fühl mich wieder wie mit fünf.“





FOTO: KATRIN BINNER FÜR MPG

Viele Köche, aber ein guter Brei: Mathias Bächle, Marta Ghebremedhin, Hannah Hartge, Thomas Vilgis und Juan Carlos Zambrano (von links) entwickeln gemeinsam Ideen für neue Forschungsprojekte – in jüngster Zeit ist nachhaltige Ernährung ein großes Thema.

Thomas Vilgis kocht meist ohne Rezept und ist immer auf der Suche nach neuen, ungewöhnlichen Geschmackserlebnissen. Das Food-Completing fängt schon beim Sonntagsfrühstück an: Ins große Müsli mit diversen frischen Früchten und Trockenobst kommen auch Kräuter aus dem eigenen Garten. Mal Majoran – „je intensiver, desto besser“ –, mal Thymian, mal Basilikum. Was grad so wächst. Sein Lieblingsgewürz ist die Tonkabohne (heuartig, vanillig, leicht bitter). „Im Dessertbereich wird sie oft zusammen mit Vanille verwendet. Noch eine Prise Muskat dazu, und es ist wie ein Parfum.“ Er gibt das tropische Gewürz aber auch als „finalen Abrieb“ zu Salzigen. Zu Bratkartoffeln, Hähnchen, Fisch und sogar auf Rotkohl. „Zucker und Butter mit etwas Vanille in der Pfanne karamellisieren, den klein geschnittenen Kohl darin kurz anrösten, Sahne drüber, ein bisschen Tonkabohne, salzen. Mmh!

Perfekt zu Wild.“ Nachzulesen im Kochbuch *Der Genussforscher* – wie unter anderem auch Kalte Früchte-Ministrone mit Campari, Stierwade, aromatisiert und zugenäht und cremiges Sellerie-Nuss-Gemüse. Zum Abschluss vielleicht noch ein Kosakenzipfel à la Lorient? Statt mit Sahnehäubchen krönt Vilgis das legendäre Dessert – ein Mokka-Trüffel-Parfait mit Zitronencreme-Bällchen – mit einem winzigen Baiser. Damit es besonders schwer genau in der Mitte zu teilen ist – eine Schwierigkeit, an der in einem Sketch Lorient die Freundschaft zweier Ehepaare zerbricht. Doch natürlich geht es Thomas Vilgis nicht darum, mit dieser Variation Zwietracht zu säen, sondern – man kann es erahnen – um die aufregende Kombination von Texturen und Aromen zwecks spannenden Mundgefühls: kalt, cremig und kross – bitter, sauer und süß.

🔗 www.mpg.de/fleischfreie-wurst

FORSCHUNG LEICHT GEMACHT

Das Magazin der Max-Planck-Gesellschaft als **ePaper**:

www.mpg.de/mpf-mobil

www.mpg.de/mpforschung

KOSTENLOS
DOWNLOADEN!





FOTO: AKG-IMAGES

ZWEITER BLICK

MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR BILDUNGSFORSCHUNG

April 1822. Im griechischen Unabhängigkeitskrieg töten osmanische Soldaten auf der Insel Chios Tausende griechischer Zivilisten. Berichte und Bilder davon, wie das von Eugène Delacroix (links), verbreiten sich in Europa und lösen eine Welle des Mitgefühls und der Unterstützung aus. Die Historikerin Caroline Moine sieht darin einen der Ursprünge internationaler Solidarität. Heute ist es der Krieg in der Ukraine, der in Europa solidarische Gefühle weckt – nach ähnlichen Mustern wie damals. Bilder von Gräueltaten, ein klares Feindbild und gemeinsame Werte, die auf dem Spiel stehen, treiben die Menschen auf die Straße – wie hier in Berlin.

53

EIN KOPIERER FÜRS ERBGUT

TEXT: ANDREAS LORENZ-MEYER

54 Mit einem unverständlichen Code kann niemand etwas anfangen – auch eine Zelle nicht. Patrick Cramer erforscht das Enzym, das den DNA-Code umschreibt, sodass aus einem Gen ein Protein entstehen kann. Dabei setzt er auf scharfe Mikroskope und auf künstliche Intelligenz.

Film ab! Es geht mitten hinein in den Zellkern. Wie das Gewinde einer Schraube bohrt sich die DNA-Doppelhelix in das aktive Zentrum der RNA-Polymerase. „Dort drinnen wird sie entwunden, und einer der beiden DNA-Stränge dient dann als Vorlage für das zu bildende Boten-RNA-Molekül“, erklärt Patrick Cramer, Direktor am Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften in Göttingen. Auf Cramers Bildschirm erscheint die RNA als ein einzelner Strang, der sich aus dem Körper des Polymerase-Enzyms herauschlängelt. Er dient als Bauanleitung für ein neues Protein.

In der Fachsprache wird dieser Vorgang der Umschreibung von DNA in RNA als Transkription bezeichnet. „Sie ist der Prozess, der unser Erbgut zum Leben erweckt“, sagt Cramer. Kein Wunder, dass eine ganze Menge unse-

rer Gene und Proteine nur dazu dient, Boten-RNA herzustellen – alles in allem rund 1800. Ein Akteur stellt alle anderen in den Schatten: das Enzym RNA-Polymerase II, das für die Produktion der Boten-RNA zuständig ist. „Unsere zentrale Kopiermaschine“, so nennt Cramer dieses aus mehreren Untereinheiten bestehende Enzym. Wenn er erzählt, dass das Enzym eine Kraft von 20 billionstel Newton entwickelt und 3000 Bausteine pro Minute in die RNA einbaut, ist dem 53-jährigen Chemiker und Strukturbiologen seine Bewunderung für die Leistungen des Moleküls anzumerken. Auch nach jahrelanger Forschung hat er nichts von seiner Begeisterung für die faszinierenden Vorgänge im Zellinnern verloren.

Die wissenschaftliche Laufbahn führte ihn von 1999 bis 2001 als Postdoc an die kalifornische Stanford University. Roger Kornberg, der später den Chemie-Nobelpreis erhielt, war dort sein Mentor. Cramer gelang es in dieser Zeit als Erstem, die komplizierte räumliche Struktur der RNA-Poly-

merase II zu entschlüsseln. Damit konnten die Forschenden zum ersten Mal einen Blick in das Innere dieser molekularen Maschine werfen. In Cramers Büro am Göttinger Faßberg steht ein Modell des Enzyms, das an eine bunte Koralle erinnert. Es zeigt unter anderem den Spalt im Molekül, in dem die DNA in RNA umgeschrieben wird.

Die Aufklärung der 3D-Struktur damals in Stanford war der Startpunkt für die Entschlüsselung der Transkription: Viele Fragen ließen sich nun beantworten. Zum Beispiel, wie die RNA-Polymerase an die Startstelle eines Gens dirigiert wird. Oder warum das Enzym beim Entlanggleiten an der DNA ständig Pausen einlegt: „Die sind nötig, weil manchmal Sand im Transkriptionsgetriebe ist. Dann eilen Helfermoleküle herbei, sogenannte Elongationsfaktoren. Sie beseitigen die Hürden – und die Transkription kann weitergehen“, erklärt Cramer. Um den Prozess immer weiter zu entschlüsseln, mussten die Forschenden im Lauf der Jahre wie-

FOTO: SRINIVASAN RENGACHARI, SHINTARO AIBARA, PATRICK CRAMER; MPI-NAT



WISSEN AUS

BIOLOGIE & MEDIZIN

Räumliche Struktur des Transkription-Initiationskomplexes. Die verschiedenen Farben markieren verschiedene Proteinfaktoren, die der RNA-Polymerase II (grau) helfen, die Startstelle eines Gens zu finden, die DNA-Doppelhelix zu entwinden und die RNA-Synthese zu beginnen.

55



56

Die Entschlüsselung der Gentranskription ist Teamarbeit: Patrick Cramer (Mitte) mit Mitgliedern seiner Abteilung.

der und wieder neue experimentelle und computerbasierte Methoden entwickeln.

Zwanzig Jahre später tritt die Transkriptionsforschung jetzt in ihre nächste Phase. „Bisher haben wir den Umschreibevorgang außerhalb der Zelle im Reagenzglas nachgestellt und untersucht. Nun wollen wir den Vorgang in seiner natürlichen Umgebung analysieren“, so Cramer. „Wir möchten der RNA-Polymerase direkt bei der Arbeit zuschauen.“ Noch ist unklar, ob dies gelingt, denn auch dazu müssen wieder neue Methoden entwickelt werden. Zur Demonstration zukünftiger Arbeiten zeigt Patrick Cramer die elektronenmikroskopische Aufnahme von Teilen eines Zellkerns. Die DNA und ihre Begleitpro-

teine erscheinen als körnige Masse. Aber von der Polymerase keine Spur! Noch, denn Cramers Abteilung testet gerade einen neuen Ansatz: eine Kombination aus Kryoelektronenmikroskopie und -tomografie. Bei der Kryoelektronentomografie bilden die Forschenden die körnige Masse aus unterschiedlichen Blickwinkeln ab. „Es wird schwer werden, die RNA-Polymerase direkt zu sehen“, erklärt Cramer. „Deshalb wollen wir bekannte Strukturen wie Puzzleteile in die niedriger aufgelösten Tomografiebilder einpassen. Mithilfe künstlicher Intelligenz werden nun nicht nur die Bilder schärfer, sondern wir können auch die Struktur der Puzzleteile vorhersagen. So hoffen wir bald zu sehen, wie ein Gen während der Transkription aussieht.“ In der Forschung wei-

terzukommen ist das eine. Cramer versucht aber auch, neues Wissen einem größeren Publikum näherzubringen. Er schreibt allgemein verständliche Texte, hält öffentliche Vorträge und twittert. „Mir liegt am Herzen zu erklären, was wir tun und warum wir Grundlagenforschung brauchen.“ Wie dringend notwendig sie ist, dürfte in den vergangenen zweieinhalb Jahren der Coronapandemie klar geworden sein.

Seit Ausbruch der Pandemie stehen Forschende wie nie zuvor im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Doch wie sich positionieren in solch unruhigen Zeiten, in denen Fake News und Verschwörungstheorien die öffentliche Diskussion und die Demokratie gefährden? Patrick Cramer sieht die

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Das Enzym RNA-Polymerase II ist das zentrale Enzym der Transkription, bei der ein Genabschnitt auf der DNA in ein RNA-Molekül umgeschrieben wird. Die Entschlüsselung der räumlichen Struktur der Polymerase und der Transkription ist ein Meilenstein in der Molekularbiologie.

Künftig soll die Transkription nicht mehr nur im Reagenzglas, sondern auch in lebenden Zellen erforscht werden. Möglich machen sollen dies methodische Entwicklungen, unter anderem die Kombination zweier Mikroskopietechniken.

Wissenschaft als Anwältin der Vernunft und als Ausgangspunkt einer faktenbasierten Politik. „Gerade bei Themen, die für die Menschen unmittelbar relevant sind, müssen wir Stellung beziehen. Wir müssen klar sagen, was wir wissen, aber auch, was nicht.“

Blockierte Polymerase soll Virus stoppen

Auch in seinem Forscheralltag ist das Virus angekommen, denn Sars-CoV-2 besitzt ebenfalls eine RNA-Polymerase. Wer sie blockieren kann, kann vielleicht auch die Vermehrung des Virus stoppen. Cramer erinnert sich nur allzu gut an den Beginn der Pandemie im Frühjahr 2020: „Wir wussten, dass wir keinen Wirkstoff herbeizaubern können. Aber mit Polymerasen kannten wir uns aus – also legten wir los.“ Ein halbes Dutzend Mitarbeitende kehrte sofort aus dem Homeoffice ins Labor zurück – unter den geltenden Sicherheitsauflagen natürlich. Ein Wettlauf gegen die Zeit begann – und gegen Forschungsgruppen aus China. Die hatten ein

wenig früher angefangen, aber Patrick Cramers Team konnte den Rückstand aufholen. Euphorische Momente und Rückschläge wechselten sich ab. Anfang April 2020 – also nur sechs Wochen nachdem Corona Europa erreicht hatte – war es so weit: Nahezu zeitgleich veröffentlichten die Teams aus Deutschland und China die Struktur der Viruspolymerase. Anders als die Daten aus Fernost zeigten die Göttinger Analysen auch neuartige Molekülhäkchen der Coronapolymerase. Mit diesen Häkchen kann sich die Polymerase am Erbgut festklammern, bis sie es kopiert hat. Das ist gerade für das Coronavirus wichtig, denn sein Genom besteht aus rund 30000 Bausteinen und ist damit besonders lang, das Kopieren also eine echte Mammutaufgabe.

In den folgenden Monaten untersuchte Cramers Team auch die Wirkweise antiviraler Medikamente. Die Forschenden konnten zeigen, warum der antivirale Wirkstoff Remdesivir, der 2020 als erstes Covid-19-Medikament zugelassen worden war, bei Covid-19 eher schwach wirkt. „Remdesivir behindert zwar die Polymerase in ihrer Arbeit, tut dies allerdings erst mit einiger Verzögerung. Und das Medikament stoppt das Enzym auch nicht vollständig“, erklärt Patrick Cramer.

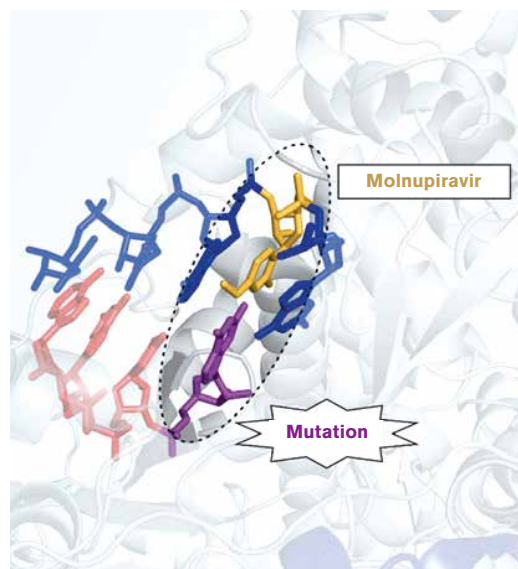
Im Unterschied dazu wirkt Molnupiravir – eine Verbindung, die ursprünglich als Grippemedikament entwickelt wurde, ganz anders gegen Sars-CoV-2. Wie die Göttinger Forschenden im Detail zeigten, beeinträchtigt Molnupiravir die Funktion der Kopiermaschine nicht wie Remdesivir direkt. Stattdessen sorgt der Wirkstoff dafür, dass es bei der Vervielfältigung des Viruserbguts zu Mutationen kommt. Das Virus kann sich dadurch nicht mehr vermehren. Seit Anfang 2022 kann das Medikament in verschiedenen Ländern zur Behandlung von Covid-19 eingesetzt werden.

Im dritten Jahr nach Ausbruch der Pandemie wird es nun erneut spannend in Göttingen: Cramers Team will einen Wirkstoff finden, der die Polymerase des Virus stark blockiert und so die Vermehrung des Erregers noch besser hemmt. Dafür arbeiten die Forschenden mit Kolleginnen und Kollegen am Dortmunder Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie zusammen. Gemeinsam haben sie mehr als 300000 Substanzen auf potenzielle Wirkstoffe hin untersucht, welche die Viruspolymerase hemmen.

Damit stehen die Forschenden aber erst am Anfang: Das ebenfalls in Dortmund ansässige Lead Discovery Cen-

57

Molnupiravir (gelb) wird in die RNA des Coronavirus (blau, rot) eingebaut und führt dort zu Mutationen (violett). Dadurch kann der Wirkstoffkandidat die Vermehrung des Virus unterdrücken.



GRAFIK: FLORIAN KABINGER, CHRISTIAN DIENMANN, PATRICK CRAMER / MPI FÜR MULTIDISZIPLINÄRE NATURWISSENSCHAFTEN



Christian Dienemann analysiert die Ergebnisse seiner Untersuchungen am Kryoelektronenmikroskop.

ter soll jetzt dabei helfen, den unter Pharmaforschenden berühmten Graben zwischen Wirkstoff- und Medikamentenkandidaten zu überbrücken und die Entwicklung neuer Medikamente zu erleichtern. „Der Markenkern der Max-Planck-Gesellschaft ist die Grundlagenforschung. Gleichzeitig sollten wir jedoch dafür sorgen, neues Wissen mit potenziellem Nutzen für die Menschen auch zur Anwendung zu bringen“, betont Cramer.

Die Förderung innovativer Forschung wird Cramer in den nächsten Jahren noch intensiver beschäftigen – dann jedoch weniger als Institutsdirektor, sondern als Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft. Im Juni hat ihn der Senat der Forschungsorganisation zu Martin Stratmanns Nachfolger gewählt. Im Juni 2023 wird Cramer das Amt übernehmen.

Welche Grundsätze hat er für seine Amtszeit? „Zum Beispiel, dass Exzellenz mehr bedeutet als herausragende Forschungsergebnisse. Unser Anspruch muss höher liegen, denn nicht alles, was man messen kann, zählt. Und nicht alles, was zählt, kann man messen. Exzellenz erfordert es, Forschungsneuland zu betreten, etwas zu wagen. Wir haben das Privileg, dass wir selbst festlegen, wohin wir gehen.“ Genauso wichtig ist für den designierten Präsidenten die Pflege der Arbeitskultur: „Als Max-Planck-Ge-

sellschaft sind wir nur so gut, wie wir unsere Mitarbeitenden behandeln. Die Förderung von Nachwuchs und Diversität hat zentrale Bedeutung.“

Bekenntnis zu den eigenen Werten

Auch der Umgang mit nicht demokratischen Staaten wird den zukünftigen Präsidenten fordern. Er ist ein Spagat, wie Cramer aus eigener Erfahrung weiß. „Wir sollten Wege finden, die Forschung, die für die Zukunft der Menschen wichtig ist, gemeinsam voranzubringen. Aber wir müssen auch klar benennen, was nicht mit unseren Werten vereinbar ist. Wenn Doktoranden und Postdocs aus dem Ausland zu uns kommen, dann lernen sie auch etwas über unsere Kultur. Das prägt die jungen Menschen und trägt zur Verständigung bei.“ Und Russland? Cramer findet es richtig, dass die Allianz der Wissenschaftsorganisationen nach dem Angriff auf die Ukraine alle Kooperationen mit russischen Instituten ausgesetzt hat. Aber es gibt da nicht nur die politische Ebene, sondern auch die persönliche: An Cramers Institut sind 27 russische und zehn ukrainische Mitarbeitende beschäftigt. Bei Kriegsbeginn reagierte Cramer sofort. Er schrieb den russischen Mitarbeitenden, dass sie weiter willkommen sind. Und den ukraini-

schen bot er Hilfe an. Mehrere Verwandte aus der Ukraine sind danach in Göttingen untergekommen.

Die Forschung zur Transkription wird inzwischen auch durch viele ehemalige Mitarbeitende von Cramer in deren eigenen Labors in verschiedenen Ländern vorangetrieben. So kann Patrick Cramer sich auf das neue Amt vorbereiten: Er reist zu den 86 Max-Planck-Instituten. „Ich möchte beides wissen: welche Sorgen bestehen und welche Ideen und Träume es gibt.“ Corona, der Angriffskrieg Russlands, steigende Bau- und Energiepreise – das alles geht auch an der Max-Planck-Gesellschaft nicht spurlos vorbei. „Aber gerade deswegen müssen wir dazu beitragen, positive Zukunftsbilder zu entwickeln und neue Handlungsoptionen aufzuzeigen. Wer, wenn nicht wir?“

←

GLOSSAR

KRYOELEKTRONEN- MIKROSKOPIE

Bei einem Elektronenmikroskop durchdringt ein Strahl aus Elektronen das zu untersuchende Molekül und liefert aus jeder Schicht ein Bild. Aus Tausenden Bildern der einzelnen Schichten wird dann die räumliche Struktur des Moleküls berechnet. Da Elektronen eine geringere Wellenlänge als Licht besitzen, ist die Auflösung elektronenmikroskopischer Aufnahmen höher als die eines klassischen Lichtmikroskops. Durch vorheriges Schockgefrieren bei tiefer Temperatur („Kryo“) kann die Probe vor Beschädigung durch den Elektronenstrahl geschützt werden.

KRYOELEKTRONEN- TOMOGRAFIE

Mit dieser Technik wird das zu untersuchende Objekt nach jeder Aufnahme etwas gedreht, sodass der Elektronenstrahl des Mikroskops es unter einem veränderten Winkel trifft. Die zweidimensionalen Einzelbilder werden danach von einer Software zu einem 3D-Bild verrechnet. Auf diese Weise lassen sich auch sehr komplizierte dreidimensionale Objekte untersuchen.



Zurück in die Zukunft ...

**Sie haben die Titelzeile gelesen,
sich an einen 1980er-Film erinnert
und gefragt, was das mit
Grundlagenforschung zu tun hat?**

Wie ein Videorecorder hat Ihr Hirn
gerade einen verknüpften Strom
von sequenziellen Aktivitätsmustern
erzeugt.

Die Stiftung unterstützt Yingxue Wang
am Max Planck Florida Institute for
Neuroscience; sie erforscht, wie unser
Hirn im Hippocampus sequenzielle
Informationen verarbeitet und Vergan-
genheit und Zukunft in die Gegenwart
integriert.

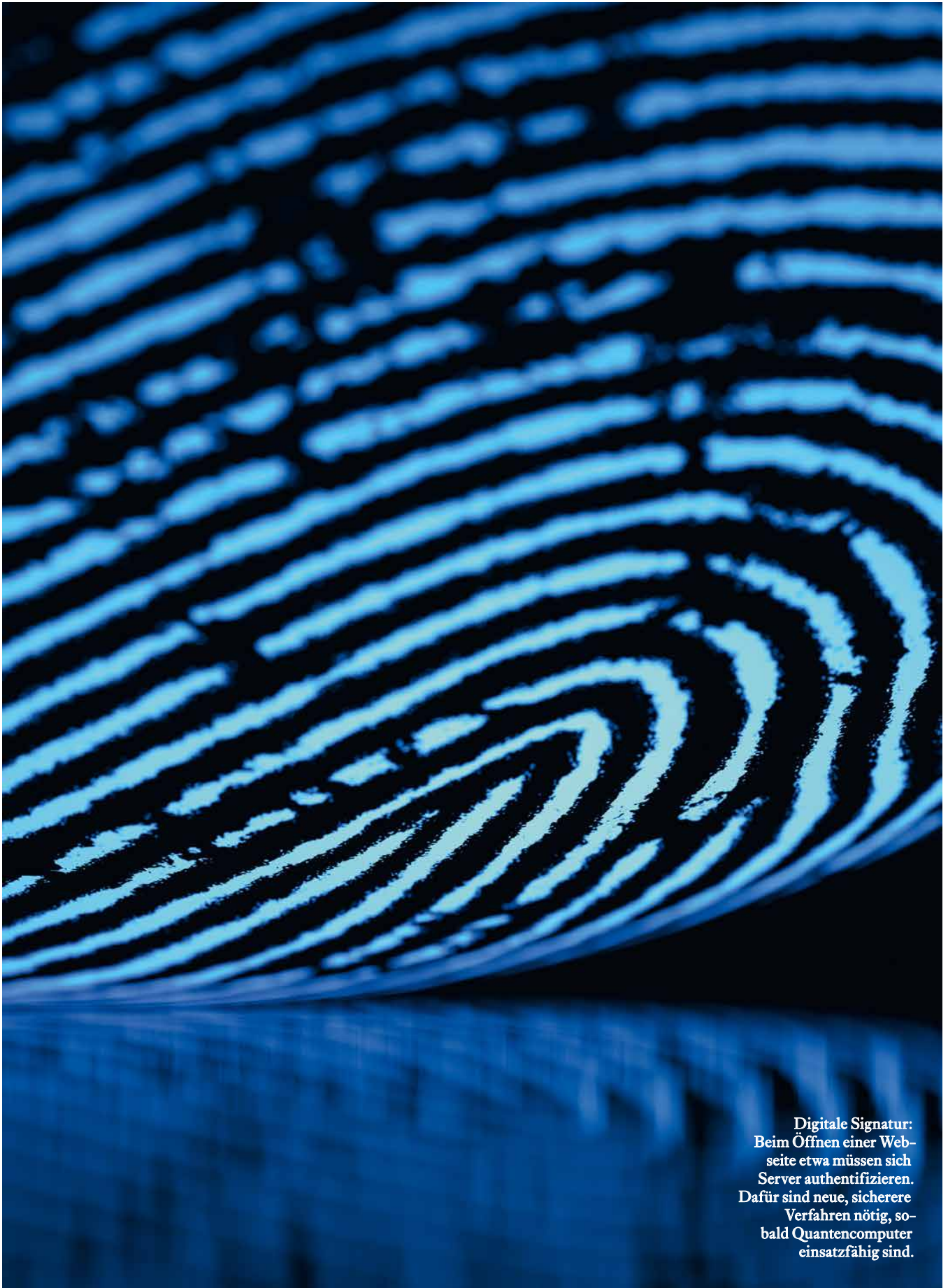
Die Max-Planck-Förderstiftung unterstützt
seit über zehn Jahren die Max-Planck-
Gesellschaft, indem sie an den mehr als
80 Instituten gezielt innovative und
zukunftsweisende Spitzenforschung fördert
und so Durchbrüche in der Wissenschaft
ermöglicht. Im weltweiten Wettbewerb
der Wissenschaften können Sie als privater
Förderer einen entscheidenden Unter-
schied machen und Freiräume schaffen.
Gehen Sie mit uns diesen Weg!

Max-Planck-Förderstiftung
Deutsche Bank
IBAN DE46 7007 0010 0195 3306 00

www.maxplanckfoundation.org



MAX PLANCK
Förderstiftung



Digitale Signatur:
Beim Öffnen einer Web-
seite etwa müssen sich
Server authentifizieren.
Dafür sind neue, sicherere
Verfahren nötig, so-
bald Quantencomputer
einsatzfähig sind.

QUANTENSICHER

TEXT: PETER HERGERSBERG

Für die Onlinekommunikation ist es ein bedrohliches Szenario: Sobald es leistungsfähige Quantencomputer gibt, sind die heutigen Verschlüsselungstechniken schlagartig unsicher. Peter Schwabe, Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Sicherheit und Privatsphäre, entwickelt daher mit internationalen Partnern Methoden der Post-Quanten-Kryptografie. Vier solcher Verfahren standardisiert nun das National Institute for Standards and Technology in den USA – an dreien davon war Peter Schwabe beteiligt.

Der Quantencomputer ist für viele eine Verheißung – ganz bestimmt für die Geheimdienste dieser Welt. Online-dienste, die auf einen sicheren Datenaustausch angewiesen sind, sehen darin dagegen auch eine Bedrohung. Es ist noch nicht abzusehen, wann die ersten leistungsfähigen Rechner dieser Art ihre Arbeit aufnehmen werden. Klar ist aber: „Die kryptografischen Protokolle, die heute quasi den gesamten Datenverkehr schützen, sind wertlos, sobald es die ersten Quantencomputer gibt“, sagt Peter Schwabe, Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Sicherheit und Privatsphäre und Professor an der Radboud-Universität in Nijmegen.

„Denn sie können die beiden mathematischen Probleme lösen, auf denen heutige kryptografische Methoden beruhen.“ So können sie eine große Zahl im Handumdrehen in zwei Primzahlfaktoren zerlegen. Da herkömmliche Computer dafür Zehntausende Jahre benötigen würden und dabei auch noch so viel Energie verschlingen, wie die Sonne in diesem Zeitraum zur Erde schickt, bildet die Primzahlfaktorisation den Kern einer weitverbreiteten Verschlüsselung.

Um den Datenverkehr künftig auch gegen Angriffe mit Quantencomputern zu schützen, haben 69 Teams beim National Institute for Standards and Technology (NIST) Vorschläge für neue kryptografische Methoden eingereicht; sie sprechen von Post-Quanten-Kryptografie. Nach einigen Runden hat das NIST entschieden, vier dieser Verfahren zu standardisieren. „Sie stellen einen besseren Schutz für die digitale Kommunikation dar – gerade weil Quantencomputer die bisherigen Verschlüsselungsmethoden und Signatursysteme aushebeln würden“, sagt Eike Kiltz, der als Professor an

der Ruhr-Universität Bochum forscht und lehrt und mit Peter Schwabe und zahlreichen Partnern an solchen neuen Verschlüsselungstechniken arbeitet.

Drei der ausgewählten Methoden dienen der Authentifizierung, darunter die Verfahren Sphincs+ und Crystals-Dilithium, an deren Entwicklung Peter Schwabe beteiligt war: „Bei der Authentifizierung stellt eine digitale Signatur sicher, dass etwa ein Server auch tatsächlich der ist, der er vorgibt zu sein.“ Schwabe koordinierte zudem das internationale Team, das Crystals-Kyber konzipiert und zur Anwendungsreife gebracht hat. Mit diesem Verfahren werden auf sichere Weise Schlüssel für die weitere Kommunikation übertragen.

Am Beispiel des Schlüsselaustauschs lassen sich einige Aspekte der Kryptografie gut erklären: In vielen Anwendungen, sei es ein Messengerdienst oder ein Onlineeinkauf, werden Daten mit asymmetrischen Verfahren verschlüsselt. Das heißt, der Schlüssel zum Verschlüsseln einer Nachricht ist öffentlich. Nur der Code zum Ent-

61



schlüsseln der Botschaft ist geheim. Im Gegensatz zu symmetrischen Kryptografiertechniken, die mit nur einem geheimen Schlüssel arbeiten, können die öffentlichen Schlüssel asymmetrischer Verfahren über nicht sichere Kanäle ausgetauscht werden. Denn was ist schon ein sicherer Kanal? Nicht von ungefähr erhalten wir eine Geheimzahl der Bank als aufwendig verpackten Rubbelcode. So einen Geheimbrief an jeden E-Mail-Kontakt zu schicken, dürfte wohl die Freude an der Onlinekommunikation rasch verderben. Zu den asymmetrischen Methoden der Kryptografie gehört auch das weitverbreitete RSA-Verfahren, das letztlich auf der Primzahlfaktorisation beruht, aber durch Quantencomputer ausgehebelt werden kann.

Einfache, effiziente und sichere Verfahren

62 Techniken der Post-Quanten-Kryptografie wie etwa Crystals-Kyber arbeiten daher mit mathematischen Problemen, die für Quantencomputer nach heutigem Wissensstand fast so knifflig sind wie für herkömmliche Rechner. Dabei sind die eigentlichen Rechenoperationen bei Crystals-Kyber denkbar einfach – es geht nur um Multiplizieren und Addieren: Ein Wert, genauer gesagt ein Polynom, wird mit einem anderen Wert multipliziert, der der geheime Schlüssel ist. Zu dem Produkt wird ein weiterer Wert addiert, der das Ganze kompliziert macht. Der geheime Schlüssel und der addierte Wert – auch dabei handelt es sich um Polynome – sind klein. Trotzdem ist es in dieser Konstellation beliebig schwierig, den geheimen Schlüssel zu ermitteln, selbst wenn man das Ergebnis dieser Operation und das Ausgangspolynom kennt, die gemeinsam als öffentlicher Schlüssel dienen.

„Auf diesem Prinzip beruhen einige der Vorschläge für die Post-Quanten-Kryptografie“, erklärt Peter Schwabe. Aber es kommt nicht nur auf das mathematische Problem hinter einem

Verfahren an, sondern auch darauf, wie die Rechenvorschrift in Softwarecode formuliert wird. Genau das beherrscht Peter Schwabe besonders gut. „Bei der Implementierung müssen wir zahlreiche Faktoren gegeneinander abwägen, weil ein Gewinn bei dem einen immer auf Kosten eines anderen geht. Mein Beitrag bestand darin, viele Entscheidungen so zu treffen, dass das Verfahren letztlich einfach, effizient und vor allem sicher ist.“ Genau das waren die Kriterien, nach denen das NIST seine Auswahl getroffen hat. Jetzt wird es zu den ausgewählten Verfahren Standards schreiben. Das heißt, es wird die kryptografischen Techniken erläutern und auch Hinweise formulieren, damit beispielsweise Onlinedienste sie vergleichsweise einfach in ihre Anwendungen einbinden können – und vor allem, ohne dabei Löcher in die Sicherungsvorkehrungen zu reißen.

Gegen die Arbeit des NIST gibt es auch Vorbehalte. Manche Kritiker fürchten, die Behörde könnte auf Geheiß der NSA Verschlüsselungsmethoden standardisieren, welche dem US-Geheimdienst Hintertüren offen lassen. „Es ist ziemlich sicher, dass dies in der Vergangenheit in einem Fall geschehen ist“, erzählt Peter Schwabe. Das habe die Behörde aber vermutlich nicht wissentlich getan und inzwischen selbst auch als großen Fehler eingeräumt. „Das Verfahren mit der Hintertür kam – anders als die Methoden, die jetzt zur Auswahl standen – nicht aus der Wissenschaft. Heute ist die Kryptocommunity an der Auswahl auch stärker beteiligt.“ So klopfen jetzt nicht mehr nur das NIST die zur Wahl stehenden Methoden auf mögliche Sicherheitslücken ab, sondern auch nahezu die gesamte Kryptografiegemeinde der Welt. „NIST hat die Auswahl neuer Kryptografiestandards bereits zweimal so gestaltet wie bei der Post-Quanten-Kryptografie“, sagt Peter Schwabe. „Und die Verfahren, die dabei herausgekommen sind, haben sich als sehr sicher erwiesen – und sie werden heute auf der ganzen Welt genutzt.“

Es ist daher gut möglich, dass das NIST mit seiner Entscheidung zumindest für die USA und Europa Standards setzt. Das deutsche Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) empfiehlt in einer technischen Richtlinie allerdings schon seit 2020 zwei andere Methoden für den Schlüsselaustausch im Zeitalter des Quantencomputers. „Diese Verfahren halten wir für besonders sicher“, sagt Stephan Ehlen, der als Mathematiker beim BSI quantensichere Verschlüsselung untersucht. Sie beruhen auf einem mathematischen Problem, das mit dem Prinzip von Crystals-Kyber verwandt ist. Allerdings seien diese Verfahren nicht so effizient wie jene, die das NIST nun standardisiert, sagt Ehlen. Für das

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Sobald es leistungsfähige Quantencomputer gibt, sind heutige Verschlüsselungstechniken schlagartig unsicher.

Das National Institute for Standards and Technology wird nun vier von 69 vorgeschlagenen Methoden der Post-Quanten-Kryptografie standardisieren.

Peter Schwabe hat drei der ausgewählten Verfahren maßgeblich mitentwickelt, zwei dienen der Authentifizierung, ein weiteres dem sicheren Austausch von kryptografischen Schlüsseln.

NIST sei Effizienz aber ein wichtiges Kriterium, damit sich die Verfahren auch gut für die breite Anwendung in der alltäglichen Internetnutzung eignen. „Es ist durchaus möglich, dass wir bei einer Aktualisierung der Richtlinien weitere Verfahren aufnehmen, auch solche, die jetzt vom NIST ausgewählt wurden“, so Ehlen. Das würde nicht zuletzt die sichere

Kommunikation von Bundesbehörden, die den BSI-Empfehlungen folgen, beispielsweise mit Unternehmen erleichtern, die den NIST-Standard anwenden. Für die digitalen Signaturen wird das BSI erst noch Verfahren auswählen. „Das war bislang nicht so dringlich, weil es da nicht das Problem gibt, dass verschlüsselte Kommunikation möglicherweise heute schon abgefangen und gespeichert, aber erst später entschlüsselt wird.“

Die Standardisierung könnte Ende 2023 abgeschlossen sein, vermutet der Informatiker. Doch schon jetzt nutzen zum Beispiel Google, Amazon und Cloudflare, ein Dienstleister für IT-Sicherheit, testweise Methoden der Post-Quanten-Kryptografie – gemeinsam mit den heutigen Standard-

verfahren, welche für Angriffe mit Quantencomputern verletzlich sind. Und auch Automobilhersteller beschäftigen sich bereits mit der Post-Quanten-Kryptografie, um sicherzustellen, dass sie die Software ihrer heute gebauten Fahrzeuge auch in fünfzehn oder zwanzig Jahren noch ohne großen Aufwand sicher aktualisieren können. „Wir gehen davon aus, dass nach der Standardisierung immer mehr Dienste die neuen Verfahren einsetzen werden“, erläutert Peter Schwabe. Dann werden die Verschlüsselungsmethoden, welche die Bochumer Forschenden mitentwickelt haben, den Besuch einer Webseite, den E-Mail-Verkehr oder Bankgeschäfte hoffentlich schon sichern, bevor es den ersten leistungsfähigen Quantencomputer gibt.




GLOSSAR




AUTHENTIFIZIERUNG
stellt in der Onlinekommunikation sicher, dass ein Computer oder Server auch der ist, der zu sein er vorgibt, also etwa der Server eines E-Mail-Dienstes.

POST-QUANTEN-KRYPTOGRAPHIE
bezeichnet Verschlüsselungsmethoden, die auch Quantencomputer nicht knacken können.

SCHLÜSSELAUSTAUSCH
ist ein kryptografisches Verfahren, das es zwei Parteien erlaubt, über einen unsicheren Kanal einen gemeinsamen geheimen Schlüssel auszutauschen.





STANDARDISIERUNG DURCH DAS NIST
umfasst Erläuterungen der Verschlüsselungsmethoden sowie Hinweise, wie die Verfahren sicher und möglichst einfach in Programme für digitale Dienste integriert werden können.






öffentlich  : (A, t) v = t  +  + m

geheim  : s u = A  + 





} Chiffretext

Entferne den öffentlichen Schlüssel

$$d = v - su = t \text{  +  + m - s (A \text{  + )$$

$$d = \text{  +  + m + s  (weil : A s +  = t)$$

Entferne das Rauschen durch Runden

$$d = m + \text{  +  - s }$$

groß klein

Verschlüsselung als Buchstabensalat: Beim Schlüsselaustausch mit Crystals-Kyber erhält der Absender einer Nachricht vom Empfänger die öffentlichen Schlüssel A und t, mit denen er seine Nachricht m verschlüsselt. Nur mit dem geheimen Schlüssel s kann der Empfänger die Nachricht entschlüsseln. Die Icons stehen für kleine Werte, die die entscheidenden Komponenten leicht verzerren und die Entschlüsselung für Angreifer noch komplizierter machen. Sie werden im letzten Schritt entfernt, indem auf die Null oder Eins eines Bits gerundet wird.

DAS UNIVERSUM IN NEUEM LICHT

TEXT: HELMUT HORNING

64

Ein halbes Jahr nach dem Start hat das James-Webb-Teleskop erste Bilder geliefert. Sie zeigen faszinierende Einblicke in ferne Galaxien ebenso wie turbulente Szenarien von Geburt und Tod der Sterne. Zudem hat die Weltraumsternwarte Spektren von Exoplaneten aufgenommen. Das Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg war am Bau der Instrumente beteiligt.

„Das alles sieht fantastisch aus und übertrifft sogar noch unsere hohen Erwartungen“, sagt Oliver Krause. Voller Spannung hatten der Wissenschaftler und sein Team am Heidelberger Max-Planck-Institut der Veröffentlichung von Bildern und Daten am 12. Juli entgegengefiebert. Die Astronominen und Astronomen mussten lange auf diesen Augenblick warten – ursprünglich hätte das Teleskop 2007 ins All abheben sollen; und auch in den Folgejahren war es immer wieder zu Verzögerungen gekommen.

Als das rund zehn Milliarden Dollar teure Observatorium am 25. Dezember 2021 an Bord einer europäischen Trägerrakete Ariane 5 endlich seine Reise begann, hätte in den sechs Monaten bis zu den ersten erfolgreichen Beobachtungen im Sommer sehr viel schiefgehen können: Nicht weniger als 344 entscheidende Fehlerquellen hatten die Experten vor Beginn der Mission identifiziert. „Single point failures“ nennt sie Oliver Krause. Jeder dieser Fehler hätte das Projekt, an dem die amerikanische, die europäische und die kanadische Weltraumagentur beteiligt sind, gefährdet oder sogar zum Scheitern gebracht.

In der Tat war der Weg vom Start bis zum einsatzfertigen Teleskop äußerst komplex. „James Webb“ war praktisch als Baukasten ins Weltall geschickt worden. Die beiden wichtigsten Strukturen sollten sich buchstäblich erst entfalten: der fünfflagige Son-

nenschutzschild von der Größe eines Tennisplatzes und der aus 18 Waben bestehende Hauptspiegel, der einen Durchmesser von sechseinhalb Metern aufweist.

Beim Entpacken mussten sich die Ingenieurinnen und Techniker darauf verlassen, dass alle mechanischen Prozesse perfekt und fehlerfrei abliefen. So kamen etwa beim Sonnenschutzschild 107 Bolzen und Federn zum Einsatz, und die sechseckigen Berylliumsegmente des Hauptspiegels wurden durch insgesamt mehr als einhundert kleine Motoren auf den Bruchteil eines Millimeters genau in die richtigen Positionen geschoben. Hätte sich ein Teil verhakt, hätte niemand direkt eingreifen können.

Während rund drei Monaten im Frühjahr 2022 kühlte das 21 Meter lange Teleskop allmählich auf die Betriebstemperatur von minus 230 Grad Cel-





High five: Stephans Quintett besteht aus fünf Galaxien, von denen einige miteinander wechselwirken. Nicht zur rund 290 Millionen Lichtjahre entfernten Gruppe gehört eines der Milchstraßensysteme in der Mitte des Bildes; es wurde vom Entdecker Édouard Stephan ursprünglich dazugerechnet, liegt jedoch im Vordergrund.



sus ab. Seine vier wissenschaftlichen Instrumente lieben es sogar noch ein Stück kälter – bis zu 267 Grad Celsius unter null. Zudem wurde die Sternwarte behutsam an ihren Beobachtungsposten bugsiiert, den Lagrange-Punkt 2. „Dieser Ort ermöglicht es, Sonne, Erde und Teleskop wie auf einer Perlenschnur aufgereiht zu positionieren und so James Webb immer im Schatten des Schutzschildes ins All blicken zu lassen“, erläutert Oliver Krause.

Das Weltraumobservatorium steht aber nicht fest an jenem eineinhalb Millionen Kilometer von der Erde entfernten Lagrange-Punkt 2 – insgesamt fünf solcher Punkte gibt es, in denen sich die Gravitationskräfte von Himmelskörpern gleichsam die Waage halten –, sondern umläuft diesen auf einer Bahn, deren Durchmesser größer ist als der Abstand zwischen Erde und Mond. Ein halbes Jahr dauert ein solcher Reigen jeweils, wobei die Steurdüsen des Teleskops per-

manent für eine präzise Choreografie sorgen müssen.

Bevor die ersten Bilder und Daten gewonnen werden konnten, mussten zunächst die vier wissenschaftlichen Bordinstrumente in Betrieb gehen. Krause und seine Gruppe hatten die vorbereitenden Arbeiten während dieser Phase intensiv verfolgt und begleitet. So etwa steckt in einem der Instrumente mit dem Namen MIRI (Mid-Infrared Instrument) ein Filter-



rad, das am Max-Planck-Institut für Astronomie entwickelt und gebaut wurde. Mit MIRI durchmustert das Teleskop den Kosmos im mittleren Infrarotlicht, mit NIRCам (Near Infrared Camera) beobachtet es im nahen Infrarot. Das Quartett der Instrumente ergänzen die beiden Spektrografen NIRSpec (Near Infrared Spectrograph) sowie FGS/NIRISS (Fine Guidance Sensor/Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph), die beide das Licht kosmi-

Waben für das Weltall: Der Hauptspiegel des James-Webb-Teleskops besteht aus 18 sechseckigen Berylliumsegmenten und besitzt einen Durchmesser von sechseinhalb Metern. Damit mustert die Sternwarte das Universum im infraroten Licht.

scher Objekte in kleine Regenbögen zerlegen, also Spektren erzeugen. Damit deckt das Teleskop einen Wellenlängenbereich von 0,6 bis 28 Mikrometer (tausendstel Millimeter) ab.

Mikrometeoriten treffen den Spiegel

Die Tests, Daten und Probeaufnahmen im Frühsommer sahen bereits hervorragend aus. Selbst nachdem laut Auskunft der US-Raumfahrtbehörde Nasa mehrere Mikrometeoriten den Spiegel getroffen und leicht beschädigt hatten, war die Sehkraft des Teleskops nicht gemindert. James Webb spähte schließlich wie geplant in die Tiefen des Universums – und begeisterte Fachleute wie Laien gleichermaßen.

Eines der Bilder zeigt das Spektrum von WASP-96b. Dieser 1150 Lichtjahre entfernte Gasplanet ist halb so groß wie Jupiter und umläuft seinen Mutterstern einmal alle dreieinhalb Erdtage. „Man sieht, um wie viel besser die Messgenauigkeit des Teleskops ist, wenn man es mit seinen Vorgängern wie Spitzer oder Hubble vergleicht“, sagt Maria Steinrück. Die Wissenschaftlerin beschäftigt sich am Max-Planck-Institut für Astronomie mit den Atmosphären von Exoplaneten – ein Forschungsfeld, dem das Weltraumteleskop ganz neue Impulse verleihen soll. Abteilungsdirektorin Laura Kreidberg hat gleich zwei Beobachtungsanträge erfolgreich eingereicht. Und Maria Steinrück ist überzeugt, „dass das James-Webb-Teleskop es in Zukunft ermöglichen wird, die Zusammensetzung der At-

mosphären von Exoplaneten zu bestimmen, die bisher für eine Messung zu klein oder zu kühl waren.“ Im August wurde eine zweite Beobachtung an einem Exoplaneten veröffentlicht: Das Observatorium hatte Infrarotlicht gemessen, das durch die Atmosphäre des rund 700 Lichtjahre entfernten heißen Gasriesen WASP-39b gefiltert wurde. Damit gelang Webb nicht nur die Aufzeichnung des ersten detaillierten Spektrums eines fremden Planeten im nahen Infrarotlicht, sondern auch der Nachweis von Kohlendioxid in dessen Atmosphäre.

67

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die ersten Daten und Bilder, die das James-Webb-Teleskop geliefert hat, lassen viele spannende Entdeckungen erwarten.

Das Weltraumobservatorium beobachtet eineinhalb Millionen Kilometer von der Erde entfernt.

Die vier wissenschaftlichen Bordinstrumente mustern den Kosmos im Bereich des infraroten Lichts zwischen 0,6 und 28 Mikrometern (tausendstel Millimeter).

WASP-39b besitzt nur etwa ein Viertel der Masse des Jupiters, aber einen 1,3-mal größeren Durchmesser. In der Atmosphäre des Exoplaneten herrscht eine Temperatur von ungefähr 900 Grad Celsius. Im Gegensatz zu den kühleren, kompakteren Gasriesen Jupiter und Saturn in unserem



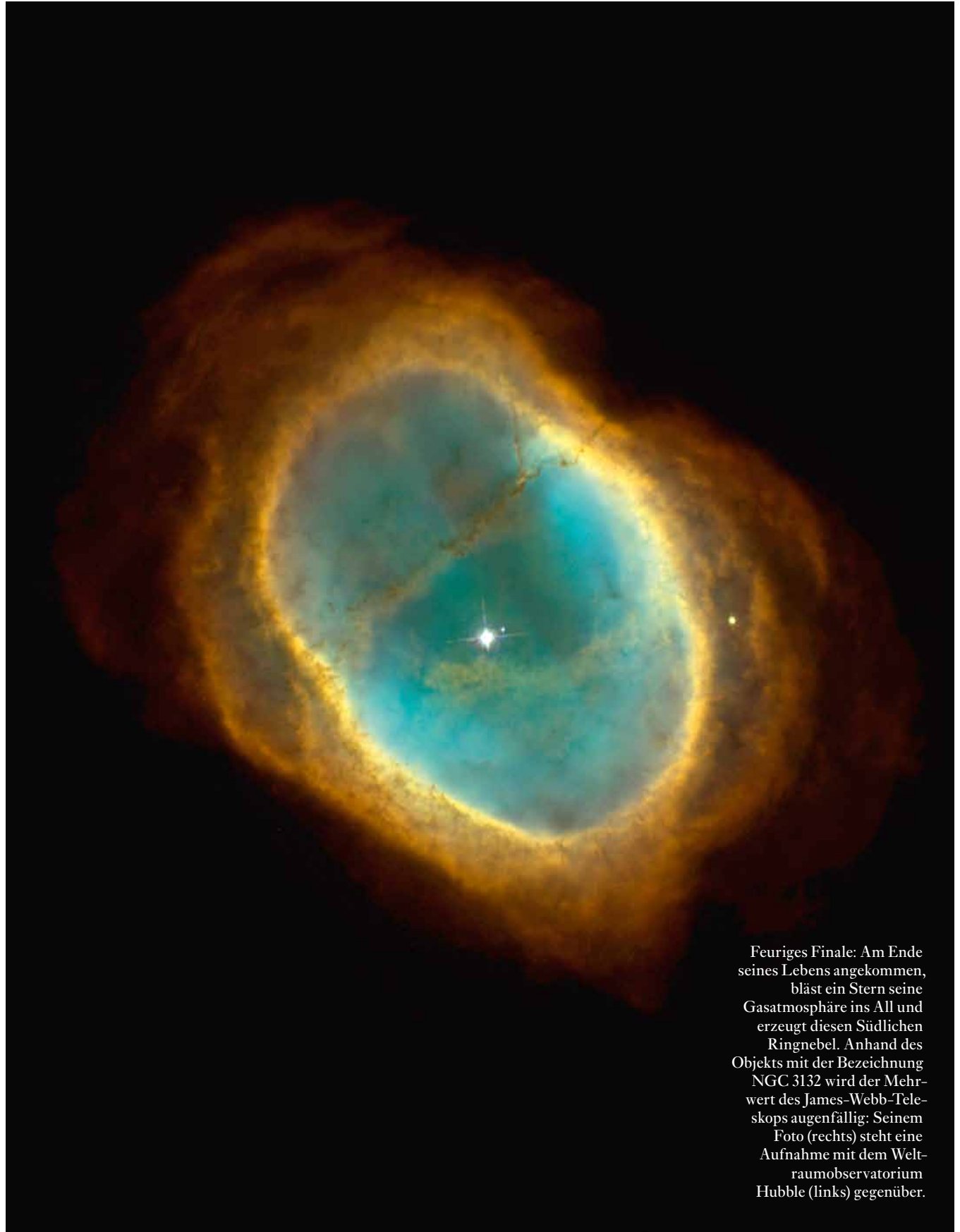
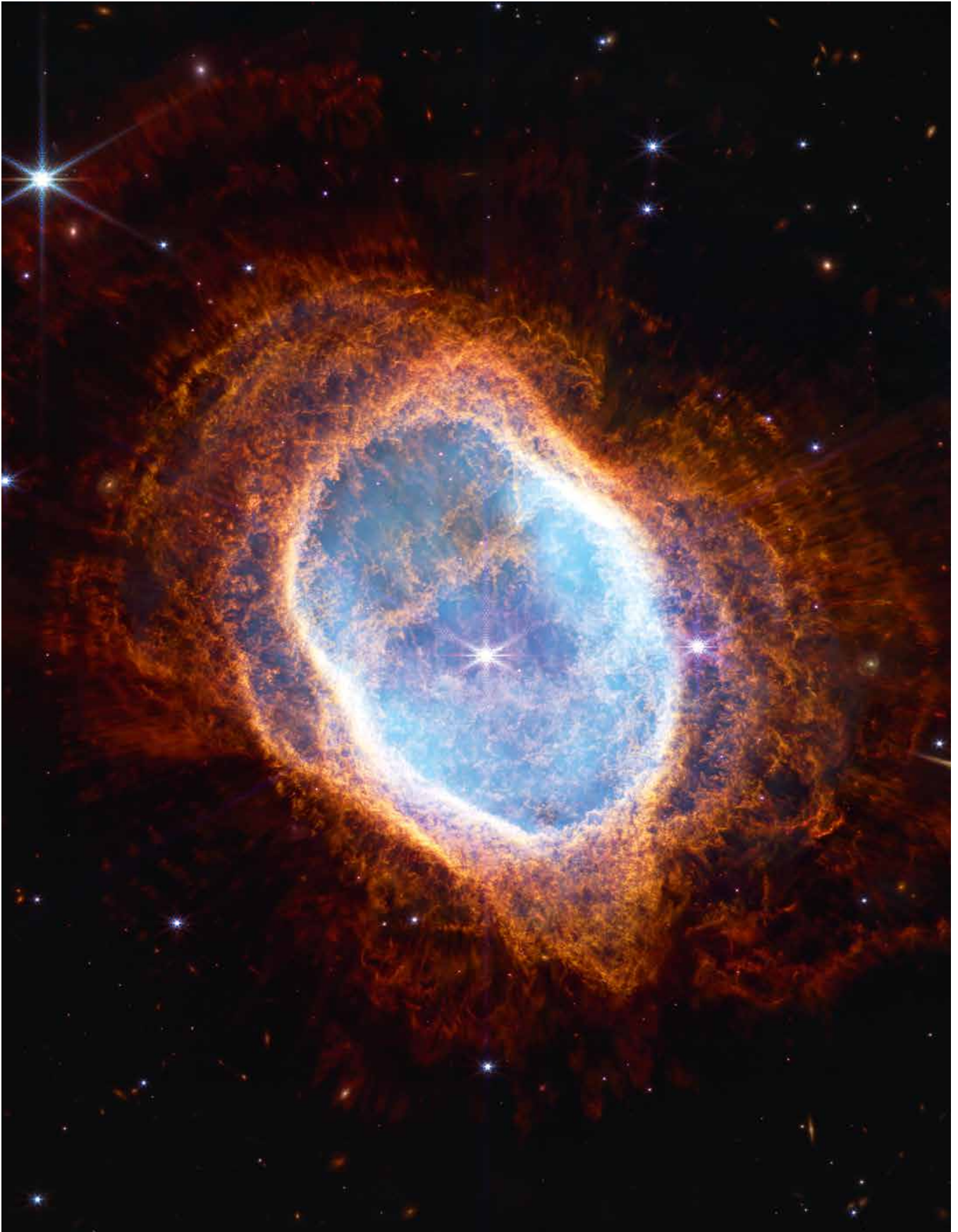


BILD: THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA/NASA)

Feuriges Finale: Am Ende seines Lebens angekommen, bläst ein Stern seine Gasatmosphäre ins All und erzeugt diesen Südlichen Ringnebel. Anhand des Objekts mit der Bezeichnung NGC 3132 wird der Mehrwert des James-Webb-Teleskops augenfällig: Seinem Foto (rechts) steht eine Aufnahme mit dem Weltraumobservatorium Hubble (links) gegenüber.

BILD: ESA / CSA / STSCI / NASA



Wiege der Sterne:
Was wie ein
zerklüftetes Gebirge
aussieht, ist in
Wirklichkeit eine
Region im etwa
7600 Lichtjahre
entfernten
Carinanebel, in der
neue Sonnen
geboren werden.



BILD: ESA / CSA / STSCI / NASA

70 Sonnensystem umkreist WASP-39b – ebenso wie WASP-96b – seinen Stern in unmittelbarer Nähe; seine Distanz beträgt nur etwa sieben Millionen Kilometer, was einem Achtel der Entfernung zwischen Sonne und Merkur entspricht. Aufgrund des geringen Abstands ist der im Jahr 2011 entdeckte Planet rasend schnell unterwegs – ein Umlauf dauert nur etwas mehr als vier Erdtage.

Von uns aus blicken wir seitlich auf die Bahn. Das heißt: WASP-39b zieht periodisch vor dem Stern vorüber und verdeckt ihn, was zu einer minimalen Verdunkelung führt. Während eines solchen Transits passiert ein kleiner Teil des Sternlichts die Atmosphäre des Planeten, die dadurch gleichsam durchleuchtet wird. Dabei registrierte das Instrument NIRSpec im aufgefächerten Licht zwischen 4,1 und 4,6 Mikrometern einen geringen Helligkeitsanstieg – damit wurde zum ersten Mal Kohlendioxid auf einem Planeten außerhalb unseres Sonnensystems klar nachgewiesen.

„Dieser Fund ist ein wichtiger Meilenstein für die Charakterisierung der

Atmosphäre von Exoplaneten“, erklärt Max-Planck-Astronomin Laura Kreidberg. „Kohlendioxid ist ein wichtiger Indikator für die Entstehungsgeschichte von Planeten. Es hilft uns, das komplette Kohlenstoff- und Sauerstoffinventar der Atmosphäre zu messen, das sehr empfindlich auf die Bedingungen in der Scheibe reagiert, in welcher der Planet entstanden ist.“ Mithilfe der CO₂-Messung können die Fachleute zum Beispiel den Entstehungsort des Planeten oder die Eigenschaften der eingebrachten Feststoffe und Gase besser eingrenzen.

Galaxiengruppe im Sternbild Pegasus

Für die Öffentlichkeit attraktiv sind vor allem Fotos astronomischer Objekte. Galaxien etwa sind das Hauptmotiv im Bild von Stephans Quintett, einem Ensemble aus fünf Milchstraßensystemen, die der französische Astronom Édouard Stephan 1877 im Sternbild Pegasus entdeckt hat. Die Fünfergruppe in 290 Millionen Lichtjahren

Distanz steht recht nah beisammen, einige der Mitglieder beeinflussen sich aufgrund ihrer Schwerkraft gegenseitig. Gas wirbelt umher, zuhauf werden neue Sterne geboren. „Das Besondere ist nicht nur die Klarheit und Schärfe der Aufnahme“, sagt Max-Planck-Forscher Krause. Auf dem Foto erscheine die Umgebung von Stephans Quintett in einer dramatischen Ansicht. „Da spiegeln sich viele astrophysikalische Prozesse wider, die sich nun in bisher unerreichter Genauigkeit untersuchen lassen.“

Vorher nicht gekannten Detailreichtum und einzigartige Dynamik offenbaren auch die Bilder des Südlichen Ringnebels und des Carinanebels. Hier spielt das James-Webb-Teleskop seine Stärke aus, denn es beobachtet nicht – wie das berühmte Weltraumteleskop Hubble – im optischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums, sondern im für uns Menschen nicht zugänglichen Infrarotfenster. Damit sieht Webb die Welt gleichsam mit anderen Augen. Während der Südliche Ringnebel vom Tod eines Sterns kündigt, gleicht der Carinanebel einem kosmischen Kreißsaal, in dem Hun-

derte Sonnen zur Welt kommen. Beide Himmelsobjekte gehören zu unserer Milchstraße und sind 2000 beziehungsweise 7600 Lichtjahre von der Erde entfernt.

Gravitationslinse enthüllt ferne Objekte

Auch in den Tiefen des Weltraums eröffnet das Observatorium neue Dimensionen. So hat es den Galaxienhaufen SMACS J0723.3-7327 ins Visier genommen, der wie eine Gravitationslinse wirkt. Dabei fokussiert und verzerrt die Masseansammlung von Galaxien im Vordergrund das Licht der dahinterliegenden, noch viel weiter entfernten Objekte. Diese erscheinen – zum Teil mehrfach und als Bögen – wie durch eine Lupe. Vor der Beobachtung durch James Webb waren hinter der rund viereinhalb Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernten kosmischen Gravitationslinse insgesamt 19 Mehrfachbilder von sechs Hintergrundquellen bekannt. Die Daten des Teleskops enthüllten 27 zusätzliche Mehrfachbilder zehn weiterer Objekte.

„Die Aufnahmen sind absolut verblüffend und wunderschön. Sie ermöglichten es, unser Massemodell für die Gravitationslinse erheblich zu verfeinern“, sagt Gabriel Bartosch Caminha, Postdoc-Fellow am Garching Max-Planck-Institut für Astrophysik. Die

Forschenden verwendeten ihr Modell, um die Distanz dieser Linsengalaxien abzuschätzen. Das Licht einiger Objekte scheint vor rund 13 Milliarden Jahren auf die Reise gegangen zu sein. Weil die Strahlung mit endlicher Geschwindigkeit (rund 300 000 Kilometer pro Sekunde) durch den Kosmos eilt, wirken Teleskope wie Zeitmaschinen: Die Beobachtung von Himmelskörpern in großer Distanz bedeutet aus diesem Grund immer auch einen Blick in die Vergangenheit. Auf diese Weise erhellt James Webb also die Frühzeit des Universums.

Die Astronominnen und Astronomen erwarten in der Kosmologie ebenso neue Erkenntnisse wie bei der Erforschung von Exoplaneten, des Werdegangs von Galaxien sowie der Entwicklung von Sternen. Wenn das James-Webb-Teleskop gesund bleibt und keinerlei technischen Defekte auftreten, könnte es bis zu zwei Jahrzehnte arbeiten – Zeit genug für jede Menge überraschende Entdeckungen.

←

GLOSSAR

EXOPLANETEN
sind Himmelskörper, die einen fernen Stern umlaufen. Bisher kennt man ungefähr 5000 solcher Objekte. Besonders interessant ist die Suche nach Exoplaneten, die der Erde ähneln.

GRAVITATIONSLINSEN
ergeben sich aus Einsteins Relativitätstheorie. Danach wird Licht einer entfernten Quelle – beispielsweise einer Galaxie – durch die Masse eines vom Betrachter aus gesehen davorliegenden Objekts, etwa eines Galaxienhaufens, wie von einer optischen Linse beeinflusst. Das Bild kann dabei verstärkt, verzerrt oder sogar vervielfältigt werden.

Blick in die Vergangenheit:
Mehr als 13 Milliarden Jahre war das Licht unterwegs, das einige der hier abgebildeten Galaxien ausgesendet haben. Die Striche und Bögen werden durch den Galaxienhaufen SMACS J0723.3-7327 erzeugt, der als Gravitationslinse wirkt.

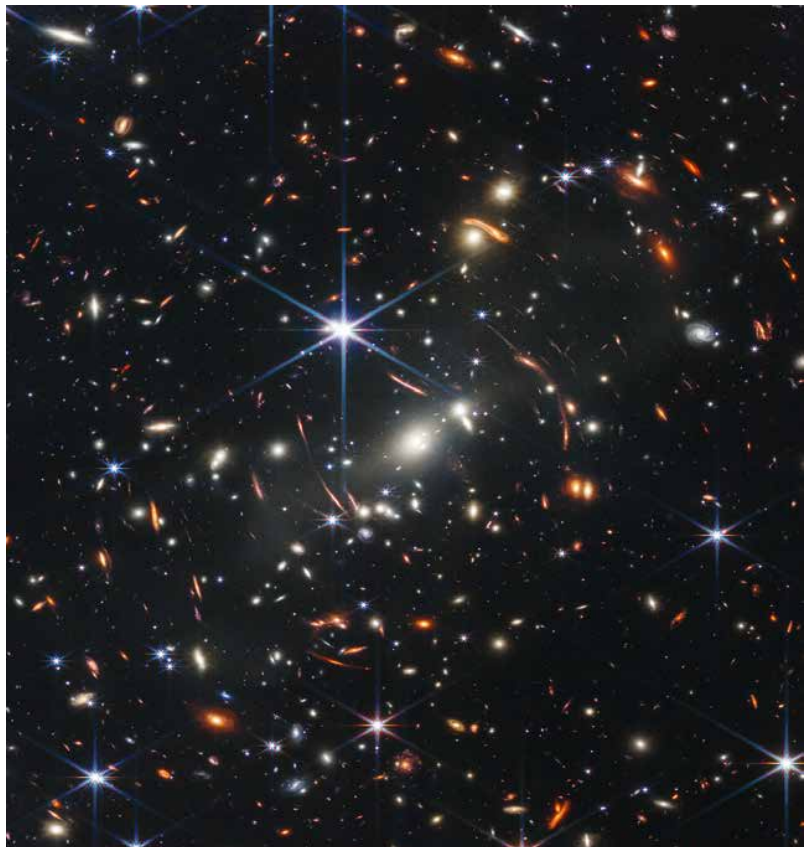
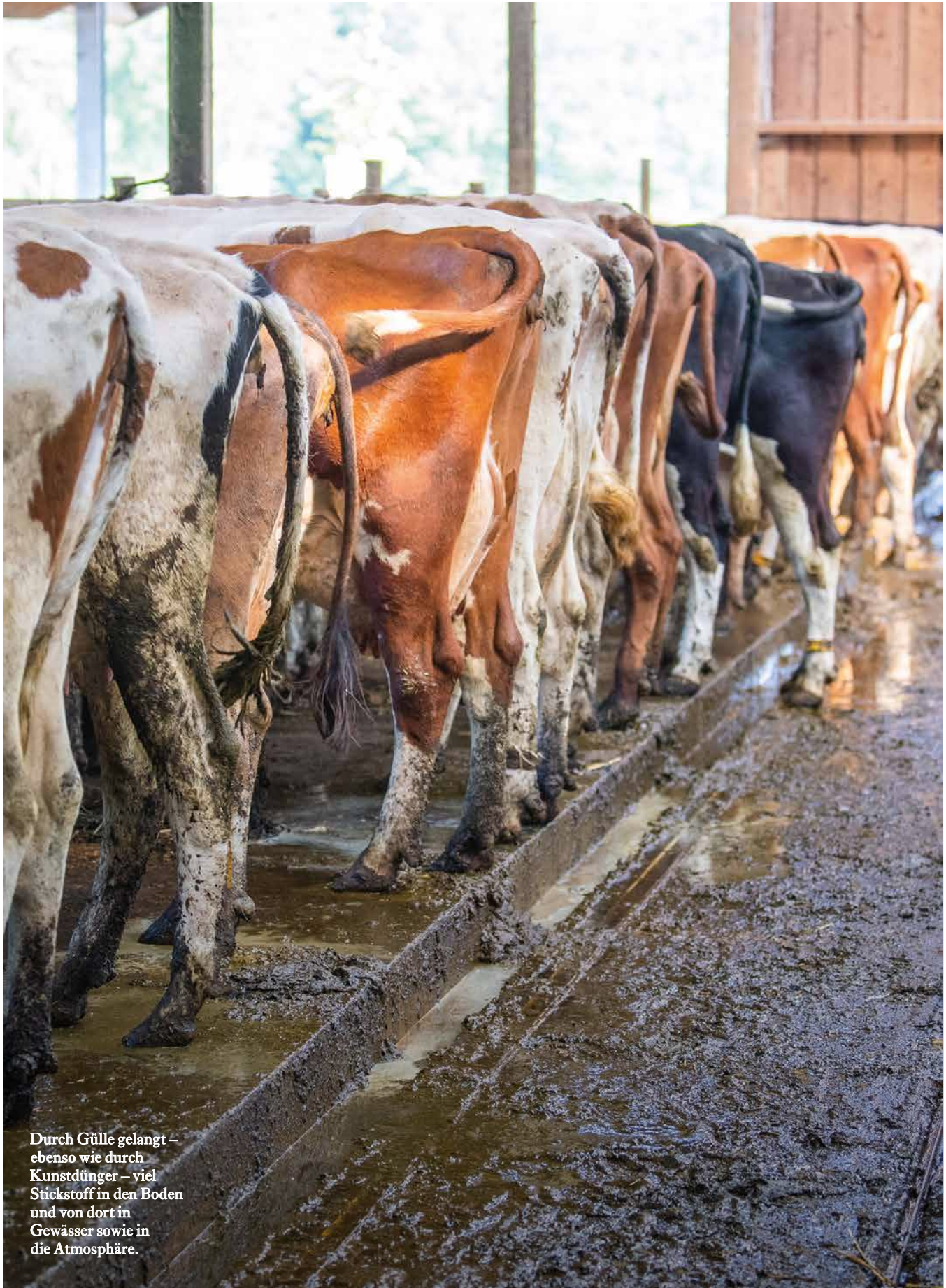


BILD: ESA / CSA / STSCI / NASA



Durch Gülle gelangt –
ebenso wie durch
Kunstdünger – viel
Stickstoff in den Boden
und von dort in
Gewässer sowie in
die Atmosphäre.

FOTO: PICTURE ALLIANCE/DPA | LINO MIRGELER

DIE ÜBERDÜNGTE ERDE

TEXT: KLAUS JACOB

Kein Tier, keine Pflanze und kein Einzeller kommt ohne Stickstoff aus, doch der Mensch bringt immer mehr davon in Umlauf – mit diversen Folgen für Gesundheit und Umwelt. Sönke Zaehle, Direktor am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena, untersucht den Stickstoffkreislauf und seine Rückkopplung mit dem Klima. Die Ergebnisse sind auch umweltpolitisch relevant.

Wenn die Bedeutung chemischer Elemente für das Leben ausgezeichnet würde, wäre Kohlenstoff der große Abräumer. Denn in der organischen Chemie spielt er die Hauptrolle. Stickstoff steht dagegen im Schatten. Doch diese Geringschätzung ist alles andere als gerechtfertigt. Denn ohne ihn ist kein Leben denkbar. Kein Protein, das nicht Stickstoff enthält. Jede Pflanze, jedes Tier braucht davon, um gedeihen zu können. Keine biochemische Reaktion ist ohne Stickstoff denkbar. Und wenn Menschen Fleisch oder Gemüse essen, nehmen sie – auch – Stickstoff zu sich. In seiner biologisch nutzbaren Form zirkulierte in vorindustrieller Zeit eine kaum wachsende Menge durch die Luft, den Boden, die Gewässer und die Lebewesen. In dem nahezu geschlossenen Kreislauf gab es allenfalls lokale Veränderungen. Dann hat der Mensch massiv eingegriffen, etwa

durch die Düngung von Feldern. Wie der Kreislauf durch diesen Eingriff durcheinandergerät und wie sich dies auf das Klima auswirkt, erforscht Sönke Zaehle, Direktor am Max-Planck-Institut für Biogeochemie.

Aber der Reihe nach: Obwohl Stickstoff mit 78 Prozent den Hauptbestandteil der Luft stellt, ist er als Baustoff der Biomoleküle von Natur aus rar. Denn in seiner sehr stabilen elementaren Form, wie er in der Atmosphäre zum größten Teil vorkommt, ist er für die meisten Pflanzen und Tiere nicht nutzbar. Allerdings haben Blitze die Power, ihn in eine biologisch verfügbare Form zu verwandeln – Geowissenschaftler sprechen von reaktivem Stickstoff. So hat jedes Gewitter auch einen düngenden Effekt. Doch auch manche Organismen haben im Laufe der Evolution einen Weg gefunden, an den seltenen Grundstoff zu gelangen: Knöllchenbakterien, die in Symbiose mit Leguminosen wie Klee, Wicke oder Sojabohne leben und an deren Wurzeln andocken, versorgen diese Pflanzen mit Stickstoffverbindungen. Als es noch keinen Kunstdünger gab, hat man daher häufig Dreifelderwirtschaft betrieben und für eine Saison Leguminosen angebaut, um den Bo-

den mit Stickstoff anzureichern. Die Erfindung des Kunstdüngers hat die Karten dann neu gemischt. Vor gut einem Jahrhundert haben die deutschen Chemiker Fritz Haber und Carl Bosch ein Verfahren entwickelt, um aus atomarem Stickstoff und Wasserstoff Salpeter zu erzeugen, ein Vorprodukt von Kunstdünger wie Ammoniumnitrat – aber auch von Sprengstoff. Nicht nur deshalb ist das Haber-Bosch-Verfahren Fluch und Segen zugleich. Auch in anderer Hinsicht ist seine Wirkung ambivalent. Einerseits hat es zu einer landwirtschaftlichen Revolution geführt, die es erst ermöglichte, die rasch wachsende Weltbevölkerung zu ernähren. Auf der anderen Seite hat es den Stickstoffkreislauf erheblich verändert – mit weitreichenden Folgen für Ökosysteme und Gesundheit.

Wie bei fossilen Brennstoffen ist die Menge das Problem. Die Produktion von Kunstdünger ist seit dem Zweiten Weltkrieg geradezu explodiert. Um eine Vorstellung der Dimensionen zu bekommen: Das Haber-Bosch-Verfahren verschlingt rund 1,4 Prozent des Weltenergiebedarfs, weil dafür elementarer Wasserstoff, Hitze und hoher Druck erforderlich sind. Und

73



durch die synthetischen Dünger gelangen nach Sönke Zaehles Berechnungen Jahr für Jahr rund 90 bis 100 Millionen Tonnen reaktiver Stickstoff zusätzlich in den globalen Kreislauf. Und das ist noch nicht alles: Auch bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe in Kohle- und Gaskraftwerken, aber nicht zuletzt in Dieselmotoren entstehen Stickoxide, aus denen sich gesundheitsschädlicher Feinstaub bildet. Hinzu kommen Waldbrände, die einen Teil des Stickstoffs aus der Biomasse ebenfalls in Form von Stickoxiden freisetzen.

liche Nutzfläche, freisetzen. Dabei berücksichtigen die Forschenden, welche Rolle die steigende CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre, die auch das Pflanzenwachstum ankurbelt, und die Phosphordüngung spielen. Sie untersuchen auch, wie sich die Stoffkreisläufe mit dem Klimawandel ändern. Zusätzlich füttern die Forschenden das Modell mit Daten anderer Forschungsgruppen zu den menschengemachten Stickstoffemissionen etwa aus Verkehr und Industrie. So erhalten sie einen genauen Überblick, wo wie viel reaktiver

Stickstoff in welchen Mengen ansammelt. Bei den beiden Einbahnbeurteilungen soll es aber nicht bleiben. „In einem großen EU-Projekt arbeiten wir zusammen mit internationalen Kollegen daran, den gesamten Stickstoffkreislauf zu modellieren“, sagt Sönke Zaehle. Besonders knifflig sind dabei die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilen des Erdsystems, also den Ozeanen und anderen Gewässern, den Landökosystemen sowie der Atmosphäre, aber auch die sehr unterschiedlichen Lebensdauern der global relevanten Stickstoffverbindungen – die von Sekundenbruchteilen bis zu Jahrhunderten reichen können.

Folgen für Ökologie und Gesundheit

So vielfältig die atmosphärische Chemie von Stickstoff ist, so divers sind die schädlichen Wirkungen, die jede seiner Verbindungen nacheinander entfalten kann. Sie verändern Ökosysteme, lassen etwa Gewässer umkippen, schädigen das Trinkwasser und die Atemwege, beeinflussen das Klima und zerstören die Ozonschicht. Es verhält sich also mit dem vom Menschen ins Spiel gebrachten Stickstoff wie mit Goethes Zauberlehrling, der dachte, mit einem selbstständigen Besen eine pfiffige Idee zu haben, das außer Kontrolle geratene Gerät dann aber nicht mehr stoppen konnte.

Da ist zunächst die Wirkung auf die Gesundheit: Eine Studie der Organisation Environmental Health Analytics (LLC) in Washington hat ergeben, dass Jahr für Jahr etwa 100 000 Menschen vorzeitig durch Stickoxide sterben, wobei solche Analysen infolge einer Vielzahl von Einflussfaktoren einigen Unsicherheiten unterliegen. Wegen der Gesundheitsschäden gibt es für die Belastung der Luft mit Stickoxiden und Feinstaub Grenzwerte. Wenn die überschritten wurden, mussten Dieselfahrzeuge in manchen deutschen Städten bereits stehen bleiben.

Aber warum schadet reaktiver Stickstoff der Umwelt, wenn er doch als Dünger

74

FOTO: STEFFEN WALTHER FÜR MPG



Bringt die Zyklen in Form: Sönke Zaehle und sein Team untersuchen die Rückkopplungen zwischen den Kreisläufen von Stickstoff, Kohlenstoff und Phosphor sowie dem Klima.

Zu ermitteln, wie viel Stickstoff sich im Umlauf befindet, wo er sich anreichert und in welchen Mengen er zwischen Bio-, Geo- und Atmosphäre hin und her fließt, erfordert einen erheblichen Aufwand. Den ganzen Kreislauf in einem Modell zu beschreiben und am Computer zu simulieren, ist so kompliziert, dass Sönke Zaehles Team das Problem aufgeteilt hat: in den Weg aus den Ökosystemen in die Atmosphäre einerseits und den umgekehrten Weg andererseits. Um zu ermitteln, welche Mengen der verschiedenen Stickstoffverbindungen aus den diversen Quellen in die Luft gelangen, teilen die Forschenden die Erde in Gitterzellen von etwa 50 Kilometer Kantlänge auf. Für jedes dieser Felder errechnet ihr Modell, wie viel Stickstoff die dortigen Ökosysteme, also Wald, Grasland oder landwirtschaft-

Stickstoff in die Atmosphäre entweicht. Dabei kommen sie zu demselben Ergebnis wie Studien anderer Gruppen, die aus der weltweiten Verteilung von Ammoniak, Stickoxiden und Lachgas auf die Emissionen der Substanzen schließen: „Der Mensch hat den Input des Stickstoffkreislaufs seit Beginn der industriellen Revolution mehr als verdoppelt.“ Das ist ein massiver Eingriff, zumal es über viele Jahrtausende offenbar nur geringe global bedeutende Änderungen gab.

Auch den Eintrag von Stickstoff aus der Luft in Gewässer, Böden und Ökosysteme berechnen die Forschenden aus Jena mit Modellen, welche auch das lokale Klima berücksichtigen. Dafür verwenden sie Daten, wie sich Stickstoffverbindungen weltweit in der Atmosphäre verteilen. Die Ergebnisse zeigen ihnen, wo sich der

FOTO: STEFFEN WALTHER FÜR MPG



AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Natürlicherweise wandeln hauptsächlich Gewitter und Knöllchenbakterien elementaren Stickstoff in eine Form um, in der Pflanzen dieses lebenswichtige Element aufnehmen können.

Vor allem durch Düngung und die Verbrennung fossiler Brennstoffe hat der Mensch die Stickstoffmenge verdoppelt, die sich im Kreislauf zwischen Atmosphäre, Gewässern, Boden und Landökosystemen befindet.

Stickstoffverbindungen stimulieren das Pflanzenwachstum, ihr Überschuss reduziert jedoch die Artenvielfalt, schadet der Gesundheit sowie der Ozonschicht und wirkt sich auf das Klima aus.

gute Dienste leistet? Die Antwort ist immer wieder Thema für Medien und Politik. Die Pflanzen können einen Teil der großen Düngermengen nicht aufnehmen, auch weil der Regen ihn auswäscht, ehe das Wachstum Fahrt aufnimmt. So gelangt Stickstoff vor allem in Form von Nitrat in Flüsse und Grundwasser und schließlich ins Meer. Nitrat kann im Körper jedoch in das verwandte Nitrit umgewandelt werden, das der Gesundheit schadet. Auch für Trinkwasser gelten deshalb Grenzwerte. Einige Trinkwasserbrunnen mussten in Deutschland wegen einer zu hohen Belastung bereits stillgelegt werden. Das Problem ist vor allem in Norddeutschland akut, wo es große Mastbetriebe mit einer starken Gülleproduktion gibt.

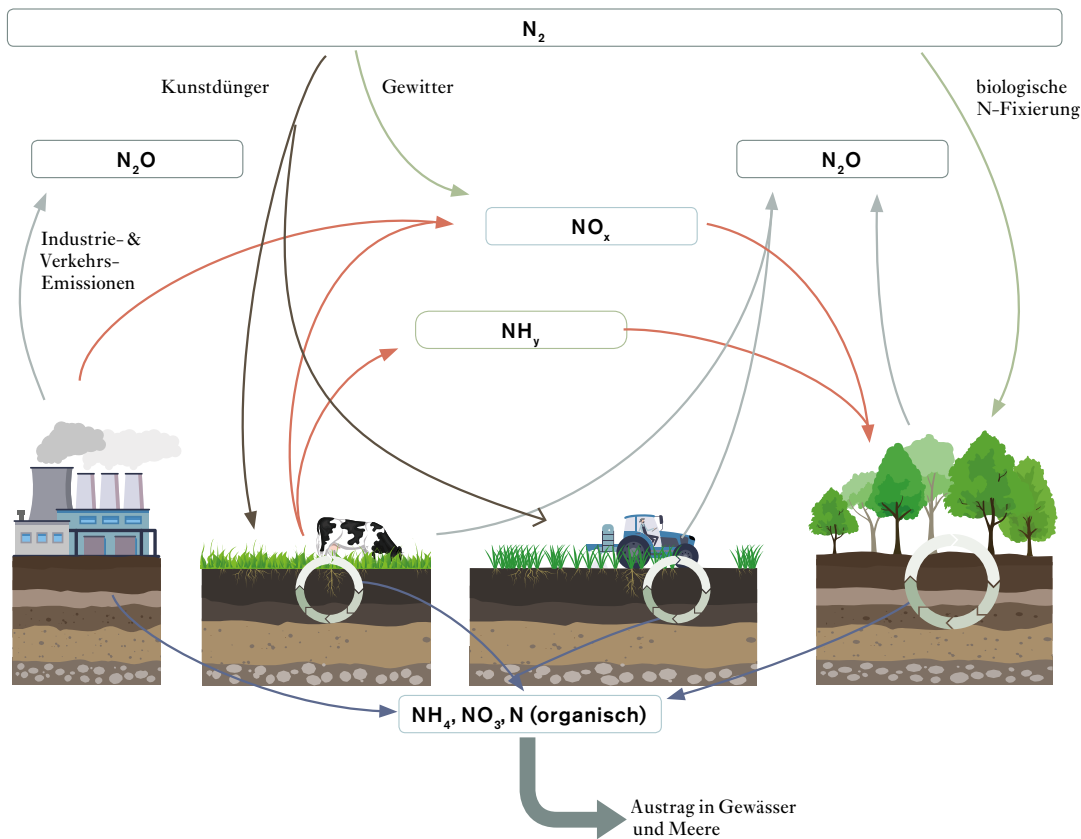
Die Überdüngung schadet zudem den natürlichen Ökosystemen. Denn nicht alle Pflanzen mögen viel Dünger. Die Vegetation, die auf kargen

Böden gedeiht, leidet unter der ungewollten Gabe. Dabei ist hier die Artenvielfalt besonders groß, vielleicht weil sich die Spezialisten etwas einfallen lassen mussten, um mit Stickstoffmangel leben zu können. Sogar fleischfressende Pflanzen wie die Venusfliegenfalle sind entstanden, die ihren Stickstoffbedarf durch das Fangen von Insekten decken. Diese Vielfalt droht infolge der Düngerschwemme zu verschwinden. In überdüngten Regionen dominieren wenige, stickstoffliebende Arten wie Brennnessel oder Löwenzahn. Wenn aber Pflanzenarten verschwinden, dann verschwinden auch zahlreiche Tiere, die auf die Hungerkünstler angewiesen sind. Genauso schädlich ist die Überversorgung mit Nährstoffen für Flüsse und Seen. Denn diese Eutrophierung führt zu einer Überproduktion an Biomasse, in deren Folge die Ökosysteme schlimmstenfalls umkippen.

→



Treibhausgasen auf der Spur: Heiko Moossen (links) und Sönke Zaehle erforschen die Zu- und Abnahme von Lachgas, aber auch Kohlendioxid und Methan in der Atmosphäre und analysieren zu diesem Zweck mit Massenspektrometern deren Isotopenverhältnis. Dabei dienen ihnen die reinen Substanzen aus Gasflaschen als Referenz.



Elementarer Stickstoff N_2 wird durch Gewitter, biologische Fixierung durch Bakterien oder die Umwandlung in Kunstdünger in eine reaktive Form wie Stickoxide NO_x gebracht, die Pflanzen verwerten können. Im Stickstoffkreislauf mischen zudem die Stickoxide NO_x und N_2O aus Industrie und Verkehr sowie die Emissionen von NO_x , N_2O und NH_3 aus der Landwirtschaft mit.

76

Auch auf das Klima wirkt sich die Überversorgung mit Stickstoff aus. Im Stickstoffkreislauf entsteht unweigerlich Lachgas, ein starkes Treibhausgas. Denn Bodenorganismen setzen Nitrat unter Sauerstoffabschluss zu elementarem Stickstoff und Lachgas um. Deshalb gelangt nach jedem Regen, wenn Wasser dem Erdreich die Sauerstoffzufuhr abschneidet, besonders viel Lachgas in die Atmosphäre. Sein Treibhauseffekt ist fast 300-mal so hoch wie der von Kohlendioxid. Und Lachgas bleibt im Schnitt rund 110 Jahre in der Atmosphäre, zehnmal länger als Methan. Die Lachgaskonzentration in der Atmosphäre hat seit 1750 um 33 Prozent zugenommen, wie Zaehles Team berechnet hat. Analysen verschiedener Forschergruppen, darunter auch der Gruppe von Sönke Zaehle, stimmen darin überein, dass der größte Teil davon aus der Landwirtschaft stammt – in Deutschland sind es nahezu 80 Prozent.

Doch nicht nur als Lachgas beeinflusst Stickstoff das Klima, auch andere Stickstoffverbindungen mischen da

mit, weil sie das Pflanzenwachstum ankurbeln. Das entzieht der Atmosphäre Kohlendioxid, was einen kühlenden Effekt hat. Zudem bilden Stickoxide in Bodennähe Aerosole, die zum Feinstaub zählen. Die schirmen das Sonnenlicht ab und wirken somit ebenfalls kühlend. All diese teils gegenläufigen Effekte erfasst Zaehles Team derzeit in Modellen, um so die Gesamtwirkung von Stickstoff auf das Klima abzuschätzen. Die Berechnungen werden dadurch erschwert, dass Stickoxide sehr inhomogen verteilt sind: Über Ballungsräumen erreichen sie hohe Werte, über großen Waldgebieten dagegen niedrige. „Erste Analysen deuten darauf hin, dass sich die Effekte von reaktivem Stickstoff, die den Klimawandel verstärken oder ihm entgegenwirken, mehr oder weniger kompensieren“, sagt Zaehle.

Ein weiterer Schaden, den Lachgas neben seiner Treibhauswirkung in der Atmosphäre anrichtet, wird dagegen nicht durch einen gegenläufigen Effekt anderer Stickstoffverbindungen

begrenzt: Das Gas nagt auch an der Ozonschicht in der Stratosphäre, die uns vor schädlicher UV-Strahlung schützt. Es gelangt in diese großen Höhen, weil es in der unteren Atmosphäre ausgesprochen reaktionsträge ist. In der Stratosphäre spaltet die kurzwellige Strahlung der Sonne die Lachgasmoleküle, und die Abbauprodukte attackieren das Ozon.

Tiersektor als größte Lachgasquelle

Bei all den schädlichen Wirkungen von reaktivem Stickstoff liegt es auf der Hand, dass die Nationen gegensteuern müssen. Doch bisher ist zu wenig geschehen – vor allem in puncto Überdüngung. Denn Dünger ist billig, genauso wie die Entsorgung von Gülle auf Feldern. Zudem stehen Landwirte unter Druck, billig zu produzieren, und die Politik greift selten beherzt ein, weil sie den Bauern nicht mit hohen Auflagen die Arbeitsgrundlage entziehen will. Zwar ging

die Menge an freigesetztem reaktivem Stickstoff in Europa, vor allem dank EU-Vorgaben, in den letzten vierzig Jahren zurück. Doch in Asien, Afrika, Südamerika und sogar in den USA wächst sie. Nicht zuletzt weil in Ländern wie China der Fleischkonsum steigt. Daher wird immer mehr Kunstdünger für die Futtermittelproduktion eingesetzt, und es wird immer mehr Gülle entsorgt. „Der Tiersektor ist die größte Lachgasquelle“, sagt Zaehle. Auch die Aquakultur, die inzwischen rund die Hälfte der weltweit konsumierten Fische produziert, dreht am Stickstoffkreislauf. Sie ist nicht nur der am schnellsten wachsende Sektor der Lebensmittelproduktion, sondern auch der am stärksten wachsende Lachgasemittent. Gegensteuern könnte man hier etwa durch Aquaponik, ein Verfahren, das die Exkremente aus der Fischzucht als Nährstoff für Pflanzen nutzt.

EU-Klage gegen die Bundesregierung

Selbst rückläufige Zahlen in Europa sind kein Grund, sich zurückzulehnen. Beispiel Deutschland: Nach Angaben des Statistischen Bundesamts ging der Einsatz von Stickstoffdünger zwischen 2000/2001 und 2020/2021 von 1,85 Millionen Tonnen auf 1,27 Millionen Tonnen zurück. Das reicht aber nicht aus. Wie es beim Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU heißt, war 2009 nahezu die Hälfte der natürlichen und naturnahen terrestrischen Ökosysteme in Deutschland überdüngt. Und immer noch überschreiten die Nitratkonzentrationen im Grundwasser an etwa 17 Prozent der Messstellen den Grenzwert von 50 Milligramm pro Liter, den die Nitratrichtlinie der EU vorgibt. Die EU-Kommission klagte deshalb 2016, und der Europäische Gerichtshof gab ihr zwei Jahre später recht. 2021 hat die Bundesregierung daraufhin die Düngeverordnung verschärft. So dürfen Landwirte in nitratbelasteten Gebieten um 20 Prozent weniger Dünger ausbringen und müssen längere Sperrfristen im Herbst und im Winter einhalten. Doch noch immer

gilt als Obergrenze für die Menge an Stickstoffdünger: 80 Kilogramm pro Hektar und Jahr.

„Das ist für viele Standorte deutlich zu viel“, sagt Sönke Zaehle. Um eine Vorstellung von der Menge zu geben, nennt er eine andere Zahl: Ein natürliches Ökosystem, etwa ein Wald, setzt durchschnittlich etwa 120 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr um. Im Vergleich dazu sind 80 Kilo zusätzlich viel. Trotzdem schimpfte der Präsident des Deutschen Bauernverbands, Joachim Rukwied, über die „fachlich mangelhafte Verordnung, die bedarfsgerechte Düngung in nitratsensiblen Gebieten verbietet“. Das ständige Draufsatteln bei gesetzlichen Auflagen, meinte er, ignoriere die Belastbarkeit der Höfe. Die Probleme bei der Umsetzung sieht auch Sönke Zaehle. Dennoch gehen ihm und seinen Kollegen die jetzigen Bemühungen nicht weit genug. Er begrüßt daher eine Resolution der UN-Umweltorganisation, den Überschuss an Stickstoff bis zum Jahr 2030 um die Hälfte zu reduzieren.

Helfen könnte dabei mehr ökologischer Landbau, da hier kein Kunstdünger sowie Gülle nur streng geregelt ausgebracht werden dürfen. So wird der Stickstoff in dem geschlossenen Kreislauf effizienter genutzt, kann aber zu geringeren Erträgen als im

GLOSSAR

REAKTIVER STICKSTOFF heißen anorganische und organische Stickstoffverbindungen, die Pflanzen und Mikroorganismen, anders als die elementare Form, nutzen können.

STICKSTOFFKREISLAUF bezeichnet den Zyklus des Elements durch die verschiedenen Teile des Erdsystems: die Atmosphäre, Hydrosphäre, Geosphäre und Biosphäre.

konventionellen Landbau führen. Auch viele konventionell arbeitende Landwirte versuchen inzwischen, Überdüngung zu vermeiden, indem sie den Stickstoffgehalt des Bodens messen und die Menge des Düngers entsprechend anpassen. Und wir können alle dazu beitragen, dass weniger Stickstoff in Umlauf kommt. Denn Überdüngung in der Landwirtschaft ist auch eine Folge unserer Ernährung. Sie ließe sich auch verringern, indem wir weniger Lebensmittel wegwerfen, Bioprodukte verwenden oder weniger Fleisch essen. Dann müsste weniger Kunstdünger eingesetzt werden, und es gäbe weniger Gülle.

77

←

Stickstoffrecycling: In der Aquaponik werden Pflanzen mit den Exkrementen von Fischen gedüngt, sodass die großen Stickstoffmengen, die in einer Fischzucht anfallen, nicht zur Überdüngung von Gewässern beitragen.



FOTO: SHUTTERSTOCK/TANAKORN SAR



Exklusive Lage: Das Big Bear Solar Observatory ist von Wasser umgeben. Das verringert störende Turbulenzen aufgrund aufsteigender warmer Luft und schafft beste Bedingungen für die Sonnenbeobachtung.

78

Max-Planck-Forschende kooperieren mit Partnern in mehr als 120 Ländern. Hier schreiben sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Hans-Peter Doerr vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung hat drei Wochen am Big Bear Solar Observatory in Kalifornien gearbeitet. Er erklärt, warum das Sonnenteloskop im Wasser steht, erzählt von Anglern, Waffennarren und von alternativen Wegen des Datentransports.

Wie viele Astronomen war auch ich schon als Kind vom Universum fasziniert. Ich bin auf dem Land aufgewachsen, wo man noch einen dunklen Nachthimmel über sich hat. Der Blick auf die Sterne hat mich daher schon früh in den Bann gezogen. Unsere Sonne ist der einzige Stern, der nah

genug ist, dass wir von der Erde aus Details auf seiner Oberfläche erkennen können. Das Goode Solar Telescope am Big Bear Solar Observatory, das vom New Jersey Institute of Technology betrieben wird, war lange Zeit das größte bodengestützte Sonnenteloskop weltweit, bevor es kürzlich vom Daniel K. Inouye Solar Telescope auf Hawaii abgelöst wurde.

Mit einem Spiegeldurchmesser von 1,6 Metern ist das kalifornische Teleskop leistungsfähig genug, um 50 bis 60 Kilometer große Strukturen auf der Sonne aufzulösen. Das Observatorium steht in den San Bernardino Mountains auf zweitausend Metern Höhe. Ungewöhnlich scheint sein Standort am Ende eines Damms, der rund zweihundert Meter weit in einen See – den Big Bear Lake – ragt. Für die Sonnenbeobachtung ist die Lage jedoch ideal, denn das Wasser erwärmt sich weniger stark als die Landoberfläche. Schlechtes „Seeing“ – störende Turbulenzen aufgrund aufsteigender warmer Luft – wird so

deutlich vermindert. In der Nähe des Observatoriums gibt es ein Guesthouse mit Selbstverpflegung als Unterkunft für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die gerade dort arbeiten. Zum Einkaufen fahren wir nach Big Bear Lake City, das man mit dem Auto in weniger als fünfzehn Minuten erreicht. Dort gehen wir hin und wieder auch essen. Der Name „Big Bear“ geht übrigens auf die vielen Grizzlybären zurück, die früher in der Umgebung vorkamen.

Der See ist ein beliebtes Naherholungsziel für die Bewohner aus dem Großraum L.A. Während der Coronazeit, als Auslandsreisen nicht möglich waren, war die landschaftlich schöne Gegend ein wahrer Besuchermagnet. Irgendwann musste gar ein Absperrzaun gezogen werden, weil schießwütige Amerikaner auf die Idee gekommen waren, die Tür zum Observatorium für Zielübungen mit dem Luftgewehr ins Visier zu nehmen! Das saubere Wasser und die vielen Fische locken vor allem Angler an den See,

BIG BEAR LAKE, USA



man kann aber auch durch Pinienwälder wandern, schwimmen, Boot fahren oder auf dem Campingplatz in Lagerfeuerromantik schwelgen. Im Winter ist die Gegend bei Skifahrern beliebt.

Während unserer mehrwöchigen Kampagnen haben wir für solche Freizeitaktivitäten allerdings nur wenig Sinn. Unter der Leitung von Michiel van Noort entwickeln wir Instrumentierung für die bodengebundene Sonnenbeobachtung. Aufbau und Inbetriebnahme von neuen Geräten halten uns auf Trab, denn es gibt immer etwas, das noch getestet und verbessert werden muss.

Für das Goode Solar Telescope haben wir ein Polarimeter und ein Kamerasystem entwickelt. Das Besondere an unseren Instrumenten ist, dass sie für die Anwendung von computergestützten Bildrekonstruktionsverfahren optimiert sind. Damit lässt sich das theoretische Auflösungsvermögen des Teleskops nahezu vollständig ausnutzen.

Für optimale Ergebnisse benötigen wir Hunderte bis Tausende Einzelbelichtungen in kurzer Abfolge.

Daraus resultieren riesige Datenmengen und ein enormer Bedarf an Rechenleistung für die Rekonstruktion. Unser Kamerasystem liefert bei einer Rate von 360 Belichtungen pro Sekunde ungefähr zehn Terabyte an Rohdaten pro Stunde. Bei mehreren Stunden Datennahme pro Tag ist das viel zu viel für eine Übertragung über die vorhandene Internetanbindung. Wir haben daher auf eine Methode zurückgegriffen, die die amerikanischen Kollegen treffend als „Sneaker-net“ bezeichneten: Zu Fuß trugen wir stapelweise Festplatten mit den Beobachtungsdaten über das Gelände und brachten sie im Handgepäck wieder zurück nach Deutschland. Glücklicherweise wurden die deutlich übergewichtigen Taschen am Flughafen nicht gewogen, und auch bei der Sicherheitskontrolle hat sich diesmal niemand für unsere Fracht interessiert.



FOTO: PRIVAT

Hans-Peter Doerr

43, ist von jeher technikbegeistert und tüfelt mit Vorliebe an neuen Instrumenten für die Sonnenbeobachtung. Nach seinem Physikstudium an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg hat er dort promoviert. Seit 2015 arbeitet er als Postdoc am Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in der Abteilung von Sami Solanki und beschäftigt sich mit der Beobachtung der Atmosphäre unseres Muttersterns.

AUF DEM HOLZWEG

In den 1980er-Jahren schien das Schicksal der heimischen Wälder besiegelt: Aufgrund des sauren Regens würden diese schon bald verschwunden sein, prophezeiten Experten damals. Die Katastrophe blieb aus, und heute weiß man, dass neben den Luftschadstoffen auch Faktoren wie Trockenheit für den schlechten Zustand zahlreicher Baumarten verantwortlich waren. Der Ökologe Hans Jürgen Böhmer beleuchtet in seinem Buch das Ökosystem Wald anhand von Beispielen aus aller Welt und ergründet, wie es zu solchen Fehleinschätzungen kommt. Er selbst forschte unter anderem in den Regenwäldern Hawaiis, wo vor vierzig Jahren ebenfalls massenhaft Bäume starben. In diesem Fall lag die Hauptursache in den natürlichen Lebens- und Sterbezyklen zeitgleich entstandener Baumkohorten. Naturgegebene Alterungsprozesse, Hitze, Dürre, Schadpilze, invasive Arten oder alles zusammen – die Gründe, warum Bäume sterben, sind äußerst komplex und regional verschieden. In der Debatte um den Klimawandel und die Zukunft der Wälder ist es daher laut Böhmer nicht zielführend, sich auf Ferndiagnosen und Modellrechnungen zu verlassen. Gefragt seien vielmehr groß angelegte Langzeitstudien im Freiland. Doch die sind angesichts von Publikationsdruck und Mittelkürzungen schon seit Längerem auf dem absteigenden Ast.

Elke Maier

Hans Jürgen Böhmer
Beim nächsten Wald wird alles anders
208 Seiten, S. Hirzel Verlag
24,00 Euro



VERRÜCKTE PHYSIK

Sie ist die schwächste der vier Naturkräfte – und kommt uns doch so stark vor. Immerhin hält sie uns auf der Erde. Aber im Alltag denken wir eher wenig über sie nach. Schmerzlich wird sie uns in dem Moment bewusst, in dem das neue Handy aus der Hand gleitet und auf die Fliesen knallt. Die Rede ist von der Schwerkraft. Über sie hat der Astrophysiker Luciano Rezzolla ein Buch geschrieben. Darin nähert er sich diesem Phänomen akribisch an und beginnt – wie könnte es anders sein – bei Galileo Galilei und Isaac Newton. Einen Schwerpunkt bildet Albert Einstein, der vor hundert Jahren mit einer vollkommen neuen Theorie der Gravitation die Physik auf den Kopf stellte und so verrückte Dinge beschrieb wie eine gekrümmte Raumzeit. Daraus eröffneten sich wiederum überraschende Perspektiven, etwa schwarze Löcher, in denen sogar Licht verschwindet. In jüngster Zeit hat die

Relativitätstheorie durch die erste Aufnahme eines solchen exotischen Objekts und durch die Entdeckung von Gravitationswellen eine Renaissance erlebt, die auch Laien fasziniert. Rezzolla beschreibt alle diese Dinge der aktuellen Forschung und vermittelt tiefeschürfende Einblicke in die Schwerkraft. Eine Warnung sei allerdings ausgesprochen: Ein schnelles Durchlesen der acht detail- und umfangreichen Kapitel verträgt das Buch nicht. Vielmehr will das Thema, ohnehin hart an der Grenze des Vorstellbaren, Schritt für Schritt erarbeitet werden.

Helmut Hornung

Luciano Rezzolla
Die unwiderstehliche Anziehung der Schwerkraft
269 Seiten, C. H. Beck Verlag
24,00 Euro



DEFIZITE IN DER BILDUNG

Schon Albert Einstein konstatierte 1930, wie „gedankenlos wir uns der Wunder der Wissenschaft und Technik bedienen und nicht mehr davon verstanden haben als die Kuh von der Botanik der Pflanzen, die sie mit Wohlbehagen frisst“. An dieser Einschätzung habe sich nicht viel geändert, bedauert Ernst Peter Fischer und betont, dass die Distanz zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit seit dem Zweiten Weltkrieg noch viel größer geworden sei. Dabei wird unser Alltag heute mehr denn je von Wissenschaft geprägt – eine Erkenntnis, die uns nicht erst seit Corona schwant. Vehement tritt Fischer dem Vorwurf von der Bringschuld der Wissenschaft entgegen und kritisiert die Umkehrung der Aufgabenstellung: Vielmehr gehe es hier um eine Bildungspflicht! Sonst entstehe unweigerlich ein wachsendes wissenschaftliches Analphabetentum, das der Zukunft einer Zivilgesellschaft keinesfalls zuträglich sein könne. Es könnte sich sogar als höchst gefährlich erweisen. Corona- und Klimawandelleugner sind Beispiele dafür. Fischer bringt es auf den Punkt, wenn er schreibt: Man muss seine Kenntnisse selbst abholen, man muss sie erwerben, um sie zu besitzen. Und räumt auch sogleich mit den Bemühungen eines „Public Understanding of Science“ auf: Ob denn hier das *Verstehen von* oder das *Verständnis für* Wissenschaft gefördert werden solle? Fischer nimmt kein Blatt vor den Mund – er hält diese Bemühungen allesamt für einen Fehlschlag. Sein Plädoyer gilt einer neuen Allgemeinbildung – wir werden sie brauchen!

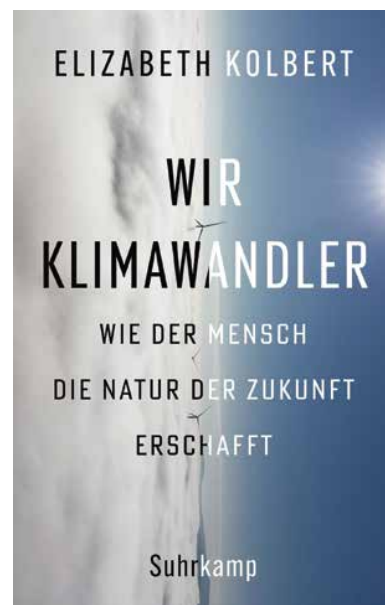
Christina Beck

Ernst Peter Fischer
Wider den Unverstand!
130 Seiten, S. Hirzel Verlag
20,00 Euro

NEU ERSCHIENEN

ALLES UNTER KONTROLLE?

Der Mensch hat die Erde seit Beginn der Industrialisierung so stark verändert, dass wir in eine neue Epoche eingetreten sind: das Anthropozän, das Erdzeitalter des Menschen. Den Begriff prägte der inzwischen verstorbene niederländische Atmosphärenchemiker und Nobelpreisträger Paul Crutzen, ehemals Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie – und er verstand ihn nach eigener Aussage als Warnung. Die Pulitzer-Preisträgerin Elizabeth Kolbert hat in ihrem Buch viele Beispiele zusammengetragen, die uns vor allem eines lehren: Wir haben den Planeten mitnichten unter Kontrolle. Tatsächlich sind wir ständig damit befasst, Probleme zu lösen, die erst dadurch entstanden sind, dass wir in die natürlichen Zusammenhänge vermeintlich zu unserem eigenen Vorteil eingegriffen haben. Wenn Kontrolle das Problem ist, so Kolbert, dann muss nach der Logik des Anthropozäns die Lösung in mehr Kontrolle bestehen. Sehr anschaulich werden die Grenzen dieser Hybris am Beispiel von New Orleans: Der Hochwasserschutz für die Stadt am Mississippi blockiert die Sedi-



mentablagerung und führt zu erheblichen Landverlusten. Mit einem aberwitzigen Aufwand und mit Kosten im Milliardenbereich werden Millionen Kubikmeter Sedimente zur Landgewinnung herangeschafft – die dann innerhalb eines Jahrzehnts wieder verschwinden. All dies zeigt uns somit vor allem eines: dass es an der Zeit ist, unseren Umgang mit unserem Planeten radikal zu überdenken.

Christina Beck

Elizabeth Kolbert
Wir Klimawandler
239 Seiten, Suhrkamp Verlag
25,00 Euro

FÜNF FRAGEN

ZUR ENERGIEKRISE

AN ROBERT SCHLÖGL



Gasknappheit und Klimakrise sind Gründe genug, so schnell wie möglich aus fossilen Energieträgern auszusteigen. Robert Schlögl bewertet die Energiepolitik und erläutert, was die Wissenschaft dazu beitragen kann.

Herr Schlögl, wie beurteilen Sie die aktuelle Energiepolitik?

ROBERT SCHLÖGL Die Regierung hat ziemlich viel unternommen. Man kann kurzfristig, glaube ich, nicht viel mehr machen. Prinzipiell haben wir in Deutschland aber ein Systemproblem. Es ist Unsinn, die Energiewende durch das Klimaschutzgesetz in Sektoren aufzuteilen, die auf die Ministerien zugeschnitten sind. Jetzt machen fünf Ministerien irgendwas. Aber das Gesamtsystem muss optimiert werden und nicht ein Sektor auf Kosten aller anderen. Alle wollen jetzt auf die nicht vorhandene grüne Elektrizität zugreifen. Die einen wollen elektrisch Auto fahren, die anderen elektrisch heizen und die Dritten ihre Industrie elektrifizieren. Ein großes Problem ist, dass wir dafür wesentlich mehr Strom brauchen als heute. Denn um die Schwankungen von Wind und Sonne auszugleichen, muss man ungefähr 50 Prozent der Energie speichern. Das kostet aber viermal mehr Energie, als sie direkt zu verwenden. Mich beunruhigt, dass wir keinen Gesamtplan haben.

Gibt es in der Wissenschaft schon systemische Konzepte?

Das Bundesforschungsministerium hat vor zwei Jahren das Projekt TransHyDE aufge-

legt, das ich koordiniere. Darin untersuchen wir den Transport von Wasserstoff für Deutschland. In einem Teilprojekt entwickeln ungefähr 40 Unternehmen und 250 Leute Konzepte für das Gesamtsystem.

Warum werben Sie für einen globalen Markt erneuerbarer Energien?

Die Energiewende, die viele anstreben, geht nicht von einem globalen Energiemarkt aus, sondern von Unabhängigkeit. Das ist ein grober Fehler. Wie können wir als Exportweltmeister autark sein? Man muss den Import von Energie allerdings diversifizieren. Das ist mit erneuerbarer Energie leichter als mit fossiler, weil man diese in transportierbarer Form effizient in einem Streifen plus/minus 20 Grad um den Äquator erzeugen kann. Die Hälfte der Landfläche Saudi-Arabien würde schon reichen, um den Energiebedarf der gesamten Welt zu decken.

Wie kann unsere Energieversorgung langfristig gesichert werden?

Wir müssen schnellstens unsere Infrastruktur auf Vordermann bringen. Für die Tausende von Windrädern, die jetzt gebaut werden sollen, gibt es keine Stromleitungen. Und für den grünen Wasserstoff, den wir kaufen wollen, gibt es keine Pipelines. Um die Erdgaspipelines zu nutzen, wie es deren Betreiber vorschlagen, müsste erst der Wasserstoff da sein, und das dauert noch zwanzig Jahre. Bis dahin kann man die alten Pipelines nicht mehr verwenden. Um das russische Gas durch Wasserstoff zu ersetzen, müssten alle Fabriken der Welt, die Elektrolyseure herstellen, vierzig Jahre Elektroly-

seure produzieren – nur für Deutschland. Um in zwanzig Jahren den Wasserstoffbedarf zu decken, muss man jetzt anfangen. Die meiste Zeit verliert man bei so großen Projekten am Anfang. Wenn die Bagger rollen, dauert es, solange es dauert. Aber das Reden darüber, ob die Bagger rollen sollen, kann man beschleunigen.

Wie kann die Grundlagenforschung etwa in der Kernfusion zur Energiewende beitragen?

Die Kernfusion ist etwas fürs 22. Jahrhundert. Dennoch muss man das natürlich verfolgen. Aber im Maschinenraum der Energiewende gibt es eine Million von Schwierigkeiten. Katalysatoren werden zum Beispiel überall gebraucht. Die meisten funktionieren nicht richtig. Dadurch verlieren wir viel Energie. Da tun wir in der Max-Planck-Gesellschaft viel. Nur geht es bei der Energiewende nicht nach dem Leitspruch von Max Planck: Dem Anwenden muss das Erkennen vorausgehen. Wir müssen jetzt erst einmal anfangen und suchen dann das Optimum. Die Gegner der Energiewende sagen oft: Wenn ihr das ganze Wissen habt, dann machen wir Energiewende. Das ist aber ganz falsch.

Interview: Peter Hergersberg

Robert Schlögl ist Direktor der Abteilung „Anorganische Chemie“ am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft.

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

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

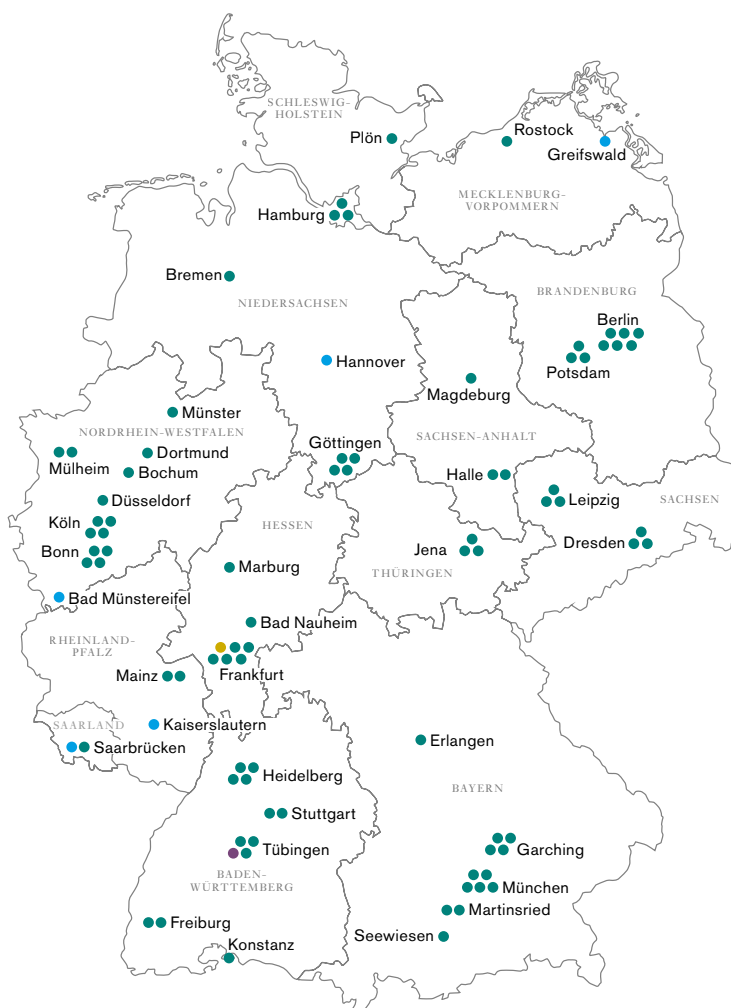
- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



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
089 2108-1719 /-1276 (vormittags)
mpf@gv.mpg.de
www.mpg.de/mpforschung
Kostenlose App: www.mpg.de/mpfmobil

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung

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

Redaktion

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

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)
Annabell Kopp (-1819)

Konzeptionelle Beratung

Sandra Teschow und Thomas Susanka
www.teschowundsusanka.de

Gestaltung

GCO Medienagentur
Schaezlerstraße 17
86150 Augsburg
www.gco-agentur.de

Druck & Vertrieb

Vogel Druck & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg

Anzeigenleitung

Beatrice Rieck
Vogel Druck & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg
0931 4600-2721
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 allgemein verständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (*MaxPlanckResearch*) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr. Die Auflage dieser Ausgabe beträgt 80000 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 e. V. unterhält 86 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 23900 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6900 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2021 umfasste insgesamt 2,0 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®).



Zur besseren Lesbarkeit haben wir in den Texten teilweise nur die männliche Sprachform verwendet. Mit den gewählten Formulierungen sind jedoch alle Geschlechter gleichermaßen angesprochen.

MAX PLANCK
GESELLSCHAFT

