



IMMUNOLOGIE

VOM HARMLOSEN PILZ ZUR TÖDLICHEN GEFAHR

Warum die Darmflora aus dem Gleichgewicht gerät

PHOTONIK

SCHNELLTEST FÜR ANTIBIOTIKA- RESISTENZEN

Wie ein Chip den Einsatz von Medikamenten verbessert

ÖKOLOGIE

ÜBERLEBENS- KÜNSTLER IN DER UNTERWELT

Wie Mikroorganismen unterirdische Lebensräume erobern



SCHWERPUNKT

MIKRO- WELTEN

Nahezu jeder Lebensraum der Erde ist von Mikroben besiedelt – ebenso wie alle höheren Organismen, vom Fichtenbäumchen bis zum Menschen. Über die große Bedeutung der winzigen Lebewesen.



Werden Sie
Freund & Förderer
der Friedrich-Schiller-
Universität Jena

Kontakt

Gesellschaft der Freunde und
Förderer der Friedrich-Schiller-
Universität Jena e.V.

Dr. Renate Adam
Fürstengraben 1 · 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-31 000
Fax: +49 36 41 9-31 002
E-Mail: renate.adam@uni-jena.de

Die Gesellschaft der Freunde und Förderer
der Friedrich-Schiller-Universität Jena
unterstützt Wissenschaft, Lehre und
Forschung und fördert unter anderem
nationale und internationale Tagungen,
studentische Exkursionen, die Internatio-
nalisierung, Drucklegungen, die akade-
mische Musikpflege und die universitären
Sammlungen.

Wir laden Sie herzlich ein, der Gesellschaft
beizutreten (Jahresbeitrag: 45 Euro, Firmen
und Vereine: 150 Euro) oder uns mit einer
Spende zu unterstützen.

Weitere Infos sowie eine Beitrittserklärung
finden Sie im Internet unter:

www.uni-jena.de/univerein





Prof. Dr. Thorsten Heinzel
Vizepräsident für Forschung
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Tradition und Zukunft – Mikrobiologie in Jena

Das Jahr 2018 steht für die Wissenschaft in Deutschland erneut im Zeichen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder. Insgesamt 195 Konzeptanträge für Exzellenzcluster sind in diesem nationalen Wettbewerb gestellt worden. Unter den 88 Antragsskizzen, die nun bis Februar zu Vollarträgen ausgearbeitet werden, sind gleich zwei Anträge der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU). Ab 2019 werden 45 bis 50 Exzellenzcluster mit jährlich 385 Millionen Euro gefördert.

Der Clusterantrag »Enlightening the Receptome« wird gemeinsam mit der Universität Würzburg ausgearbeitet. Er hat zum Ziel, die Summe aller Rezeptormoleküle eines Organismus, das »Rezeptom«, systematisch aufzuklären und für die Behandlung von Krankheiten nutzbar zu machen (S. 49). Der Clusterantrag »Balance of the Microverse« widmet sich Mikroorganismen und ihren Interaktionen mit anderen Mikroorganismen sowie mit ihrer gesamten Umwelt, dem »Microverse«.

Die Vielfalt dieser »Mikrowelten« bilden den Schwerpunkt (S. 8–46) der vorliegenden Ausgabe der LICHTGEDANKEN. Aktuelle mikrobiologische Forschungsthemen an der FSU behandeln Zukunftsfragen wie die Bekämpfung von Infektionskrankheiten oder die nachhaltige Sicherung unserer Lebensgrundlagen sowie eines stabilen Klimas.

Mit diesen Themen führt die Universität die langjährige Tradition der Mikrobiologie in Jena fort, deren Grundstein Hans Knöll in den 1940er Jahren legte, als er hier die erste großtechnische Penicillin-Produktion realisierte.

Aus dem von ihm geleiteten Zentralinstitut für Mikrobiologie und experimentelle Therapie (ZIMET) ging das heutige Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI) hervor. Von der engen Zusammenarbeit mit dem HKI und anderen außeruniversitären Forschungseinrichtungen der Leibniz-Gemeinschaft, Max-Planck-Gesellschaft, Fraunhofer-Gesellschaft und Helmholtz-Gemeinschaft profitiert die Universität insbesondere auch bei der Ausarbeitung des Microverse-Clusterantrags.

Der Cluster bündelt die Expertise aus den FSU-Forschungsprofillinien LIGHT und LIFE und baut auf der seit 2007 bestehenden, sehr erfolgreichen Jenaer Exzellenzgraduiertenschule für Mikrobielle Kommunikation (JSMC) auf. Die strategische Zusammenarbeit der beteiligten Einrichtungen überzeugt bereits jetzt mit erfolgreich eingeworbenen koordinierten Drittmittelprojekten wie zum Beispiel Sonderforschungsbereichen. Eine Förderung des Microverse- wie des Receptome-Clusters würde diese positive Entwicklung fortsetzen und die überregionale und internationale Sichtbarkeit der FSU erhöhen.

Ich wünsche viel Freude bei der Lektüre der LICHTGEDANKEN.

Ihr

Jena, im Januar 2018

HERAUSGEBER:

Stabsstelle Kommunikation/Pressestelle im Auftrag des
Präsidenten der Friedrich-Schiller-Universität Jena

REDAKTION UND GESTALTUNG:

Dr. Ute Schönfelder, Juliane Dölitzsch, Stephan Laudien,
Axel Burchardt (v.i.S.d.P.), Liana Franke, Kai Friedrich,
Monika Paschwitz (Redaktionsassistenz) und Kerstin Apel
(Sekretariat)

GRAFISCHES KONZEPT: Timespin – Digital Communication
GmbH, Sophienstraße 1, 07743 Jena

ANSCHRIFT:

Friedrich-Schiller-Universität Jena
Fürstengraben 1, 07743 Jena
Telefon: +49 3641 9-31040, Telefax: +49 3641 9-31032,
E-Mail: presse@uni-jena.de

GESAMTHERSTELLUNG:

Druckhaus Gera GmbH, Jacob-A.-Morand-Straße 16,
07552 Gera

INTERNET: www.uni-jena.de/lichtgedanken

ISSN: 2510-3849

ERSCHEINUNGSDATUM: Januar 2018

FOTOS: Kasper (1, 3, 5, 6, 7, 8, 11 – 14, 16, 19, 25 – 29, 33, 35,
40, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 51, 56 – 61, 63, 64, 66), Günther (5,
18, 23, 55, 63, 35, 68), Frenzel (5, 71, 73), Beutel (5, 52),
Lehmann (5, 36, 37, 38), Fischer (10), Döring (5, 20, 24), Bee-
melmanns (30, 32), Rischer (31), Mittag (34), Gutmann (39),
Kirtzel (43), Archiv (47), Schroll (48), Yan (50), Stein (53, 54),
Hoffmeister (64), Alivernini (70, 72), Biehl (72, 73), privat (74).
Nachdruck nur mit Genehmigung gestattet. Für unverlangt
eingesandte Manuskripte, Fotos u. Ä. wird keine Haftung
übernommen. Namentlich gekennzeichnete Artikel müssen
nicht mit den Auffassungen des Herausgebers und der Re-
daktion übereinstimmen. Für den Inhalt sind die Unterzeich-
ner verantwortlich. Zur besseren Lesbarkeit haben wir in den
Texten teilweise nur die männliche Sprachform verwendet.
Mit den gewählten Formulierungen sind Männer und Frauen
gleichmaßen angesprochen.



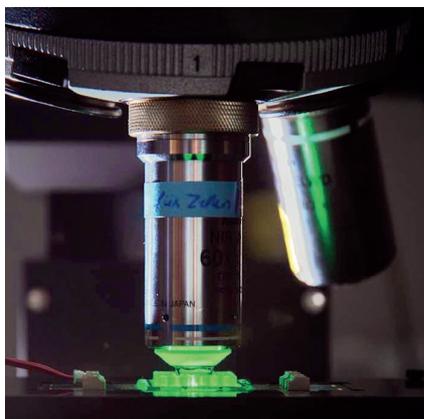
SCHWERPUNKT

MIKROWELTEN

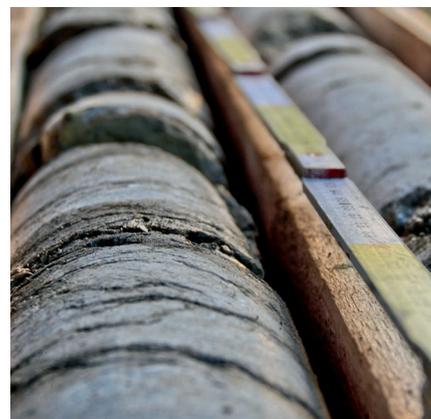
- 08 KLEINE LEBEWESEN MIT GROSSER BEDEUTUNG**
Wie mikrobielle Lebensgemeinschaften in der Natur funktionieren; wie Wirtsorganismen und Umwelt von ihnen profitieren und wie die Kommunikation in den vielfältigen Mikrobiomen gelingt, das untersuchen Forscher der FSU mit zahlreichen Partnern.
- 14 FREUNDE UND HELFER IM MIKROKOSMOS**
Über das Erfolgsrezept der Mikroben und was wir Menschen von ihnen lernen können, spricht Mikrobiologe Prof. Dr. Axel Brakhage im Interview.
- 18 MIKROORGANISMEN UND GESUNDHEIT**
Wie aus harmlosen Darmbewohnern gefährliche Keime werden; warum Fortschritte der modernen Medizin zum Gesundheitsrisiko werden können; welche psychischen Folgen eine lebensbedrohliche Sepsiserkrankung haben kann und wie sich resistente Keime schnell und sicher nachweisen lassen.
- 26 BLUTSTROPFEN IM (AUTO-)FOKUS**
Im Forschungsprojekt »BLOODi« wird an der Entwicklung eines dynamischen Häogramms gearbeitet. Die Reportage begleitet das Forscherteam und zeigt, wie sich mit neuen optischen Technologien Infektionen im Vollblut erkennen lassen.
- 30 MIKROORGANISMEN UND UMWELT**
Wie Termiten Pilze für den Eigenbedarf kultivieren und Bakterien Grünalgen zur Strecke bringen; wie Mikroorganismen im Grundwasser und Bodengestein überleben und zur Biomineralisation beitragen.
- 44 BILDGEBUNG PER »RÖNTGENBLICK«**
Mit ultrakurzen Röntgenpulsen lassen sich Prozesse und Strukturen bis in den Nanometer-Bereich auflösen.
- 46 GPS FÜR ANTIBIOTIKA**
Mit polymerbasierten Nanosystemen sollen Medikamente künftig punktgenau an den Infektionsherd gelotst werden.



- 18** | IMMUNOLOGIE
**VOM HARMLOSEN PILZ
ZUR TÖDLICHEN GEFAHR**



- 24** | PHOTONIK
**SCHNELLTEST FÜR
ANTIBIOTIKARESISTENZEN**



- 37** | ÖKOLOGIE
**ÜBERLEBENSKÜNSTLER
IN DER UNTERWELT**



- 50** | 3D-REKONSTRUKTION
**KÄFERFOSSIL ZUM
LEBEN ERWECKT**



- 68** | PORTRÄT
**CHRISTOPH REDIES IST
ANATOM UND KÜNSTLER**



- 70** | EXPEDITION
**MAGAZIN »GEO« SCHICKT
FORSCHER NACH AFRIKA**

NACHRICHTEN

- 06 | Aktuelles aus Uni und Stadt

DAS KALENDERBLATT

- 47 | Mythos Oktoberrevolution

THEMEN

- 48 | Überleben mit Leukämie
50 | Bad Boy im Käferstammbaum
53 | Geschenke an die Götter
56 | JUMP zieht an – oder nicht

PROJEKTE

- 58 | Spuren alter Erdbeben ausgraben
59 | Sichern, nutzen, teilen
60 | Prävention gegen Terrorismus
61 | Das Beste aus zwei Nanowelten
62 | Haussknechts Orientsouvenirs

NACHGEDACHT

- 52 | Länger als ein Leben

TICKER

- 63 | Forschung kurz und knapp

WISSENSCHAFTSFOTO

- 66 | Mehr Sicherheit – mehr Risiko?

PORTRÄT

- 68 | Die Kunst (in) der Wissenschaft

HINTER DEN KULISSEN

- 74 | Forschung schwerelos



Gesundheit (nutriCARD) der Universitäten Jena, Halle und Leipzig angesiedelt und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit knapp 2,7 Millionen Euro unterstützt. »Unser Ziel ist es, Ernährungskonzepte für gesunde Personen mit unterschiedlichen Ernährungsgewohnheiten zu entwickeln, mit denen sichergestellt werden kann, dass sie alle notwendigen Nährstoffe in ausreichender Menge aufnehmen«, erklärt Dr. Christine Dawczynski, die Leiterin der neuen Nachwuchsgruppe.

Um die Aussagekraft ernährungsassoziierter Studien dauerhaft zu verbessern, konzentrieren sich die Wissenschaftler darauf, Biomarker zu identifizieren und zu validieren, die bestimmte Ernährungsmuster verlässlich reflektieren und so Zusammenhänge zwischen der Nährstoffzufuhr und dem Gesundheitszustand erkennen lassen. Beispielsweise sind Omega-3-Fettsäuren marinen Ursprungs bereits heute gut im Blut nachweisbar – ähnliches wollen die Forscher nun auch für den Konsum von ballaststoffreichem Getreide, Fleisch, Milchprodukten, Schokolade, Fast Food oder Gemüse und Obst erreichen. sh

Biomarker für gesundes Essen

Nachwuchsgruppe »Nutritional Concepts« entwickelt Konzepte für verschiedene Ernährungstypen und erhält rund 2,7 Millionen Euro vom Bund

Vegetarier, Veganer, Flexitarier – Menschen ernähren sich heute auf ganz unterschiedliche Art und Weise. Wer auf bestimmte Lebensmittel verzichtet, läuft jedoch Gefahr, einen Mangel an wichtigen Nährstoffen zu erleiden. Zwar gibt es für die meisten Ernährungsformen jede Menge Ratgeber, eine valide wissenschaftliche Datenbasis dazu ist bislang aber nur ansatzweise vorhanden.

Jenaer Ernährungswissenschaftler wollen das jetzt ändern. In den kommenden fünf Jahren erarbeitet die Nachwuchsgruppe »Nutritional Concepts« gezielt Ernährungskonzepte für verschiedene Ernährungstypen. Diese Leitlinien werden durch Humaninterventionsstudien wissenschaftlich validiert.

Die Gruppe ist am Kompetenzcluster für Ernährung und kardiovaskuläre

Chronische Wunden heilen

Forschungsgruppe »InflammAging« wird vom Land mit 700 000 Euro gefördert. Deren Ziel ist eine bessere Wundheilung mittels Nanocellulose

Mit 700000 Euro wird die interdisziplinäre Forschungsgruppe »InflammAging« an der Universität Jena für drei Jahre durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds gefördert.

Ziel des Forschungsverbunds sind neue Therapieansätze zur Behandlung von chronischen Wunden – vor allem bei älteren Menschen. Dazu setzt das Team aus Pharmazie, Ernährungswissenschaften und Medizin auf die Kombination von Wirkstoffen aus der Natur mit einem innovativen Trägermaterial aus bakterieller Nanocellulose. Auf Basis dieses biotechnologisch gewonnenen Materials sollen aktive Wundauflagen entwickelt werden, um chronisch-ent-



In Wundauflagen aus Nanocellulose wollen die Forscher entzündungshemmende Wirkstoffe verpacken, um chronische Wunden effektiver behandeln zu können.

zündliche Wunden effektiver behandeln zu können.

In Deutschland erkranken jedes Jahr etwa 400000 Menschen an einem behandlungsbedürftigen Dekubitus, einer Schädigung der Haut und des darunterliegenden Gewebes, die sich zu »stillen« Entzündungen entwickeln können. »Anti-inflammatorische Strategien zur Prophylaxe und Therapie von derartigen Entzündungen sind daher ein wichtiges Forschungsfeld«, erläutert der Koordinator der neuen Forschungsgruppe, Prof. Dr. Stefan Lorkowski.

Zur Wundbehandlung eingesetzt werden natürliche Wirkstoffe, etwa Triterpensäuren aus Weihrauch, die entzündungshemmend sind. AB

Mit zwei Anträgen im Wettbewerbsfinale

Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder: Die Universität Jena ist zur Einreichung von zwei Vollanträgen für Forschungscluster aufgefordert worden. Die Anträge »Balance of the Microverse« und »Enlightening the Receptome: From Biophysics to Clinical Applications« müssen bis 21. Februar vorliegen.

Die Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) ist in der Exzellenzstrategie erfolgreich und mit zwei Exzellenzcluster-Anträgen in die Finalrunde des Wettbewerbs eingezogen. Die Clusteranträge, von denen einer gemeinsam mit Würzburg erstellt wird, kommen aus den Bereichen Lebens- und Naturwissenschaften. Die Exzellenzcluster sollen ab 2019 mit jährlich 385 Millionen Euro gefördert werden. Die Förderentscheidungen werden im September 2018 getroffen.

»Balance of the Microverse«

Das Ziel des Clusters »Balance of the Microverse« – dessen Sprecher Prof. Dr. Axel Brakhage ist – besteht darin, Mikroorganismen und ihre Interaktionen mit anderen Mikroorganismen sowie mit ihrer gesamten Umwelt – dem Microverse – zu

erforschen. Für ein umfassendes Verständnis dieser Wechselbeziehungen bündelt Jena seine Expertise: Die Fachrichtungen (Umwelt-)Mikrobiologie, Infektionsbiologie, Chemische Biologie, Bio-Geo-Interaktionen, Systembiologie, Optik/Photonik, Materialwissenschaften und weitere Disziplinen arbeiten fachübergreifend zusammen.

Neben technologischen Fortschritten im Labor erwarten die Forschenden zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten zum Wohle des Menschen und der Umwelt. Unter Federführung der FSU sind auch das Uniklinikum, das Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut, das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, das Leibniz-Institut für Photonische Technologien, die Max-Planck-Institute für chemische Ökologie, für Biogeochemie und für Menschheitsgeschichte, das Helmholtz-Institut Jena sowie das DLR-Institut für Datenwissenschaften beteiligt.

»Enlightening the Receptome: From Biophysics to Clinical Applications«

Der Antrag »Enlightening the Receptome: From Biophysics to Clinical Applications« hat zum Ziel, das »Rezeptom«, die Summe aller Rezeptormoleküle eines Organismus, systematisch aufzuklären und für die Behandlung von Krankheiten nutzbar zu machen. Der Clusterantrag ist von den Universitäten Würzburg und Jena und ihren Klinika gestellt worden. Daneben sind Forschergruppen des Leibniz-Instituts für Altersforschung – Fritz-Lipmann-Institut – und des Max-Planck-Instituts für chemische Ökologie beteiligt. Als Sprecher fungieren Prof. Dr. Markus Sauer (Würzburg), Prof. Dr. Klaus Benndorf und Prof. Dr. Christian Hübner, beide vom Jenaer Uniklinikum.

Mit dem Cluster wollen die Wissenschaftler ihre erfolgreiche Kooperation aus dem Sonderforschungsbereich »ReceptorLight« weiter ausbauen. AB

Neuer Innovationstreiber

In Thüringen entsteht ein neues Innovationszentrum für Quantenoptik und Sensorik (InQuoSens)

Mit jeweils 1,5 Millionen Euro aus EU- und Landesmitteln fördert der Freistaat Thüringen das neue Zentrum. Die Friedrich-Schiller-Universität Jena und die Technische Universität Ilmenau werden gemeinsam Träger des standortübergreifenden Innovationszentrums. »Mit InQuoSens entsteht ein leistungsfähiger Forschungsverbund, der in einem Themenfeld agiert, welches einerseits noch Gegenstand exzellenter Grundlagenforschung, andererseits aber bereits Treiber konkreter Innovationen in der optischen Sensorik ist«, sagte FSU-Präsident, Prof. Dr. Walter Rosenthal, anlässlich der Übergabe der Förderbescheide Ende Oktober 2017.



Übergabe der Fördermittelbescheide (v. l.): Andreas Tünnermann (Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik und Uni Jena), Walter Rosenthal (Uni Jena), Wolfgang Tiefensee (Thüringer Wirtschafts- und Wissenschaftsministerium), Kai-Uwe Sattler und Jens Müller (TU Ilmenau).

Pilzkulturen in der »Jena Microbial Resource Collection« (JMRC), einer gemeinsamen Einrichtung des Leibniz-Instituts für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI) – und der Friedrich-Schiller-Universität. Die JMRC kuratiert eine Sammlung von rund 50 000 Mikroorganismen zu Forschungszwecken.



SCHWERPUNKT

Mikrowelten

Über kleine Lebewesen und ihre große Bedeutung

Mikroorganismen sind die heimlichen Herrscher der Welt: Sie besiedeln nicht nur nahezu jeden Flecken unserer Erde – auch sämtliche höheren Organismen, ob Tier, Pflanze oder Mensch, sind mit Mikroben vergesellschaftet. Zahllose Lebensvorgänge und abiotische Prozesse wie das Klima werden vom Zusammenspiel mit komplexen Mikrobengemeinschaften beeinflusst. Die vielfältigen Mikrowelten werden in Jena seit langem intensiv erforscht: an der Universität und dem Universitätsklinikum ebenso wie an außeruniversitären Forschungseinrichtungen, etwa dem Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI). »

Zwischen Minimalismus und Vielfalt

Sie sind Überlebens- und Wandlungskünstler, Kommunikationstalente und zumeist in riesigen Communities vernetzt. Ihre Flexibilität, ihre Vielfalt und Vielzahl sind unübertroffen. Mikroorganismen stellen gut zwei Drittel aller Biomasse auf der Erde. Wie ihre Lebensgemeinschaften in der Natur funktionieren, wie sie dynamische Gleichgewichte mit Wirtsorganismen und ihrer Umwelt herstellen und erhalten und wie die Kommunikation in den unterschiedlichen Mikrobiomen gelingt, das untersuchen Jenaer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in mehreren interdisziplinären Forschungsverbänden.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

In Süßwasser wie Flüssen und Seen, aber auch im Salzwasser der Ozeane kommen zahlreiche Mikroben vor. Sie sind für den Stoffumsatz in den Gewässern essenziell.

Mikroorganismen bestehen nur aus einer Zelle bzw. Aggregaten von Einzelzellen. Zu den mikroskopischen Kleinstlebewesen gehören Bakterien, Archaeen (der älteren Bezeichnung nach »Archebakterien«), die meisten Pilze (auch Hefen), Mikroalgen und Protozoen (Amöben). Auch Viren – eigentlich keine Lebewesen – werden meist zu den Mikroorganismen gezählt. Mikrobielles Leben ist Leben auf engstem Raum, auf das kleinste Maß reduziert. Doch trotz des Minimalismus' in ihrem Aufbau verfügen Mikroorganismen über eine große Vielfalt an Stoffwechselwegen und -produkten, die sie extrem anpassungsfähig machen.

Nahezu jedes Habitat der Erde ist von Mikrowesen besiedelt

Grob geschätzt leben rund 10^{30} Mikroorganismen auf unserer Erde, das ist eine »Quintillion« – eine Billiarde mal eine Billiarde. Ein Großteil von ihnen ist zudem noch unentdeckt, Schätzungen zufolge kennen wir erst ein bis fünf Prozent aller Mikroorganismen. Klar ist jedoch die immense Bedeutung der Winzlinge für das Leben auf der Erde: Mikroben spielen die entscheidende Rolle in den Stoffkreisläufen der Natur und sorgen damit für die Lebensgrundlagen sämtlicher höherer Organismen.

Lebensraum Wasser

Ob Regenpfütze, Gartenteich, Fluss oder Weltmeer – in allen Gewässern kommen Mikroorganismen vor: von Bakterien und Algen über Wimper- und Pantoffeltierchen bis hin zu Amöben. Im Wasser wimmelt es nur so von Kleinstlebewesen. So hatte der niederländische Naturforscher und Tuchhändler Antoni van Leeuwenhoek im 17. Jahrhundert in Wassertropfen aus einem Tümpel erstmals mikrobielles Leben entdeckt und beschrieben.

Algen sind für rund die Hälfte des weltweit produzierten Sauerstoffs verantwortlich und binden dafür das Treibhausgas Kohlendioxid. Sie sind somit ein zentraler Faktor für das Weltklima. Als Bestandteil des Planktons sind Al-



Mikrobiologische Forschung an der Universität Jena und außeruniversitären Instituten der Region

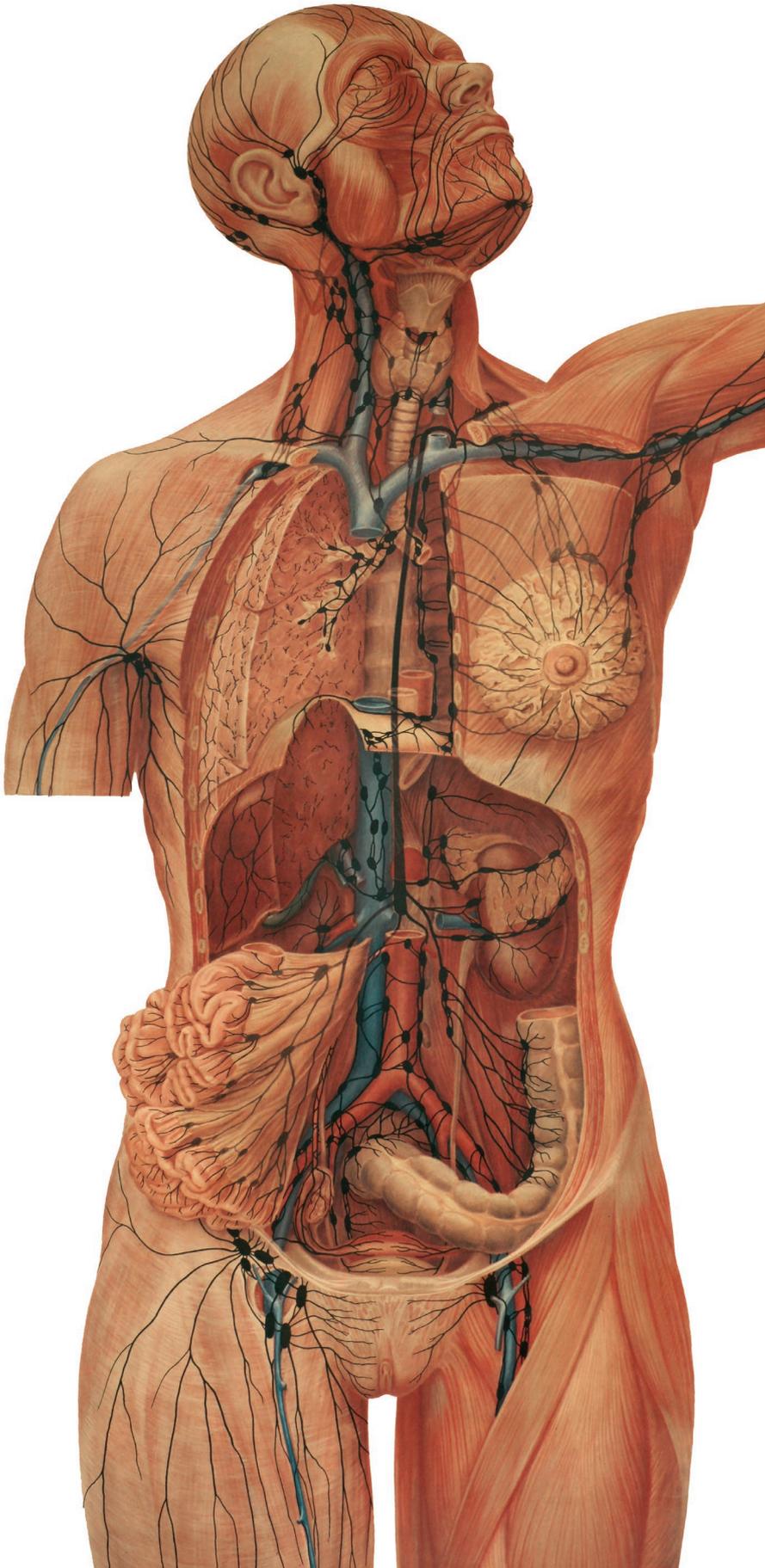
Die 2006 an der Universität Jena gegründete Graduiertenschule »Jena School for Microbial Communication« (JSMC) wird seit 2007 in der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder gefördert. Sie vereint Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Natur- und Lebenswissenschaften, wie der Biologie, Chemie, Medizin, Pharmazie, Biotechnologie, Geologie, Mathematik, Physik und Informatik. Ziel der JSMC ist es, die »Sprache« von Mikroorganismen untereinander sowie mit höheren Organismen und der Umwelt zu entschlüsseln. Das bildet die Voraussetzung für ein besseres Verständnis vieler Krankheiten oder der Ursache von Schäden in der Umwelt. Viele der aus Grundlagenforschung gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für die Entwicklung innovativer Technologien und Wirkstoffe. Seit der Gründung haben über 130 Doktoranden und Doktorandinnen ihre Dissertationen abgeschlossen. Derzeit zählt die JSMC 135 aktive Promovierende, von denen jeder Dritte aus dem Ausland kommt.

Mit krankheitserregenden Pilzen befasst sich der Sonderforschungsbereich/Transregio »FungiNet«. In dem 2013 gestarteten Forschungsverbund arbeiten Wissenschaftler der Universität Jena, des Jenaer Universitätsklinikums und des Leibniz-Instituts für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI) gemeinsam mit Kollegen der Universität Würzburg und ihrem Klinikum zusammen, um pilzbedingte lebensbedrohliche Infektionen besser zu verstehen und neue antiinfektive Therapien zu entwickeln.

Ebenfalls seit 2013 arbeiten Ökologen, Geowissenschaftler und Chemiker im Sonderforschungsbereich »AquaDiva« daran, die Verknüpfung von ober- und unterirdischen Lebensräumen von Pflanzen und Mikroorganismen sowie die darin ablaufenden Prozesse zu analysieren, um aus den gewonnenen Erkenntnissen Empfehlungen für den nachhaltigen Schutz dieser Ökosysteme und ihrer Dienstleistungen für den Menschen zu entwickeln. Konkret geht es dabei unter anderem um den Schutz der natürlichen Grundwasserreservoirs. Neben Wissenschaftlern der Uni Jena gehören auch Forscher des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie, des Leibniz-Instituts für Photonische Technologien (IPHT) und des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung (UFZ) zu »AquaDiva«.

Chemische Mediatoren – Signalmoleküle, die die Wechselbeziehungen zwischen Zellen und Organismen einer oder mehrerer Spezies bestimmen – stehen seit 2014 im Fokus des Sonderforschungsbereichs »ChemBioSys«. Die Forscher von Universität, HKI und dem Max-Planck-Institut für chemische Ökologie belauschen und entschlüsseln darin das chemische »Stimmengewirr« in Biosystemen mit Pilzen, Bakterien, Mikroalgen, Pflanzen, Tieren und Humanzellen, um zu klären, wie solche Gemeinschaftsstrukturen entstehen, funktionieren und ihre Vielfalt erhalten bleibt.

Chemiker, Materialwissenschaftler, Pharmazeuten, Mediziner und Biochemiker der Universität Jena und des Universitätsklinikums sowie Wissenschaftler des IPHT, des HKI sowie des Leibniz-Instituts für Altersforschung (FLI) wollen im 2017 gestarteten Sonderforschungsbereich »PolyTarget« Nanopartikel entwickeln, mit denen sich Medikamente gegen mikrobielle Infektionen zielgerichtet steuern lassen. Damit werden die bereits stark aufgestellte Sepsis- und die Infektionsforschung in Jena weiter gestärkt.



gen wichtige Primärproduzenten in den Nahrungsketten der Meere und Seen.

An der Uni Jena untersuchen Biologen und Chemiker u. a. das Wechselspiel der Süßwasseralge *Chlamydomonas reinhardtii* (siehe S. 33) mit unterschiedlichen Bakterien. Forscher am Institut für Anorganische und Analytische Chemie nehmen marine Kieselalgen ins Visier und untersuchen den Einfluss chemischer Signalmoleküle auf ihre Lebensweise, Vermehrung oder die Anfälligkeit für Virenbefall. Geowissenschaftler und Ökologen spüren zudem dem mikrobiellen Leben im Grundwasser nach (siehe S. 36).

Lebensraum Mensch

Mikroorganismen siedeln nicht nur in jedem Lebensraum der Erde sondern auch auf und im Gleichgewicht mit beinahe jedem anderen höheren Organismus – einschließlich des Menschen. Wir sind wandelnde »Ökosysteme«. Rund ein Kilo mikrobielle Biomasse trägt jeder Mensch auf und in sich (siehe Interview S. 14). Vor allem der Darm ist von mehreren Hundert Arten von Bakterien, Archaeen und Pilzen besiedelt und das in jeweils ganz individueller Zusammensetzung. Die mikrobiellen Mitbewohner helfen bei der Verdauung – sie können beispielsweise für uns unverdauliche Nahrung zersetzen –, unterstützen unser Immunsystem, stellen das für die Blutgerinnung notwendige Vitamin K her und bauen schädliche Substanzen ab.

Jenaer Forschergruppen nehmen u. a. die Pathogenese von systemischen Pilzinfektionen in den Blick (siehe S. 18), identifizieren und charakterisieren neuartige Wirkstoffe aus der Natur zur Behandlung von Infektionen (siehe S. 30) und entwickeln in interdisziplinä-

ren Forscherverbänden neue Nachweis- und Behandlungsmethoden für schwerwiegende Infektionskrankheiten, die bis zur Sepsis führen können (siehe S. 20 und S. 24).

Lebensraum Boden und Gestein

Mikrobielles Leben ist nicht nur in oberirdischen Lebensräumen vielfältig, sondern auch und vor allem unter Tage. Forscher gehen davon aus, dass ein Drittel bis zur Hälfte der Biomasse auf unserem Planeten unterirdisch produziert wird – und zwar von Mikroorganismen.

Ob im Wald, auf dem Acker oder im heimischen Garten: Im Boden tummelt sich eine Vielzahl von Lebensformen. Bodenbakterien und Pilze leben vor allem in den von Pflanzen durchwurzelten Bereichen des Bodens. Dort zersetzen sie organisches Material, stellen Nährstoffe bereit und bauen Schadstoffe ab.

Aber auch in tiefen unterirdischen Gesteinsschichten sind Mikroorganismen zu Hause. Bestimmte Bakterien und Archaeen können in mehreren Kilometern Tiefe bei extremen Temperaturen und hohem Druck leben. Sie brauchen weder organisches Material noch Licht zum Überleben, sondern nutzen zur Energiegewinnung anorganisches Gestein. Diese Organismen haben einen sehr langsamen Stoffwechsel. Manche, so schätzt man, teilen sich nur alle 1000 Jahre einmal.

In aktuellen Forschungsprojekten untersuchen Mikrobiologen der Universität Jena unter anderem, wie Pilze Gesteine zersetzen und Bakterien Minerale bilden (siehe S. 40). Geowissenschaftler und Ökologen spüren zudem bislang unbekannte Mikroben im Gestein im Thüringer Hainich Nationalpark und im Thüringer Becken auf (siehe S. 36). ■



Mikrobielle Bodenbewohner sorgen für den Abbau von abgestorbenem Holz und anderen Pflanzen und stellen daraus wichtigen Humus her.

Freunde und Helfer im Mikrokosmos

Angesichts wachsender Bedrohungen durch weltumspannende Infektionskrankheiten, multiresistente Keime und immer knapper werdende Ressourcen an wirksamen Medikamenten haben Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze nicht den besten Ruf. Doch die zweifellos ernstzunehmenden Gesundheitsgefahren verstellen leicht den Blick auf die immense Bedeutung, die Mikroben für die Gesunderhaltung des Menschen, eine intakte Umwelt und ein stabiles Klima haben. Was die Mikroorganismen so erfolgreich macht und was wir Menschen von ihnen lernen können, darüber spricht der Jenaer Mikrobiologe Prof. Dr. Axel Brakhage im Interview.

INTERVIEW: UTE SCHÖNFELDER

Prof. Dr. Axel Brakhage ist Professor für Mikrobiologie und Molekularbiologie der Universität Jena und Direktor des Leibniz-Instituts für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI). Er koordiniert die Exzellenzgraduiertenschule »Jena School for Microbial Communication« (JSMC) und ist u. a. Sprecher des Sonderforschungsbereiches/Transregio »FungiNet« (siehe Kasten S. 11) sowie des Forschungsverbundes »InfectControl 2020«.

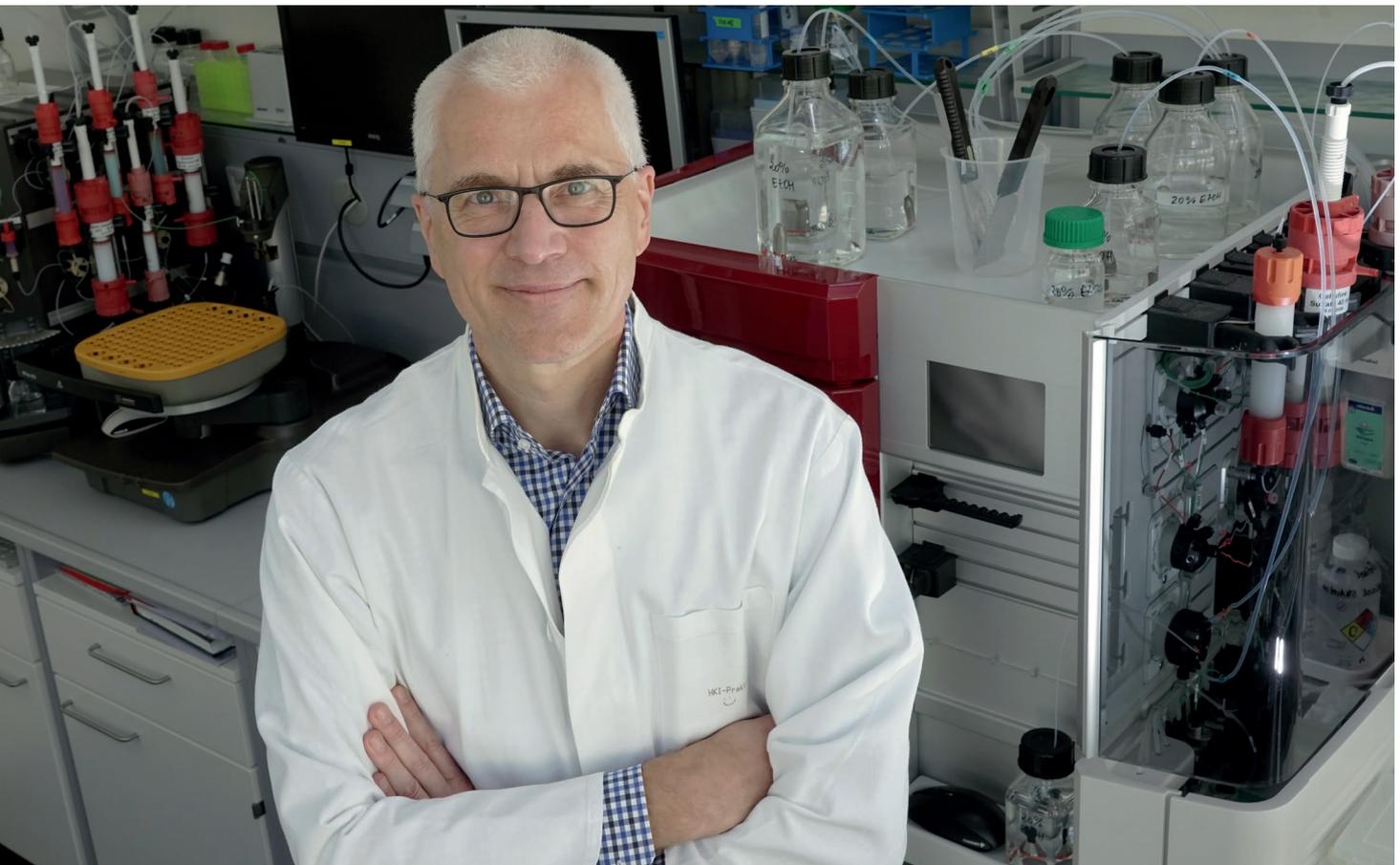
Mikroorganismen gibt es praktisch überall: im Boden, im Wasser, in der Luft. Wie schaffen es Bakterien, Pilze oder Mikroalgen, nahezu jeden Lebensraum der Erde zu besiedeln?

Ein wesentliches Merkmal von Mikroorganismen ist ihre metabolische Diversität. Sie verfügen über eine unwahrscheinlich große Zahl an Stoffwechselwegen, wesentlich mehr als jedes höhere Lebewesen. Dadurch sind sie sehr flexibel und können sich rasch an alle möglichen Umweltbedingungen anpassen, auch wirklich extreme, wie Temperaturen von über 100 Grad Celsius, absolute Trockenheit, hohen Druck oder radioak-

tive Strahlung. Das ermöglicht es ihnen, im Prinzip sämtliche Habitats der Erde zu besiedeln – und nicht zu vergessen, sämtliche höheren Lebewesen: Pflanzen, Tiere und auch wir Menschen sind Lebensräume von einer gigantischen Zahl und Vielfalt von Mikroorganismen. Jeder von uns trägt rund ein Kilo Bakterien mit sich herum, im Darm, im Mund, auf der Haut.

Kann man also Vielfalt als das mikrobielle Erfolgsrezept bezeichnen?

Zweifellos. Aber es gibt noch einen zweiten wichtigen Erfolgsfaktor. Und der ist in ihrer großen Zahl begründet.



Mikroorganismen sind einfach viele! Sie übertreffen in ihrer Anzahl sämtliche anderen Organismen auf der Welt. Dadurch übersteigt auch die Zahl der mikrobiellen Gene bei Weitem die der höheren Organismen. Sie vermehren sich schnell und besitzen eine hohe Dynamik ihres genetischen Materials. Bakterien unterschiedlicher Arten sind in der Lage, Gene untereinander – über den sogenannten horizontalen Gentransfer – auszutauschen. Dadurch gibt es einen großen Gen-Pool, der schnelle Veränderungen im Genom unterschiedlicher Spezies ermöglicht.

Was können wir uns denn aus der so erfolgreichen Mikrowelt abschauen?

Wir können von Mikroorganismen beispielsweise lernen, wie man Schadstoffe in der Umwelt abbauen kann oder uns mikrobielle Stoffwechselwege in der Biotechnologie zunutze machen. Wir können die Herstellung von Naturstoffen, etwa Wirkstoffen zur Behandlung von Krankheiten, von ihnen lernen. Vor allem aber ist es wichtig zu lernen, wie es Mikroorganismen schaffen miteinander und mit ihrer Umgebung zu kommunizieren und wie sie es schaffen, ihre Gemeinschaften in einem dynamischen Gleichgewicht zu halten.

Warum ist das wichtig?

Nehmen wir uns Menschen als Beispiel. Wir leben mit etwa so vielen Mikroorganismen zusammen, wie unser eigener Körper Zellen hat. Die Frage ist dabei doch, wie schaffen es die Mikroorganismen mit uns so im Einklang zu leben, dass wir ihnen ein komfortabler Lebensraum sind und sie uns nicht krank machen? Das haben sie im Laufe der Evolution gelernt: Sie »kommunizieren« über kleine chemische Moleküle untereinander und mit unserer Immunabwehr und stellen so ein Gleichgewicht her. Und davon profitiert unser eigener Körper in vielfältiger Weise. Wir wollen lernen, wie das funktioniert, um solche mikrobiellen Gemeinschaften auch beeinflussen zu können.

Welche denn zum Beispiel?

Zum Beispiel die Mikroflora in unserem Darm. Sie ist nicht nur für die Verdauung wichtig; sie bestimmt darüber hin-

aus eine Vielzahl von Prozessen, die auf unseren Gesundheitszustand und unser Wohlbefinden Einfluss nehmen. Wenn sie nicht im Gleichgewicht ist, werden wir krank. Es gibt Millionen von Menschen, die etwa unter chronischen Darmentzündungen leiden, weil ihre Mikroflora nicht im Gleichgewicht ist. Wenn wir wüssten, wie wir diese beeinflussen können, welche Mikroorganismen wir fördern, welche wir drosseln müssen, dann wäre das für diese Patienten eine große Erleichterung.

Außerdem gibt es auch Herausforderungen, die die gesamte Menschheit, wenn nicht gar das Leben insgesamt auf der Erde betreffen, wie den Klimawandel. Ein Hauptproblem dabei ist das Treibhausgas Methan. Das ist ein um ein Vielfaches wirksames Treibhausgas als Kohlendioxid. Und Methan wird ausschließlich von Mikroorganismen erzeugt, die im Magen von Wiederkäuern oder im Boden leben. Wenn es uns gelingen würde, die mikrobiellen Konsortien, die heute große Mengen Methan produzieren, so zu manipulieren, dass dies gestoppt oder zumindest reduziert wird, dann hätten wir ein großes Klimaproblem weniger.

Mikroorganismen haben uns im Laufe unserer gemeinsamen Koevolution geformt und verändert.

Nicht nur Wissenschaftler wie Sie und Ihre Kollegen aus Universität und außeruniversitären Forschungsinstitutionen beschäftigen sich mit Mikroorganismen: Beim jüngsten G20-Gipfel im vergangenen Jahr in Hamburg haben die Staats- und Regierungschefs der mächtigsten Länder der Welt neben den üblichen Wirtschafts- und Finanzthemen auch über von Mikroorganismen hervorgerufene Krankheiten diskutiert. Warum das?

Weil Infektionskrankheiten ein riesiges und vor allem wachsendes Problem sind, hier bei uns und weltweit. Wir ha-

ben allein in Deutschland pro Jahr 60 000 Todesfälle auf Grund von Infektionskrankheiten, geschätzt 30 000 Todesfälle auf Grund multiresistenter Mikroorganismen. Das ist eine tickende Zeitbombe. Wir stehen in einem Wettlauf: Krankheitserreger entwickeln Resistenzen und das wesentlich schneller als wir neue Wirkstoffe – neue Antibiotika – entwickeln können. Zwar hat es in der Menschheitsgeschichte immer wieder von Mikroorganismen hervorgerufene Epidemien gegeben, die ganze Landstriche entvölkert haben. Doch heute besteht eine ungleich höhere Gefahr darin, dass sich Infektionskrankheiten zu Pandemien auswachsen, sich also über Länder- und Kontinentgrenzen hinweg ausbreiten und das rasend schnell. Mit dem Flugzeug reisen Krankheitserreger heute in 36 Stunden einmal um die ganze Welt.

Was sind denn die gefährlichsten Erreger, von denen heute Gesundheitsgefahren für uns Menschen ausgehen?

Dazu zählen mit Sicherheit multiresistente Bakterienstämme z. B. von *Klebsiella pneumoniae* oder *Pseudomonas aeruginosae*, gegen die es kein einziges wirksames Antibiotikum mehr gibt. Diese Bakterien können lebensgefährliche Lungenerkrankungen hervorrufen, insbesondere bei immungeschwächten Personen. Es gibt auch andere multiresistente Keime – solche Infektionen können wir einfach nicht mehr therapieren. Hinzu kommen auch einige humanpathogene Pilze, die invasive Infektionen hervorrufen können, wie Hefe- oder Schimmelpilze, gegen die es bislang keine wirksamen Medikamente und Behandlungsstrategien gibt. Neuere Daten implizieren, dass zur natürlichen Abwehr gegen Infektionen ein intaktes Mikrobiom beiträgt, während dessen Funktionseinschränkung die Pforten für Infektionen und auch andere Krankheiten öffnet.

Das Verhältnis Mensch-Mikrobe scheint also recht ambivalent: Gibt es gute Keime und schlechte Keime?

Nein, das wäre eine zu anthropozentrische Sichtweise. Es ist fraglos wichtig, sich über Infektionskrankheiten Gedanken zu machen und alles zu tun, ihre



Mikrowelt mit Fichte (siehe auch Cover-Foto): Im Institut für Mikrobiologie untersuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das Wechselspiel zwischen Baumwurzeln und Pilzen.

Ausbreitung zu verhindern. Dennoch dürfen wir nicht vergessen, dass die überwiegend große Zahl von Mikroben für uns gänzlich ungefährlich ist oder uns sogar nützt. Es gibt schätzungsweise drei bis fünf Millionen Pilze; davon sind nur 150 als pathogen bekannt. Auf der anderen Seite leben wir von mikrobiellen Produkten: Wir essen Brot, Käse, Joghurt – und trinken Alkohol (*lacht*).

Das heißt, wir brauchen die Mikroorganismen mehr als sie uns?

Das heißt, das Zusammenleben, die Interaktion zwischen Mikroorganismen und uns oder anderen höheren Lebewesen ist das Ergebnis einer Jahrtausenden dauernden Koevolution. Wir sind wechselseitig aufeinander angewiesen. Fest steht: Mikroorganismen waren die ersten Organismen auf der Welt – und sie werden vermutlich auch die letzten sein. Die Evolution sämtlicher höherer Organismen war immer ein Wechselspiel mit Mikroorganismen und sie dauert bis heute an.

Wir sehen das beispielsweise in unserem Immunsystem. Das würde es ohne Mikroorganismen gar nicht geben. Wir verfügen über eine Vielzahl an Immun-

rezeptoren, die nur dafür da sind, mit unterschiedlichen Mikroorganismen zu interagieren, weil die für uns gefährlich oder nützlich sein können. Das heißt, Mikroorganismen haben uns im Laufe der Zeit geformt und verändert, so wie wir auch die mikrobiellen Gemeinschaften geformt haben. Ähnliche Beispiele lassen sich auch bei Pflanzen finden, die im Wechselspiel mit Mikroorganismen effiziente Verteidigungsstrategien entwickelt haben. Das ist ein ständiger Wettlauf zwischen Mikroben und höheren Organismen.

Welche Herausforderungen gilt es für die mikrobiologische Forschung denn in Zukunft zu meistern?

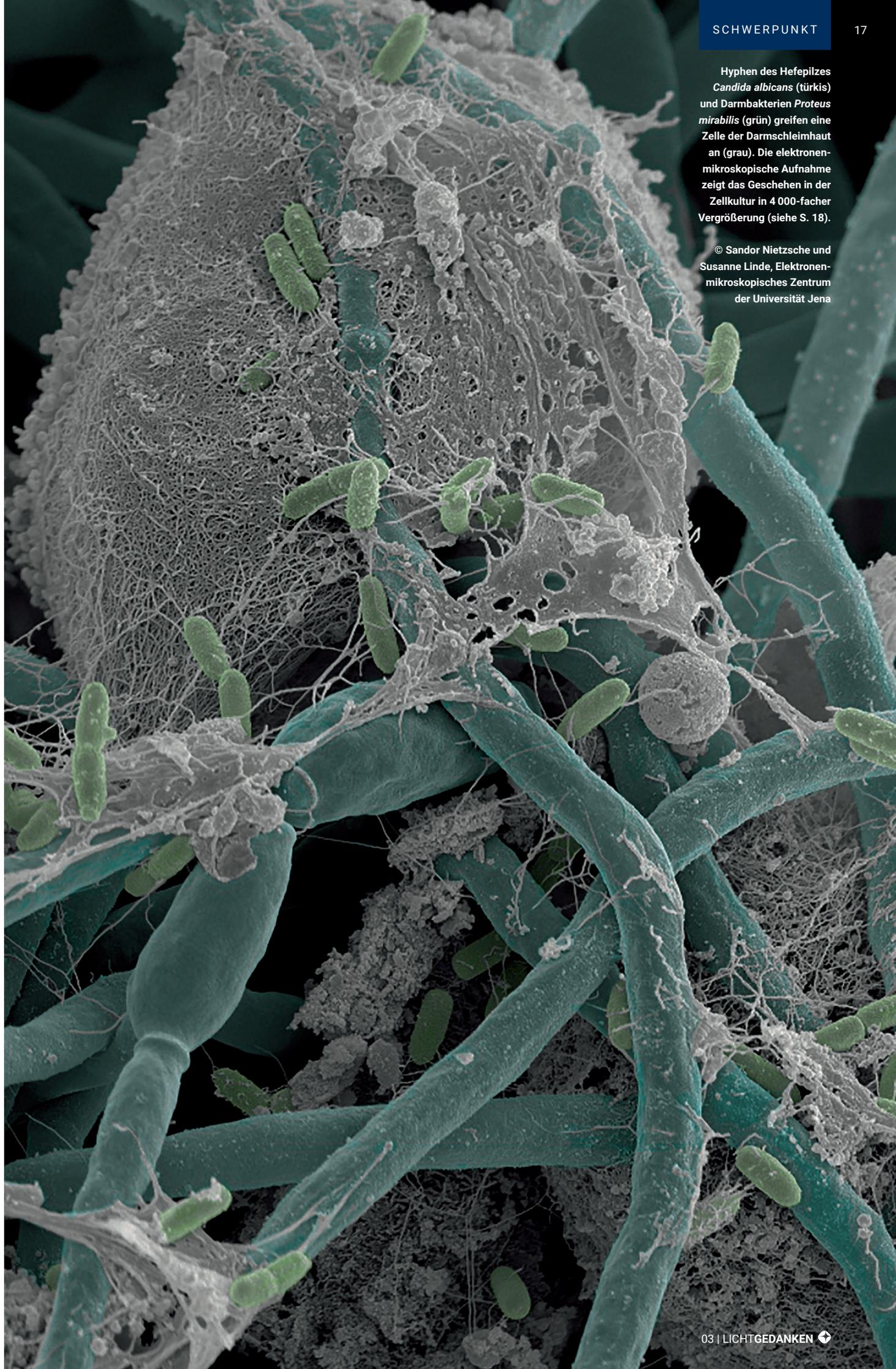
Was wir bis jetzt haben, ist eine umfassende Analytik der Mikrobengemeinschaften. Wir können ihre Genome sequenzieren und ihren Stoffwechsel, ihre Proteine und Naturstoffe analysieren und vergleichen. Wir können die Organismen und die Konsortien, die sie bilden, exakt beschreiben. Aber beschreiben heißt noch lange nicht verstehen. Die nächste Stufe der Forschung besteht daher aus Funktionsanalysen. Um zu verstehen, warum die Mikroben

in dieser oder jener Zusammensetzung zusammenleben und welchen Einfluss sie auf die Umwelt und ihre Wirte wie Menschen, Pflanzen und Tiere haben, müssen wir mechanistische Analysen durchführen.

Dafür brauchen wir ein ganzes Arsenal an neuen Methoden: gute Computermodellsysteme, um Simulationen durchführen zu können; wir brauchen neue optische und chemische Analysemethoden, mit denen wir die Lebensprozesse in den Organismen in Echtzeit und *in situ* (in der realen Umgebung) beobachten können. Wir wollen einzelne Zellen und Moleküle so hochaufgelöst wie nur möglich abbilden und sehen können, wie einzelne Mikroben miteinander und mit uns »sprechen«. Und auch Materialwissenschaftler sind gefragt, denn wir brauchen künstliche Zellen und Organe, an denen sich mikrobielle Gemeinschaften untersuchen und manipulieren lassen. Das sind wichtige Forschungsziele für die kommenden Jahre und dafür sind wir in Jena gut aufgestellt. Wir erwarten, dass daraus entscheidende Erkenntnisse für die Therapien von Krankheiten, die Landwirtschaft und den Umweltschutz resultieren. ■

Hyphen des Hefepilzes *Candida albicans* (türkis) und Darmbakterien *Proteus mirabilis* (grün) greifen eine Zelle der Darmschleimhaut an (grau). Die elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt das Geschehen in der Zellkultur in 4 000-facher Vergrößerung (siehe S. 18).

© Sandor Nietzsche und Susanne Linde, Elektronenmikroskopisches Zentrum der Universität Jena



»Dr. Jekyll and Mr. Hyde« in der Darmflora

Wie aus harmlosen Mitbewohnern gefährliche Eindringlinge werden, untersuchen Prof. Dr. Ilse Jacobsen und ihr Team: Sie erforschen die Pathogenese von systemischen Pilzinfektionen. Fakultativ pathogene Darmbewohner wie *Candida albicans* und *Proteus mirabilis* helfen uns gemeinsam mit anderen Mikroorganismen bei der Verdrängung von Darmerregern und trainieren unser Immunsystem. Sie können aber auch lebensbedrohende Infektionen bis hin zur Sepsis verursachen. Entscheidend für die Verwandlung von »Dr. Jekyll« zu »Mr. Hyde« in der Darmflora ist das Zusammenspiel der Mikroben im »Ökosystem Mensch«.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER



Prof. Dr. Ilse Jacobsen leitet die Forschungsgruppe »Mikrobielle Immunologie« am Jenaer Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI) und ist Professorin für Mikrobielle Immunologie an der Universität Jena.

Wir Menschen sind wandelnde Lebensräume, selbst in größter Einsamkeit sind wir niemals wirklich allein: Zusammen mit Billionen Mikroorganismen bilden wir ein hochkomplexes Ökosystem. Wir tragen Hunderte verschiedene Arten von Bakterien, Pilzen und anderen Kleinstlebewesen mit uns herum, teilen uns mit ihnen Nahrung und bieten uns gegenseitig Schutz. So hilft unsere Darmflora nicht nur bei der Verdauung. Sie ist – so zeigen immer mehr Studienergebnisse – darüber hinaus an einer Vielzahl von Lebensprozessen beteiligt: von der Immunabwehr über das Herz-Kreislauf-System bis hin zu unserer psychischen Verfassung.

Einer der prominentesten »Mitbewohner« des menschlichen Darms ist der Hefepilz *Candida albicans*. Auch wenn jeder Mensch über seine ganz eigene, individuell zusammengesetzte Mikroflora verfügt, so ist *Candida albicans* bei der Mehrheit der Bevölkerung nachweisbar. Diese wenige Mikrometer großen Einzeller leben normalerweise als »kommensale« Organismen im Gleichgewicht mit anderen Mikroorganismen, nicht nur im Darm, sondern auch in der Mundhöhle oder auf der Haut.

»Unter bestimmten Umständen kann aus diesem eher unspektakulären Pilz jedoch ein wirklich lebensbedrohlicher Krankheitserreger werden«, sagt Prof. Dr. Ilse Jacobsen. Die Professorin für Mikrobielle Immunologie erforscht mit ihrem Team am Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI), wie es zu einem solch drastischen Wandel kommt. Normalerweise leben die Hefezellen einzeln und sind von kugelige Gestalt. Der Pilz ist aber auch in der

Lage, in langen mehrzelligen Fäden – sogenannten Hyphen – zu wachsen. Mit diesen bis zu 100 Mikrometer langen »Fangarmen« kann *Candida albicans* die Zellen der Darmschleimhaut durchbohren und regelrechte Löcher in die Barriere reißen.

»Auf diese Weise gelangen nicht nur der Pilz selbst, sondern möglicherweise auch andere Mikroorganismen in das umliegende Gewebe, können innere Organe infizieren und sich unter Umständen bis in den Blutstrom ausbreiten und so Infektionen überall im Körper verursachen«, erläutert Ilse Jacobsen. Im schlimmsten Fall erleiden die Patienten eine Sepsis, eine systemische – den gesamten Organismus betreffende – Entzündungsreaktion, die etwa ein Viertel von ihnen nicht überlebt (siehe S. 20).

Was aber bewirkt diese dramatische Verwandlung? Wie kommt es dazu, dass *Candida albicans* aus der friedlichen Gemeinschaft der Darmbevölkerung ausbricht und sich derart gegen seinen Wirtsorganismus wendet? Ein Risikofaktor dafür ist paradoxerweise der Fortschritt der modernen Medizin. Denn systemische Pilzinfektionen treffen vor allem bereits schwerkranke Patienten. »Patienten auf Intensivstationen erhalten oft eine Antibiotikatherapie«, so Jacobsen. Damit würden jedoch nicht nur gezielt Keime zurückgedrängt, die eine bestimmte Krankheit verursachen. »Jede Antibiotikaeinnahme greift auch massiv in die mikrobiellen Lebensgemeinschaften des Patienten ein und stört deren natürliche Balance«, so die Mikrobiologin weiter. Zahlreiche Studien belegen, dass vor allem *Candida albicans* und eine Reihe von Bakterien die Nutznießer dieser veränderten Ver-



Dr. Maria Joanna Niemiec (l.) und Masterstudentin Isabel Auge plattieren Mäusekotproben auf Nährböden aus, um die Mikroorganismen darin zu bestimmen. Sie wollen herausfinden, wie Hefepilze und Darmbakterien miteinander kommunizieren.

hältnisse im »Ökosystem Mensch« sind. Sie erhalten einen Wachstumsvorteil und drängen andere Organismen ins Abseits.

Hefen stacheln Bakterien an, mehr Zellgift zu produzieren

So wie *Candida albicans* gehören auch verschiedene Darmbakterien zu den »fakultativ pathogenen« Arten, die lebensbedrohliche Infektionen bis hin zur Sepsis auslösen können. Im aktuellen Forschungsprojekt »CanBac« des Center for Sepsis Control and Care (CSCC) untersuchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Jacobsens Arbeitsgruppe gemeinsam mit Kollegen aus HKI und Universität das Wechselspiel dieser Organismen untereinander und mit ihrem Wirt – dem Menschen.

»Wir kultivieren Zellen der menschlichen Darmschleimhaut, sogenannte Enterozyten, und infizieren diese mit Kombinationen der zu untersuchenden Mikroorganismen«, erläutert Dr. Maria Joanna Niemiec den Versuchsansatz. »Uns interessiert dabei, wie sich Pilz und Bakterien in ihrer Pathogenität beeinflussen«. Dr. Niemiec ist Postdoktorandin und leitet das CanBac-Projektteam in Jacobsens Gruppe.

Unter anderem studieren die Forscher das Wechselspiel von *Candida albicans* und dem Darmbakterium *Proteus mirabilis*. In den Zellkulturen zeigt sich, dass beide Mikroorganismen für sich die Darmzellen in begrenztem Umfang schädigen bzw. zu deren Tod führen

können. Werden die Darmzellen jedoch mit beiden Erregern zugleich infiziert, erhalten die Forscher ein dramatisch anderes Bild: »Für nahezu alle Zellen bedeutet dies das Ende«, fasst Dr. Niemiec zusammen. »Wir finden in diesem Fall eine synergistische – sich wechselseitig verstärkende – Wirkung beider Erreger.«

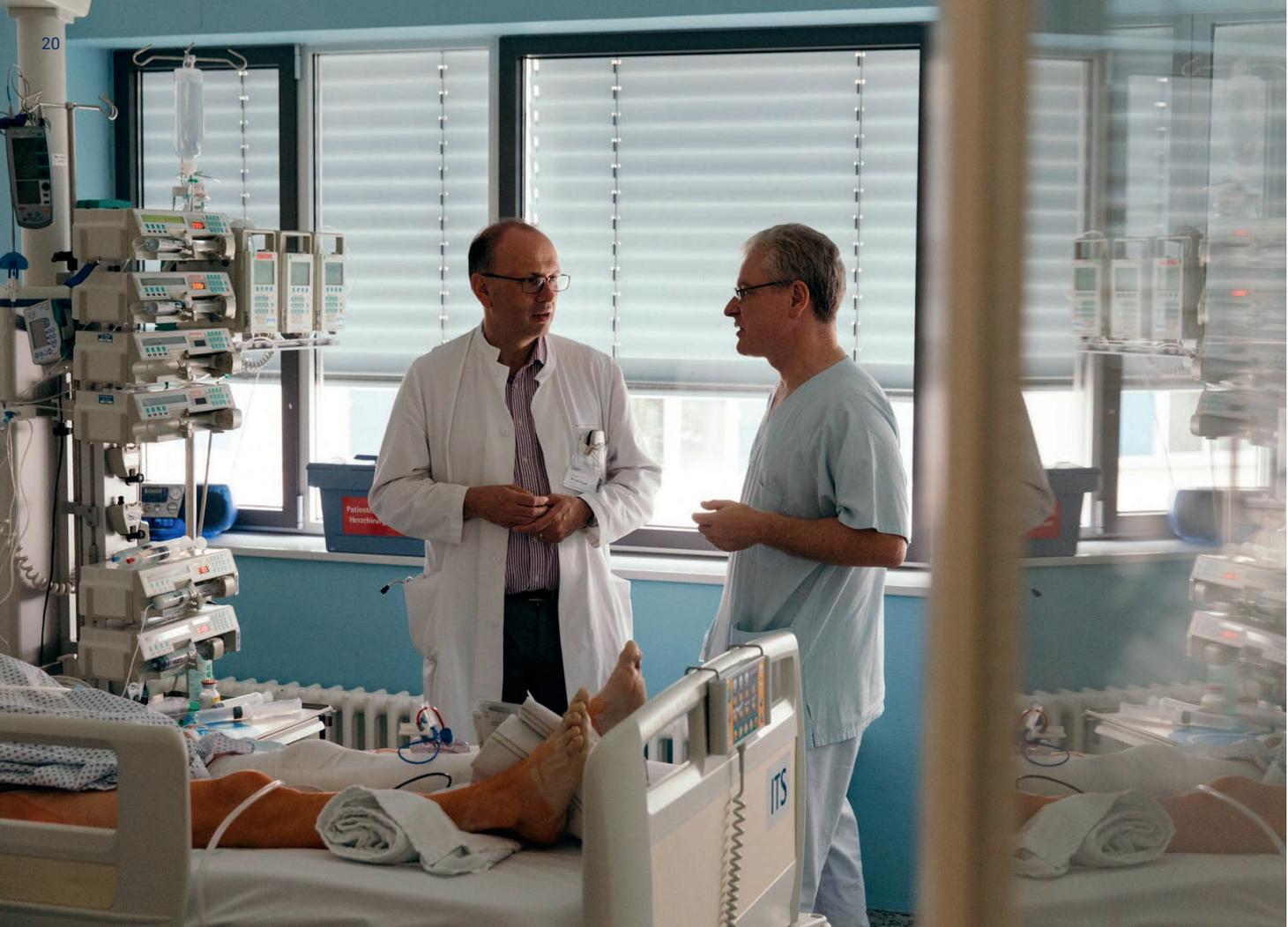
Worauf diese verheerende Wirkung beruht, zeigen erste – noch unveröffentlichte – Daten des Jenaer Forscherteams. So weist sehr viel darauf hin, dass die Darmbakterien *Proteus mirabilis* in Gegenwart von *Candida albicans* vermehrt ein Toxin produzieren. Dieses Hämolyysin ist ein Protein, das Zellmembranen des Wirtsorganismus »lysiert« – also auflöst. Dadurch sterben die Zellen ab. »Der Pilz macht das Bakterium praktisch giftiger«, veranschaulicht Prof. Jacobsen. Umgekehrt jedoch verändert sich die »Angriffslust« des ebenfalls pathogenen Pilzes durch das Bakterium nicht. Zwar kann auch *Candida albicans* ein tödliches Zellgift produzieren – das Candidalysin. Dessen Produktion wird durch eine Koinfektion mit *Proteus mirabilis* jedoch sehr wahrscheinlich nicht zusätzlich angekurbelt.

In aktuellen Untersuchungen wollen die Forscherinnen und Forscher nun herausfinden, auf welchen chemischen »Kommunikationswegen« die Verständigung zwischen den Mikroben erfolgt. Bereits jetzt ist klar: Auch andere Hefepilze, beispielsweise die gewöhnliche Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*, stacheln *Proteus mirabilis* dazu an,

vermehrt Hämolyysin zu produzieren. »Außerdem interessiert uns, ob sich die Effekte aus den Zellkulturen auch *in vivo* reproduzieren lassen«, kündigt Dr. Niemiec an. Geplant sind dazu Studien an Fadenwürmern und Mäusen.

Prophylaxe gegen Pilze nur gezielt einsetzen

Doch schon jetzt lassen sich aus den vorliegenden Ergebnissen Aspekte für die Behandlung von Intensivpatienten ableiten, macht Prof. Jacobsen deutlich. Bei diesen schwerkranken Patienten gehe es stets um eine jeweils ganz individuelle Risikoabschätzung, wie wahrscheinlich die Ausbildung einer Sepsis sei. »Wenn beispielsweise festgestellt wird, dass nach einer Antibiotikatherapie des Patienten *Candida albicans* andere Mikroorganismen zurückdrängt und gleichzeitig auch die Keimzahl von *Proteus mirabilis* oder einem vergleichbaren Erreger deutlich ansteigt, dann besteht ein konkretes, ernstzunehmendes Risiko für den Patienten.« In diesen Fällen sei eine prophylaktische Therapie, die den Pilz bekämpft, ratsam. Einen generellen prophylaktischen Einsatz von Wirkstoffen gegen Pilzinfektionen sieht Prof. Jacobsen dagegen kritisch. »Es gibt insgesamt nur wenige Antimykotika und bei einem großzügigen Einsatz besteht – genau wie bei Antibiotika auch – die Gefahr der Resistenzbildung.« Daher sollten diese Wirkstoffe nur ganz gezielt eingesetzt werden. ■



Achillesferse Immunsystem

Trotz – oder gerade wegen – der modernen Medizin gehört die Sepsis in Deutschland zu den häufigsten Todesursachen. Vor allem durch Bakterien ausgelöst, sind es jedoch immer häufiger Pilze wie *Candida albicans*, die den tödlichen Verlauf begünstigen. Prof. Dr. Michael Bauer erforscht am Jenaer Universitätsklinikum und am Center for Sepsis Control and Care (CSCC) schwere Infektionen. Um zu verstehen, wie Mikroorganismen im Körperinneren kommunizieren, will er von Biologen lernen.

TEXT: JULIANE DÖLITZSCH

Sie klingt nicht nur destruktiv, sie ist es auch: Die Sepsis ist eine falsche, selbstzerstörerische Reaktion des Körpers. »Nach der heutigen Definition bedeutet Sepsis ein Organversagen, das durch eine inadäquate Antwort des Organismus auf eine Infektion resultiert«, erklärt Prof. Dr. Michael Bauer, Intensivmediziner am Uniklinikum Jena. Eine lebensbedrohliche Infektion laufe aus dem Ruder und die Stressantwort des Körpers schädige eigene Gewebe und

Organe: »Statt seinen geballten Zorn gegen den Erreger zu richten, wendet sich das Immunsystem gegen den Wirt selbst. Die Reparatursysteme des Körpers versagen.«

Die Sepsis kann zu Schock, multiplem Organversagen und schließlich zum Tod führen, insbesondere, wenn sie nicht früh erkannt und schnell behandelt wird. Sepsis ist weltweit die führende infektionsbedingte Todesursache. Allein in Deutschland treten jährlich rund

280 000 Fälle auf, fast ein Viertel der Patienten stirbt daran – das ist in Jena nicht anders. »Von 400 Patienten im Jahr verlieren wir etwa 100 an die heimtückische Erkrankung«, erzählt Bauer, der auch Sprecher des CSCC ist. Sepsis kann als Komplikation jeder Infektion, wie zum Beispiel Lungenentzündung, Tonsillitis oder Harnwegsinfektionen, auftreten, ebenso nach Verletzungen und chirurgischen Eingriffen. Sie ist daher ein Problem jeder medizinischen Disziplin.

Ausgelöst wird eine Sepsis in erster Instanz meist durch bakterielle Erreger wie *Staphylococcus aureus* oder *Escherichia coli*. Erneute Lebensgefahr besteht, wenn sie eigentlich überstanden scheint: »Ein zweiter Sepsisschub beruht in über 30 Prozent der Fälle auf einer Pilzinfektion«, berichtet Michael Bauer. »Pilze sind besonders schwer nachzuweisen und unsere Diagnostikmethoden sind viel zu langsam. Der Nachweis aus Blutkulturen dauert Tage, viele Patienten versterben jedoch binnen weniger Stunden.«

INFEKTIONEN, SEPSIS UND DIE FOLGEN

Infektionskrankheiten sind weltweit auf dem Vormarsch. Immer mehr Erreger sind mittlerweile gegenüber Antibiotika unempfindlich und gefährden damit die Gesundheit vieler Menschen. Es droht eine »**postantibiotische Ära**«, in der harmlose Krankheiten tödlich enden können. Ein Netzwerk führender wissenschaftlicher Einrichtungen unter der Führung der Leibniz-Gemeinschaft und mit Beteiligung der Friedrich-Schiller-Universität ruft die neue Bundesregierung auf, den Kampf gegen multiresistente Krankheitserreger stärker zu unterstützen. Die Erforschung neuer Therapien und Diagnoseverfahren erfordert eine verbesserte interdisziplinäre Zusammenarbeit in den Kliniken in Form von öffentlich-privaten Partnerschaften. Forschungsergebnisse müssten schneller als bisher den Patienten zugutekommen, so die Unterzeichner des Aufrufs, der im November anlässlich der »**World Antibiotic Awareness Week**« der Weltgesundheitsorganisation in Berlin vorgestellt wurde (www.leibniz-ipht.de/fileadmin/user_upload/Aufruf_Infektionskrankheiten.pdf).

Nicht nur die Krankheit Sepsis (umgangssprachlich »**Blutvergiftung**«), sondern auch ihre Folgen stellen für die betroffenen Patienten und ihre Angehörigen eine große Belastung dar. Nach dem Aufwachen aus einem mehrtägigen oder -wöchigen künstlichen Koma sind viele Patienten zunächst bewegungsunfähig. Häufig müssen sie die einzelnen Bewegungen des Körpers erst wieder erlernen, die geschädigten Organe müssen langsam ihre Funktionsfähigkeit zurückgewinnen. Nicht selten sind durch die Sauerstoffunterversorgung während der Sepsis periphere Gliedmaßen so stark beschädigt, dass das Gewebe abstirbt und operativ entfernt werden muss, was bis zu Amputationen führen kann. Zu den **Langzeitfolgen** gehören darüber hinaus Gewichts- und Leistungsverlust, Müdigkeit, Kopfschmerzen oder Gelenk- und Muskelschmerzen. Auch kognitive Störungen wie Konzentrationsschwäche, Gedächtnisverlust, Taubheit und Lähmungen können auftreten. Etliche Patienten sind von den Erlebnissen auf der Intensivstation psychisch stark belastet und müssen therapeutisch behandelt werden (siehe Interview S. 22).

Bild links: Prof. Dr. Michael Bauer (l.) ist einer von drei Sprechern des Center for Sepsis Control and Care (CSCC). Am Jenaer Uniklinikum behandeln der Intensivmediziner und seine Kollegen jedes Jahr etwa 400 Patienten mit einer Sepsis. Etwa ein Viertel von ihnen überlebt die Krankheit nicht. Häufige Ursachen von Sepsis sind Infektionen mit Bakterien oder Pilzen.

Umso wichtiger sei es, fundamentale Forschungslücken zu schließen. Der Jenaer Forschungscampus »InfectoGnostics« arbeite bereits an besseren und schnelleren Verfahren. Das Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI), Uniklinikum und Universität Jena sowie weitere Partner, die beim Thema Infektionsforschung eine Schnittmenge haben, arbeiten dort eng zusammen.

Wie dringend dies ist, betont Bauer: »Die Zahl der Sepsisinfektionen steigt.« In Zeiten moderner Hochleistungsmedizin mag das zunächst verwundern, doch schafft eben diese die Bedingungen für die invasive Infektion. »Immer mehr Menschen werden sehr alt, oft erhalten über 80-Jährige noch ein neues Knie- oder Hüftgelenk«, schildert er. »Aber selbst eine geglückte Operation schwächt das Immunsystem – und in dem Moment schlagen häufig fakultativ pathogene Erreger zu.« Mit solchen Keimen lebe der Mensch normalerweise friedlich zusammen, sie lösen nur

unter bestimmten Bedingungen eine Krankheit aus. Der Pilz *Candida albicans* beispielsweise besiedelt mehr als 50 Prozent der Menschen an den Schleimhäuten im Mund und Rachen, im Genitalbereich oder im Verdauungstrakt (siehe S. 18).

»Das menschliche Immunsystem limitiert den Erfolg der modernen Medizin, ist sozusagen deren Achillesferse«, sagt der Jenaer Mediziner. Denn viele Medikamente und Therapieverfahren beeinträchtigen das Immunsystem und machen es anfälliger für Keime – auch jene, die wie *Candida albicans* endogen, also im Körper selbst, vorliegen. Gerade das intestinale Mikrobiom, gemeinhin als Darmflora bekannt, mit Millionen von Mikroorganismen sei »schlachtentscheidend für die Gesundheit.« Wenn sich diese Keime gegen den Körper richten, haben Ärzte oft das Nachsehen.

»Deswegen ist es unheimlich wichtig, dass wir verstehen, wie Mikroorganismen in ökologischen Systemen funktionieren und wie sie kommunizieren«, findet Prof. Bauer. »Da will ich von den

Biologen lernen.« Wenn deren Erkenntnisse auf die Medizin angewendet würden, könnten sich ganz neue Möglichkeiten ergeben – weg von dem simplen Konzept, sämtliche Krankheitserreger aggressiv mit Antibiotika zu behandeln. Andernfalls drohe die Entwicklung von immer mehr multiresistenten Keimen, die im schlimmsten Fall in einem »postantibiotischen Zeitalter enden« könnte (siehe Kasten oben).

Der Körper muss selbst die geeignete Stressantwort finden

»Das bessere Verständnis für Mikroorganismen soll letztlich helfen, Wege zu finden, um die Abwehrkräfte und das Immunsystem zu stärken. Der Körper soll selbst eine bessere Stressantwort auf die Sepsis finden und widerstandsfähiger werden«, wünscht sich Michael Bauer. »Interdisziplinär gemeinsam an einem Strang zu ziehen und unsere Expertise zu bündeln, ist dafür oberste Priorität.« ■

»Wir bringen die Therapie zum Patienten«

Sepsis ist weltweit Todesursache Nr. 1 unter infektionsbedingten Erkrankungen. Selbst wer sie überlebt, ist weit davon entfernt, wieder gesund zu sein. Erhebliche körperliche Beeinträchtigungen sind meistens die Folge. Auch psychisch kann ein Aufenthalt auf der Intensivstation das Leben verändern – sowohl das des Patienten als auch das des Partners. Nicht selten hilft nur eine Therapie, um das Erlebte zu überwinden. Den Weg dahin räumlich wie emotional zu erleichtern, ist das Ziel eines Projekts am Center for Sepsis Control and Care (CSCC), das eine internetbasierte Schreibtherapie für Paare anbietet. Eine begleitende Studie überprüft die Wirksamkeit des Angebots mit dem Titel »zwei leben« (www.zweileben.net). Ein Gespräch mit den beteiligten Jenaer Psychologinnen PD Dr. Jenny Rosendahl, Projektleiterin, und Romina Gawlytta, Projektkoordinatorin.

INTERVIEW: JULIANE DÖLITZSCH

In Jena wird intensiv zum Thema Sepsis geforscht. Ihr Projekt ist im Februar 2017 gestartet. Was ist der Ansatz?

Rosendahl: Wir beschäftigen uns im Rahmen unserer Forschung am CSCC mit den psychischen Langzeitfolgen von Sepsisüberlebenden. Dazu zählen Ängste, Depressionen, Anpassungsstörungen und auch die posttraumatische Belastungsstörung, kurz PTBS genannt. Diese kann als eine psychische Reaktion auf ein extrem belastendes Ereignis, also ein Trauma, auftreten. Ein Trauma kann zum Beispiel ein Verkehrsunfall oder erlebte Gewalt sein – aber auch die Todesbedrohung angesichts einer medizinischen Grenzsituation. Die empfundene Hilflosigkeit lässt viele nicht los.

Wie wirkt sich die PTBS aus?

Gawlytta: Patienten haben oft Alpträume, erleben Flashbacks, die sie gedanklich und emotional auf die Intensivstation zurück versetzen, können nicht schlafen oder sich nur schlecht konzentrieren. Ihre Lebensqualität ist deutlich gemindert und sie empfinden oft einen großen Leidensdruck. In der Regel können sie das Erlebte nicht ohne Hilfe verarbeiten.

Was ist das Neue an dem Projekt?

Rosendahl: In der Studie überprüfen wir die Wirksamkeit der internetbasierten Schreibtherapie nach einer lebensbedrohlichen Erkrankung mit Aufenthalt auf der Intensivstation. Ein ganz neuer Ansatz ist dabei, dass der Partner oder die Partnerin aktiv in die Behandlung einbezogen und selbst behandelt wird,

wenn bei ihm oder ihr ebenfalls eine PTBS vorliegt. Ist der Partner nicht betroffen, erhält er trotzdem Informationen zur Therapie und ist auch bei dem ersten Telefoninterview dabei. Daher der Name »zwei leben«: weil es um beide Partner geht und die Patienten das Leben nach der Intensivstation oft als zweite Chance verstehen.

Sind auch die Partner betroffen?

Gawlytta: Ja. Denn auch sie waren über Tage oder Wochen der Situation ausgeliefert, nicht zu wissen, wie es ihrem Partner geht, wenn sie ins Krankenhaus kommen. Lebt er noch? Müssen sie vielleicht entscheiden, ob die Geräte abgestellt werden? Dieses AngstszENARIO werden viele nicht los, auch wenn der Partner oder die Partnerin die Intensivstation längst verlassen hat.

Wie viele Patienten leiden an einer PTBS?

Rosendahl: Die Zahlen variieren in verschiedenen Studien stark. Insgesamt lässt sich sagen, dass rund jeder fünfte Sepsispatient und jeder fünfte Partner an der PTBS leidet. Vor allem wenn der Patient selbst betroffen ist, ist es oft auch der Partner. Sie teilen dasselbe Schicksal aus zwei Blickwinkeln.

Wie hilft Ihr Projekt?

Rosendahl: Nach einer Sepsis werden die Patienten nach Hause entlassen, obwohl sie noch Restsymptome haben. Im Laufe des körperlichen Genesungsprozesses kommen dann häufig die Erinnerungen wieder hoch. Eigentlich

ist dann eine Traumatherapie erforderlich. Aber lange Wartezeiten und weite Wege, vor allem im ländlichen Raum, sind oft Hindernisse. Deswegen bieten wir eine internetbasierte Schreibtherapie an und bringen die Therapie zum Patienten. Psychologische Behandlung per Internet hat sich in den vergangenen Jahren etabliert und wird aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten weiterentwickelt. Im Gegensatz zur herkömmlichen Sprechzimmertherapie findet der Kontakt zwischen Therapeut und Patient dabei per Computer statt.

Was sind die Vorteile einer internetbasierten Schreibtherapie?

Rosendahl: Sie ist vor allem zeit- und ortsunabhängig. Patienten müssen also nicht lange auf einen Therapieplatz warten und können sich die Schreibtermine bequem zu Hause einteilen. Gerade wenn sie körperlich noch eingeschränkt sind, ist das ein entscheidender Vorteil. Zudem erleichtert es manchen Patienten, sich zu öffnen, wenn sie einem Therapeuten nicht direkt gegenüber sitzen. Das Schreiben fällt vielen bei Schuld- und Schamgefühlen leichter.

»Zwei leben« ist ein Kooperationsprojekt – mit wem arbeiten Sie zusammen?

Rosendahl: Vor Ort mit einer IT-Spezialistin, die sich um das Portal kümmert, und in Berlin mit der Psychotherapeutin Prof. Dr. Christine Knaevelsrud sowie zwei weiteren Therapeutinnen von der Freien Universität Berlin. Sie leisten den therapeutischen Part, lesen die Texte

Die Psychologinnen PD Dr. Jenny Rosendahl (r.) und Romina Gawlytta vom Institut für Psychosoziale Medizin und Psychotherapie des Universitätsklinikums.



und geben den Teilnehmern Rückmeldungen. Sie haben die internetbasierte Schreibtherapie schon zur Behandlung traumatisierender Erfahrungen von Flüchtlingen, Soldaten oder Menschen, die im Zweiten Weltkrieg traumatisiert wurden, angewandt und bringen die entsprechende Expertise mit.

Worüber schreiben die Teilnehmer in den Texten?

Gawlytta: Die ersten drei Texte befassen sich mit dem Leben vor der Intensivstation. Die Teilnehmer schreiben über ihre Kindheit, ihre Jugend und das Erwachsenenalter. In den nächsten vier Texten sollen sie die Behandlung auf der Intensivstation verarbeiten, konkret und detailliert von ihren Erinnerungen und ihren Ängsten schreiben. Die letzten drei Texte sollen die Geschehnisse aus einer anderen Sicht beleuchten, was würden sie zum Beispiel Freunden in der Situation raten. Sie sollen sich nicht mehr als Opfer fühlen, denn sie haben die Erkrankung überwunden, sind nicht mehr hilflos an Maschinen und Schläuche gefesselt und können sich damit auseinandersetzen, was sie sich von der Zukunft erwarten.

Rosendahl: Außerdem schreiben die Partner den Betroffenen einen Brief, in dem sie tröstende und verständnisvolle Worte für die erlebten und aktuellen

Belastungen finden, aber beispielsweise auch ihren Glauben an dessen Fähigkeiten und Kompetenzen zum Ausdruck bringen können. Das ist völlig privat und wird auch von den Therapeutinnen nicht gelesen. Machen beide Partner die Therapie, schreiben sie beide einen Brief an den anderen.

Haben Sie schon Rückmeldungen von den Teilnehmern erhalten?

Gawlytta: Mit den Teilnehmern, die die Behandlung beendet haben, habe ich im Anschluss telefoniert. Obwohl manche zu Beginn skeptisch waren, sind die Rückmeldungen durchweg positiv und sie sind sehr froh, mitgemacht zu haben. Sie haben nicht mehr so viele Alpträume und Flashbacks. Und selbst wenn diese auftreten, können die Teilnehmer jetzt besser damit umgehen.

In einem diagnostischen Telefoninterview finden Sie vorher heraus, wer geeignet ist für eine Teilnahme. Wer darf bei »zwei leben« nicht mitmachen?

Rosendahl: Leider alle, die keinen Partner haben, weil unsere Studie auf Paare ausgerichtet ist.

Gawlytta: Wer sich bereits in einer anderen therapeutischen Behandlung befindet, kann nicht teilnehmen, weil wir sonst nicht messen können, wie erfolgreich unser Angebot ist. Eben-

falls darf nicht teilnehmen, wer medikamenten- oder alkoholabhängig oder suizidgefährdet ist. Wir unterstützen dann natürlich dabei, eine geeignete Therapie zu finden. Eine Sepsis muss dagegen nicht notwendigerweise vorgelegen haben. Entscheidend für uns ist die Traumasituation, daher kann auch teilnehmen, wer aufgrund einer anderen Erkrankung intensivmedizinisch behandelt wurde.

Wie geht es jetzt weiter?

Rosendahl: Bis Sommer 2018 rekrutieren wir noch Teilnehmer. 70 Paare streben wir insgesamt an, momentan haben 14 Paare die Behandlung begonnen bzw. bereits abgeschlossen. Daher freuen wir uns über jeden weiteren Interessenten. Anfang 2019 soll die Studie abgeschlossen sein. Wir wünschen uns natürlich, dass das Projekt fortgesetzt wird, wenn wir die Wirksamkeit nachweisen können. Wir sind absolut davon überzeugt, dass die Therapie Betroffenen hilft.

Wie könnte sich »zwei leben« langfristig entwickeln?

Rosendahl: Unsere Behandlung auch für Einzelpersonen anzubieten, wäre eine Idee. Dann könnten zum Beispiel Alleinstehende teilnehmen oder Menschen, deren Partner an der Sepsis gestorben ist. Auch das Projekt zu internationalisieren, kann ich mir gut vorstellen. ■



Schnelltest zeigt Antibiotikaresistenzen an

Für eines der drängendsten Probleme der Medizin im noch jungen 21. Jahrhundert ist ausgerechnet die Bekämpfung von Infektionskrankheiten verantwortlich. Denn immer mehr Erreger passen sich an antibiotische Wirkstoffe an und lassen Medikamente ins Leere laufen. Neue Antibiotika wurden in den letzten 20 Jahren kaum entwickelt. In Deutschland erleiden jährlich etwa 500 000 Patienten eine sogenannte Krankenhausinfektion – 15 000 von ihnen sterben in der Folge. Schnellere und genauere Diagnosemethoden könnten dabei helfen, Antibiotika zielgerichteter und schonender einzusetzen. Wissenschaftler der Universität Jena, des Leibniz-Instituts für Photonische Technologien (IPHT) sowie des Center for Sepsis Control and Care (CSCC) bieten dafür eine Lösung.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

»Alle Lebewesen – und besonders Mikroorganismen – passen sich ihrer Umwelt an, um das Überleben ihrer Art zu sichern«, macht Prof. Dr. Jürgen Popp von Anfang an klar. »Resistenzen gegen Antibiotika lassen sich also nicht verhindern – aber sie lassen sich hinauszögern.« Dafür müsse ein Arzt genau das Medikament verschreiben können, das ausschließlich den Erreger einer Infektion bekämpft. Bisher allerdings ist es üblich, mit breitbandigen Antibiotika gegen den Verursacher vorzugehen. Damit werden auch andere Bakterien abgetötet. Das fördert die Resistenzbildung bei weitaus mehr Bakterienstämmen. Würde der Arzt wissen, mit welchem Erreger genau er es zu tun hat, könnte er gezielter Mittel verschreiben, die

sich nur gegen den vorliegenden Keim richten. Doch dafür sind komplizierte Diagnoseverfahren notwendig, die bis zu 72 Stunden dauern können und eine schnelle Behandlung der Krankheit verhindern. »Wir brauchen also Testverfahren, die schnell aufzeigen, wie ein Erreger auf ein Antibiotikum reagiert«, fasst Chemiker Popp zusammen.

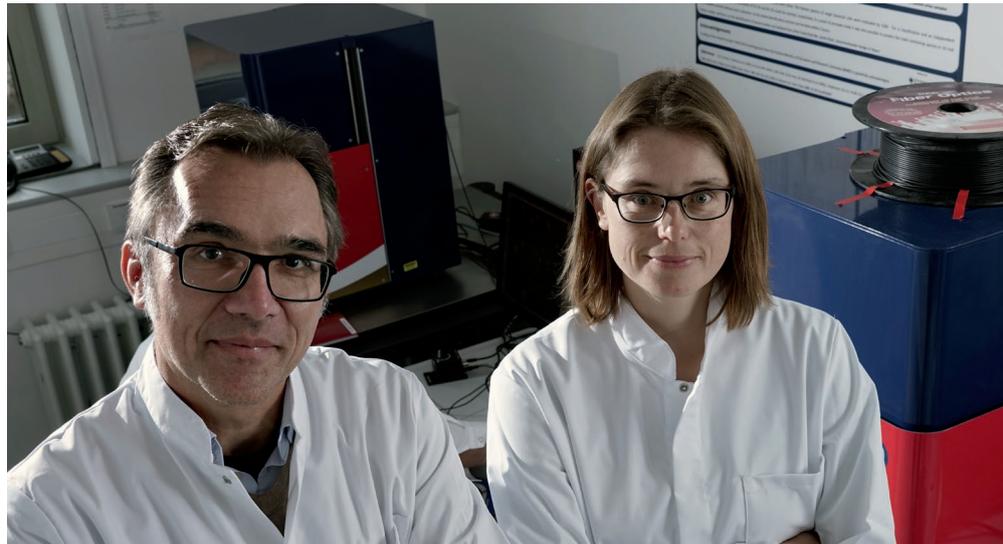
Eine solche Methode hat Popp, der das Institut für Physikalische Chemie der Uni Jena und das IPHT leitet, gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen vom InfectoGnostic Forschungscampus in den vergangenen Jahren entwickelt. Im Mittelpunkt steht dabei ein etwa ein Quadratzentimeter großer Chip. Auf ihm werden Patientenproben, z. B. Urin,

mit Antibiotika in Kontakt gebracht, die mit den darin enthaltenen Bakterien reagieren. Um sie genauer unter die Lupe nehmen zu können, werden die Erreger mittels Dielektrophorese auf dem Chip in einem Bereich von wenigen Mikrometern konzentriert.

Dafür ist die Chipoberfläche mit Elektroden versehen, die – legt man eine Spannung an – inhomogene elektrische Felder erzeugen. Diese wiederum fixieren die Bakterien an bestimmten Punkten, ohne sie zu beschädigen. Sind die Erreger so angereichert, können die Wissenschaftler die eigentliche Analyse durchführen. »Dafür nutzen wir die Raman-Spektroskopie – ein optisches Lichtstreuungsverfahren, das die genaue Identifizierung einzelner Bakterien-

Bild links: Raman-Spektroskopie mit dem Chip, mit dem sich Infektionserreger binnen weniger Stunden eindeutig nachweisen lassen. Die Jenaer Neuentwicklung kann zugleich Hinweise darauf geben, ob die Erreger auf die verabreichten Antibiotika reagieren oder Resistenzen aufweisen. Das spart kostbare Zeit für die Behandlung der Patienten.

Bild rechts: Prof. Dr. Jürgen Popp und Prof. Dr. Ute Neugebauer haben das neue Analysesystem entwickelt.



stämme ermöglicht«, sagt Prof. Dr. Ute Neugebauer, die maßgeblich an der Entwicklung des neuen Analysesystems beteiligt ist. »Bakterien werden mit Licht bestrahlt und das Streulicht analysiert. Jeder Bakterienstamm lässt dabei ein ganz individuelles, einzigartiges Schwingungsmuster erkennen, durch das man die Erreger eindeutig identifizieren kann.«

Mithilfe von statistisch hinterlegten Algorithmen lassen sich schließlich die Schwingungsmuster genau zuordnen und somit die Bakterien genau bestimmen.

Für eine erfolgreiche Behandlung von Patienten ist es notwendig, nicht nur den Erreger, sondern auch vorliegende Resistenzen zu überprüfen. Während der Entwicklung des Chipsystems konzentrierten sich die Jenaer Forscher zunächst auf die Bakteriengattung der Enterokokken. Einige Stämme dieser Darmbakterien können Harnwegsinfektionen aber auch Sepsis und Endokarditis auslösen. Bereits vor 30 Jahren wurde darüber berichtet, dass manche Enterokokken Resistenzen gegen das Antibiotikum Vancomycin ausgebildet haben, was sich weltweit zu einem medizinischen Problem entwickelt hat. Deshalb haben Popp und Neugebauer mit ihren Kolleginnen und Kollegen

einen Schnelltest entwickelt, der ganz konkret überprüft, ob diese Erreger auf Vancomycin reagieren oder nicht. Auch hier gelangen die Forscher durch den Einsatz der Raman-Spektroskopie zu einem Ergebnis: Dabei bringen sie Proben der Bakterien in Kontakt mit dem Antibiotikum und beobachten Veränderungen im Schwingungsmuster. Bereits nach etwa 90 Minuten lässt sich erkennen, ob die Erreger auf das Medikament reagieren und absterben oder nicht. Selbst mit einer entsprechenden Vor- und Nachbereitung dauert das Verfahren höchstens dreieinhalb Stunden. Die Analyseverfahren ist außerdem für andere Erregertypen und Antibiotika anwendbar. Zudem sollen auf dem Chip mehrere Antibiotika gleichzeitig getestet werden können.

Alltagstaugliches Chipsystem für die Arztpraxis

»Unser Ziel ist es nun, ein geschlossenes Schnelltestsystem zu entwickeln, das Mediziner sowohl in der Klinik als auch in einer Arztpraxis einsetzen können«, erklärt Jürgen Popp die weiteren Pläne. »Dafür braucht es natürlich den Chip sowie entsprechende Lesegeräte, die das Ergebnis ermitteln. In zwei bis drei Jahren wollen wir einen ersten Pro-

totypen vorstellen – erste Kontakte zu Partnern aus der Industrie sind bereits geknüpft.« Überhaupt setzt Popp sehr auf interdisziplinäre Zusammenarbeit, für die er in Jena optimale Bedingungen sieht. Allein der Forschungscampus ermögliche fruchtbare Kooperationen mit Medizinern, Wissenschaftlern anderer Fachrichtungen und Partnern aus der Industrie. Die Nähe zum Uniklinikum ist zudem unerlässlich, denn eine solche Analyseverfahren lasse sich ohne Kenntnisse über den Alltag in einem Krankenhaus, über medizinische Arbeitsabläufe und Sicherheitsstandards gar nicht verwirklichen. Deshalb sei es wichtig, dass beispielsweise seine Kollegin Ute Neugebauer direkt im CSCC im Uniklinikum forscht.

Doch Popp betont auch, dass die technische Entwicklung allein nicht ausreicht, um gegen Antibiotikaresistenzen vorzugehen. Denn was nützen die besten Methoden, wenn sie aus Kostengründen nicht zum Einsatz kommen? »Wichtig ist es deshalb, dass wir die Krankenkassen mit ins Boot holen. Auch hierfür müssen wir in den kommenden Jahren Gespräche führen.« Die Dringlichkeit, die sich in den aktuellen Zahlen zu Krankenhausinfektionen ausdrückt, sollte dabei das Problembewusstsein verstärken. ■

Blutstropfen im (Auto-)Fokus

Unter dem Dach des Leibniz ScienceCampus InfectoOptics arbeiten Wissenschaftler im Forschungsprojekt BLOODi an der Entwicklung eines dynamischen Hämogramms. Mit neuen optischen Technologien wollen sie Infektionskrankheiten und ihre Erreger im Vollblut auf schnellstem Wege erkennen. Um zu erfahren, wie sich einzelne Blutzellen bei einer Infektion verhalten und mit Krankheitserregern interagieren, müssen Biologen, Physiker, Bioinformatiker und Mathematiker ihre Expertise bündeln und eine gemeinsame Sprache finden.

TEXT: JULIANE DÖLITZSCH

BLOODi – ein Projektname, so blutig, wie es nur geht und bei dem mir unfreiwillig grausame Bilder durch den Kopf geistern. Doch »blutrünstig« ist BLOODi in Jena nicht, im Gegenteil: Bei dem Projekt, das die Uni Jena mit verschiedenen außeruniversitären Forschungseinrichtungen verbindet, soll im Idealfall ein einziger Tropfen Blut ausreichen, um weitreichende Erkenntnisse zu gewinnen. Das kleine »i« im Namen steht für Imaging; der komplette Projektname lautet »Whole Blood Imaging«. Das Ziel ist es, mit mikroskopischen »Schnappschüssen« die Dynamik der Blutbestandteile einzufangen – um möglichst direkt Aussagen darüber treffen zu können, welche Erreger eine Infektion ausgelöst haben.

Kurze Wege, so viel habe ich über Jena gelernt, sind hier wichtig. Sie zeichnen die Stadt aus, aber ebenso die Uni und andere Forschungseinrichtungen. Dass BLOODi im Kleinen die hiesige Wissenschaftslandschaft im Großen wi-

derspiegelt, ist mir schnell klar, als ich zunächst auf das Organigramm und dann auf verschiedene Mitwirkende der Projektgruppe treffe. Unter ihnen sind Biologen, Physiker, Mathematiker und Bioinformatiker. Sie alle eint ein Ziel: »Mithilfe optischer Technologien wollen wir ein dynamisches Blutbild entwickeln und damit ermöglichen, Infektionskrankheiten schnell und zielgerichtet zu bekämpfen«, erklärt Prof. Dr. Marc Thilo Figge, Leiter des Projekts. »Das Besondere daran ist, dass wir das Blut intakt lassen wollen, um die Interaktionen der Zellen zu beobachten. Damit uns das gelingt, vereinen wir verschiedene Wissenschaftsdisziplinen und Institute.«

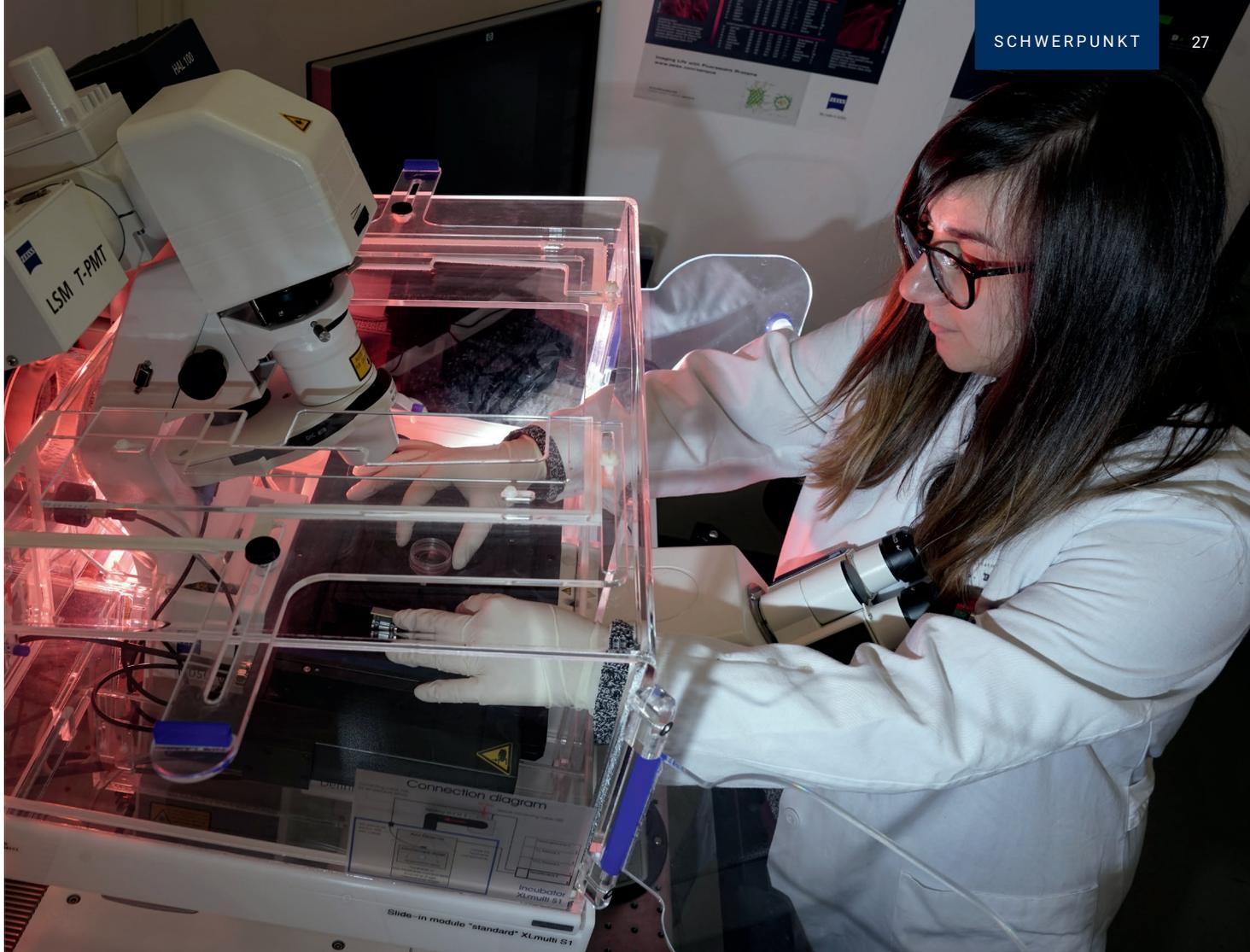
Gar nicht so einfach, denke ich, und Prof. Figge gibt mir recht. »Wir mussten erst einmal miteinander ins Gespräch kommen, eine gemeinsame Basis und Sprache entwickeln«, erinnert sich der studierte Physiker. Aus 18 Mitarbeitern besteht das BLOODi-Team, darunter sieben Doktoranden. Jene sorgen

dafür, dass BLOODi nicht nur fächerübergreifend, sondern auch international gut aufgestellt ist. So stammen drei der Promovierenden aus Deutschland, die anderen aus Italien, Indien, Russland und Syrien. Mit frischen Ideen und einem unverstellten Blick auf die Forschung tragen die Nachwuchswissenschaftler zur Innovationsfreude von BLOODi bei.

Kurze Wege zwischen Labor und Labor

Das Projekt, das vor anderthalb Jahren gestartet ist, lebe besonders vom ständigen Austausch, berichtet Figge. »Regelmäßig finden wir uns in der großen Gruppe zusammen, um Ergebnisse und neue Ansätze zu besprechen. Daneben suchen wir natürlich immer dann in kleinen Konstellationen den Kontakt, sobald Bedarf besteht.« Die überschaubaren Distanzen auf dem Beutenberg-Campus erleichtern die Kommunikation enorm, binnen weniger Minuten





Doktorandin Alessandra Marolda untersucht neutrophile Granulozyten: Dafür vergleicht sie zwei Blutproben ein und derselben Person. Eine Probe ist mit dem Pilz *Candida albicans* infiziert, die andere nicht. Untersuchungen mit dem Laser-Scanning-Mikroskop machen deutliche Unterschiede zwischen den Neutrophilen aus infiziertem Blut und aus der Kontrollprobe sichtbar.

klopft man da an die Tür der Forscherkollegen und tauscht sich aus – bei jeder sich bietenden Gelegenheit.

Das merke ich, während mir Alessandra Marolda, Doktorandin am Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI), ihren Part an BLOODi darlegt. Im Hintergrund ist eifriges Geflüster der anderen Projektteilnehmer zu vernehmen, die sich nicht etwa über das vergangene Wochenende austauschen, sondern über Zwischenergebnisse aus dem Labor.

Das Ideal sei es, am Ende des Projekts tatsächlich Vollblut untersuchen zu können und dieses so wenig wie möglich zu beeinträchtigen, erzählt mir derweil die junge Biologin. Bislang könne die Wissenschaft das nicht leisten. Was sie nun zu Beginn am Zentrum für Innovationskompetenz (ZIK) Septomics untersucht, stellt nichtsdestotrotz schon einen kleinen Meilenstein dar: »Am Anfang erforschen wir durchaus noch

einzelne Zellen, aber ohne sie zu markieren.« Die Zellen werden also nicht gefärbt, sondern möglichst unangetastet gelassen – um trotz Extraktion valide Ergebnisse zu generieren.

Neutrophile reagieren auf Pilzinfektion

Dazu habe sie von zwei Blutproben desselben Menschen eine Probe mit dem Pilz *Candida albicans* infiziert und die andere nicht. »Nach einer Stunde habe ich aus beiden Proben neutrophile Granulozyten isoliert«, so Marolda. Diese oft nur als Neutrophile bezeichneten Zellen sind mit Abstand die häufigsten weißen Blutkörperchen. »Als Teil der angeborenen Immunabwehr tragen sie zur Identifizierung und Zerstörung von Mikroorganismen bei – daher erschien es uns vielversprechend, sie genauer zu beobachten«, führt die Italienerin aus. Erste Versuche mit dem Laser-Scanning-Mikroskop lassen auch mich erkennen, dass sich die isolierten Neutrophile aus

infiziertem Blut tatsächlich von denen aus nichtinfiziertem unterscheiden: Ihre Form hat sich leicht verändert; sie sind etwas flacher. »Ihre Morphokinetik wurde durch den Erreger beeinflusst«, fasst Alessandra Marolda zusammen. Als nächstes wird sie durch eine Infizierung der Blutproben untersuchen, wie die Immunzellen auf andere Pilze und Bakterien reagieren. Genauso? Anders? Helfen sie nur, eine Infektion zu verkünden oder kann man deren Charakteristika nutzen, um auf einen konkreten Erreger zu schließen? Wie verhalten sich andere Blutzellen? Zum Beispiel bei einer Sepsis ist der frühestmögliche Beginn der Behandlung entscheidend für deren Erfolg – eine schnelle Bestimmung der Keime und die entsprechende medizinische Reaktion kann im äußersten Fall über Leben und Tod entscheiden.

Beeindruckt von der Tragweite der Untersuchungen verlasse ich das Labor. Auch die anderen beenden ihre Fachsimpelei, die inzwischen angekommen



Prof. Dr. Marc Thilo Figge (l.) und Doktorand Ivan Belyaev werten die Experimente rechnerisch aus. Hier betrachten sie die Morphokinetik der neutrophilen Granulozyten aus dem Live Cell Imaging.

ist bei der Ähnlichkeit von Mikroskopen, die die Biologen und die Physiker verwenden. Offenbar lassen sie sich im diskutierten Fall nicht gut vergleichen. Gemeinsam tauschen wir Laborartikel gegen Jacke und setzen uns in Bewegung, um uns nur wenige Minuten später in einem Physiklabor des Abbe Center of Photonics wiederzufinden.

Mikrofluidik gibt Auskunft über die Zusammensetzung der Blutproben

Diesmal mit Schuhüberziehern ausgestattet, begutachte ich ein Mikroskop. Unter dem Objektiv liegt ein Chip mit eingestanzten feinen, sich windenden Linien. Susanne Pfeifenbring, die hier einen Großteil ihrer Zeit verbringt, erklärt mir, was es mit diesem auf sich hat. Die etwa einen mal anderthalb Zentimeter große – oder besser kleine – Platte sei das Fundament für die tropfenbasierte Mikrofluidik. Auf meinen fragenden Blick hin wird die Physikerin, die im Rahmen von BLOODi am Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT) promoviert, konkreter: »Wir geben einen Blutstropfen in den Chip und untersuchen die Blutzellen mit nicht-linearer Schwingungsspektroskopie.« Kaum weniger ratlos als vorher studiere ich den Chip, doch Pfeifenbring fährt schon fort: »Jede Zelle besteht aus ver-

schiedenen Makromolekülen wie Proteinen, Lipiden und DNS. Indem wir mit zwei Laserpulsen auf das Vollblut strahlen, regen wir selektiv verschiedene Moleküle zum Schwingen an und beobachten ihre Verteilung in der Zelle. Da das Schwingungsspektrum der Zelle so spezifisch wie ein Fingerabdruck ist, erkennen wir daran die biochemische Zusammensetzung. So finden wir zum Beispiel die Neutrophilen im Vollblut.«

Wichtig sei dies, weil die Forscher auch im Physiklabor auf die kleinstmögliche Beeinträchtigung der Blutproben setzen und, entgegen dem Vorgehen bei der bislang üblichen Durchflusszytometrie, keine Zellen markieren wollen. Durch die Schwingungsspektroskopie, auch Raman-Spektroskopie genannt, würden sie so erfahren, um welche Zellen es sich handelt – und im Idealfall, ob diese Kontakt mit bestimmten Krankheitserregern hatten. »Nichtlineare Laserspektroskopie mit Mikrofluidik zu verbinden, um Vollblut zu untersuchen, ist absolutes Neuland«, erzählt Susanne Pfeifenbring.

Während wir uns langsam auf den Weg nach draußen machen, hebt Marc Thilo Figge noch einmal deutlich das Kennzeichen von BLOODi hervor: »Bei uns entwickeln Physiker neue optische Methoden, für die sie von allein keine

Notwendigkeit sehen würden. Und unsere Biologen wissen, was sie untersuchen und herausfinden möchten, können jedoch nicht die Methoden dafür schaffen.« Durch die enge Verbindung von Laserphysikern, Biologen und Immunologen entstehen so fruchtbare Forschungsideen und die Möglichkeit, sie durch Mitwirkung aller auch umzusetzen.

Zeitraffermikroskopie macht Unterschiede sichtbar

Und weil alle Labortätigkeit auch jemanden braucht, der sie analysiert und interpretiert, ergänzen Wissenschaftler wie Prof. Figge selbst und der Doktorand Ivan Belyaev das Team. Im Zentrum für Systembiologie der Infektion am HKI, das wir zu guter Letzt ansteuern, werten sie die Experimente rechnerisch aus. Dazu erhalten sie zum Beispiel die Daten von Alessandra Marolda und betrachten die Entwicklung der Neutrophilen in den einzelnen »Schnappschüssen« genauer. Die mit dem Zeitraffermikroskop erstellte Bilderfolge, auch als Live Cell Imaging bezeichnet, erlaubt es, dynamische Charakteristika der Zellformen zu bestimmen. »So können wir diagnostische Kriterien für gesunde und erkrankte Zellen festhalten«, erläutert Belyaev,

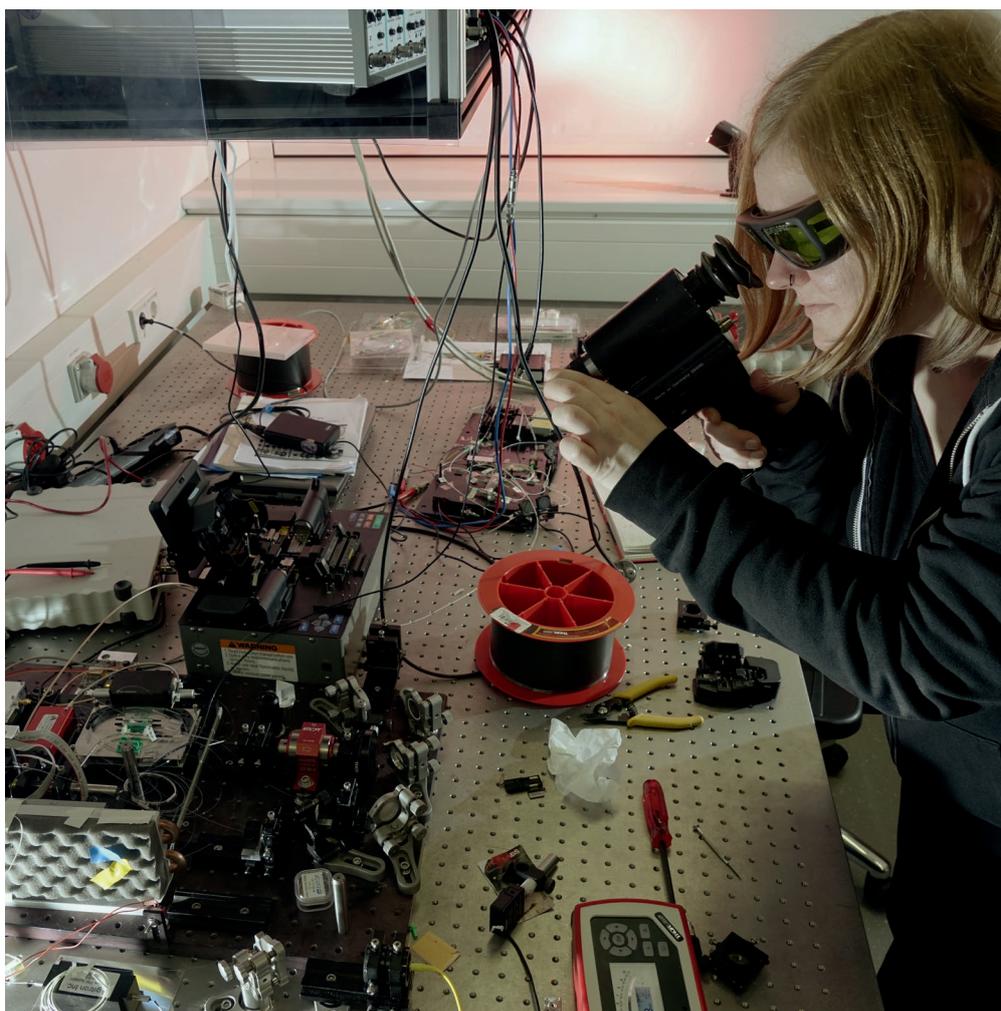
»BLOODi« ist ein Teilprojekt des Leibniz ScienceCampus »InfectoOptics«. Forscher aus den Lebenswissenschaften sowie der Optik/Photonik arbeiten eng zusammen, um Infektionskrankheiten mit Hilfe neuartiger optischer Technologien besser zu verstehen und zu bekämpfen. Zu den **Projektpartnern** gehören die Friedrich-Schiller-Universität Jena, das Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI), das Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT), das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF), das Institut für molekulare Pathogenese am Friedrich-Loeffler-Institut, Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit (FLI) sowie die BLINK AG.

Fundament für die **tropfenbasierte Mikrofluidik** ist ein Chip (Foto).



der am HKI promoviert, und verweist am Rechner auf einige Diagramme, denen die morphokinetische Untersuchung der Neutrophilen zugrundeliegt. »Dadurch wissen wir, dass wir bei den Mikrofluidik-Tests mit Vollblut auf diesen Aspekt achten sollten. Das bringt uns schon einen guten Schritt weiter.« Der russische Physiker ist vor allem aus einem Grund ein Teil von BLOODi: »Wissenschaftliche Neugier.«

Dass diese auch seine Kolleginnen und Kollegen antreibt, liegt für mich auf der Hand. Das Blut auf verschiedenen Wegen zu untersuchen und die Erkenntnisse in der Gruppe zusammenzuführen, schätzt Alessandra Marolda an BLOODi. »Wir nähern uns hier aus verschiedenen Blickwinkeln einem Problem, das wir gemeinsam zu lösen versuchen«, schildert sie. Dafür haben sie und die anderen Wissenschaftler nun noch rund zwei Jahre Zeit, dann endet die Projektlaufzeit zunächst. Angesichts erster aussagekräftiger Ergebnisse zeigt sich Figge optimistisch: »Von der Vollblutdynamik können wir viel lernen. Die bereits erzielten Momentaufnahmen stimmen uns hoffnungsfroh, dass wir charakteristische Biomarker für Erreger finden und in Zukunft schnellere Vorhersagen zu Infektionen treffen können.«



Doktorandin Susanne Pfeifenbring prüft mit einem Infrarotsichtgerät die Justage eines Lasers. Im Projekt BLOODi werden Blutzellen mit Laserpulsen bestrahlt, um über deren Schwingungsspektrum zu erfahren, um welche Blutzellen es sich handelt und ob sie Kontakt mit Krankheitserregern hatten.

Termiten haben einen »grünen Daumen«

In einem Termitenstaat stimmt die Chemie – und das im wahrsten Sinne des Wortes. Die fleißigen Termiten bauen einen Pilz in großen Pilzgärten an, von dem sie sich ernähren. Um diese wertvolle Nahrungsquelle zu schützen, bekommen sie Unterstützung von Bakterien. Sie leben im Darm und Garten der Termiten und produzieren Naturstoffe, die feindliche Pilze davon abhalten, den Termitenbau zu befallen. Christine Beemelmans untersucht mit ihrem Team am Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI) die Beziehung zwischen Wirt und Mikroben und spürt dabei neue Naturstoffe auf.

TEXT: MONIKA WEISS

Wir Menschen sind von vielen verschiedenen Mikroorganismen besiedelt. Wir haben uns nicht nur aneinander gewöhnt, wir sind auch voneinander abhängig, wie zum Beispiel unsere Darmflora beweist (siehe S. 18). Auch wenn einige Bakterien oder Pilze häufig ernstzunehmende Krankheiten verursachen – ohne die meisten Mikroorganismen können wir nicht leben. So wie uns Menschen ergeht es auch anderen Organismen, die gemeinschaftlich mit Mikroben zusammenleben: Mikroorganismen in der Wurzelumgebung im Boden gehen beispielweise eine Symbiose mit Pflanzen ein und unterstützen sie bei der Aufnahme von Nährstoffen. Und auch Insekten haben eine ganz individuelle Darmflora, auf die sie angewiesen sind.

Termiten legen in ihren Bauten Gärten an, um Pilze zu kultivieren

»Im Darm und im Pilzgarten von pilzzüchtenden Termitenarten befinden sich sogenannte Aktinobakterien. Sie nehmen eine essenzielle Rolle für die Insektengemeinschaft ein«, berichtet Dr. Christine Beemelmans. Die Chemikerin leitet eine Nachwuchsgruppe am HKI, die die Wechselbeziehungen von Mikroben und ihrem Wirt auf chemischer Ebene untersucht. Gemeinsam mit einer interdisziplinären Forschergruppe unternahm Beemelmans 2015 und 2016 Expeditionen nach Südafrika, wo pilzzüchtende Termiten leben. Mit ihren Kollegen entnahmen sie Proben von Termitenbauten: »Um in den Pilzgärten der Termiten vorzudringen,



Termitenhügel einer *Macrotermes*-Kolonie in Südafrika.

mussten wir tief graben«, berichtet die Jenaer Wissenschaftlerin.

»Vergleichbar mit unserem Getreideanbau kultivieren Termiten dort einen Pilz der Gattung *Termitomyces*, um sich von diesem zu ernähren. Sie sind ausgezeichnete Gärtner«, führt Beemelmans fort. Damit solch ein hochkomplexes und fragiles Staatengebilde, wie das der Termiten, intakt bleibt, müssen viele verschiedene Faktoren im Gleichgewicht sein. Neben abiotischen Faktoren wie der Zusammensetzung der Erdbestandteile kommt es vor allem auf das Zusammenspiel der organismischen Partner an. Nur wenn der als Nahrungsquelle dienende Pilz und die unterstützenden Mikroben der Termiten in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen, kann solch ein komplexes System überleben.

Hierbei sind vor allem sogenannte bioaktive Substanzen wichtig, da sie den beteiligten Organismen als Signal- und Kommunikationsstoffe dienen. Auf diese Weise steuern die Mikroorganismen ihre Interaktionen und halten das System in der Balance. Insektenstaaten bilden ähnlich wie der Mensch mit seinem komplexen Mikrobiom eine Art Superorganismus. Jedoch sind auch diese ökologischen Systeme angreifbar und werden ab und an von Schädlingen befallen oder erleiden Infektionen. Zum Beispiel können parasitäre Pilze den lebensnotwendigen Nahrungspilz überwachsen und den gesamten Staat zusammenbrechen lassen.

Die Nachwuchsgruppe von Christine Beemelmans beschäftigt sich mit die-

Termitenkönigspaar der Spezies *Macrotermes natalensis*. Die Königin (links) kann bis zu 15 Zentimeter groß werden. Deutlich zu erkennen ist ihr vergrößerter Hinterleib für die Produktion der Eier. Der König (rechts) wird nur zwei bis drei Zentimeter groß. Die Königin ist umringt von mehreren »Arbeitern« und kleinen »Soldaten«. Die Arbeiter bauen die Pilzgärten an und versorgen Königin und König mit Nahrung. Die Soldaten beschützen die Gärten und das Königspaar.



sen Mikroben-Wirt-Beziehungen. Die Chemikerin sieht darin ein großes Potenzial, neue Naturstoffe zu finden, die beispielsweise zur Bekämpfung von menschlichen Infektionen zum Einsatz kommen können. Anstatt aus Proben zufällig Substanzen zu extrahieren, untersucht Beemelmanns' Team bioaktive Naturstoffe zuerst innerhalb der organismischen Beziehungen auf ihre mögliche biologische Funktion. Die Forscher schlagen dabei zwei Fliegen mit einer Klappe: Neben den neuen Naturstoffen verstehen sie gleichzeitig grundlegende Mechanismen komplexer Symbiose-Systeme besser.

»Wir haben bereits einige neue Moleküle gefunden«, hebt die Nachwuchswissenschaftlerin hervor. Eines der Moleküle, das von den Aktinobakterien im Darm der Termiten gebildet wird, ist besonders interessant für die Forscher, da es eine neuartige Struktur aufweist. Es handelt sich um ein Hybridmolekül, das aus drei verschiedenen Bausteinen – einem Zucker, einem Polyketid und einer Aminosäure – durch das Zusammenspiel vieler verschiedener Enzyme gebildet wird. »Das fertige Endmolekül

ist biologisch inaktiv, soweit wir das bisher abschätzen können. Jedoch weisen einige Zwischenstufen antimikrobielle Aktivitäten auf«, erklärt Beemelmanns. Die Naturstoff-Forscherin und ihr Team gehen davon aus, dass diese sogenannten Tropolonderivate neben einigen anderen gefundenen Naturstoffen den feindlichen Pilz davon abhalten, den Termitenbau zu befallen – sozusagen eine natürliche Kombination an Pestiziden bilden, die die Termiten beim Anbau ihrer Nahrungsquelle unterstützt.

Wirkstoffe machen Pilze zu Parasiten und Krankenhauskeime unschädlich

In weiteren Untersuchungen haben die Forscherinnen und Forscher um Christine Beemelmanns auch einen anderen parasitären Pilz genauer angeschaut. Sie konnten beobachten, dass der Pilz aus der Gattung *Pseudoxylaria* den für die Termiten lebensnotwendigen Nahrungspilz wie Unkraut überwächst. Die Ursache dafür erklärt Beemelmanns: »Wir konnten aus diesem Schadpilz zyklische Tetrapeptide isolieren, die vermutlich für seine parasitäre

Lebensart mitverantwortlich sind.« In weiteren Experimenten fanden die Wissenschaftler heraus, dass diese aktiven Substanzen auch gegen das Bakterium *Pseudomonas aeruginosa* wirken.

Das ist vor allem deshalb eine interessante Erkenntnis, weil *Pseudomonas aeruginosa* – ein typischer Krankenhauskeim – schwerwiegende Wundinfektionen beim Menschen hervorrufen kann. Solche sogenannten »Gram-negativen« Bakterien sind schwer zu bekämpfen. Die Jenaer Forscher vermuteten deshalb hier einen potenziellen neuen Wirkstoff zur Behandlung der Wundinfektionen. Jedoch stellte sich dieser Naturstoff als zu toxisch heraus, so dass er für eine Anwendung als Antibiotikum bei Menschen nicht in Frage kommt. »Allerdings haben wir weitere Substanzen in der Pipeline, die hoffentlich verbesserte pharmakologische Eigenschaften aufweisen«, ist Dr. Beemelmanns zuversichtlich.

Aktuell beantragt das HKI gemeinsam mit der Universität ein Patent für einen neuen Naturstoff, der zur Entwicklung eines neuen Präparats für die Krebstherapie zum Einsatz kommen könnte. ■

Original-Publikation

Isolation, biosynthesis and chemical modifications of rubterolones A–F, rare tropolone alkaloids from *Actinomadura* sp. 5 – 2 (2017), DOI: 10.1002/chem.201701005

Kontakt

Dr. Christine Beemelmanns
Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI)
Beutenbergstraße 11a, 07745 Jena

Telefon: +49 36 41 53 21 525
E-Mail: christine.beemelmanns@leibniz-hki.de
www.leibniz-hki.de





Von Termiten angelegter »Pilzgarten« mit weißen Fruchtkörpern des Gartenpilzes *Termitomyces*. Die ovalen Fruchtkörper werden bis zu einem Zentimeter groß.

Infizierter Pilzgarten mit Schadpilz *Pseudoxylaria*. Der Parasit überwächst den für die Termiten lebensnotwendigen Nahrungspilz wie »Unkraut«.





Agarplatte mit Grünalgen, auf die Bakterien (Mitte) bzw. Bakterienextrakte aufgebracht sind. Im Zentrum ist deutlich ein gehemmtes Algenwachstum als Halo erkennbar.

Treibjagd in der Petrischale

Wenn die Grünalgen *Chlamydomonas reinhardtii* auf Bakterien der Art *Pseudomonas protegens* treffen, ist ihr Schicksal besiegelt. Die nur etwa zwei Mikrometer großen Stäbchen umzingeln die etwa fünf Mal größeren Algen und attackieren sie mit einem tödlichen Giftcocktail. Die Algen verlieren daraufhin ihre Geißeln, was sie zur Bewegungslosigkeit verdammt. Anschließend verformen sich die grünen Einzeller und sind nicht mehr in der Lage, sich zu vermehren. Den chemischen Mechanismus hinter dem effektiven Beutezug der Bakterien haben Botaniker und Naturstoffchemiker jetzt aufgedeckt.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Es ist ein schauriges Schauspiel, das sich Prasad Aiyar beim Blick durchs Mikroskop bietet. Der aus Indien stammende Doktorand vom Institut für Allgemeine Botanik und Pflanzenphysiologie, der zuvor für sein Masterstudium in »Molecular Life Sciences« nach Jena gekommen ist, beobachtet auf einem Objektträger Mikroalgen der Art *Chlamydomonas reinhardtii*. Die rund zehn Mikrometer großen, oval geformten Einzeller tragen jeweils zwei Geißeln, mit deren Hilfe sie munter hin- und herschwimmen. Bis zu dem Moment, in dem Prasad Aiyar mit

einer Pipette einen Tropfen einer Bakterienlösung dazu gibt. Die wesentlich kleineren Bakterien sammeln sich zu Schwärmen, die die Algen einkesseln. Nur anderthalb Minuten später verharren die Algen vollkommen reglos und beim genauen Betrachten ist zu erkennen, dass sie entgeißelt wurden.

Warum die Bakterien eine solch verheerende Wirkung auf die Grünalgen haben, konnten Jenaer Forscherinnen und Forscher jetzt aufdecken. Wie die Teams um Prof. Dr. Maria Mittag und Dr. Se-

verin Sasso von der Friedrich-Schiller-Universität sowie Prof. Dr. Christian Hertweck vom Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut (HKI) im Fachmagazin *Nature Communications* zeigen, spielt dabei eine chemische Substanz die zentrale Rolle.

Orfamid A, so heißt die Substanz, ist ein zyklisches Lipopeptid, das die Bakterien zusammen mit anderen chemischen Verbindungen freisetzen. »Unsere Ergebnisse weisen darauf hin, dass Orfamid A auf Kanäle in der Zellmembran der Algen wirkt, was zur Öffnung dieser Kanäle führt«, erläutert Dr. Severin Sasso das Ergebnis der Jenaer Studie. »Das führt zu einem Einstrom von Kalziumionen aus der Umgebung in das Zellinnere der Algen«, führt der Leiter der Arbeitsgruppe für Molekulare Botanik aus. Eine rasche Änderung der Konzentration von Kalziumionen ist ein verbreitetes Warnsignal für viele Zelltypen, das zahlreiche Stoffwechselwege reguliert. »Um die Veränderung des Kalzium-Spiegels in der Zelle beobachten zu können, haben wir das Gen für ein Photoprotein in die Grünalgen ein-

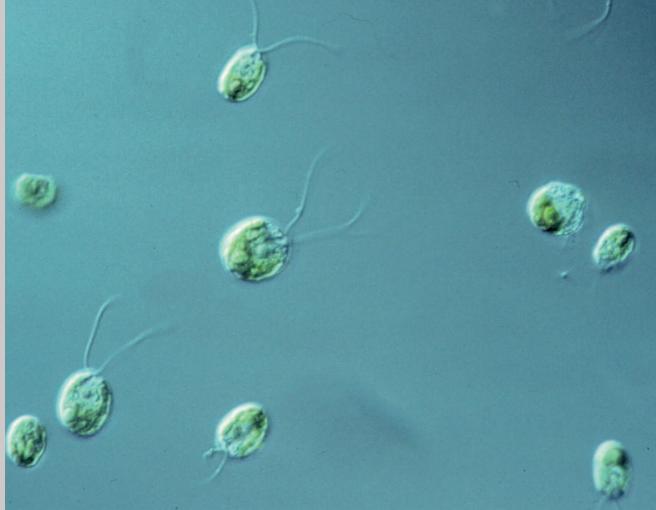
Chlamydomonas reinhardtii

Klein, wendig, schnell: Die einzellige Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* ist gerade einmal zehn Mikrometer groß und damit rund zehn Mal dünner als ein Blatt Papier. Doch mit ihren zwei Geißeln kommt sie so richtig in Fahrt. Bezogen auf ihre Größe schwimmt *C. reinhardtii* bis zu zwölf Mal schneller als ein Mensch. Grund für die Eile der winzigen Alge ist meist ein Wechsel der Lichtverhältnisse. Je nach Lichteinfall und -intensität sucht sie sich die optimale Position für **Photosynthese und Energiegewinnung**. Die Mikroalgen sind **Süßwasserbewohner**. Sie sind weltweit verbreitet und kommen neben Gewässern auch in feuchten Böden vor.

Zur Wahrnehmung von Licht nutzt *C. reinhardtii* eine Vielzahl von Photorezeptoren. Einige davon befinden sich im sogenannten **Augenfleck**, der sich am »Äquator« des Einzellers befindet und durch Carotinoide gelborange gefärbt ist. Untersuchungen an diesen Rezeptoren haben ein neues Forschungsfeld – die Optogenetik – eröffnet, in dem bestimmte Eiweiße aus *Chlamydomonas* als »molekulare Lichtschalter« in der Neurobiologie eingesetzt werden.

Die Alge verfügt über einen ausgeprägten **Tag-Nacht-Rhythmus**, der – ähnlich wie bei uns Menschen – von einer »inneren Uhr« gesteuert wird. Auch wenn die Algen dauerhaft im Dunkeln gehalten werden, läuft der Rhythmus mit einer Periode von ungefähr 24 Stunden weiter, d. h. die Algen »wissen« immer noch, wann es eigentlich Tag oder Nacht wäre. Chronobiologen bezeichnen dies als circadianen Rhythmus und unterscheiden den subjektiven Tag bzw. die subjektive Nacht. Registrieren die Grünalgen Lichtpulse während ihres subjektiven Tages, so schwimmen sie auf das Licht zu; werden sie aber während ihrer subjektiven Nacht mit Lichtpulsen angestrahlt, bewegen sie sich nicht.

Interessant für die Forschung ist *C. reinhardtii* auch deshalb, weil sich an dem einfachen Organismus viele grundlegende entwicklungsbiologische und physio-



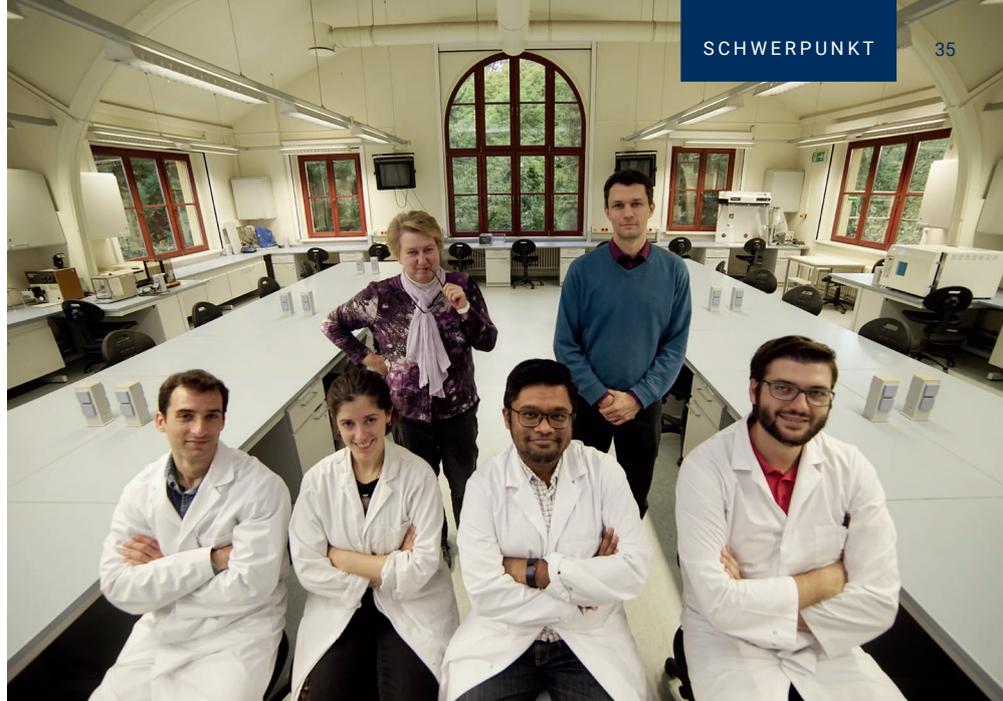
logische Prozesse studieren lassen. Da die Grünalge nur einen **haploiden** (»einfachen«) **Chromosomensatz** enthält, lassen sich gezielte Eingriffe in das Erbgut der Mikroalgen direkt und unmittelbar studieren. *C. reinhardtii* war eine der ersten Grünalgen, deren Genom vollständig sequenziert worden ist, was ihre Bedeutung als Modellorganismus unterstreicht. Die Erbsubstanz umfasst mehr als 15 000 Gene, die teilweise mit pflanzlichen Genen übereinstimmen, aber teilweise auch Gemeinsamkeiten mit tierischen Genen zeigen.

Die Grünalge wird zudem auch immer wichtiger für **biotechnologische Prozesse**. So wird sie zur Erzeugung von Biodiesel oder alternativen Energiequellen wie Wasserstoff eingesetzt. *C. reinhardtii* ist außerdem der erste bekannte pflanzliche Organismus, der zur Energiegewinnung Zellulose – also andere Pflanzen – verdauen kann. Wenn in ihrer Umgebung zu wenig Kohlendioxid vorhanden ist, das sie für die Photosynthese braucht, bildet die Mikroalge Enzyme, die es ihr stattdessen erlauben, Zellulose abzubauen. Damit wird die Alge auch zur **Gewinnung von Biokraftstoffen** aus zellulosehaltigen Pflanzenabfällen interessant.

Bereits im Jahr 2014 kürte die Sektion Phykologie der Deutschen Botanischen Gesellschaft *Chlamydomonas reinhardtii* zur »**Alge des Jahres**«.



Doktorand Prasad Aiyar forscht an Kulturen der einzelligen Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii*.



Forscherguppe um Prof. Dr. Maria Mittag (hinten l.) und Dr. Severin Sasso (hinten r.): David Carrasco Flores, Dr. María García-Altres (HKI Jena), Prasad Aiyar und Daniel Schaeme (sitzend v. l.).

gebracht, welches bei einer Erhöhung des Kalzium-Niveaus ein Aufleuchten verursacht. Somit kann man die Menge des Kalziums über das Leuchten messen«, erklärt Maria Mittag, Professorin für Allgemeine Botanik. In manchen Fällen führen die Änderungen des Kalziums zu Änderungen in der Bewegungsrichtung, wie zum Beispiel nach Lichteinfall. In anderen Fällen, wie nach der Bakterienattacke verursachen sie ein Abfallen der Geißeln.

Chemische »Sprachforschung«

Die Teams haben zudem zeigen können, dass die Bakterien die Algen als Nährstoffquelle anzapfen können, wenn es ihnen an Nährstoffen mangelt. »Wir haben Hinweise, dass auch weitere Substanzen aus dem Giftcocktail, den die Bakterien freisetzen, dabei eine Rolle spielen«, so Maria Mittag. Diese wolle man nun, erneut in Zusammenarbeit mit den Teams von Prof. Hertweck und Dr. Sasso, ebenfalls aufspüren, um die chemische Kommuni-

kation zwischen Algen und Bakterien genau zu verstehen.

Der »chemischen Sprachforschung« zwischen Mikroorganismen und ihrer Umgebung haben sich zahlreiche Forschergruppen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) »ChemBioSys« verschrieben. Mikrobielle Artengemeinschaften kommen in nahezu jedem Lebensraum der Erde vor. »Dabei werden sowohl die Artenzusammensetzung als auch die Wechselbeziehungen von individuellen Organismen einer oder mehrerer Spezies durch chemische Mediatoren reguliert«, macht Prof. Hertweck deutlich, der Sprecher des SFBs ist und am HKI die Abteilung Biomolekulare Chemie leitet.

Ziel des interdisziplinären Forschungsverbundes ist es, die fundamentalen Kontrollmechanismen in den komplexen Biosystemen aufzuklären, die das gesamte irdische Leben prägen. »Wir wollen die Mechanismen verstehen lernen, über die mikrobielle Gemeinschaftsstrukturen entstehen und ihre Vielfalt erhalten bleibt.« Denn da-

von hängen essenzielle Lebensgrundlagen nicht zuletzt des Menschen ab: wie Nahrung oder Atemluft.

Das gilt auch für Mikroalgen wie *Chlamydomonas reinhardtii*. Solche Photosynthese-betreibenden Kleinstlebewesen (Phytoplankton) tragen zu rund 50 Prozent zur Fixierung des Treibhausgases Kohlendioxid bei und liefern als Nebenprodukt der Photosynthese den für uns lebensnotwendigen Sauerstoff. Mikroalgen, die im Süßwasser, nassen Böden oder den Weltmeeren vorkommen, bilden zudem eine wichtige Grundlage für die Nahrungsketten, besonders in aquatischen Systemen. So ernährt sich das Zooplankton in den Ozeanen von den Algen und dient zusammen mit diesen als Nahrungslieferant für Krebstiere, die wiederum Nahrung für Fische sind, bevor diese von größeren Raubfischen gefressen werden – oder von Menschen gefangen. »Gemessen an der immensen Bedeutung der Mikroalgen für unser Leben, wissen wir noch erstaunlich wenig über die Grundlagen und das Zusammenspiel in ihrer Mikrowelt«, sagt Prof. Mittag. ■

Original-Publikation

Antagonistic bacteria disrupt calcium homeostasis and immobilize algal cells. *Nature Communications* (2017), DOI: 10.1038/s41467-017-01547-8

Kontakt

Prof. Dr. Maria Mittag, Dr. Severin Sasso
Matthias-Schleiden-Institut für Genetik,
Bioinformatik und Molekulare Botanik
Am Planetarium 1, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-49 201
+49 36 41 9-49 475
E-Mail: M.Mittag@uni-jena.de
severin.sasso@uni-jena.de
www.botanik.uni-jena.de





Eingang zur
»Unterwelt«:
Grundwassermessstelle
im Nationalpark Hainich
am Reckenbühl.

Überleben in der Unterwelt

Der Untergrund steckt voller Leben. In Böden und Sedimenten, im Grundwasser und sogar im Gestein tummeln sich zahlreiche Mikroorganismen. Doch die Lebensbedingungen in der Tiefe sind hart. Es mangelt an beinahe allem, was Organismen zum Leben brauchen: Nährstoffen, Licht, Energiequellen; hinzu kommt, dass in der Tiefe teilweise extreme Temperaturen und hoher Druck herrschen. Welche Mikroben dieser unwirtlichen Umgebung trotzen und mit welchen Strategien sie ihr Überleben in der Unterwelt sichern, ist bisher noch weitgehend unerforscht. Jenaer Ökologen, Geowissenschaftler und Chemiker verfolgen die Spuren des verborgenen Lebens im Untergrund.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Not macht erfinderisch, sagt ein Sprichwort. Wo es Menschen an Nahrung oder anderen Gütern zum Leben mangelt, wächst die Bereitschaft zum Teilen, Tauschen und Improvisieren. In der unterirdischen Mikrowelt ist das nicht anders, beispielsweise im Grundwasser. Tief im Gestein, wo sich das Niederschlagswasser sammelt, nachdem es durch den Boden versickert ist, ist für Mikroorganismen kein Leben in Saus und Braus möglich. Wer mit dem kargen Nährstoffangebot hier unten fernab oberirdischer Stoffkreisläufe auskommen will, braucht verlässliche Partner.

»Es gibt eine ganze Reihe von Mikroorganismen, die sich im Grundwasser eingerichtet haben«, weiß Prof. Dr. Kirsten Küsel. Bakterien und andere Einzeller führen hier ein Leben auf absoluter Sparflamme. »Die meisten dieser Organismen haben ein stark reduziertes Genom und sind zum Überleben auf Partner angewiesen«, sagt die Ökologin. Um Energie zu sparen, haben viele Mikroben einen Teil ihrer Stoffwechselwege einfach stillgelegt oder gleich ganz abgeschafft und halten nur ein absolutes Notprogramm aufrecht. Das hilft zum Überleben. Deshalb nutzen sie Stoffwechselprodukte von anderen Organismen, die sich ihrerseits für ein anderes Stoffwechsel-Sparmodell entschieden haben und tauschen überlebensnotwendige Substanzen untereinander aus.

Ein solch streng aufeinander abgestimmtes Überlebensnetzwerk macht das Ökosystem in den Grundwasserlei-

tern extrem anfällig, betont Prof. Küsel. »Wenn eine Art Schaden nimmt oder nicht überlebt, trifft das die Partner ebenso.« Wie das unterirdische mikrobielle Gleichgewicht seine Stabilität erhält, wie es überhaupt entsteht und welchen Einflüssen es unterliegt, das untersuchen die Forscherinnen und Forscher in Zusammenarbeit mit zahlreichen Partnern im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1076 »AquaDiva« (siehe S. 11).

Dafür haben sie im Thüringer Hainich eine einzigartige Forschungsplattform etabliert: das »Hainich Critical Zone Exploratory« (CZE). In dem rund zwölf Quadratkilometer großen Freilandlabor gewinnen die Forscher Wasser-, Gas- und Stoffproben aus unterirdischen Kompartimenten, den Böden, der ungesättigten Zone und dem Grundwasser, um diese zu charakterisieren und deren Funktionen zu verstehen.

Die sogenannte »Kritische Zone« erstreckt sich von der bodennahen Atmosphäre bis hinab zu den Grundwasserleitern. Auf sechs Kilometern Länge sind im CZE eine Vielzahl an Mess- und Probenahmestellen eingerichtet worden. Beginnend in den Wäldern des Nationalparks Hainich über Wiesen bis hin zu bewirtschafteten Ackerflächen haben die Wissenschaftler den Untergrund jeweils bis in die Grundwasserleiter hinein angebohrt. »Das geht fast einhundert Meter tief durch Boden und Gesteinsschichten des Quartärs und des Oberen Muschelkalk«, sagt Prof. Dr. Kai



Messrohre einer Grundwassermessstelle für verschiedene Anwendungen wie Grundwasserprobennahme, Sondenmonitoring oder *in situ*-Experimente.

Uwe Totsche, Hydrogeologe und neben Prof. Küsel und Prof. Dr. Susan Trumbore Sprecher von AquaDiva.

Auf diese Weise konnten die Forscher anhand der erhaltenen Bohrkern nicht nur die Böden und den geologischen Untergrund dieses Freilandlabors rekonstruieren. Die entnommenen Wasser- und Gesteinsproben liefern jetzt auch bemerkenswerte Daten über die Mikrobengemeinschaften in der Tiefe.

»Wundersame« Einzeller werden aus den Böden in das Grundwasser gespült

In einer aktuellen Publikation hat das Forscherteam beispielsweise die Artenvielfalt sogenannter Archaeen im Grundwasser und im Gestein charakterisiert. Diese urtümlichen Einzeller besiedeln häufig Lebensräume mit extremen Bedingungen. So sind Archaeen bekannt, die bei Temperaturen von über 100 Grad Celsius leben, etwa in Gebieten mit vulkanischer Aktivität in Geysiren; andere halten extrem hohem Druck oder hohen Salzkonzentrationen stand. Doch auch im Boden kommen Archaeen in erheblichem Maße vor.

Aus der aktuellen Jenaer Studie geht nun hervor, dass die bodenlebenden Archaeen über Wasser- und Stofftransporte aus dem Boden durch die darunterliegenden Gesteinsschichten bis ins Grundwasser gelangen. »Normalerweise sind die Mikrobiome im Waldboden

HINTERGRUND

Um Mikroorganismen in Boden- oder Wasserproben zu identifizieren, nutzen Wissenschaftler heute vorwiegend die Methodik der **Genomsequenzanalyse**. Diese hat gegenüber früheren Methoden, etwa der Kultivierung von Mikroben auf Nährböden, den Vorteil, dass damit auch Organismen analysiert werden können, die sich bislang nicht kultivieren lassen. Außerdem liefert das automatisierte Hochdurchsatzverfahren die Ergebnisse in kürzerer Zeit und benötigt einen Bruchteil an Arbeitsaufwand.

Für die Identifizierung wird ein »**genetischer Fingerabdruck**« der Keime herangezogen. Genau wie ein echter Fingerabdruck kann dieser mit dem anderer Proben verglichen und bereits bekannte Organismen können so eindeutig identifiziert werden. Zusätzlich ermöglicht dieses Verfahren aber auch die Bestimmung bisher gänzlich unbekannter Arten und ihrer verwandtschaftlichen Beziehungen.

In einem ersten Arbeitsschritt wird das Erbgut der Mikroorganismen aus den Wasser- oder Gesteinsproben extrahiert. Dabei ist größte Sorgfalt notwendig, um eine Verunreinigung mit anderen Mikroorganismen, die überall in unserer Umgebung vorkommen, zu vermeiden. Die so erhaltenen, zumeist nur wenigen Erbgutschnipsel werden anschließend in einem automatisierten Verfahren in großer Zahl kopiert. Dabei kommt die »**Polymerase Chain Reaction**« (**PCR**) zum Einsatz. Anschließend werden die genetischen Informationen »ausgelesen«, das heißt, die Sequenz der Erbinformationen bestimmt.

Interessant für die Identifizierung von Mikroorganismen ist unter anderem die sogenannte **16S rRNA**. Diese bezeichnet Abschnitte der **ribosomalen RNA (rRNA)**, die in allen Organismen vorkommen und über den gesamten Zeitraum der Evolution konserviert wurden. Die Ribosomen sind komplexe Gebilde aus Nukleinsäuren und Proteinen, die in allen Zellen vorkommen und an denen die Proteinbiosynthese stattfindet – ein universeller Lebensprozess. Das Gen der 16S rRNA ist zwar einerseits hochkonserviert, das heißt, es kommt in allen Organismen vor, zeichnet sich aber darüber hinaus durch eine sehr hohe Variabilität aus. Mittlerweise stehen in öffentlich zugänglichen internationalen Datenbanken Tausende Sequenzen der 16S rRNA als Vergleichssequenzen zur Verfügung, die eine direkte Identifizierung ermöglichen.

Die Methode wird nicht nur in der Analytik von Umweltproben angewandt. Sie kommt heute praktisch überall zum Einsatz, wo Mikroorganismen identifiziert werden müssen, so zum Beispiel in der klinischen Diagnostik zum Nachweis von Krankheitserregern.

Die Kenntnis der 16S rRNA liefert nicht nur die Grundlage für den Nachweis eines bestimmten Mikroorganismus in einer Probe. Da sich die ribosomale RNA im Laufe der Evolution kaum verändert hat, ist sie eine Art »**molekularer Zeitmesser**«. Sie ermöglicht die Einordnung der jeweiligen Art in den universellen Stammbaum des Lebens und die Ermittlung der nächstverwandten Arten.

Anhand der ribosomalen RNA-Sequenzen ist auch der heute allgemein anerkannte **phylogenetische Stammbaum** allen Lebens erstellt worden. Dieser teilt die auf der Erde lebenden Organismen in drei Domänen ein: die Bakterien, die Archaeen und die sogenannten Eukaryoten, zu denen unter anderem sämtliche höheren Organismen wie Pflanzen, Tiere und Pilze gehören. Was die Mikroorganismen betrifft, so gehen Schätzungen heute davon aus, dass bisher lediglich ein bis fünf Prozent aller Arten überhaupt bekannt sind. Von mehr als 90 Prozent aller Bakterien und Archaeen kennt man bisher lediglich ihre rRNA-Sequenzen, ohne sie jemals in einer Petrischale kultiviert oder mit einem Mikroskop sichtbar gemacht zu haben.



Foto oben: Bohrkernprobe einer Schillkalkbank (Oberer Muschelkalk). Die durch Verkarstung erweiterten Klüfte stellen Fließpfade des Grundwassers dar.

Foto rechts: Beprobung von Grundwasser im »Hainich Critical Zone Exploratory« an einem Standort mit der Bodennutzung als Weideland.

und im Grundwasser völlig verschiedene Welten«, weiß Prof. Küsel. Die Mikroorganismen unterscheiden sich in ihrer Lebensweise deutlich. »Wenn wir also Bodenorganismen im Grundwasser finden, dann ist das kein Zufall«, unterstreicht die Inhaberin des Lehrstuhls für Aquatische Geomikrobiologie und nennt den Eintrag von Oberflächenorganismen ins Grundwasser als Beleg für die enge Verknüpfung von ober- und unterirdischen Lebensräumen.

Obwohl die meisten Archaeen aus dem Boden in Wasser nicht lange überleben, haben die Forscher über den gesamten untersuchten Streckenabschnitt Archaeen in Grundwasserproben nachweisen können. Dies zeige, so ihr Fazit, dass es über die gesamte Strecke zu einem Eintrag ins Grundwasser kommen müsse. »Vor allem im Bereich des Hainich, wo die Grundwasserleiter relativ dicht unter dem Boden verlaufen, war der Eintrag hoch«, so Küsel. Die Organismen, die ihren Umzug aus dem Boden ins Grundwasser am ehesten überlebten, konnten als sogenannte »Thaumaarchaeota« (vom griechischen »thauma« für »Wunder«) und als nach dem amerikanischen Mikrobiologen Carl Richard Woese benannte »Woesearchaeota« identifiziert werden.

In einer weiteren Untersuchung haben die Wissenschaftler die gewonnenen



Bohrkerne aus dem CZE hinsichtlich der in ihnen lebenden Mikroorganismen untersucht. Mikrobiologen und Geowissenschaftler aus den Teams von Prof. Küsel und Prof. Totsche haben den Kernen kleine Gesteinsproben entnommen, die auf darin befindliche Spuren mikrobieller Erbsubstanz untersucht wurden (siehe auch Kasten S. 38).

Lebenszeichen aus Jahrtausenden altem Gestein

Wie sich herausstellte, lassen sich auch im Gestein selbst Lebenszeichen finden: In den fein zerkleinerten Gesteinsproben ließen sich tatsächlich genetische Fingerabdrücke unterschiedlicher Mikroorganismen aufspüren.

»Was wir dabei entdeckt haben, ist, dass die Mikrobengemeinschaften im Zusammenhang mit der Durchlässigkeit, der sogenannten Permeabilität des Gesteins, stehen und damit von der Hohlraumstruktur abhängig zu sein scheinen«, sagt Prof. Küsel. »Das kontrolliert die Kontaktdauer zwischen Wasser und der Gesteinsmatrix und bestimmt damit die Lebensbedingungen der »ökologischen Nischen«, erläutert Prof. Totsche. In Bereichen mit hoher Permeabilität, wo das Wasser vergleichsweise schnell fließt, leben andere Organismen als in Bereichen mit geringer Permeabilität. Zudem unterscheiden sich die Organismen, die in den Gesteinsproben gefunden wurden, von denen aus Vergleichsproben aus dem Grundwasser oder dem Boden.

Ähnlichkeiten zeigten sich dagegen zu Organismen, die bei der Forschungsbohrung INFLUINS im Thüringer Becken entdeckt worden waren. »Hierbei handelt es sich um Proben aus der gleichen geologischen Schicht, die wir auch im Hainich beprobt haben«, macht Totsche deutlich. Denkbar sei, dass die Organismen daher gleichen Ursprungs sind – das müssten jedoch künftige Untersuchungen erst zeigen. Fest steht: Die Gesteine des Muschelkalkes sind bereits über 230 Millionen Jahre alt und aus den Sedimenten eines Meeresbodens entstanden. »Auch dieser Boden steckte einst voller Leben«, sagt Kirsten Küsel. »Möglicherweise haben wir es bei den Steinmikroben also auch mit Nachfahren dieser Urorganismen von vor 230 Millionen Jahren zu tun.« ■

Original-Publikationen

Archaeal diversity and CO₂ fixers [...].
Archaea 2017 DOI: 10.1155/2017/2136287
Aquifer configuration and geostructural links control the groundwater quality [...].
Hydrology and Earth System Science 2017
DOI: 10.5194/hess-2016-374

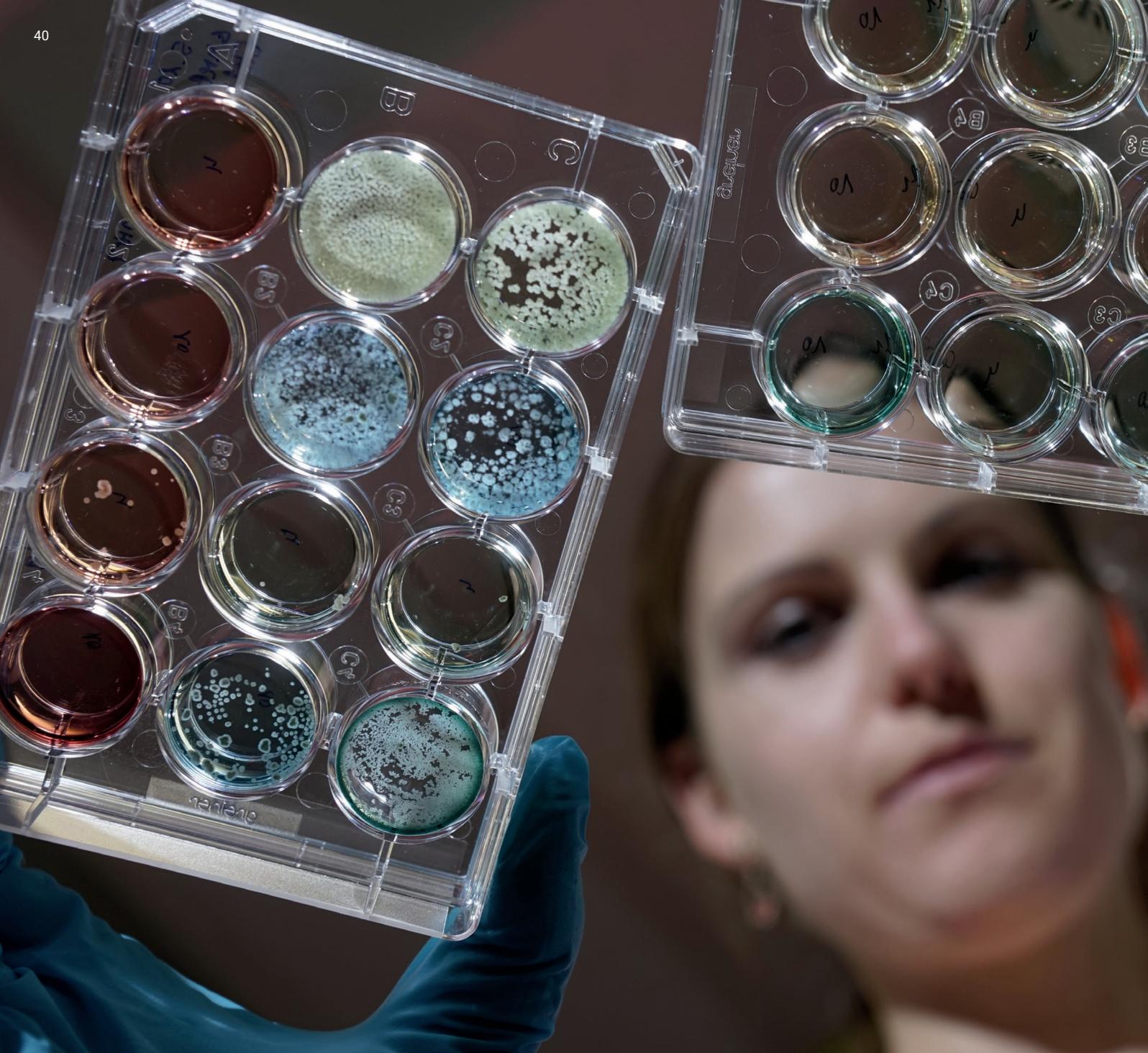
Kontakt

Prof. Dr. Kirsten Küsel
Institut für Biodiversität
Dornburger Straße 159, 07743 Jena
Telefon: +49 36 41 9-49 461
E-Mail: kirsten.kuesel@uni-jena.de
www.geomicrobiology.de



Prof. Dr. Kai Uwe Totsche
Institut für Geowissenschaften
Burgweg 11, 07743 Jena
Telefon: +49 36 41 9-48 651
E-Mail: kai.totsche@uni-jena.de
www.hydro.uni-jena.de





Entstehen und vergehen

Geowissenschaften und Biologie standen lange nebeneinander – fokussiert auf die unbelebte Welt der Gesteine und Minerale einerseits und die belebte Natur der Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen andererseits. Nach und nach zeigt sich aber, dass die beiden Disziplinen mehr miteinander zu tun haben als bisher gedacht. Mikrobiologen der Universität Jena beispielsweise erforschen, wie Bakterien Minerale bilden – und Pilze Gesteine zersetzen.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

Gesteinsbildung wird gemeinhin als geologischer Prozess betrachtet, bei dem biologische Vorgänge kaum eine Rolle spielen. Doch inzwischen ist klar, dass auch Mikroorganismen Minerale bilden können. So sind Mikrobiologen durchaus mit den Prozessen vertraut, durch die Bakterien das Mineral Kalzit (Kalziumkarbonat) an Süßwasserquellen bilden. Dieses Mineral ist in vielen Gesteinsarten vertreten, etwa in Travertin (siehe Kasten S. 43). Normalerweise



Doktorandin Hanka Brangsch vom Institut für Mikrobiologie inspiziert Mikrotiterplatten mit Bakterienkulturen, die mit Schwermetallen wachsen.

besonders der pH-Wert der Umgebung wichtig ist und durch Mikroben beeinflusst wird: Bei hohem pH-Wert (unter alkalischen Bedingungen) fällt Karbonat aus und es entstehen sogenannte Sintergesteine, die aus Kalziumkarbonat bzw. Kalzit bestehen. Ist der pH-Wert niedrig, liegen also saure Bedingungen vor, bleibt das Karbonat im Wasser gelöst. Die Wissenschaftler vom Jenaer Institut für Mikrobiologie machten nun aber eine überraschende Entdeckung, durch die die Rolle der Mikroorganismen bei der Mineralisation möglicherweise ganz neu bewertet werden muss: Sie stellten fest, dass Bakterien auch in saurer Umgebung dafür sorgen, dass Karbonate ausfallen anstatt sich zu lösen.

Scheiden Bakterien Minerale ab?

»Wir haben an den kalkhaltigen Lagen in der Nähe von Bad Kösen verschiedene Bakterienstämme aus dem Grundwasser, dem Gestein und dem Boden entnommen, um dann zu beobachten, ob sie auch unter Laborbedingungen Biomineralisation durchführen können«, erklärt Prof. Dr. Erika Kothe die Vorgehensweise. »Mehr als 92 Prozent der Mikroorganismen bildeten tatsächlich Karbonate – meist Kalzit, in selteneren Fällen auch Magnesium-haltiges Kalzit oder Vaterit.« Etwas weniger als ein Drittel von ihnen schuf dabei eine alkalischere Umgebung, weniger als zwei Drittel übten keinen Einfluss auf den pH-Wert des sie umgebenden Mediums aus. Sechs Stämme sorgten sogar für saurere Bedingungen. »Offensichtlich gibt es einen bisher unbekanntem Prozess, der auch bei niedrigem pH-Wert erlaubt, Minerale zu bilden«, fasst Kothe zusammen.

Bei näherer Betrachtung einzelner Bakterien unter dem Mikroskop stellten die Forscher zudem fest, dass die neu entstandenen Minerale nicht zwangsläufig direkt an den Bakterienzellen angelagert sein müssen, sondern auch entfernt davon auftreten. Das bedeutet, dass es sich um einen diffundierenden, also streuenden, Mechanismus handeln muss, der die Mineralisation auslöst –

wahrscheinlich spielen dabei Substanzen eine Rolle, die die Bakterien ausscheiden. Darüber hinaus unterscheidet sich auch die äußere Form des Präzipitats. »Wir haben sehr unterschiedliche morphologische Versionen gefunden, von rundlich über länglich bis hin zu rosettenförmigen Kristallen«, sagt die Mikrobiologin. Und noch einen erstaunlichen Zusammenhang haben die Jenaer Mikrobiologen festgestellt: Hochgerechnet auf 365 Tage entstehen hier etwa zwei Gramm neues Gestein – das entspricht ziemlich genau dem bekannten jährlichen Wachstum eines Stalaktiten. Der beobachtete Vorgang ist also aus der Natur durchaus bekannt.

Die aktuellen Ergebnisse werfen eine Menge neuer Fragen zur Biomineralisation auf, die Forscher in den kommenden Jahren beantworten wollen. »Unser Ziel ist es, den Prozess, der hinter der Mineralisation steckt, zu identifizieren«, sagt Erika Kothe. »Wir haben damit begonnen, bei einem Bakterienstamm – einem Streptomyceten – Gene auszuschalten und so herauszufinden, welche für die Mineralbildung verantwortlich sind. Dabei konnten wir bereits erste Erfolge verbuchen.«

In der genaueren Erforschung grundlegender Prozesse dieser Art der Mineralbildung steckt sogar Potenzial für praktische Anwendungen: Mit den Informationen kann man beispielsweise bereits die Entwicklung selbstheilender Baustoffe voranbringen. Sporen können in Beton oder Straßenbelag integriert werden, die – wenn sie durch eindringendes Wasser zu keimen beginnen – Mineralisation induzieren und Risse aus dem Inneren heraus wieder schließen.

Für Erika Kothe zeigen die Resultate einmal mehr, wie gewinnbringend die Zusammenarbeit von Mikrobiologen und Geowissenschaftlern ist. »Wir wissen nun, dass Mineralbildung weitaus komplexer ist als gedacht und dass mikrobiologische Prozesse dabei eine wichtige Rolle spielen.« Die beiden Disziplinen führe das noch näher zusammen. An der FSU sind die Grenzen sowieso schon sehr durchlässig: Kooperationen bestehen seit dem Jahr 2000,

fällt Karbonat aus, wenn kaltes Grundwasser an die Erdoberfläche gelangt und sich dort erwärmt. Durch mikrobielle Prozesse unterstützt können sich Kohlensäure und Kalzium schließlich zum Kalzit verbinden. Bei diesem als »Biomineralisation« bezeichneten Prozess sorgen Bakterien dafür, dass festes Karbonat ausfällt: Es bilden sich kleine Kristalle mit unterschiedlichen Formen, die sich im Wasser absetzen. Bisher war man davon ausgegangen, dass dafür



Historische Aufnahme aus dem Jahr 2005: Spitzkegelhalden in Paitzdorf bei Ronneburg im ehemaligen Uranabbaugebiet der Wismut. Die Bergbaulandschaft in Ostthüringen ist inzwischen umfangreich saniert und rekultiviert worden.

2005 mündeten diese in einen eigenen Studiengang Biogeowissenschaften. Seit 2006 arbeiten Nachwuchswissenschaftler in der »Jena School for Microbial Communication« (JSMC) zusammen, die seit 2007 von der Exzellenzinitiative gefördert wird. Im Rahmen dieser Initiative decken die Forscher in vielseitigen interdisziplinären Projekten auf, wie Mikroorganismen ganz verschiedene Lebensbereiche beeinflussen. So konzentrieren sich die Biogeowissenschaftler immer wieder darauf, Methoden zu entwickeln, mit denen Altlasten des Bergbaus beseitigt und Halden wieder genutzt werden können. Einen vielversprechenden Ansatz dafür liefert ein weiteres aktuelles Forschungsergebnis.

Pilze knabbern Steine an

Auch hierbei spielt die biologische Variante eines vor allem aus den Geowissenschaften gut bekannten Phänomens eine wichtige Rolle. Diesmal allerdings steht nicht die Entstehung von Gestein im Vordergrund, sondern das Gegenteil – die Verwitterung. Denn nicht nur Wettereinflüsse und physikalische Prozesse zersetzen Gesteine, auch Organismen tragen zur Verwitterung bei. Die Jenaer Wissenschaftler fanden jetzt heraus, dass Pilze das harte Material angreifen können – und dabei Schwermetalle herauslösen.

»Wenn man gemahlenes Gestein mit diesen Pilzen in Berührung bringt, dann können Metalle freigesetzt werden – das wussten wir«, berichtet Erika Kothe. »Deshalb wollten wir genauer untersuchen, ob das auch bei kompakten Gesteinsproben gelingt.« Die Mikrobiologen vermuteten, dass dafür das kupferhaltige Enzym Laccase eine entscheidende Rolle spielt. Dieses Protein findet man vor allem in holzzersetzenden Weißfäulepilzen, die es benötigen, um Lignin abzubauen. Dieses Biopolymer, das im Holz vorliegt, kann nur von Pilzen vollständig abgebaut werden. Die Forscher ließen deshalb im Labor einen solchen Pilz mit dem lateinischen Namen *Schizophyllum commune* (siehe Kasten rechts) auf Schwarzschieferplat-

Kalzitkristall auf dem roten Mineral Realgar aus China (Mineralogische Sammlung der Uni Jena).

HINTERGRUND

Das Mineral **Kalzit** besteht aus Kalziumkarbonat. Es ist ein meist farbloses Mineral, das sich in saurem Milieu unter Gasentwicklung (frei werdendes Kohlendioxid) auflöst. Charakteristisch für Kalzitkristalle ist ihre Doppelbrechung, daher auch ihr Beiname »**Doppelspat**«: Einfallendes Licht wird in zwei Lichtstrahlen aufgespalten, die unterschiedliche Brechungsindizes aufweisen. Kalzit ist ein gesteinsbildendes Mineral und kommt u. a. in Marmor und Kalkstein vor. Auch Stalaktiten und Stalagmiten in Tropfsteinhöhlen bestehen aus Kalzit.

Das chemisch dem Kalzit verwandte **Vaterit** besteht ebenfalls aus Kalziumkarbonat, unterscheidet sich von diesem jedoch in seiner Kristallstruktur. Dadurch hat das wesentlich seltenere Vaterit andere Eigenschaften: Es bildet nur kleine, faserige Kristalle und ist schwerer löslich als Kalzit. Vaterit bildet sich in mineralreichen Quellen und auch in organischem Gewebe. So ist das Mineral beispielsweise Bestandteil von Gallen- und Nierensteinen.



Das Gestein **Travertin** besteht zum überwiegenden Teil aus Kalzit (Kalziumkarbonat), das als »Süßwasserkalk« aus warmen oder kalten Quellen ausfällt. Bekannt sind beispielsweise die »Travertinterrassen« in Pamukkale (Türkei) oder im Yellowstone-Nationalpark in Mammoth Hot Springs (USA). Das Gestein ist von heller, meist gelblicher und brauner Farbe und weist eine poröse Struktur auf. Es findet Anwendung als Baumaterial: Zahlreiche historische Bauten, wie Kirchen, bestehen aus Travertin.

Der Pilz **Schizophyllum commune** (Gemeiner Spaltblättling) ist einer der weltweit am weitesten verbreiteten Pilze. Besonders interessant ist, dass dieser Pilz über 20 000 verschiedene »Geschlechter« bzw. Paarungstypen ausbildet und damit eine ebenso große Anzahl von Möglichkeiten, sich sexuell fortzupflanzen. Er kommt als typischer Weißfäuleerreger an Laub- und Nadelbäumen vor.

Schizophyllum commune produziert Fruchtkörper an totem Holz, aber auch auf Petrischalen. Er ist u. a. in der Sonderausstellung »Dem Geruch auf der Spur – Die chemische Sprache der Natur« bis Herbst 2018 im Phyletischen Museum der Uni Jena zu sehen.



ten von Halden des Schaubergwerks Morassina oder aus dem ehemaligen Uranabbaugebiet der Wismut AG bei Ronneburg in Thüringen wachsen. »Dabei stellten wir fest, dass sich der Pilz etwa 200 Nanometer tief in den Stein hineinfrisst«, erklärt die Wissenschaftlerin. »Schwarzschiefer ist reich an organischem Material, das sich der Pilz als Nahrung herauslöst.«

Um nun festzustellen, was letztlich ausschlaggebend für diese Leistung ist, schalteten die Forscher einzelne Gene des Pilzes aus. Nach dem Knock-out des Gens, das für die Bildung von Laccase verantwortlich ist, erhielten sie den Beweis für ihre Hypothese. Zudem fanden sie heraus, dass *Schizophyllum commune* in Verbindung mit dem Gestein besonders viel des Enzyms herstellt – möglicherweise weil er auch mehr benötigt, um an seine Nahrung zu gelangen.

Diese Erkenntnisse könnten dabei helfen, neue Methoden zur Sanierung ehemaliger Bergbauflächen zu entwickeln. Denn durch die Zersetzung des organischen Materials im Gestein löst der Pilz die darin eingelagerten Schwermetalle heraus. Diese werden somit im Wasser konzentriert. Dank des Pilzes könnten solche Schwermetallrückstände also biologisch saniert werden. »Uns zeigt das vor allem einmal mehr, welches Potenzial in den Mikroorganismen steckt«, sagt Erika Kothe. »Und das werden wir auch in Zukunft weiter erforschen – nicht zuletzt gemeinsam mit unseren Kollegen aus den Geowissenschaften.« ■

Original-Publikationen

Stone-Eating Fungi [...]. *Advances in Applied Microbiology* (2017), DOI: 10.1016/bs.aams.2017.01.002; Calcium carbonates: Induced biomineralization with controlled macromorphology. *Biogeosciences* (2017), DOI: 10.5194/bg-2017-251

Kontakt

Prof. Dr. Erika Kothe
Institut für Mikrobiologie
Neugasse 25, 07743 Jena



Telefon: +49 36 41 9-49 291
E-Mail: erika.kothe@uni-jena.de
www.mikrobiologie.uni-jena.de

Bildgebung per »Röntgenblick«

Mit ultrakurzen Röntgenpulsen lassen sich Prozesse und Strukturen bis in den Nanometer-Bereich auflösen. Erzeugt werden solche Röntgenpulse üblicherweise in riesigen Teilchenbeschleunigern, wie dem DESY in Hamburg. Doch deren Einsatzmöglichkeiten sind begrenzt und der Betrieb der Anlagen ist extrem teuer. Jenaer Physiker entwickeln daher »handliche« Lasersysteme, mit denen sich ultrakurze Röntgenpulse auch im kleineren Labormaßstab erzeugen und für eine Vielzahl von Anwendungen im eigenen Labor nutzen lassen.

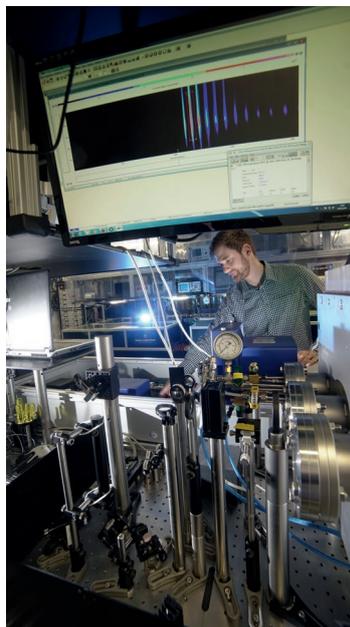
TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

Beim Augenarzt gehört sie fast schon zum Standardprogramm: die optische Kohärenztomografie. Mit diesem Bildgebungsverfahren lassen sich durch Infrarotstrahlung die verschiedenen Schichten der Netzhaut durchdringen und dreidimensional genauer untersuchen, ohne dass das Auge überhaupt berührt werden muss. Mediziner können so Erkrankungen wie den Grünen Star ohne Eingriff erkennen.

Doch diese Methode hätte noch weitaus größeres Potenzial für die Naturwissenschaften, wenn man die Wellenlänge der verwendeten Strahlung stärker verkürzen und somit eine höhere Auflösung des Bildes erhalten könnte. Physikern aus Jena ist genau das gelungen. Über ihre Forschungsergebnisse berichten sie im Fachmagazin »Optica«.

Erste XUV-Kohärenztomografie im Labormaßstab

Die Physiker verwendeten für das Verfahren erstmals im eigenen Labor erzeugte extreme ultraviolette Strahlung (XUV) und führten somit die erste XUV-Kohärenztomografie im Labormaßstab durch. Die Wellenlänge dieser Strahlung liegt bei etwa 20 bis 40 Nanometern – von dort ist es also nur noch ein kleiner Schritt bis zum Röntgenbereich. »Um XUV-Strahlung zu erzeugen, sind normalerweise Großgeräte, also Teilchenbeschleuniger wie das Deutsche Elektronen-Synchrotron in Hamburg, notwendig«, erklärt Silvio Fuchs vom Institut für Optik und Quantenelektronik. »Demzufolge wäre eine Untersuchungsmethode dieser Art also sehr aufwendig, teuer und nur für wenige Forscher verfügbar.« Die Jenaer Physi-



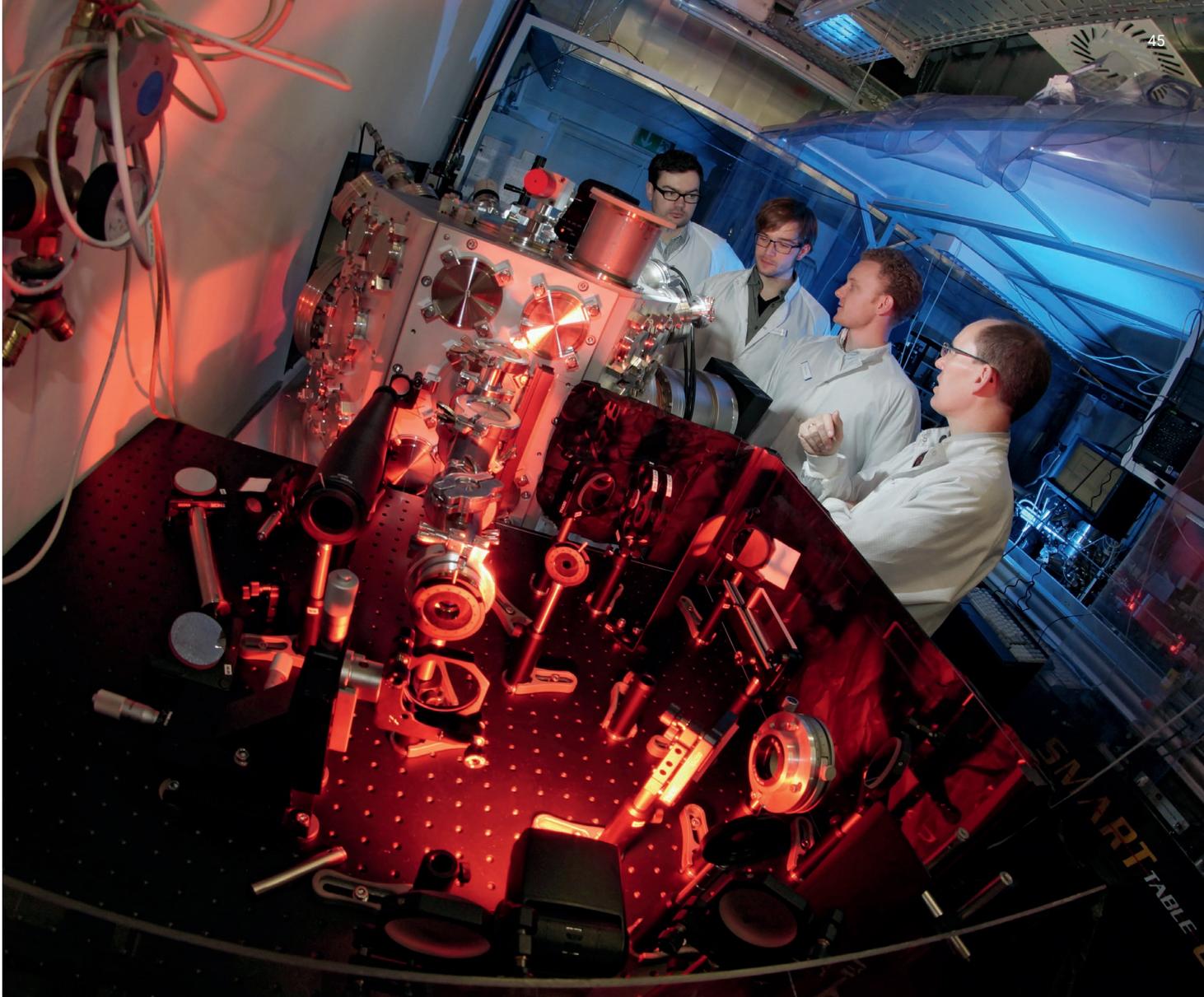
Die Erzeugung und Anwendung extrem ultravioletter Strahlung ist zu einem Schwerpunkt an mehreren Forschungsinstituten in Jena geworden. Hier zu sehen ist Physik-Doktorand Robert Klas hinter einem solchen Versuchsaufbau. Er und seine Kollegen aus dem Team um Prof. Dr. Jens Limpert fokussieren Laserpulse in einen doppelbrechenden Kristall, wobei die Frequenz des ursprünglich infraroten Lichts verdoppelt wird. Das Ergebnis sind Laserpulse im grünen Wellenlängenbereich. Diese werden in einem zweiten Schritt der sogenannten kaskadierten Frequenzkonversion erneut fokussiert, woraus noch höherfrequente Pulse im XUV resultieren. Das Team um Limpert ist führend u.a. in der Entwicklung von Ultrakurzpuls-Lasern mit sehr hoher mittlerer Leistung, die dann zur Erzeugung intensiver XUV-Strahlung angewandt werden kann.

ker konnten diese Methode bereits an Großforschungsanlagen demonstrieren, doch nun haben sie eine Möglichkeit gefunden, sie auch im kleineren Maßstab anwenden zu können.

Dazu fokussierten sie einen ultrakurzen, sehr intensiven Infrarotlaser in ein Edelgas, etwa Argon oder Neon. »Durch einen Ionisationsprozess werden die Elektronen im Gas beschleunigt«, erklärt Fuchs. »Diese emittieren dann die XUV-Strahlung.« Zwar sei diese Methode sehr ineffizient, da nur etwa ein Millionstel der Laserstrahlung auch tatsächlich vom infraroten in den extrem ultravioletten Bereich umgewandelt werde, aber dieser Verlust lasse sich durch den Einsatz von sehr starken Laserquellen ausgleichen. »Die Rechnung ist einfach. Je mehr wir hineingeben, desto mehr bekommen wir auch heraus«, sagt der Jenaer Experte.

Starke Bildgebungscontraste entstehen

Der Vorteil der XUV-Kohärenztomografie ist, neben der sehr hohen Auflösung, dass die Strahlung stark mit der Probe interagiert, denn verschiedene Stoffe reagieren unterschiedlich auf das Licht. Einige absorbieren mehr und andere weniger. Es entstehen also starke Bildgebungscontraste, die den Forschern wichtige Informationen, etwa über die materielle Zusammensetzung des zu untersuchenden Objektes, liefern. »Wir haben beispielsweise zerstörungsfrei dreidimensionale Abbildungen von Siliziumchips erstellt, auf denen man das Trägermaterial und aus anderen Materialien bestehende Strukturen gut voneinander unterscheiden kann«, erklärt



Von rechts: Prof. Dr. Gerhard G. Paulus, Silvio Fuchs, Martin Wünsche und Dr. Christian Rödel an einer lasergetriebenen Röntgenquelle. Die Physiker wollen Röntgenpulse für neue Bildgebungsverfahren nutzbar machen, etwa zur Untersuchung von Zellen.

Silvio Fuchs. »Sollte dieses Verfahren auch in der Biologie Anwendung finden – etwa bei der Untersuchung von Zellen, was eines unserer Ziele ist –, dann wäre dort das vorherige Einfärben der Proben, wie in anderen hochauflösenden Mikroskopiemethoden üblich, nicht nötig. Elemente wie Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff würden selbst den Kontrast liefern.« Bis dahin haben die Physiker aber noch einige Arbeit vor

sich. »Mit unserer bisherigen Lichtquelle erzeugen wir eine Tiefenaufklärung von bis zu 24 Nanometer. Das reicht zwar schon aus, um kleine Strukturen, beispielsweise in Halbleitern abzubilden, jedoch liegen die Strukturgrößen aktueller Chips teilweise bereits unter dieser Marke.

Mit neuen, noch stärkeren Lasern sollte es aber in Zukunft möglich sein, mit der Methode bis zu drei Nanometer

Tiefenaufklärung zu erreichen«, informiert Fuchs. »Grundsätzlich haben wir gezeigt, dass man diese Methode im Labormaßstab verwenden kann.« Langfristiges Ziel könne es schließlich sein, ein preisgünstiges und bedienungsfreundliches Gerät zu entwickeln, das Laser und Mikroskop vereint und etwa der Halbleiterindustrie oder biologischen Laboren dieses Bildgebungsverfahrens unkompliziert ermöglicht. ■

Original-Publikation

Optical coherence tomography with nano-scale axial resolution using a laser-driven high-harmonic source. *Optica* (2017), DOI: 10.1364/OPTICA.4.000903

Kontakt

Silvio Fuchs
Prof. Dr. Gerhard G. Paulus
Institut für Optik und Quantenelektronik
Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-47 615
+49 36 41 9-47 201
E-Mail: silvio.fuchs@uni-jena.de
gerhard.paulus@uni-jena.de
www.ioq.uni-jena.de



GPS für Antibiotika

Woher weiß der Wirkstoff eigentlich, wo er hin soll? Und wie gelangt der Wirkstoff aus der Blutbahn genau dort hin? Mit polymerbasierten Nanosystemen wollen Jenaer Forscher Medikamente künftig zielgerichtet an den Infektionsherd lotsen und Wirkstoffe – etwa Antibiotika – punktgenau dort abliefern, wo sie gebraucht werden.

INTERVIEW: AXEL BURCHARDT

Sie sind Experte für neuartige Batterien auf Polymerbasis, selbstheilende Materialien, innovative Anwendungen des Tintenstrahldrucks. Wieso entwickeln Sie und Ihr Team aus Chemikern und Materialwissenschaftlern jetzt auch noch neue Medikamente?

Ein weiteres unserer Spezialfelder sind Pharma-Polymere, also Kunststoffe für den Einsatz in der Medizin. Gemeinsam mit der starken Universitätsmedizin und den außeruniversitären Instituten konnten wir in diesem Bereich eine Stärke entwickeln, die sich im neuen Sonderforschungsbereich »PolyTarget«, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, niederschlägt. Darin wollen wir Wirkstoffe so verpacken, dass sie ohne Nebenwirkung zielgerichtet an die Krankheitsherde kommen.

Wieso sollen Wirkstoffe gerade in Nanopartikel verpackt werden und wieso sind gerade die für Infektionskrankheiten besonders geeignet?

Es gibt viele bekannte Antibiotika, die nicht eingesetzt werden können, weil sie zu viele Nebenwirkungen haben: Die Dosis ist zu hoch, sie verteilen sich überall im Körper. Und es gibt viele mögliche neue Antibiotika, die nicht zum Einsatz kommen können, weil sie nicht wasserlöslich und dadurch nicht bioverfügbar sind. Wir bieten Lösungen für diese beiden Einschränkungen. Wir verpacken die Wirkstoffe in kleinen polymerbasierten Nanopartikeln. Dadurch werden viel weniger Nebenwirkungen hervorgerufen, auch weil die Dosen kleiner werden können, denn wir sorgen dafür, dass sie Organ- und Zell-spezifisch aufgenommen werden. Diese neuen Pharma-Polymere entwickeln wir mit Robotik, mit Hochdurchsatzmethoden, und das gemeinsam mit unseren Kollegen aus der Medizin, bis hin zur Anwendung.

Ihre Nanopartikel sind Container für diese Wirkstoffe. Wie sieht denn der ideale Wirkstoffcontainer aus?

Der ideale Wirkstoffcontainer ist natürlich nicht giftig, ist bioabbaubar und am Ende werden all seine ungefährlichen Bestandteile wieder ausgeschieden. Außerdem hat er ein GPS-System, mit dem wir programmieren können, in welches Organ, in welche Zelle der Container gelangen muss. Zudem enthält der Container Farbstoffe, so dass man mit einer mo-



Chemiker und Materialwissenschaftler Prof. Dr. Ulrich S. Schubert ist Sprecher des Sonderforschungsbereichs (SFB) 1278 »PolyTarget« (siehe auch Kasten S. 11). Das Forschungskonsortium unterstützt die an Universität, Uni-Klinikum und außeruniversitären Instituten in Jena breit aufgestellte Sepsis- und Infektionsforschung mit innovativen Trägermaterialien zur zielgerichteten Applikation von Arzneistoffen.

dernen Mikroskopie nachvollziehen kann, wo er hingehet und man diesen dann noch weiter optimieren kann.

Der SFB ist zuerst ein Grundlagenforschungsprojekt, bei dem wir ein Verständnis dafür entwickeln wollen, welche Größe, welche Ladung und welche Art von Polymer muss ich nehmen, um ein genetisches Material oder ein Antibiotikum oder ein Peptid an den gewünschten Ort zu liefern. Wir wollen eine Plattform entwickeln, die es erlaubt, auch zukünftig neue Medikamente in relativ kurzer Entwicklungszeit soweit zu bringen, dass man andere Krankheiten damit heilen kann.

Sie haben bislang nie bei Grundlagenforschung aufgehört. Ist es geplant, die Nanocontainer auch ganz praktisch in Therapie und Diagnostik zu überführen?

Auch das ist natürlich geplant. Wir haben bereits eine Ausgründung, die SmartDyeLivery GmbH, die in Kürze zusammen mit dem Universitätsklinikum für ein ganz spezielles Krankheitsbild, die septische Cholestase, bereits im Großtiermodell arbeitet. Es gibt verschiedene anwendungsnahe Projekte mit der Industrie. Wir gehen das parallel an.

Wann darf man auf die ersten Polymer-Nanocontainer im Einsatz hoffen?

Das wird davon abhängen, wie lange man für die medizinischen Regularien und Studien benötigen wird. Ziel des SFBs ist es auf jeden Fall, bereits in vier Jahren eine gewisse Translation hinzubekommen, so dass Nachfolgeprojekte auch direkt mit Firmen durchgeführt werden können.

Das Feld ist so riesig, kann man das selbst mit einem so vielfältigen Team überhaupt bewältigen?

Wir haben uns natürlich eingeschränkt. Die Nanomedizin, die wir betreiben wollen, nutzen wir wirklich nur für infektionsbezogene Krankheiten, u. a. Sepsis. Denn dabei sind wir hier am Standort Jena stark, mit den anderen Schwerpunkten an der Universität und den außeruniversitären Instituten. Nur zusammen können wir die kritische Masse erreichen. Aber wir haben das Glück, dass wir hier in Jena u. a. Medizin, Pharmazie, Biochemie, die Makromolekulare Chemie und Materialwissenschaften haben. Es gibt nicht viele Standorte, die das alles zusammen bieten können.

Das Kalenderblatt: Mythos Oktoberrevolution

Vor gut einhundert Jahren – am 25. Oktober 1917 – übernahmen die Bolschewiki in Russland die Macht von der provisorischen Regierung. Der Handstreich im Winterpalais wurde zur Großen Sozialistischen Oktoberrevolution verkürt und später entsprechend bebildert. Ein Mythos, der sich bis in die heutige Zeit gehalten hat.

TEXT: STEPHAN LAUDIEN

Der Schuss des Panzerkreuzers »Aurora« (zu deutsch »Morgenröte«) gab das Signal zum Sturm auf das Winterpalais und läutete zugleich das neue Zeitalter des Kommunismus ein. Tausende Bolschewiki stürmten den verhassten Zarenpalast in Petrograd und errangen den Sieg, ein leuchtendes Fanal für die Arbeiter auf der ganzen Welt.

Was für eine Geschichte! Doch leider ist sie falsch. »Die Oktoberrevolution war von Beginn an ein Mythos und wurde als solcher inszeniert«, sagt der Osteuropahistoriker Prof. Dr. Jörg Ganzenmüller von der Uni Jena. Schon der Begriff »Revolution« sei nicht haltbar: Es gab 1917 keine revolutionären Massen auf den Straßen, sondern vielmehr eine konzertierte Aktion, in der die provisorische Regierung verhaftet und strategisch wichtige Punkte in Petrograd besetzt wurden. Jörg Ganzenmüller spricht von einem Staatsstreich. Dennoch lebt bis heute, 100 Jahre später, der Mythos von der Großen Oktoberrevolution fort. Schuld daran sind die Bilder des Ereignisses, besser gesagt die fehlenden Bilder.

Eine Erhebung der Massen fand bereits im Februar 1917 statt. Ursache für die Revolution war eine Versorgungskrise des Russischen Reiches, ausgelöst durch den Ersten Weltkrieg. Nach dem Sturz des Zaren Nikolaus II. lag die Macht in den Händen der provisorischen Regierung, die sie sich jedoch mit den Arbeiter- und Soldatenräten teilen musste, den Sowjets. Die provisorische Regierung führte den unpopulären Krieg weiter, und so rissen Lenin und seine Bolschewiki die Macht an sich.

Historische Aufnahmen zum großen Teil Fiktion

»Die Bolschewiki hatten durchaus Rückhalt unter den Arbeitern und Soldaten«, sagt Jörg Ganzenmüller. Bei den Wahlen zur verfassungsgebenden Versammlung 1918 erzielten sie 25 Prozent. Bei der »Oktoberrevolution« waren die Massen jedoch nicht beteiligt. Später wurde das Ereignis indes entsprechend inszeniert. Einerseits durch Inszenierungen am historischen Ort zu den Jahrestagen, vor allem aber durch den Film »Oktober« von Sergej Eisenstein aus dem Jahr 1927. Die Bilder vom Ereignis, die wir bis heute im Kopf haben, stammen größtenteils aus diesem Film. Jörg Ganzenmüller konstatiert, die Bolschewiki haben der Nachwelt suggerieren wollen, dass die Massen auf ihrer Seite gewesen wären. Tatsächlich aber hatte die Mehrheit der Bevölkerung 1918 die Sozialrevolutionäre gewählt, Agrarsozialisten, die gerade bei den Bauern beliebt waren. »Es ging nach dem Sieg im Bürgerkrieg darum, die Bolschewiki als die revolutionäre Kraft darzustellen«, sagt Prof. Ganzenmüller. Zugleich sollten konkurrierende sozia-



Die Büste zeigt Wladimir Iljitsch Uljanow, genannt Lenin. Die von ihm angeführte »Oktoberrevolution« war eher ein Staatsstreich, von dem bis heute falsche Bilder kursieren.

listische Parteien marginalisiert werden – neben den Sozialrevolutionären vorrangig die Menschewiki –, die im Bürgerkrieg besiegt worden waren.

Der Mythos vom Sturm auf das Winterpalais war sehr wirkmächtig und er fand seinen Weg bis in deutsche Schulbücher. In der DDR wurde die sowjetische Lesart übernommen, in der BRD fanden sich noch in den 1980er Jahren »Bilder« von der Oktoberrevolution, von der es keine Bilder gibt. Bis heute helfen sich Fernsehdokumentationen damit aus, die fehlenden Bilder durch Ausschnitte aus Filmen (vor allem dem von Eisenstein) zu ersetzen. Nur wenige weisen dabei auf die Quelle hin. So lebt der Mythos von der Revolution munter fort.



MEDIZIN

Überleben mit Leukämie

Die zielgerichtete Therapie bei chronischer myeloischer Leukämie (CML) ist auch über die Dauer von elf Jahren wirksam und nebenwirkungsarm. Zu diesem Ergebnis kommt ein Autorenteam um den Jenaer Hämatologen Prof. Dr. Andreas Hochhaus bei einer neuen Auswertung der IRIS-Studie. Diese wegweisende Studie begründete die zielgerichtete Therapie bei CML und die begleitende molekulare Verlaufskontrolle.

TEXT: UTA VON DER GÖNNA



Der Hämatologe Prof. Dr. Andreas Hochhaus hat mit seinem Team die Daten der im Jahr 2000 gestarteten »IRIS«-Studie erneut ausgewertet.

Die chronische myeloische Leukämie (CML) ist die zweithäufigste Form chronischer Leukämien (Blutkrebs). Bei dieser durch eine genetische Störung verursachten Erkrankung des blutbildenden Systems kommt es zu einer starken Vermehrung der weißen Blutkörperchen. Neue Wirkstoffe, sogenannte Tyrosinkinase-Inhibitoren, hemmen zielgerichtet die Aktivität des veränderten Proteins, das in den Leukämiezellen die fortgesetzte Teilung auslöst. Diese Wirkstoffe verbesserten die Therapie der nur durch eine Stammzelltransplantation heilbaren Erkrankung grundlegend.

»Heute leben 83 Prozent der CML-Patienten auch zehn Jahre nach der Diagno-

se, das ist nahe an den Überlebensraten der Normalbevölkerung« nennt Prof. Dr. Andreas Hochhaus, Direktor der Klinik für Innere Medizin II des Jenaer Universitätsklinikums, ein zentrales Ergebnis einer Langzeitauswertung der IRIS-Studiendaten.

Die Studie war im Jahr 2000 gestartet worden, um die Wirksamkeit des Tyrosinkinase-Hemmers »Imatinib« mit der damaligen Standardtherapie, der Gabe des Immunstimulators Interferon alpha, zu vergleichen. »IRIS« steht für »Internationale Randomisierte Studie mit Interferon im Vergleich zu STI571«.

Das therapeutische Ansprechen und die Verträglichkeit von »Imatinib« waren so gut, dass die Mehrheit der Patienten

Exzellenz-Clusterantrag »Aufklärung des Rezeptoms: Von der Biophysik zu klinischen Anwendungen«

Das »Rezeptom«, die Summe aller Rezeptormoleküle eines Organismus, macht mehr als fünf Prozent seiner Proteine aus. Diese **molekularen Schalter** steuern durch Wechselwirkung mit anderen Molekülen eine Vielzahl von Stoffwechselprozessen. Aufgrund ihrer Funktion sind Rezeptoren ideale Angriffspunkte für therapeutische Anwendungen. Ziel des Clusterantrags ist es, das Rezeptom in seiner Vielfalt aufzuklären und aus den gewonnenen Erkenntnissen **neuartige Diagnoseverfahren und personalisierte Therapien** für die Behandlung von Krankheiten zu entwickeln.

Gemeinsame Antragsteller sind die **Universitäten Würzburg und Jena**; Sprecher sind Prof. Dr. Markus Sauer (Würzburg) sowie Prof. Dr. Klaus Benndorf und Prof. Dr. Christian Hübner (Jena).

der Interferon-Gruppe zu dieser Therapie wechselte und »Imatinib« der Standardwirkstoff zur Behandlung dieser Leukämieform wurde. Die Nachverfolgung der Studienteilnehmer liefert nun wertvolle Daten zur Langzeittherapie. Andreas Hochhaus: »Der Wirkstoff ist auch in der Langzeitanwendung effektiv, so dass Patienten zehn Jahre und länger ohne CML-Symptome leben. Die IRIS-Studie hat auch gezeigt, dass sich in dieser Zeit keine kritischen Nebenwirkungen aufsummieren oder verstärken.«

Nicht zuletzt durch die Erfahrungen aus der IRIS-Studie ist die chronische myeloische Leukämie mit ihrer charakteristischen Mutation zur Modellerkrankung für Diagnostik und Therapie vieler Krebserkrankungen mit komplexeren genetischen Auslösern geworden. Erkenntnisse zur individuellen Tumorbio-logie lassen sich beispielsweise nutzen, um gezielt in die molekularen

Tumormechanismen einzugreifen und neue Therapieansätze zu entwickeln. So stehen spezifische Interaktionen von Proteinen und Signalmolekülen – wie zwischen »Imatinib« und der Tyrosinkinase – im Fokus eines aktuellen Clusterantrages, mit dem sich die Universitäten Würzburg und Jena in der Exzellenzstrategie von Bund und Ländern beteiligen (siehe Kasten oben).

Standards für Therapie und Verlaufskontrolle etabliert

Die Wirksamkeit einer CML-Therapie zeigt sich an der Remission, dem Rückgang des Anteils der noch vorhandenen genetisch veränderten Blutkörperchen. Zu ihrer Bestimmung wurde für die IRIS-Studie eine quantitative molekular-genetische Analyse-methode entwickelt, die inzwischen standardmäßig zur Verlaufskontrolle bei CML eingesetzt wird.

Sinkt der Anteil der weißen Blutkörperchen mit der charakteristischen Mutation unter einen Schwellenwert, so gilt die Krankheit als komplett zurückgedrängt.

»Neuere Therapiestudien haben gezeigt, dass Patienten in tiefer Remission die Therapie sicher absetzen können. Das hat wichtige Folgen für die Lebensqualität und auch für die Therapiekosten«, betont Andreas Hochhaus, der in Jena die Deutsche CML-Allianz als Netzwerk aus universitären Zentren, niedergelassenen Hämatologen und Patientenvertretern koordiniert. »Dank der in der IRIS-Studie belegten erfolgreichen zielgerichteten Therapie der CML können wir uns jetzt Fragen widmen, die über die Überlebenssicherung hinausgehen. Das betrifft zum Beispiel bessere Abläufe in der CML-Behandlung und die sozialen und psychologischen Aspekte des Langzeitüberlebens mit der Erkrankung.«

Original-Publikation

Long-Term Outcomes of Imatinib Treatment for Chronic Myeloid Leukemia. *New England Journal of Medicine* (2017), DOI: 10.1056/NEJMoa1609324

Kontakt

Prof. Dr. Andreas Hochhaus
Klinik für Innere Medizin II,
Abteilung Hämatologie und Internistische
Onkologie

Am Klinikum 1, 07747 Jena
Telefon: +49 36 41 9-32 42 01
E-Mail: Andreas.Hochhaus@med.uni-jena.de
www.kim2.uniklinikum-jena.de





Fossilienfund: »Bad Boy« *Ponomarenkia belmonthensis* (oberes Perm von Australien, Alter ca. 250 Millionen Jahre).

Dr. Evgeny V. Yan von der Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) gelungen. Gemeinsam mit dem renommierten Käferforscher Dr. John Lawrence und dem australischen Geologen Dr. Robert Beattie haben sie ihre Entdeckung im Fachmagazin »Journal of Systematic Palaeontology« publiziert. Beattie war es, der die einzigen zwei bekannten fossilen Stücke des Käfers in einem ehemaligen Sumpfbereich in Belmont, Australien, entdeckt hatte.

»Die Käfer, die heute mit knapp 400 000 beschriebenen Arten fast ein Drittel aller bekannten Organismen ausmachen, haben im Perm noch ein Schattendasein geführt«, erklärt der Jenaer Zoologe Beutel. »Die bisher bekannten Fossilien waren ‚altertümlichen‘ Käfern zuzuordnen, die sich unter der Rinde von Nadelbäumen aufgehhalten haben. Sie weisen eine ganze Reihe ‚ursprünglicher‘ Merkmale auf, etwa noch nicht vollständig verhärtete Deckflügel oder eine dicht mit kleinen Höckern besetzte Körperoberfläche.«

Früheste Form des »modernen« Käfers

Die nun entdeckte Art der neu eingeführten Familie *Ponomarenkiidae* hingegen kann trotz ihres bemerkenswerten Alters als »moderner« Käfer bezeichnet werden. Neuartige Merkmale sind die perlschnurartigen Antennen, Antennengruben und der ungewöhnlich schmale, spitz zulaufende Hinterleib. Im Gegensatz zu bislang bekannten Käfern des Perm sind darüber hinaus die Deckflügel durchgehend verhärtet, die Körperoberfläche ist weitgehend glatt und die für die Fortbewegung zuständigen Brustsegmente weisen moderne Merkmale auf, erklärt Insektenpaläontologe Yan. Zudem habe der kleine Käfer an-

PALÄONTOLOGIE

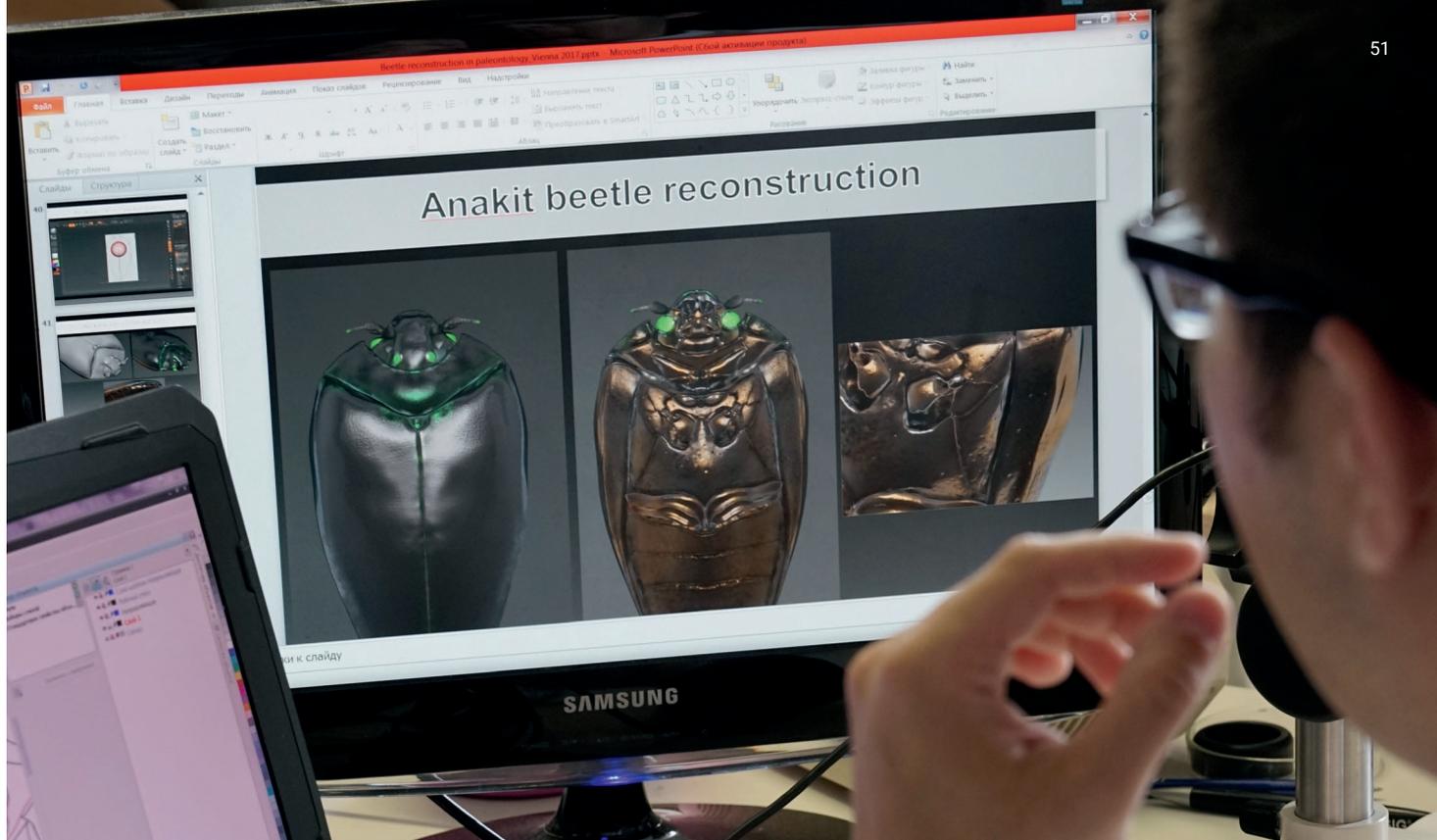
Bad Boy im Käferstammbaum

Einem internationalen Team von Insektenforschern ist es gelungen, anhand eines Fossilienfundes einen längst ausgestorbenen Käfer zu rekonstruieren. Trotz seines stolzen Alters von rund 250 Millionen Jahren überrascht *Ponomarenkia belmonthensis* die Forscher mit seiner recht »modernen« Lebensweise und stellt sie vor ein veritables taxonomisches Problem.

TEXT: JULIANE DÖLITZSCH

Er ist Australier, etwa einen halben Zentimeter groß, recht unscheinbar, rund 250 Millionen Jahre alt – und versetzt Zoologen und Paläontologen gleichermaßen in Erstaunen. Ein Käferfund aus dem ausgehenden Erdaltertum (oberes Perm), dem Zeitalter, in dem noch nicht

einmal die Dinosaurier auf der Bildfläche erschienen waren, wirft ein völlig neues Licht auf die früheste Entfaltung in dieser Insektengruppe. Die Rekonstruktion und Merkmalsinterpretation von *Ponomarenkia belmonthensis* ist Prof. Dr. Rolf Beutel und



Der Insektenpaläontologe Dr. Evgeny V. Yan vor der Computerrekonstruktion von »Flat Bob«, dem ältesten bekannten Taumelkäfer und einem Zeitgenossen des »Bad Boy«.

scheinend den vormalig bevorzugten Aufenthalt unter Rinde aufgegeben und auf Pflanzen eine deutlich exponiertere Lebensweise geführt als seine Zeitgenossen. Wesentlich ist, dass sich die Gattung aufgrund ihrer Kombination ursprünglicher und moderner Merkmale in keine der vier noch lebenden Käfergroßgruppen einordnen lässt, weshalb Yan und Beutel ihr den Beinamen »Bad Boy« gegeben haben.

»*Ponomarenkia belmonthensis* zeigt vor allem, dass die ersten wesentlichen Aufspaltungsereignisse in der Evolution der Käfer schon vor dem Permisch-Triassischen Massenaussterben stattgefunden haben«, berichtet Rolf Beutel. Die Käfer als Ganzes haben dieses dramatische Geschehen inklusive Versauerung der Meere und massiver Vulkaneruptionen wesentlich besser überstanden als die meisten anderen Organismengruppen – vermutlich durch das Leben an

Land und das verstärkte Außenskelett. Der »Bad Boy« jedoch hatte kein Glück: Es gibt im Erdmittelalter keinerlei Spuren mehr von seiner Existenz. Gattung und Familie haben die Jenaer Wissenschaftler dem Moskauer Paläontologen Prof. Dr. Alexander G. Ponomarenko gewidmet. Er prägt die Paläontologie der Käfer seit Jahrzehnten und ist der Doktorvater von Evgeny V. Yan, dem die aufwendigen Rekonstruktionen am Computer und damit die genauen Einblicke in *Ponomarenkia belmonthensis* zu verdanken sind.

Aussagekräftiges 3D Modell erstellt

In einer ersten Phase wurden die zwei Käfer als Abdrücke auf Steinen etwa 40 Mal fotografiert. »Diese Fotoreihe hat eine akkurate 2D-Rekonstruktion ermöglicht, die die Deformationen

am Originalfossil ausgleichen konnte. Damit konnten wir uns dem tatsächlichen Käfer schon nähern«, erläutert der Paläontologe. Basierend auf präzisen Zeichnungen und mit einem speziellen Computerprogramm, das auch für Animationen und Computerspiele eingesetzt wird, entstand ein aussagekräftiges 3D-Modell. »Die 3D-Rekonstruktion erlaubt auch Rückschlüsse auf die Fortbewegung und Lebensweise der Käfer«, so Dr. Yan. Diese Art der Visualisierung und die analytischen Verfahren, in die er auch hypothetische Vorfahren der Käfer einbezieht, hat er seit seiner Ankunft in Jena entwickelt. »Bereits bei drei neu entdeckten, außergewöhnlich alten Käferarten konnten wir das Verfahren anwenden«, freut sich Prof. Beutel. »Damit sind wir der Entschlüsselung der frühesten Evolution einer extrem erfolgreichen Tiergruppe wesentlich nähergekommen.«

Original-Publikation

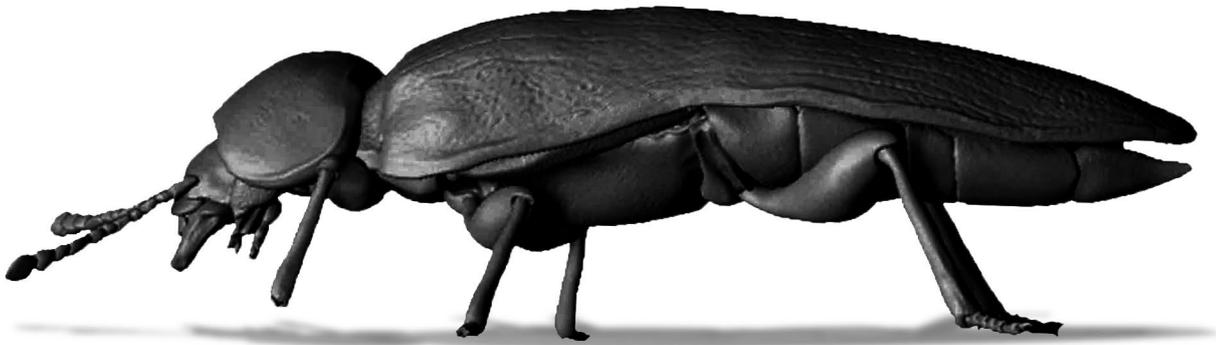
At the dawn of the great rise: †*Ponomarenkia belmonthensis* [...]. *Journal of Systematic Palaeontology* (2017), DOI: 10.1080/14772019.2017.1343259

Kontakt

Prof. Dr. Rolf Beutel
Institut für Zoologie und Evolutionsforschung
Erbertstr. 1, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-49 153
E-Mail: rolf.beutel@uni-jena.de
www.speziellezoologie.uni-jena.de





3D-Rekonstruktion von *Ponomarenkia belmonthensis* basierend auf präzisen Zeichnungen des Holotyps und einer akkuraten 2D-Rekonstruktion. Die Gattung lässt sich aufgrund ihrer ursprünglichen und zugleich modernen Merkmale in keine der vier noch lebenden Käfergroßgruppen einordnen. Daher auch der Beiname »Bad Boy«.

Länger als ein Leben

Wenn sich Forscher im Stammbaum des Lebens verewigen, haben sie nicht immer eine glückliche Hand

KOMMENTAR: UTE SCHÖNFELDER

Vor Kurzem sorgte Donald Trump wieder einmal für Schlagzeilen. »Oh, really?«, mag man denken, »so what?« Denn: Wann tut Donald Trump das einmal nicht? Doch in diesem Fall hat gar nicht er selbst für Wirbel gesorgt, sondern eine neu entdeckte Tierart – eine Motte – für die Donald Trump Anfang 2017 zum Namensgeber wurde. *Neopalpa donaldtrumpi* zielt ein gelbweißer Schuppenschopf, der eine gewisse, nicht von der Hand zu weisende Ähnlichkeit mit der Trumpschen Fönfrisur aufweist. Wer auch immer dem armen Tier diesen Namen verpasst hat, er hielt es vermutlich für witzig. Doch ist die Systematik der Lebewesen ein Feld, auf dem man Witze macht?

Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen – egal ob längst ausgestorben oder im Hamsterrad der fortlaufenden Evolution – alles was krecht und fleucht, wächst, einen Stoffwechsel betreibt und sich fortpflanzt, wird systematisch geordnet. Dank akribisch geführter Taxonomie geht keine Kreatur verloren – zumindest auf dem Papier. Und wenn eine Art aus dem Kreislauf des irdischen Lebens scheidet, weil sie keine Nahrung, keinen Sexualpartner oder Lebensraum mehr findet, weil Klimawandel, eine nachteilige Mutation oder eine Autobahn zu ihrem Aussterben geführt haben – dann bleiben ihr Name und ihr Platz im ewigen Stammbaum des Lebens bestehen. Eingordnet und beschrieben für alle Zeit. Wie lange sich wohl *Neopalpa donaldtrumpi* halten wird? Oder auch die Riesenkrabbspinne *Heteropoda davidbowie* oder der südamerikanische Frosch *Hyloscirtus princecharlesi*?

Eine Frage, die sich bei *Ponomarenkia belmonthensis* erst gar nicht mehr stellt. Denn dieser Käfer ist bereits seit mehr als 250 Millionen Jahren ausgestorben. Trotzdem ist *Ponomarenkia belmonthensis* erst jetzt von einem Forscherteam um den Jenaer Entomologen Rolf Beutel (siehe Seite 50) entdeckt, stammesgeschichtlich einsortiert und wissenschaftlich »getauft« wor-

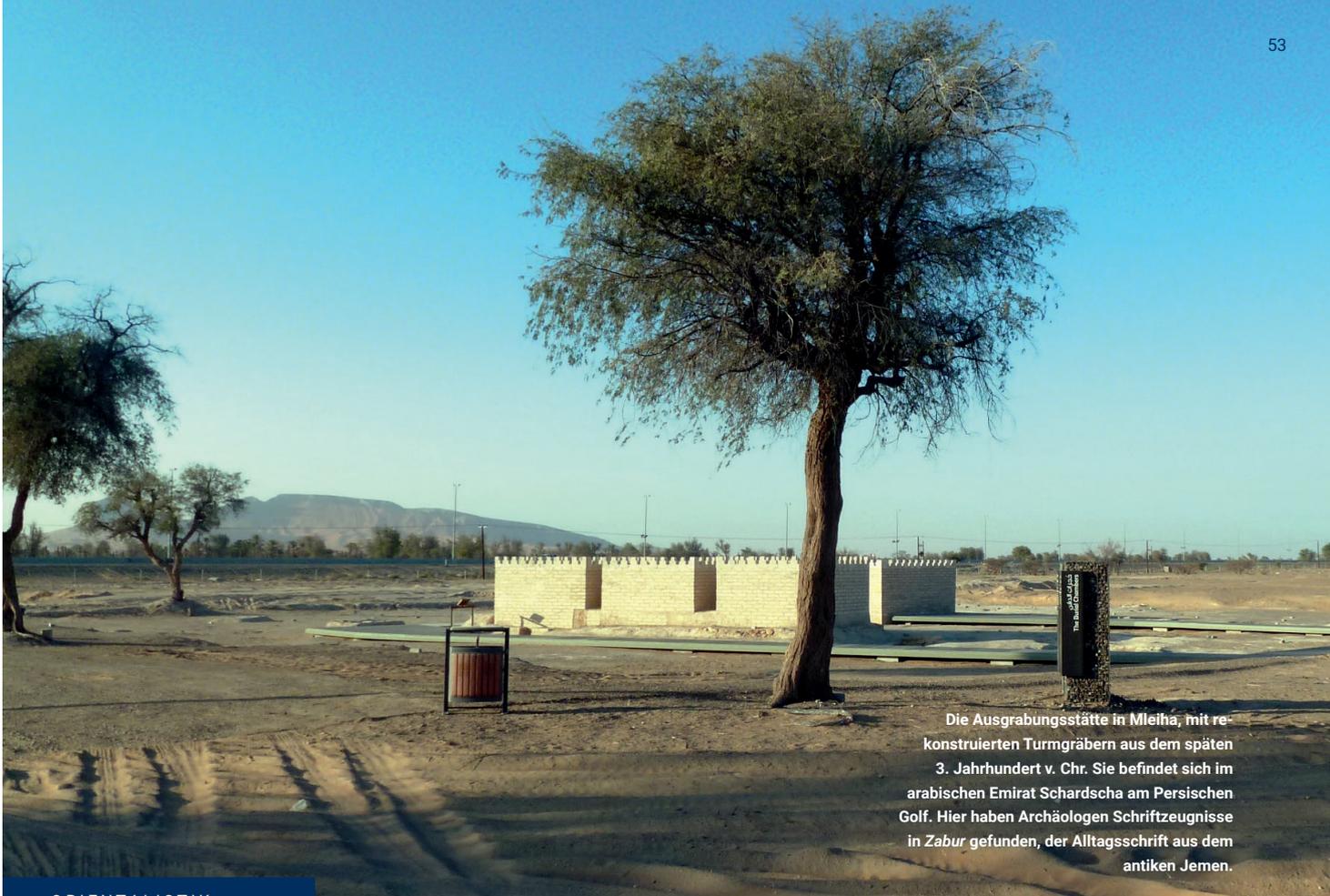
den. Namensgeber für den längst Verblichenen ist der Moskauer Paläontologe Prof. Dr. Alexander G. Ponomarenko – ein Mann, übrigens, mit Durchschnittsfrisur und würdigem Bart. Seine Arbeit als Wissenschaftler aber wird von den Jenaer Kollegen hochgeschätzt, weshalb sie den Käfer – der sowohl Merkmale urtümlicher wie moderner Arten vereint – nach ihm benannten. Doch welchen Stellenwert hat eine solche Wertschätzung, wenn eine blondgefärbte Fönwelle offenbar ebenso zur Namensfindung taugt wie wissenschaftliche Meriten?

Es braucht sicher keine »Prüfstelle für wissenschaftliche Nomenklatur«, die wie ein Standesamt darüber wacht, dass Eltern ihrem neugeborenen Nachwuchs nicht so etwas zumuten, wie »Schneewittchen« oder »Winnetou«. Doch bitte, liebe Taxonomen, bewahren Sie die namenlosen, weil noch unentdeckten Käfer, Würmer oder Motten vor einem Schicksal wie *Neopalpa donaldtrumpi*! Bedenken Sie die Reichweite Ihrer Entscheidung, wenn Sie einem bislang unbekanntem Geschöpf einen Namen geben: Sie schreiben in das ewige Buch des Lebens. Nehmen Sie sich ein Beispiel an den Taufpaten von *Ponomarenkia belmonthensis*! Schließlich, so lehren es Politik und Evolution gleichermaßen: Präsidenten und Käferarten kommen und gehen. Die wissenschaftlichen Namen aller Lebewesen aber bleiben.

Übrigens: Wer sich selbst zum Namensgeber neuer Arten berufen fühlt, der sollte Kontakt mit dem Phyletischen Museum aufnehmen. Gegen eine finanzielle Spende an den Förderverein und mit etwas Geduld kann jedermann zum Taufpaten für bislang namenlose tropische Falterarten werden und die Arbeit der Forscher so unterstützen. Denn die führen einen – nicht zu gewinnenden – Wettlauf gegen die Zeit: Viele der auf der Erde lebenden Organismen werden ihre »Taufe« schlicht und ergreifend nicht erleben, weil sie vorher ausgestorben sind.

Informationen unter:

www.phyletisches-museum.uni-jena.de/falternamen-zu-vergeben



Die Ausgrabungsstätte in Mleiha, mit rekonstruierten Turmgräbern aus dem späten 3. Jahrhundert v. Chr. Sie befindet sich im arabischen Emirat Schardscha am Persischen Golf. Hier haben Archäologen Schriftzeugnisse in *Zabur* gefunden, der Alltagsschrift aus dem antiken Jemen.

ORIENTALISTIK

Geschenke an die Götter

Reisen erweitert den Horizont. Wer andere Menschen und Kulturen kennenlernt, sieht das eigene Leben in einem neuen Licht. Reisende bringen aus der Fremde etwas in die eigene Heimat zurück und hinterlassen Spuren an den Orten, die sie besucht haben. Dass dies schon seit Jahrtausenden gilt, beweisen aktuelle Forschungsergebnisse des Jenaer Semitisten Prof. Dr. Peter Stein: Er hat am Persischen Golf die Inschrift auf einer Silbertafel aus vorislamischer Zeit entschlüsselt, die von der Verehrung der Göttin Allät in der Golfregion zeugt. Bislang waren derartige Gottesgaben nur aus Südarabien, dem heutigen Jemen, bekannt.

TEXT: JULIANE DÖLITZSCH

In Mleiha, einer archäologischen Ausgrabungsstätte, etwa 55 Kilometer östlich von Dubai, im arabischen Emirat Schardscha, machten einheimische Forscher vor einigen Jahren zwei Entdeckungen: Sie gruben eine kleine, silberne Tafel sowie einen abgebrochenen Henkel einer Amphora aus dem späten 3. Jahrhundert v. Chr. aus. Beide Funde sind mit Inschriften in Hasaitisch versehen, der Sprache, die vor 2000 Jahren in der Region gesprochen wurde.

Allerdings: Die Schrift auf den gefundenen Objekten stellte die Forscher vor ein Rätsel, denn sie ähnelte nicht den bislang von dort bekannten Buchsta-

benformen. Lösen konnte dieses Rätsel der Jenaer Semitist Prof. Dr. Peter Stein, der in den zurückliegenden Jahren intensiv die Schriftkultur des antiken Südarabien erforscht hat. Mit Unterstützung durch den Generaldirektor der Archäologiebehörde in Schardscha, Dr. Sabah Jasim, konnte der Jenaer Forscher jetzt die Inschriften am Original studieren und entziffern.

Alltagsschrift *Zabur*

Was die Inschrift zunächst so »unleserlich« machte: Sie ist in *Zabur* geschrie-

ben, in kursiven Buchstaben, die im antiken Jemen für das Alltagsschrifttum verwendet wurden. »*Zabur* wurde meist in kleine Holzstäbchen geritzt«, erklärt Stein. Briefe, Verträge und Urkunden wurden so bereits im frühen 1. Jahrtausend v. Chr. aufgeschrieben und verbreitet. Die »altsüdarabische Minuskelschrift«, wie *Zabur* auch genannt wird, war bis dato nur aus dem Süden der Arabischen Halbinsel, dem heutigen Jemen, bekannt – nicht aber aus der Region um den Persischen Golf.

Auch der Inhalt der Inschriften versetzte die Forscher in Erstaunen: Während



Die Silbertafel aus dem 3. Jahrhundert v. Chr. wurde in der Ausgrabungsstätte in Mleiha am Persischen Golf gefunden. Der Text wurde in *Zabar* geschrieben, was eigentlich typisch für den südarabischen Raum ist. Darauf heißt es: »Li'aggim, die Tochter von Ma'ünlät, hat (der Göttin) Hallät diese Metalltafel dargebracht.«

die Schrift auf dem Henkel der Amphore lediglich auf ihren Besitzer verweist, zeugt die Inschrift auf der rund sieben mal sechs Zentimeter großen Silbertafel von einem religiösen Brauch, der bislang in der Golfregion ebenfalls unbekannt war: »Die Tafel ähnelt in Material und Form den Bronzeplaketten, die typisch für Südarabien waren. Dort wurden sie als Weihgeschenke den Göttern dargebracht.« Die jeweils sechs bis acht Millimeter großen Buchstaben sind in die glatte Metalloberfläche eingestanz. Wie im antiken Südarabien üblich, sind die einzelnen Wörter durch senkrechte Striche voneinander abgegrenzt.

Weihgeschenk für die Göttin Allāt

Und auch der nun entschlüsselte Inhalt der Inschrift stellt klar, dass die Tafel in den Besitz Allāts übergeben wurde, einer in ganz Arabien verbreiteten Gottheit, »die hier, unter der einheimischen Namensform Hallāt, als lokale Hauptgöttin verehrt worden sein könnte«, wie Peter Stein vermutet. Ausgehend von Südarabien müssen die *Zabur*-Schrift und der Brauch, den Göttern metallene Tafeln zu widmen, viele hundert Kilometer zurückgelegt haben, um an der heutigen Fundstelle in der Golfregion heimisch zu werden – vermutlich über den Handel auf der berühmten Weihrauchstraße. Aus zahlreichen im Jemen gefundenen Inschriften ist bekannt, dass es um 300 v. Chr. einen regen Warenverkehr zwischen der antiken Handelsstadt Gerrha im Osten der arabischen Halbinsel und der Region des heutigen Jemen gab. »Die ostarabischen Händler, die keine eigene lokale Schriftsprache entwickelt haben, müssen das südarabische Schriftsystem benutzt und ihre Kennt-

nisse dann mit in ihre Heimat gebracht haben«, vermutet Stein.

Eine zweite Route, die die *Zabur*-Schrift und der religiöse Brauch genommen haben könnten, verläuft entlang der Südküste der Arabischen Halbinsel, durch die Region Hadramawt – den heutigen Osten des Jemen bis nach Oman. Auch hier wurde mit *Zabur*-Schrift auf Holzstäbchen kommuniziert. »Die entstandene lokale Ausprägung des altsüdarabischen Schriftsystems in Ostarabien wird von der Wissenschaft als Hasaitisch bezeichnet«, so Stein. Daneben war in der Golfregion auch die aramäische Schriftsprache bekannt, die seit der Mitte des 1. Jahrtausends im gesamten Vorderen Orient als Verkehrssprache diente. Eine aramäische Weihinschrift an dieselbe Gottheit auf einer Bronzetafel ist schon vor längerer Zeit in Mleiha zutage getreten. Die korrekte Identifizierung dieser Votivgabe konnte jedoch erst vor dem Hintergrund der neugefundenen Silbertafel vorgenommen werden.

Tempel sind noch unentdeckt

Spannend an diesen Weihetafeln sei nicht zuletzt auch die Erkenntnis, dass es in der Nähe von Mleiha Tempel bzw. Weihstätten gegeben haben müsse. »Bislang wurden allerdings, abgesehen von turmartigen Grabanlagen, keine Hinweise auf gemauerte Bauten in jener Zeit gefunden. Die permanente Besiedlung des Ortes durch die ursprünglich wohl nomadische Bevölkerung setzt erst etwa 100 bis 200 Jahre später ein«, erläutert Stein. Die Funde beantworten damit zwar einige Fragen, geben jedoch weitere Rätsel auf, die es zu lösen gilt. ■



Prof. Dr. Peter Stein hat die Inschrift auf der Silbertafel (Foto S. 54) entschlüsselt. Er gehört zu den wenigen Experten weltweit, die die altsüdarabische Minuskelschrift *Zabur* lesen können.



Original-Publikation

South Arabian *zabur* script in the Gulf: some recent discoveries from Mleiha (Sharjah, UAE). *Arabian archaeology and epigraphy* (2017), DOI: 10.1111/aae.12087

Kontakt

apl. Prof. Dr. Peter Stein
Theologische Fakultät
Fürstengraben 6, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-41 114
E-Mail: peter.stein@uni-jena.de
www.theologie.uni-jena.de



CHEMIE

JUMP zieht an – oder nicht

Jenaer Chemiker haben ein magnetisches Polymer entwickelt, dessen »anziehende« Eigenschaften sich gezielt an- oder abschalten lassen. Das Geheimnis der Substanz mit dem Namen »Jena University Magnetic Polymer« (JUMP) liegt in ihrer Struktur: Das regelmäßig strukturierte, dreidimensionale Gerüst ist von Nano-Poren durchzogen, in die verschiedene chemische Moleküle eingelagert werden und so die Eigenschaften des Polymers steuern.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Es sind nur wenige kleine Kristalle, die Chemiker Oluseun Akintola in einem Glasgefäß ins Licht hält. Violett schimmern die Polymer-Krümel, die ansonsten wenig spektakulär aussehen. Das Besondere an ihnen, so erklärt der nigerianische Doktorand vom Lehrstuhl für Anorganische Chemie II, stecke im Detail. »Die Kristalle verfügen über eine immense innere Oberfläche«, so der Sti-

pendiat des Villigst Studienwerks. Ein Gramm des Materials, das auf einem Teelöffel Platz findet, weist eine Porenfläche von gut 150 Quadratmetern auf. Das »Jena University Magnetic Polymer« – kurz JUMP – hat Oluseun Akintola im Rahmen seiner Doktorarbeit am Lehrstuhl von Prof. Dr. Winfried Plass mit den dortigen Kollegen entwickelt und charakterisiert. In der Fachzeit-

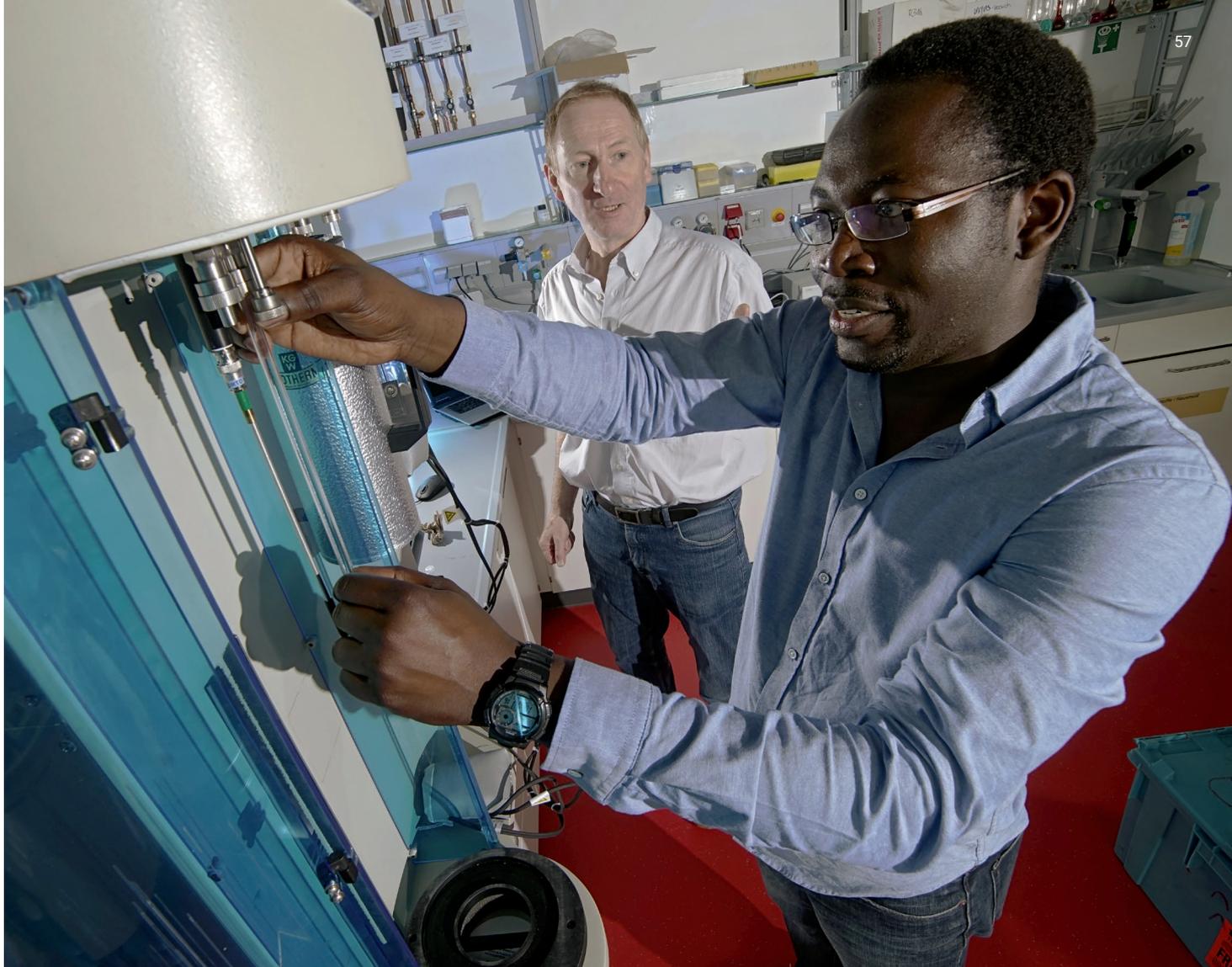
Bild links: Der Doktorand Oluseun Akintola aus Nigeria zeigt in einem Labor am Institut für Anorganische und Analytische Chemie ein kleines Glasröhrchen mit einer winzigen Probe eines porösen Polymers. Das neuartige Material, das die Kombination bisher unbekannter Eigenschaften aufweist, eröffnet neue Möglichkeiten im Bereich schaltbarer magnetischer Substanzen.

Bild rechts: Oluseun Akintola bereitet eine Probe des magnetischen Polymers für die Untersuchung in einem Analysegerät vor. Er promoviert am Lehrstuhl von Prof. Dr. Winfried Plass (im Hintergrund) am Institut für Anorganische und Analytische Chemie.

schrift »CrystEngComm« der Royal Society of Chemistry stellen die Chemiker die Substanz JUMP-1 vor, zu der das Team von Prof. Plass auch das Cover gestaltet hat.

Dreidimensionaler Kristall mit zahlreichen Hohlräumen

Neben seiner inneren Größe besitzt das poröse Polymer als zweite Besonderheit magnetische Eigenschaften. »Diese sind zudem potenziell schaltbar, das heißt wir untersuchen aktuell chemische Modifikationen des Polymers, die den magnetischen Charakter des Materials an- bzw. ausschalten«, erläutert Prof. Plass. Bei dem Material handelt es sich um Schichten eines zweidimensionalen Netzwerkes aus einer magnetischen Cobaltverbindung, die über regelmäßig angeordnete Verbindungsmoleküle verbrückt sind. »Dadurch ergibt sich ein dreidimensionaler Kristall, der zu mehr



als 50 Prozent seines Volumens aus Hohlräumen besteht«, so Plass weiter. In diese Hohlräume können sich verschiedene kleine Ionen oder Moleküle einlagern. »Je nach Eigenschaften dieser Gastmoleküle verändern sich die Eigenschaften des Polymers«, erläutert Plass. Solche porösen Gerüststoffe oder MOFs (Metall-Organic Frameworks) sind keine Jenaer Erfindung, sondern in unterschiedlichster Form bereits seit einigen Jahren gängig.

Neu an JUMP-1 ist jedoch, dass die Brückenmoleküle redoxaktiv sind: Sie können einzelne Elektronen abgeben und erlauben dadurch die magnetischen Eigenschaften der Schichten aus Cobaltionen anzusteuern. Zudem lassen sich in das insgesamt negativ geladene Polymergerüst positiv geladene Gegenionen gezielt einbauen, die ihrerseits das Aufnahmevermögen des Gittergerüsts für Gastmoleküle regulieren und gewissermaßen die »Tür« zu

den Poren gezielt öffnen und schließen. »Auf diese Weise können wir das Polymer je nach möglicher Anwendung konfektionieren«, macht Prof. Plass deutlich. Anwenden lassen sich zukünftige schaltbare magnetische Materialien beispielsweise als hochempfindliche Sensoren für kleine geladene Moleküle. Dank ihrer immensen inneren Oberfläche könnten solche Polymere auch als Katalysatorsubstanzen für chemische Reaktionen nützlich sein.

Original-Publikation
 A robust anionic pillared-layer framework with triphenylamine-based linkers: ion exchange and counterion-dependent sorption properties, *CrystEngComm* (2017), DOI:10.1039/C7CE00369B

Kontakt
 Prof. Dr. Winfried Plass, Oluseun Akintola
 Institut für Anorganische und Analytische Chemie
 Humboldtstr. 8, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-48 130
 E-Mail: Sekr.Plass@uni-jena.de
www.plass.uni-jena.de



Spuren alter Erdbeben ausgraben

Bebt heute in irgendeiner Region auf der Welt die Erde, dann zeichnen technische Hilfsmittel jede kleinste Schwingung auf. Verursacht ein Beben zudem schwere Zerstörungen, sorgt die Nachrichtenlage dafür, dass wir es so schnell nicht vergessen. Doch auch Katastrophen dieser Art, von denen uns keine Aufzeichnungen vorliegen, haben sich in die Geschichte eingegraben. Geowissenschaftler legen ihre Spuren nun wieder frei.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

In den kommenden drei Jahren beschäftigen sich Jenaer Geowissenschaftler mit einer eher unbekannteren Erdbebenzone in Europa: Slowenien und Ostitalien. »Uns sind heute vor allem die schweren Katastrophen der vergangenen Zeit im Zentrum der Apenninhalbinsel präsent, doch auch in der Nachbarschaft dieser Region kann es zu ähnlichen Ereignissen kommen«, erklärt Dr. Christoph Grützner. Er leitet ein Projekt im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Schwerpunktprogramms (SPP 2017), in dem mehrere deutsche Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten und die tektonischen Bewegungen in dieser Region untersuchen.

»Die Adriatische Platte bewegt sich stetig nach Norden auf die Eurasische Kontinentalplatte zu, ungefähr zwei Millimeter im Jahr«, erläutert Grützner. Zwar sei das im Vergleich zu anderen Erdbebenzonen sehr langsam, doch

seismische Aktivitäten blieben deshalb nicht aus. Beben im Mai und September 1976 forderten etwa tausend Menschenleben und richteten erhebliche Zerstörungen in mehreren Städten an.

Schriftliche Zeugnisse historischer Beben sind selten

Eine ähnliche Katastrophe ereignete sich 1511, wie historische Dokumente bezeugen. Durch die große Zeitspanne zwischen den einzelnen Vorkommnissen lassen sich allerdings nur schwer durchschnittliche Wiederholraten an einzelnen Bruchzonen abschätzen, die möglicherweise wichtige Informationen über die seismischen Aktivitäten in dieser Gegend beinhalten.

»Maximal die Römer, unter deren Herrschaft die Region etwa vor 2000 Jahren stand, könnten uns noch mit Informationen versorgen. Über alle anderen Erdbe-

ben davor liegen uns keine schriftlichen Zeugnisse vor«, erklärt Geophysiker Grützner. »In dieser Region könnten also geologische Zeitbomben ticken, was aber niemand weiß, weil sie nur alle paar tausend Jahre explodieren.«

Doch ein genauer Blick auf und unter die Erde kann dabei helfen, Spuren vergangener Erdbeben zu finden. »Zunächst wertere ich am Computer hochauflösende Geländemodelle aus und suche nach bestimmten landschaftlichen Strukturen, die auf tektonische Nahtzonen hinweisen – beispielsweise charakteristisch aussehende Flusstäler«, erklärt Grützner seine Arbeit. »Und schließlich schaue ich mir die Gegend persönlich an.« Vor Ort gräbt der Experte in die Tiefe und legt so Sedimentschichten frei, um auffällige Deformationsstrukturen zu finden. Normalerweise horizontal angeordnete Schichten können durch ein Erdbeben etwa vertikal verformt sein. »So identifiziere ich Störungsstellen, von denen Beben ausgegangen sind und auch in Zukunft ausgehen können, und kann zusätzlich durch die Datierung der Sedimentschichten auch eine mögliche zeitliche Einordnung der seismischen Aktivitäten herausstellen.«

Entstehung der Alpen erforschen

Doch die Region an der Adria ist nicht nur aufgrund von Erdbeben interessant. Die tektonischen Bewegungen der beiden Platten sind auch verantwortlich für die Entstehung der Alpen, wie Prof. Dr. Kamil Ustaszewski ergänzt. Der Professor für Strukturgeologie leitet die Arbeitsgruppe, in die auch Grützners Arbeit integriert ist. »Wir untersuchen, wie sich die Alpen gebildet haben und wie die tiefen Strukturen unter ihnen beschaffen sind«, erklärt Ustaszewski.

Prof. Dr. Kamil Ustaszewski (l.) und Dr. Christoph Grützner studieren eine Karte der Alpen mit dem Gebiet Sloweniens und Nordost-Italiens.





Sichern, nutzen, teilen

Immer größere Mengen an wissenschaftlichen Daten aus Beobachtungen, Experimenten oder Messungen erfordern nicht nur immer größere Rechenkapazitäten – sondern auch ein nachhaltiges Forschungsdatenmanagement. Das wird an der FSU jetzt erheblich ausgebaut.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Satellitenaufzeichnungen von Klimadaten, sozialwissenschaftliche Umfrageergebnisse sowie Wachstumskurven von Volkswirtschaften oder Mikroorganismen – in beinahe allen wissenschaftlichen Disziplinen basieren neue Erkenntnisse heute auf der Auswertung großer Mengen digitaler Daten. Oftmals arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über Jahre an der Sammlung dieser Datensätze, die anschließend riesige Speichermedien füllen und für deren Verarbeitung enorme Rechenleistung erforderlich ist. Nicht ohne Grund sprechen Informatiker daher gerne von »Datenschätzen«. »Oftmals sind solche Messungen wirklich einmalig und nicht einfach zu wiederholen«, macht Prof. Dr. Birgitta König-Ries deutlich. Es sei aus wissenschaftlicher Sicht absolut geboten, diese Datenvielfalt möglichst effizient zu nutzen. Doch bislang finde in der Regel nur ein kleiner Teil der Primärdaten den Weg in wissenschaftliche Publikationen, Datenbanken oder öffentliche Archive, sagt die Inhaberin

der Jenaer Heinz-Nixdorf-Profilur für verteilte Informationssysteme.

Um das zu ändern, setzt die Uni Jena auf einen nachhaltigen und effizienten Umgang mit digitalen Daten und baut ihr Forschungsdatenmanagement aus: Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts werden bis 2019 verschiedene Bausteine für ein effektives und effizientes Forschungsdatenmanagement entwickelt und erprobt. Das Projekt wird mit rund 467 000 Euro gefördert.

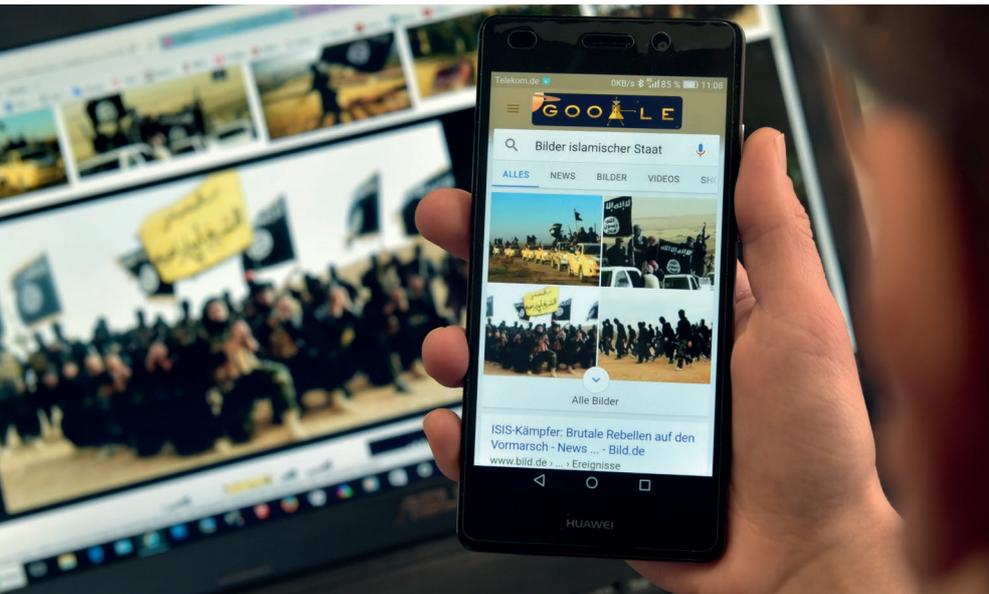
Internationale Infrastruktur

»Unser Ziel ist es, Serviceangebote im Bereich Forschungsdatenmanagement zu erweitern und zu verbessern und das von der Datenerhebung über deren Verarbeitung bis hin zur langfristigen Sicherung der Daten«, sagt Prof. König-Ries, die das Projekt leitet. Konkret wolle man Forscherinnen und

ARA-Cluster des Instituts für Informatik im Uni-Rechenzentrum. Das High-Performance-Computersystem (HPC) arbeitet mit rund 300 Prozessoren. Um aus der heute verfügbaren digitalen Datenflut wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen, gehen Hochleistungsrechnen und datenbasierte Wissenschaften Hand in Hand. Ein nachhaltiges Forschungsdatenmanagement sichert die Datensätze für die weltweite Wissenschaftsgemeinde und eine künftige Nutzung.

Forschern jeweils spezifisch an ihre Fachdisziplin angepasste Beratungen anbieten, etwa zu Datenmanagementplänen, Datenplattformen oder Metadatenstandards. Dafür werden die bereits bestehenden Angebote gebündelt und in der 2015 eingerichteten »Kontaktstelle Forschungsdatenmanagement« koordiniert.

»Darüber hinaus wollen wir die Prozesse zur nachhaltigen Sicherung von Forschungsdaten professionalisieren und diese in eine bundesweite bzw. internationale Infrastruktur einbinden«, ergänzt Roman Gerlach, der neben Prof. König-Ries in der »Kontaktstelle Forschungsdatenmanagement« arbeitet. Gerlach verweist etwa für die Veröffentlichung und Langzeitsicherung von Forschungsdaten auf die bereits bestehende »Digitale Bibliothek Thüringen«. Zudem werde man mit der internationalen Wissenschaftsgemeinde Kriterien und Methoden für eine nachhaltige Qualitätssicherung im Bereich Forschungsdatenmanagement entwickeln.



Der IS wirbt digital für seine radikalen Ziele.

Prävention gegen Terrorismus

Psychologen wollen die Radikalisierung von Jugendlichen verhindern – in Zeiten der Digitalisierung ein immer komplizierter werdendes Unterfangen. Der Bund fördert die Entwicklung von Präventivmaßnahmen mit drei Millionen Euro.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

Wenn es um Terrorismusbekämpfung geht, wird häufig über die Ausstattung der Polizei oder über militärische Einsätze gesprochen. Doch will man nachhaltig gegen politisch oder religiös motivierte Straftaten vorgehen, dann muss man vor allem verhindern, dass die Täter sich in jungen Jahren radikalieren. Deshalb entwickeln Psychologen in den kommenden drei Jahren Präventivmaßnahmen zur Radikalisierung von Jugendlichen. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojektes »Radikalisierung im digitalen Zeitalter« – kurz RadigZ – arbeiten sie dabei mit sieben weiteren Einrichtungen in Deutschland zusammen, organisiert vom Kriminologischen Forschungszentrum Niedersachsen e. V. Das Ministerium fördert das Vorhaben mit drei Millionen Euro, 350 000 Euro davon gehen nach Jena.

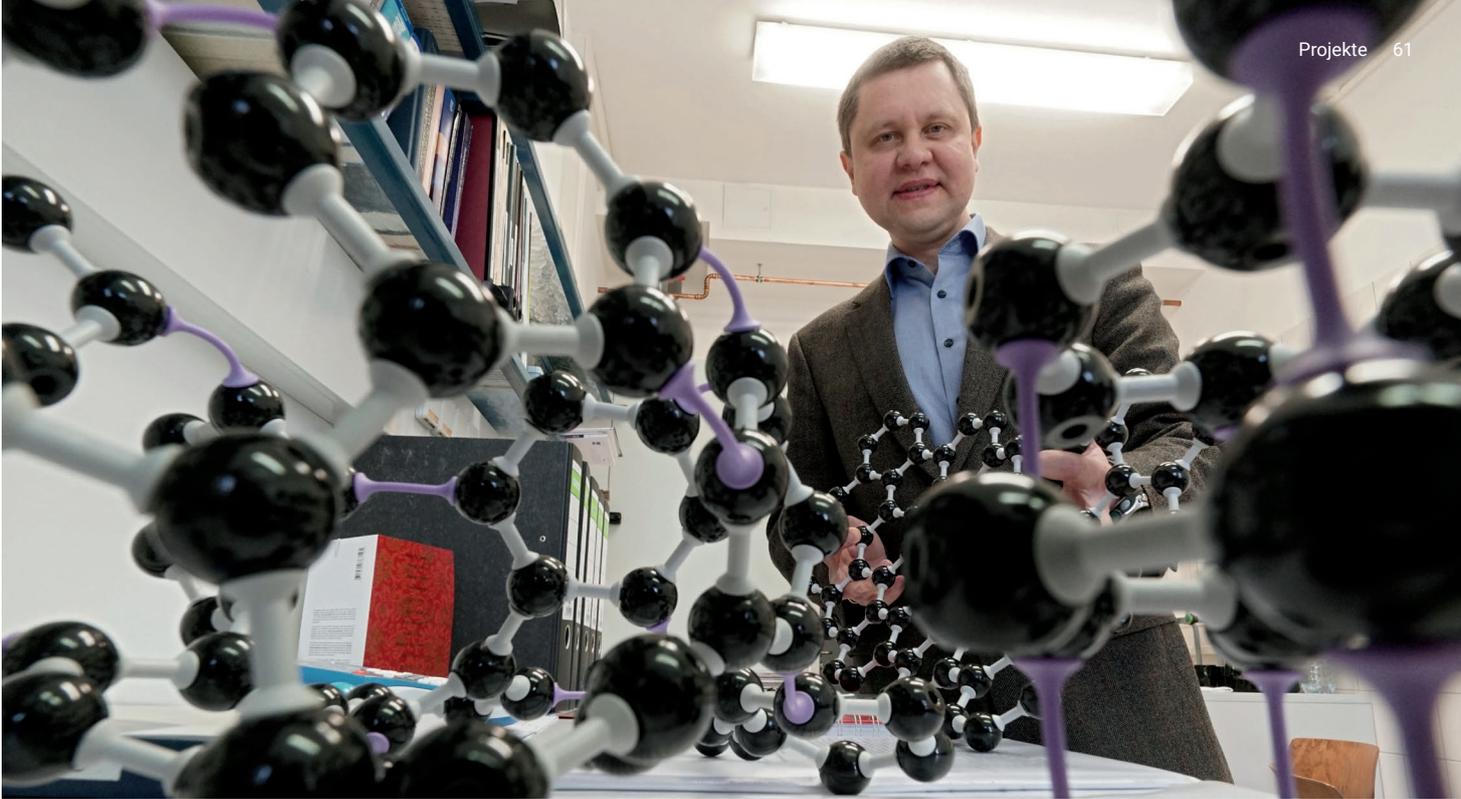
»Prinzipiell gehen wir davon aus, dass Radikalisierungsprozesse sehr ähnlich verlaufen, egal ob es sich etwa um Rechtsextremismus oder religiösen Fanatismus handelt«, sagt Prof. Dr. Andreas Beelmann, der das Projekt an der Universität Jena leitet. »Allerdings hat natürlich das Internet in den vergangenen Jahren die Situation noch einmal dramatisch verändert.« Während Gleichgesinnte früher deutlich mehr Aufwand betreiben mussten, um Kontakt zueinander aufzunehmen, sei das im digitalen Zeitalter wesentlich einfacher und zudem viel schwerer zu kontrollieren. Allerdings muss das nicht gleichzeitig bedeuten, dass sich Jugendliche häufiger radikalieren. »Nach wie vor ist es eine große Minderheit einer Generation, bei der sich radikales Gedankengut auch in strafbaren Handlungen ausdrückt«, sagt der Jenauer Experte.

Gemeinsam mit den Psychologinnen Dr. Sara Jahnke und Clara Neudecker wird er in den kommenden Jahren die internationale und nationale Forschung zur Radikalisierung systematisch erfassen und auswerten. »Dabei schauen wir zunächst darauf, welche Entwicklungsfaktoren bei Heranwachsenden mit extremistischen Einstellungen und Handlungen korrelieren«, erklärt Beelmann. »Dann nehmen wir die durchgeführten Gegenmaßnahmen unter die Lupe und untersuchen, wie wirksam sie letztendlich waren.« Mit den Ergebnissen dieser Analysen wollen die Psychologen neue wirkungsvolle Präventionsmethoden entwickeln, die dann in unterschiedlichen praktischen Kontexten – zum Beispiel Schule, politische Bildung, Ausbildung von Fachkräften – eingesetzt werden können.

Beelmann hat sich vor einigen Jahren bereits des Themas Gewaltprävention bei Kindern und Jugendlichen angenommen. »Dort sind in den letzten 30 Jahren deutliche Fortschritte erzielt worden«, sagt er rückblickend. Auch bei der Radikalisierung von Heranwachsenden gelte es nun, systematisch die Erkenntnisse über Radikalisierungsprozesse in die Gestaltung von Präventionsmaßnahmen einfließen zu lassen. Zudem sieht der Psychologe sozialpolitische Missstände, auf die die Wissenschaftler aufmerksam machen wollen. »So sind etwa Jugendliche ohne Schulabschluss und berufliche Perspektiven eine hoch gefährdete Gruppe, die in der Radikalisierung eine Möglichkeit sehen, sich die Anerkennung zu verschaffen, die ihnen an anderer Stelle versagt bleibt.«

»Zentrum für Rechtsextremismusforschung, Demokratiebildung und gesellschaftliche Integration«

Durch das Projekt wird auch die Arbeit des Zentrums für Rechtsextremismusforschung der Uni Jena um einen Schwerpunkt erweitert. Das Land Thüringen hat zudem seine Förderung für das Zentrum, das nun aufgrund der neuen Aufgaben und Ziele den Namen »Zentrum für Rechtsextremismusforschung, Demokratiebildung und gesellschaftliche Integration« trägt, verlängert und deutlich aufgestockt.



Prof. Dr. Andrey Turchanin untersucht nanoskalige 2D-Materialien wie Graphen.

Das Beste aus zwei Nanowelten

Internationale Wissenschaftler bauen auf einem 2017 zum Patent angemeldeten Halbleiter auf und wollen neue Anwendungen in der organischen Elektronik schaffen. Das EU-Förderprogramm FLAG-ERA unterstützt das vom Jenaer Chemiker Prof. Dr. Andrey Turchanin koordinierte Graphen-Verbundprojekt mit 847 000 Euro.

TEXT: JULIANE DÖLITZSCH

Der Traum eines jeden Forschers: Der Erfindung folgt die Patentanmeldung. Ein bedeutendes Journal veröffentlicht die Ergebnisse. Und schließlich beteiligt sich ein EU-weites Förderprogramm mit einer knappen Million Euro, um die Idee zu implementieren. Eben dieses Ideal hat sich für Prof. Dr. Andrey Turchanin vom Institut für Physikalische Chemie erfüllt.

So hat das EU-Programm FLAG-ERA im Oktober 2016 verkündet, welche Verbundprojekte es in den Bereichen Graphen und Human Brain in den kommenden Jahren unterstützt: Als einziges aus Deutschland koordiniertes Projekt wurde »H2O« – Heterostrukturen von 2D-Materialien und organischen, halbleitenden Nanoschichten – gewählt, das ab diesem Januar für drei Jahre mit 847 000 Euro gefördert wird. Prof. Turchanin, Projektleiter, und Dr. Bert Nickel von der Ludwig-Maximilians-Universität München bauen damit auf ihrer Erfindung

eines Halbleiterfilms aus Pentacen auf, über die das Fachmagazin *Advanced Materials* im vergangenen Mai berichtet hatte. Gemeinsam mit Wissenschaftlern aus den Niederlanden und Schweden entwickeln sie den nur 50 Nanometer dünnen organischen Film weiter.

Addition dünner Substanzen

»Mit der Förderung werden wir neue Anwendungen für unseren zum Patent angemeldeten Halbleiter kreieren, indem wir ihn mit 2D-Materialien wie Graphen und Übergangsmetall-Dichalkogeniden verbinden – und so das Beste aus zwei Welten zusammenbringen«, erklärt Turchanin. Mit einer Vielzahl mikroskopischer und spektroskopischer Untersuchungen analysieren sie zunächst die Eigenschaften der neuartigen nanoskaligen Stoffe. Durch die additive Mikrofabrikation, also das

Stapeln zweier oder mehrerer dünner Substanzen, soll ein neues Material mit den gewünschten Eigenschaften entstehen: »flexibel und biegsam, leitfähig, schaltbar, umweltverträglich«, zählt der Chemiker auf. In der organischen Elektronik sieht er Anwendungsmöglichkeiten wie flexible Displays, tragbare, formveränderliche elektronische Geräte und Photovoltaik.

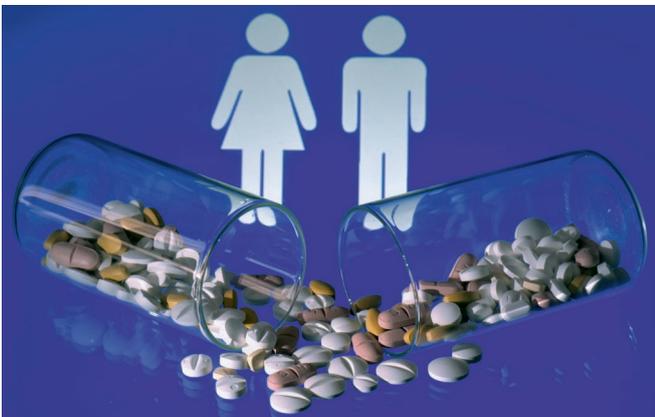
Seit der Entdeckung von freien, einschichtigen Graphenkristallen befassen sich Wissenschaftler weltweit mit der stabilen und reißfesten, dafür umso leichteren Kohlenwasserstoffmodifikation und anderen atomar dünnen Nanoblättern. Das Gebiet gilt als so vielversprechend, dass die EU seit 2013 eine ihrer zwei großen Forschungsinitiativen dem häufig als »Wundermaterial« betitelten Graphen widmet. Jährliche Aufrufe der Förderorganisation FLAG-ERA, neue Ideen einzureichen, sollen komplementäre Forschung anregen.

Getrennte Medizinschränke

Warum Entzündungshemmer bei Frauen und Männern unterschiedlich wirken, liegt am Testosteron

Männer und Frauen sind unterschiedlich anfällig für bestimmte Krankheiten: Entzündliche Erkrankungen wie Asthma, Psoriasis oder Rheumatoide Arthritis sind bei Frauen sehr viel häufiger als bei Männern. Pharmazeuten um Prof. Dr. Oliver Werz haben nun gemeinsam mit Fachkollegen aus Italien, Dänemark und Schweden eine wesentliche Ursache für diese Unterschiede auf molekularer Ebene aufgeklärt. In zwei hochrangigen Publikationen in den Magazinen »Journal of Clinical Investigation« und »Scientific Reports« zeigen sie, wie das männliche Sexualhormon Testosteron in die Biosynthese von Entzündungssubstanzen eingreift und darüber hinaus auch die Wirksamkeit von entzündungshemmenden Medikamenten vermindert (DOI: 10.1172/JCI92885 und DOI: 10.1038/s41598-017-03696-8).

Dazu haben die Forscher in unterschiedlichen Tiermodellen, aber auch an Immunzellen aus dem Blut von männlichen und weiblichen Versuchspersonen, Entzündungsprozesse detailliert analysiert und verglichen. »Wir haben die Bildung von entzündungsfördernden Substanzen, wie Leukotrienen und Prostaglandinen, untersucht und geschaut, ob sich die Wirkung von Entzündungshemmern in männlichen und weiblichen Zellen unterscheidet«, erläutert Werz.



Braucht es spezifische Medikamente für sie und ihn? Pharmazeuten belegen, dass Entzündungen bei Frauen und Männern unterschiedlich behandelt werden müssen.

Erwartungsgemäß war die Wirkung der untersuchten Substanzen in den weiblichen Zellproben deutlich größer als in den männlichen – schließlich ist bei ihnen das Entzündungsgeschehen insgesamt deutlich ausgeprägter. Diese Unterschiede lassen sich aber durch die Gabe von Testosteron komplett ausgleichen. Dass Testosteron vor Entzündungserkrankungen schützen kann, haben verschiedene Studien – auch des Jenaer Teams um Prof. Werz – bereits früher belegt. »Jetzt konnten wir aber den molekularen Wirkmechanismus aufklären und zeigen, dass dies auch die therapeutische Wirkung von Arzneistoffen beeinflusst«, unterstreicht Werz. Damit liefern die Forscher einmal mehr konkrete Anhaltspunkte für die Notwendigkeit einer geschlechtsspezifischen Medizin. US



Auswahl hat ihren Preis

Wirtschaftswissenschaftler zeigt irrationale Managerentscheidungen bei Produktinnovationen auf

Benachteiligung ist Teil unseres Alltags: Frauen haben es in Männerdomänen schwer, Ausländer müssen oft mit Vorurteilen kämpfen und Ostdeutsche sind nicht in Führungspositionen anzutreffen – dies sind Tatsachen, die wissenschaftlich untersucht und belegt sind. Wirtschaftswissenschaftler Ronny Reinhardt (Foto oben) hat nun eine weitere diskriminierte Gruppe entdeckt: neue günstige Produkte. Manager und Entscheider in Unternehmen würden jene vermeiden und bevorzugt auf teurere Produktinnovationen setzen. Dies belegen Reinhardt und seine Co-Autoren aus der Schweiz und den USA in ihrem Aufsatz »The High-end Bias – Investigating the Irrational Preference for High-end over Low-end Innovations«.

In der aktuellen Studie haben die Forscher herausgefunden, dass Manager bei Innovationsprojekten in rund 80 Prozent der Fälle Produkten den Vorzug geben, die im hochpreisigen Segment angesiedelt sind: »Bei gleichem Investment und gleicher Rendite für das Unternehmen wählen Entscheider eher teure Produkte, um sie in den Markt einzuführen.« Sie präferieren damit die Produktoberklasse – und haben lieber weniger Kunden mit mehr Geld als viele Kunden mit wenig Geld. »Günstige Innovationen lehnen sie tendenziell ab«, schildert Reinhardt. Die Studie liefert Indizien für mögliche Gründe: Teurere Produkte sind positiv konnotiert, spiegeln Hochwertigkeit und einen gewissen Status wider – der offenbar auch den Managern der Herstellerfirmen wichtig ist. »Diese Gefühle beeinflussen Investitionsentscheidungen, obwohl sie dort nicht hingehören. Letztlich bedeutet das weniger neue Produkte für den kleinen Geldbeutel«, unterstreicht Ronny Reinhardt. Die Wirtschaftswissenschaftler erhoben die Daten in experimentellen Befragungen sowie in zwei Reaktionstests, in denen Assoziationen der insgesamt rund 500 Teilnehmer aus Klein- und Großunternehmen verschiedenster Branchen erfasst wurden. Die Untersuchung eines Datensatzes zu mehr als 2000 Produkteinführungen in den Vereinigten Staaten demonstriert zudem, wie sich dies in Supermärkten niederschlägt: eine hohe Produktvielfalt im teureren Bereich und wenig Auswahl bei günstigen Lebensmittelneuheiten – obwohl mit letzteren zwischen 2010 und 2011 mehr als doppelt so viel Umsatz gemacht wurde. jd

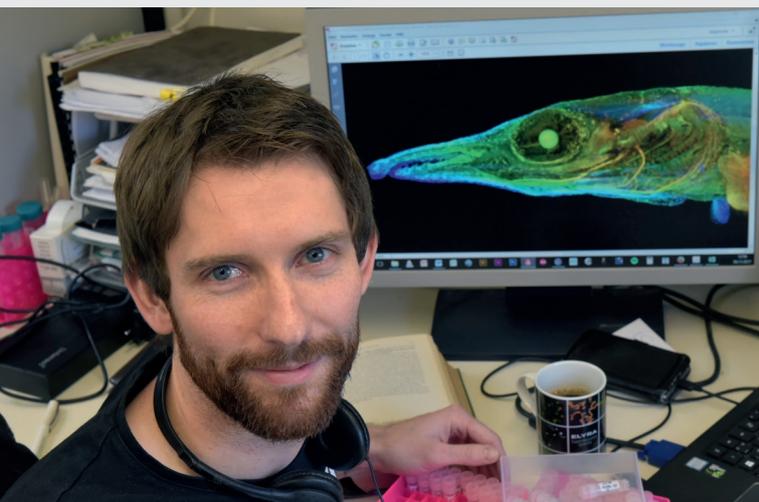
Wie Fische an Land gingen

Der Cucullaris-Muskel des Knochenhechtes gibt Aufschluss über die Evolution der Landwirbeltiere

Seit mehr als 140 Millionen Jahren schwimmt der Knochenhecht bereits durch die Gewässer unseres Planeten und noch immer birgt er Geheimnisse in sich. Eines davon konnten Evolutionsbiologen aus Jena jetzt lüften – und dabei wichtige Informationen darüber gewinnen, wie sich Fische zu Landwirbeltieren entwickelten. Benjamin Naumann (Foto unten) und Prof. Dr. Lennart Olsson vom Institut für Zoologie und Evolutionsforschung ist es gelungen, bei dieser Fischart erstmals den »Cucullaris«-Muskel richtig zu identifizieren, der viele Übereinstimmungen mit dem Cucullaris-Muskel der Landwirbeltiere aufweist. Über ihre Forschungsergebnisse berichteten die Wissenschaftler im Fachjournal »Evolution & Development« (DOI: 10.1111/ede.12239).

»Wir haben einen über hundert Jahre alten Fehler korrigiert, denn bei früheren Untersuchungen war ein anderer Muskel als Cucullaris-Muskel beim Knochenhecht bezeichnet worden«, sagt Benjamin Naumann. Von Interesse für die Evolutionsbiologen ist der Muskel, der Kopf und Schultergürtel miteinander verbindet, vor allem deswegen, weil er sowohl bei ursprünglichen Fischen als auch bei Säugetieren vorkommt, sich seine Funktion während der Evolution aber erheblich verändert hat. »Bei Fischen sitzt der Kopf direkt am Schultergürtel, weswegen sich der Kopf nicht unabhängig vom Rumpf bewegen kann«, erklärt Prof. Dr. Lennart Olsson. Diese Verbindung habe sich bei den Landwirbeltieren gelöst – sie bildeten einen Hals, was eine erhöhte Beweglichkeit des Kopfes unabhängig vom Rumpf ermöglichte.

Dank der aktuellen Jenaer Studie ist jetzt klar, dass der Muskel auch beim Knochenhecht schon an dieser Nahtstelle zwischen Rumpf und Kopf sitzt. Bisher war man fälschlicherweise von einem anderen in der Nähe der Kiemen ausgegangen. »Die Position des Cucullaris-Muskels ist deshalb wichtig, weil sie uns verrät, dass er sich genauso bildet wie zum Beispiel beim Säugetier«, erklärt Naumann. »Die Entwicklungsbiologie zeigt uns hier also eine Homologie, einen gemeinsamen evolutionären Ursprung des Muskels, in beiden Tiergruppen auf.« sh



Was Pilze »magisch« macht



Seit fast 60 Jahren ist der Stoff namens Psilocybin bekannt. Er verleiht den »Magic Mushrooms«, auch Zauberpilze genannt, die Magie – also ihre starke psychedelische Wirkung. Ein Geheimnis blieb jedoch:

Wie genau bilden die Pilze der Gattung *Psilocybe* (Foto) diese wirkungsvolle Substanz? Ein Team um den Jenaer Naturstoff- und Pilzexperten Prof. Dr. Dirk Hoffmeister konnte es jetzt lüften. So gelang es den Wissenschaftlern, die Enzyme zu identifizieren, mit deren Hilfe die Pilze ihre magischen Substanzen aufbauen. Die Wissenschaftler stellten bei ihren Untersuchungen außerdem fest, dass die Biosynthese in einer anderen Reihenfolge stattfindet, als es ältere Studien beschrieben. Ihre Ergebnisse erschienen in der Zeitschrift *Angewandte Chemie* (DOI: 10.1002/anie.201705489).

Mithilfe des Modell-Bakteriums *Escherichia coli* ließen sich die zuvor identifizierten Enzyme produzieren. Auf diese Weise konnten Hoffmeister und Kollegen die Wirkstoff-Synthese im Labor rekonstruieren und Psilocybin ohne Pilzzellen herstellen. Damit könnte dieses stark wirksame Molekül künftig einfacher hergestellt werden. Denn abseits des Gebrauchs als Freizeitdroge verfügt die Substanz über nutzbringende Heilkräfte: Beispielsweise kann sie in einer geringen Dosis die Angst von Patienten mit lebensbedrohlichem Krebs reduzieren oder die Symptome von Depressionen und Antriebslosigkeit lindern. MR

Wie Säugetierzähne ihre Form erhalten

Die Zähne von Nackthunden geben Wissenschaftlern Hinweise über die Entwicklung und Evolution von Säugetierzähnen: Nackthunde unterscheiden sich von anderen Hunden nicht nur durch das fehlende Fell, sondern auch in Anzahl und Beschaffenheit ihrer Zähne. Forscher vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig und der Friedrich-Schiller-Universität haben fast 100 Jahre alte historische Schädel und Zähne von haarlosen Rassehunden aus der Sammlung des Phyletischen Museums jetzt neu untersucht und belegt, dass ein »FOXI3« genanntes Gen an der Entwicklung der Zähne beteiligt ist. Ihre Ergebnisse stellten sie im Fachmagazin »Scientific Reports« vor (DOI: 10.1038/s41598-017-05764-5).

Das Team um PD Dr. Cornelius Kupczik und Prof. Dr. Martin S. Fischer konnte zeigen, dass bei den haarlosen Tieren nahezu alle Ersatzzähne (das heißt Schneide- und Eckzähne sowie vordere Backenzähne) fehlten, die Molaren (Zuwachszähne) aber vorhanden waren. Auffällig war auch, dass auf den Zähnen der Nackthunde bestimmte zungenseitige Zahnhöcker nicht ausgebildet waren. Die Forscher gehen davon aus, dass »FOXI3« auch bei der Zahnentwicklung anderer Säugetiere, inklusive des Menschen, eine Rolle spielt. US

Grenzen überschreiten

Vierbändige Enzyklopädie gibt erstmals umfassenden Überblick zum Internationalen Privatrecht

Das Leben der Menschen im 21. Jahrhundert ist in hohem Maße grenzüberschreitend. Sie bereisen die ganze Welt, kaufen Waren aus aller Herren Länder oder heiraten ihre Erasmusliebe. Doch was passiert, wenn der Flug annulliert wird, das Auto kaputtgeht oder die große Liebe nicht hält? »Das Recht hat mit der dramatischen Internationalisierung unseres Lebens nur unvollständig Schritt gehalten. Es ist immer noch weitgehend national und sieht in Deutschland anders aus als in England, Frankreich oder Italien«, erzählt Prof. Dr. Giesela Rühl (Foto rechts). Ihr Fachgebiet, das Internationale Privatrecht, beschäftigt sich mit der Frage, wie sich die Probleme grenzüberschreitender Rechtsverhältnisse bewältigen lassen.

Mit der Globalisierung, schildert Rühl, sei auch die Zahl der internationalen Streitigkeiten und Gerichtsverfahren gewachsen. Darauf hätten nationale und internationale Gesetzgeber, vor allem aber die Europäische Union in den letzten Jahrzehnten reagiert und entsprechende Regelungen verabschiedet. Ein Überblick über dieses unübersichtliche, enorm wachsende Rechtsgebiet fehlte allerdings – bis jetzt. Denn jüngst erschienen ist die von Prof. Rühl mit herausgegebene »Encyclopedia of Private International Law«.

Das vier Bände umfassende, englischsprachige Werk bildet das Internationale Privatrecht auf über 4000 Seiten in seiner gesamten historischen, methodischen und inhaltlichen Breite ab. Als zentrale Koordinierungsstelle sind am Lehrstuhl von Giesela Rühl alle Fäden des durch die Fritz Thyssen Stiftung

geförderten Mammutprojekts zusammengelaufen: 181 Autoren aus 57 Ländern waren daran beteiligt. Die ersten zwei Bände der Enzyklopädie enthalten Beiträge zu privatrechtlichen Themen. Band drei widmet sich Länderberichten zum Internationalen Privatrecht aus 80 Staaten, darunter Thailand, Tunesien oder Nigeria, die bislang weitgehend unerschlossen waren. Im vierten Band befindet sich schließlich eine Materialsammlung: ins Englische übersetzte Gesetzestexte aus aller Welt. »Dieser Band ist zentral für die weitere Forschung, da viele Gesetze hier erstmalig einem internationalen Publikum zugänglich gemacht werden«, berichtet Prof. Rühl. Vor allem in Hochschulbibliotheken und Bildungseinrichtungen soll das gesammelte Werk bald in den Regalen stehen. jd



Laserstrahlen aus dem Himmel

Um die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre zu untersuchen, werden nicht selten Laserstrahlen eingesetzt. Forscher schicken dabei Laserpulse in den Himmel und analysieren das zurückgestreute Licht. Besser wäre es allerdings, wenn das Licht als Laserstrahl auch wieder zur Erde zurückkehren könnte, da von seinem Licht ein stärkeres Signal ausgeht und sich Informationen besser herauslesen lassen.

Dr. Daniil Kartashov vom Institut für Optik und Quantenelektronik hat jetzt gemeinsam mit Prof. M. Schneider von der Princeton University (USA) theoretische Grundlagen für solche Himmelslaser gelegt (DOI: 10.1063/1.4978745). Dazu nutzen die Forscher die Eigenschaften der Luft: Durch die Verwendung von extrem kurzen Laserpulsen entsteht in der Luft eine Art »Linse«. Diese fokussiert den ausgesendeten Laser zusätzlich und erzeugt dünne Plasmakanäle. Das Licht in diesen sogenannten Filamenten trägt ein breites Spektrum an Strahlung in sich, das Informationen über die chemische Zusammensetzung der Umgebung liefern kann. Durch die Wahl geeigneter Parameter wie Plasmatemperatur und -dichte kann der Laser mit dem Stickstoff in der Atmosphäre so wechselwirken, dass schließlich ein echter Himmelslaser entsteht. sh

Wie funktioniert Hypnose?

Psychologen belegen, dass auch ein eingebildetes »Brett vor dem Kopf« die Sicht behindern kann: Im Fachmagazin »Scientific Reports« haben sie Studienergebnisse präsentiert, die zeigen, was im Gehirn eines hypnotisierten Menschen bei der Verarbeitung visueller Reize passiert (DOI:10.1038/s41598-017-05195-2).

Für ihr Experiment untersuchte Dr. Barbara Schmidt aus der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Wolfgang Miltner vom Lehrstuhl für Biologische und Klinische Psychologie drei Gruppen von Probanden: Personen, die sehr suggestibel, also empfänglich für Hypnose, sind, und Personen, bei denen diese Fähigkeit eher mittelmäßig und wenig ausgeprägt ist. Unter Hypnose hatten die Probanden die Aufgabe, auf einem Bildschirm verschiedene Symbole zu zählen. Gleichzeitig sollten sie sich ein Brett vor ihren Augen vorstellen. Durch die suggerierte Sichtbehinderung stieg die Anzahl der Zählfehler erheblich, am deutlichsten bei den gut hypnotisierbaren Probanden.

Die parallel per EEG erfasste Hirnaktivität der Probanden zeigt, dass die visuelle Wahrnehmung auch mit dem »Brett vor dem Kopf« funktioniert, tiefere Verarbeitungsprozesse, wie das Zählen der Symbole, aber beeinträchtigt sind. sh

Mehr Sicherheit – mehr Risiko?

Ob sich das Tragen von Sicherheits-Accessoires, wie eines Fahrradhelmes, auf die Risikobereitschaft des Probanden auswirkt, das untersuchen Psychologen vom Lehrstuhl für Biologische und Klinische Psychologie. Auf dem Foto überwacht Student Jona Ebker (l.) ein solches psychologisches Experiment. Testperson ist in diesem Fall Dr. Barbara Schmidt (r.), die die Studie leitet. Sie muss mit und ohne Helm eine Reihe von Aufgaben bewältigen, während ihre Gehirnaktivität mittels Elektroenzephalogramm (EEG) erfasst wird.





Die Kunst (in) der Wissenschaft

Anders als die meisten, die Medizin studieren, wollte Prof. Dr. Dr. Christoph Redies nie Arzt werden. Vielmehr diente die Karriere in der Forschung schon früh dem Ziel, sich wissenschaftlich mit seiner zweiten großen Leidenschaft zu befassen: der Kunst.

TEXT: JULIANE DÖLITZSCH

Wer beim zurückliegenden Uni-Sommerfest den Blick in die kleine Kunstaussstellung in der Mensa am Philosophenweg geworfen hat, ist unweigerlich an ihnen hängengeblieben – in schweres, edles Holz gerahmte, abstrakte Kompositionen. In der Nähe stets anzutreffen war ihr Urheber, Prof. Dr. Dr. Christoph Redies vom Uniklinikum. Der Professor für Anatomie war gern dem Aufruf gefolgt, dass Mitarbeiter der Uni ihre Fotografien und Bilder in der Künstlerwerkstatt des Unifestes ausstellen. Dabei zeigte er nicht nur Aquarelle, Ölmalereien, Pastelle und Radierungen, sondern brachte gleich eine Videoinstallation und eine Sammlung seiner wissenschaftlichen Aufsätze mit. Thema: Experimentelle Ästhetik. Mit großer Begeisterung schilderte er vielen Besuchern, was er untersucht.

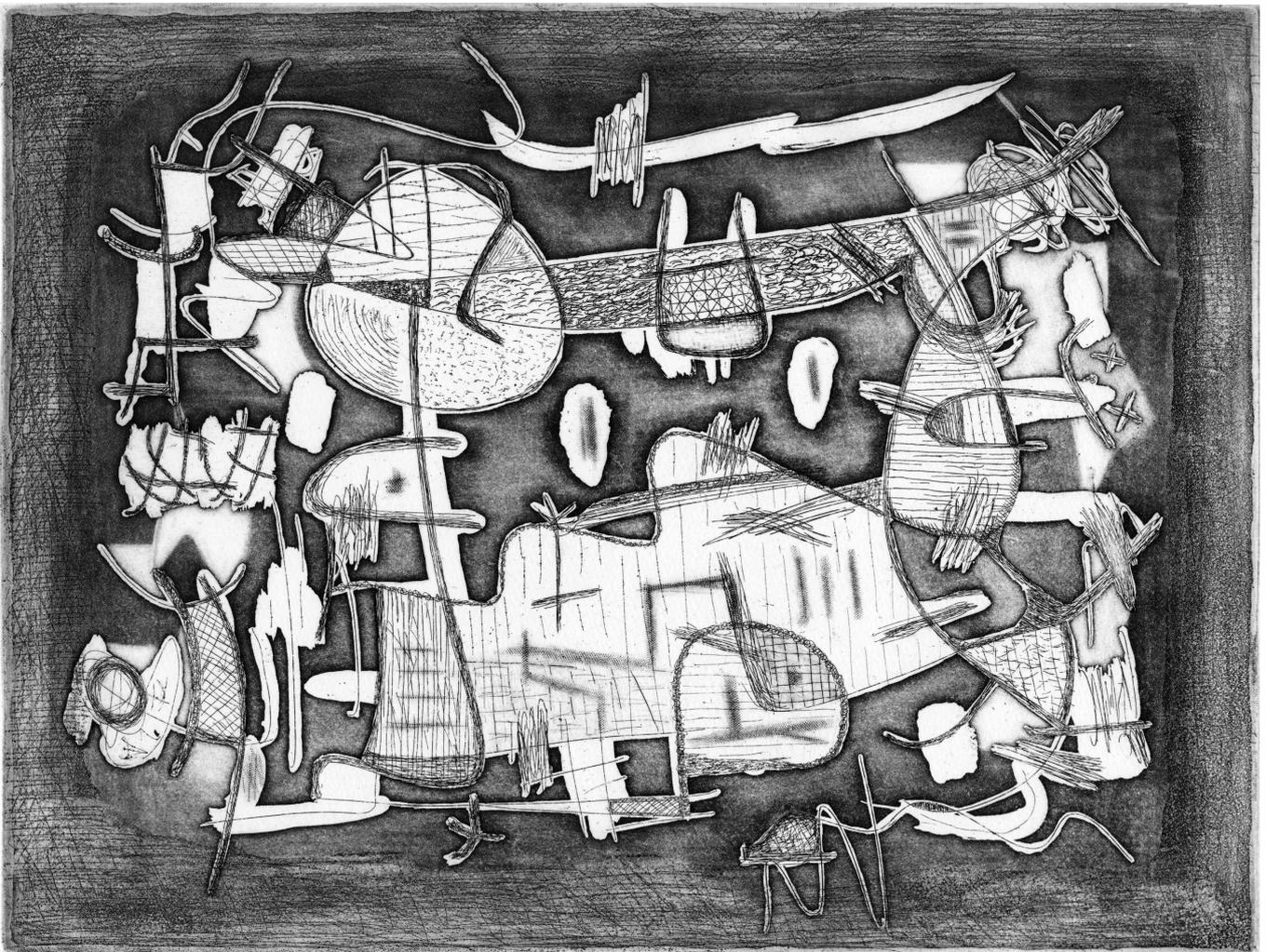
»Ich möchte herausfinden, was die Struktur eines schönen Bildes ausmacht«, erklärt Christoph Redies. »Wie muss ein Bild sein, damit es als ästhetisch empfunden wird?« Schon immer hat den 59-Jährigen diese Frage umtrieben – ebenso wie die Kunst seit jeher Bestandteil seines Lebens ist. Als Sohn von internationalen Kunsthändlern, die in Düsseldorf eine Galerie für moderne Kunst führten, fing er mit 16 Jahren an zu malen. Der Autodidakt verbrachte 1977 einen Sommer in einem Atelier in Paris, dann jedoch entschied er sich für das Medizinstudium in Essen. »Dem ungewissen Künstlerdasein fühlte ich mich nicht gewachsen«, erinnert er sich. Als reine Vernunftentscheidung möchte er das Stu-



Christoph Redies mit einem seiner abstrakten Werke aus dem Jahr 2001.

dium aber nicht bezeichnen: »Naturwissenschaften haben mich immer interessiert.« Arzt wollte er nicht unbedingt werden, sich dafür viele andere Möglichkeiten offenhalten.

Bereits nach dem Grundstudium in Essen reizte es ihn, die biologischen Grundlagen der Kunst zu erforschen. In den 1980er Jahren sei die Zeit dafür jedoch noch nicht reif gewesen, Redies spezialisierte sich auf die Sehforschung und die molekularen Grundlagen der Gehirnentwicklung. Das letzte Jahr seines Studiums glich einer klinischen Weltreise, die ihn ins australische Adelaide, ins amerikanische Boston und ins kanadische Montreal führte. Auch die Krankenhausphasen erweckten in ihm nicht den Wunsch zu praktizieren. »Nach der Approbation habe ich meinen Kittel abgegeben und nie wieder Patienten gesehen«, sagt der Mediziner. So verfasste er nach der humanmedizinischen Dissertation am Max-Planck-Institut in Göttingen eine naturwissenschaftliche in Montreal und wurde doppelter Doktor. Nach dem Postdoc am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge und an der Kyoto University folgten die Rückkehr nach Deutschland, 1997 der erste Ruf der Uni Essen und 2003 der Ruf der FSU auf den Lehrstuhl für Anatomie. Seiner erfolgreichen wissenschaftlichen Karriere in der Molekularbiologie und der Gehirnforschung schreibt er die Berufung zu – denn seine weiteren Forschungsideen zur Ästhetik galten zunächst noch als versponnen.



Die Radierung mit dem Titel »Paris« hat Christoph Redies 1977 während seines Aufenthalts in der französischen Hauptstadt angefertigt.

Doch schien Christoph Redies' Forschungsinteresse spätestens salonfähig, als sich Thüringen (erfolglos) als Standort für das neue Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik bewarb. »Zu Beginn meiner Karriere hätte ich meinen Ruf als Wissenschaftler ruiniert, wenn ich meinen Fragen zur Kunst nachgegangen wäre, doch inzwischen hatte sich die Technik enorm gewandelt. In Prof. Joachim Denzler hatte ich zudem bereits 2005 einen aufgeschlossenen Kooperationspartner gefunden«, berichtet er. Gemeinsam legten der Mediziner und der Informatiker einige der Grundlagen in der Erforschung der Ästhetik von Kunst. Heute arbeitet Redies' Forschungsgruppe mit einem Team vom Institut für Psychologie zusammen. Als Trendsetter sieht er sich nicht, aber »es ist spannend, bei einem jungen, sich entwickelnden Forschungsfeld von Beginn an dabei zu sein.« Inzwischen sei Ästhetik geradezu ein Modethema in der Wissenschaft geworden. Schon allein weltweite Forscherverbünde wie die International Association of Empirical Aesthetics, deren Mitglied natürlich auch Redies ist, belegen den Trend.

Strukturen des Schönen in bildender Kunst und Musik

Ob er anders malt, seitdem er so intensiv dazu forscht? »Beim Malen ist denken nicht unbedingt angebracht«, glaubt der Anatom, »eher das Fühlen. Und meine Gefühle haben sich nicht geändert.« Sehr viel Zeit für die Malerei hat er im Mo-

ment ohnehin nicht – noch steht die Wissenschaft an erster Stelle. Denn da gilt es einiges zu erreichen, bevor sich der Vater von vier Töchtern in den Ruhestand begibt. Noch näher möchte er an den Kern dessen kommen, was die Schönheit im Bild ausmacht. Außerdem würde er seine Forschung gern auf die Musik anwenden. Neun Jahre hat Redies in seiner Jugend Klavier gespielt, »aber nicht besonders gut«, erzählt er lachend. Das Faible für klassische Musik ist dennoch geblieben. Die Forschung ist für ihn in erster Linie ein intellektuelles Spiel: die Freude an der Neugier und dem Entdecken. Kunst könne dagegen Menschen und Kulturen verbinden, einfach tiefer im Menschsein berühren. Beides zu kombinieren, war lange sein Wunsch – den er inzwischen seit zwölf Jahren am Institut für Anatomie, dessen Direktor er ist, lebt. Dabei profitiert er nicht nur vom Standort Jena: »In Deutschland hat man als Hochschullehrer die Freiheit zu erforschen, was man möchte – das ist großartig.«

Und was hat es nun mit der Struktur eines schönen Bildes auf sich? »Wie ein Künstler malt, ist dem ähnlich, was man in komplexen natürlichen Strukturen wahrnimmt«, erläutert Redies. Kunstwerke sind dem Sehsystem dadurch vertraut und weil Menschen auf natürliche Situationen und Strukturen geprägt sind, werden die Bilder dann als schön empfunden – umso mehr, je reichhaltiger und vielfältiger sie sind. »Es in einfache Worte zu fassen, ist schwer«, meint der Professor. Mit Pinselstrichen wäre es leichter.

»GEO« schickt Doktoranden auf Reisen

Mauro Alivernini, Doktorand am Lehrstuhl für Allgemeine und Historische Geologie, ist im September ins westafrikanische Ghana gereist, um eine neue Methode zum Umwelt-Monitoring zu testen. Der 31-jährige Italiener untersucht, ob *Ostrakoden* und *Foraminiferen* – winzige Wasserlebewesen – als Bioindikatoren für den ökologischen Zustand der Küstengewässer dienen können. Möglich machte die Reise ein Stipendium des Reportagemagazins »GEO«. Und so ist von Aliverninis Forschungsergebnissen nicht nur in der Fachwelt zu lesen.

Bild links: Naturparadies an der westlichen Küste Ghanas. Bild rechts: Geowissenschaftler Mauro Alivernini in Begleitung eines ghanaischen Fischers auf der Fahrt durch einen küstennahen Mangrovenwald in der Nähe des Amanzule Flusses.



Anfang September, in Thüringen herrscht mildes Spätsommerwetter. Mauro Alivernini steht mit Kollegen auf einem Tretboot mitten im Stausee Hohenfelden, rund 20 Kilometer südlich von Erfurt. Das Boot schwankt, als der junge sportliche Mann mit Hilfe von Thomas Biehl ein mit Metallgewichten beschwerten, zwei Meter langen Plastikzylinder aus dem Wasser zieht und ins Boot hebt. Braunes, von aufgewirbeltem Schlamm gefärbtes Wasser fließt an den Seiten herunter, Alivernini bekommt im Boot nasse Füße. Er schaut zufrieden: die Sedimentprobe vom Grund des Sees verspricht ausreichend Untersuchungsmaterial. Der Probelauf war erfolgreich.

Vier Tage später sitzen Alivernini, der Masterstudent Thomas Biehl und die ghanaische Wissenschaftlerin Lailah Akita im Flugzeug nach Ghana. Ihr Ziel ist Accra: Hauptstadt, Wirtschaftsmetropole und einer der schmutzigsten Orte der Welt. Mit an Bord haben die Forscher ihre Probennahme- und Messgeräte. Alivernini und seine Kollegen wollen in dem westafrikanischen Land eine neue Methode zum Umwelt-Monitoring testen.

Ghana ist eine Elektromülldeponie Europas. Auf riesigen Halden werden im Stadtgebiet von Accra Computer, Kopierer, Faxgeräte und Fernseher aus der westlichen Welt entsorgt. Arbei-

ter gewinnen metallische Wertstoffe daraus: durch bloßes Verbrennen der Plastikgehäuse unter freiem Himmel, ohne jeden Schutz für Boden, Wasser oder sich selbst. Regenwasser spült Schwermetalle und andere Schadstoffe bis in die Lagunen am Rand der Stadt, von wo aus sie auch weiter ins Meer getragen werden. »Das sind extreme Umweltschäden, die hier entstehen und sich mit besorgniserregender Geschwindigkeit ausbreiten«, sagt Mauro Alivernini. Es gebe kaum ökologische Standards, auch ein Bewusstsein für Umweltschutz sei in Ghana bislang nur bei wenigen Menschen vorhanden. Entlang der Küste, wo der größte Teil der Bevölkerung lebe, sei die Umweltzerstörung besonders massiv.

Nachhaltiges Küstenmanagement

Mit ihren Forschungsarbeiten wollen die Wissenschaftler die Möglichkeit für ein nachhaltiges Küstenmanagement in dem westafrikanischen Land schaffen und haben dafür wissenschaftliches Neuland betreten. Drei Wochen lang, vom 9. bis 27. September, haben sie Sedimentproben aus verschiedenen Gewässern gesammelt, zunächst in Accra und seiner stark verschmutzten Umgebung, anschließend in den Lagunen und Mangrovenwäldern im weniger verschmutzten westlichen Küstenab-

schnitt Ghanas. Erste Proben haben sie direkt vor Ort untersucht, etwa zehn Kilo getrocknete Sedimente haben sie auch mit nach Jena gebracht, um sie nun genauestens »unter die Lupe« zu nehmen.

Was Alivernini und seine Kollegen, inzwischen wieder im heimischen Labor im Institut für Geowissenschaften, studieren, sind *Ostrakoden* und *Foraminiferen*: mikroskopisch kleine Lebewesen, die weltweit in Gewässern vorkommen. Mit ihren wenigen Millimetern Größe sind sie »für den Menschen normalerweise völlig uninteressant. Schließlich übertragen sie weder Krankheiten noch kann man sie essen«, scherzt Alivernini. Für ihn und andere Geologen sind die Winzlinge jedoch von riesigem Wert: Sie sammeln sich in Sedimenten an und geben Aufschluss über den Zustand der Gewässer.

Foraminiferen sind Einzeller – Amöben, die meist von einer Kalkschale umgeben sind. Sie kommen vor allem im Meer vor. Bei *Ostrakoden* handelt es sich um ebenso winzige Krebstiere, die in allen Gewässertypen leben. »Diese Organismen reagieren sehr sensitiv auf sich ändernde Umweltbedingungen«, erklärt Alivernini. Temperaturschwankungen, Änderungen im Salzgehalt des Wassers oder Schadstoffeinträge führen binnen kurzer Zeit zu morphologischen Veränderungen an den winzigen



Einheimische helfen den Jenaer Wissenschaftlern beim Verladen des Schlauchbootes und der Gerätschaften zur Probenahme in der Nähe der Keta-Lagune im Ostteil des Landes.

Strand voller Müll nahe der ghanaischen Hauptstadt Accra. Der Boden ist mit einer dichten Ölschicht versiegelt, die das Versickern von Regenwasser verhindert. Auch hier hat Mauro Alivernini Sedimentproben entnommen: Innerhalb weniger Minuten ist der Nachwuchswissenschaftler dabei bis zu den Oberschenkeln in den Schlamm gesunken. Nur mit Mühe konnte er sich aus dem weichen Untergrund, der keinen Halt bietet, herauskämpfen. Die Einheimischen berichten, dass jedes Jahr mehrere Menschen in diesem Morast einfach verschwinden.

Kalkschalen der Tiere. Anhand des Aussehens und der Artenzusammensetzung lassen sich daher Umweltbedingungen, wie die Gewässerqualität, beurteilen und sogar langfristig Aussagen über Klimaveränderungen treffen. »In einigen Ländern werden *Ostrakoden* und *Foraminiferen* bereits routinemäßig zum Umwelt-Monitoring herangezogen, etwa in Norwegen«, weiß Alivernini. Das wollen die Forscher nun auch

in Ghana ermöglichen. Denn: Die Methode ist zwar einfach, aber sehr aussagekräftig und zudem kostengünstig.

Bestandsaufnahme der Mikrofauna

Alles was man dazu braucht, ist ein durchschnittliches Lichtmikroskop und das Wissen, wie die lokale Mikrofauna typischerweise zusammenge-

setzt ist. Ihre Expedition nach Ghana haben die Forscher dafür genutzt, eine präzise Bestandsaufnahme der Ostrakoden- und Foraminiferen-Fauna in den Küstengewässern vorzubereiten. Ein Teil der gewonnenen Bodenproben wird derzeit von Wissenschaftlern der Universität Accra analysiert. Einen anderen Teil untersuchen Alivernini und seine Kollegen um den Mikropaläontologen Peter Frenzel gerade in Jena. Erste Ergebnisse aus der stark verschmutzten Region um Accra zeigen eine Vielzahl von Verformungen bei *Foraminiferen*-Gehäusen. »So etwas haben wir noch nicht gesehen«. Ziel ist es nun, die Verbreitung und Ökologie der Bioindikatoren für die ghanaische Küstenregion zu dokumentieren und die gegenwärtige Umweltsituation zu beurteilen. »Langfristig wollen wir ein auf *Ostrakoden* und *Foraminiferen* basierendes Monitoringschema für die westafrikanische Küste entwickeln«, blickt Alivernini in die Zukunft. ■

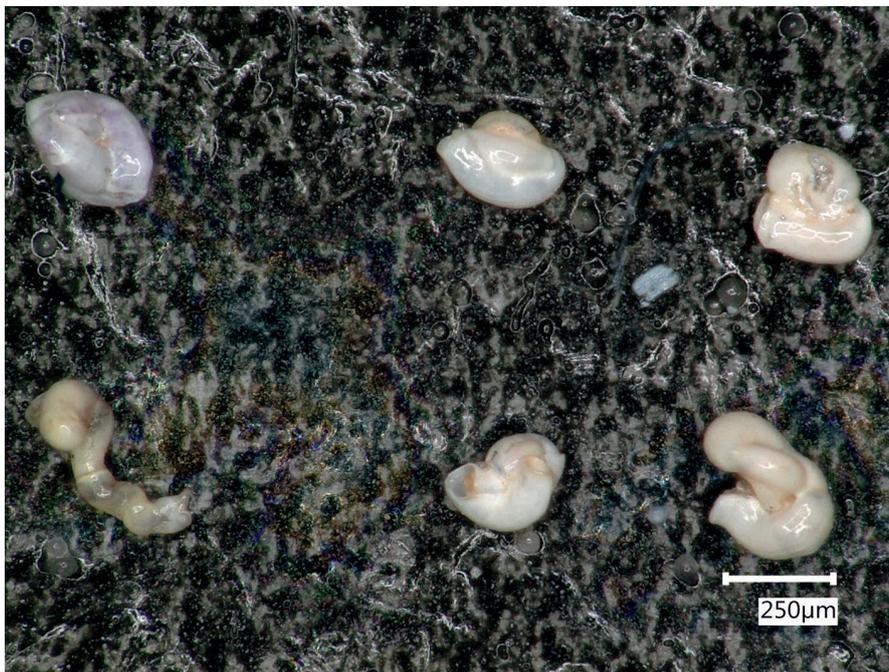
HINTERGRUND

Mit seinem Forschungsprojekt über *Ostrakoden* und *Foraminiferen* als Bioindikatoren hat Mauro Alivernini das GEO-Expeditionsstipendium 2016 gewonnen. Der 31-jährige Geologe konnte sich gegen mehr als 50 Mitbewerber aus ganz Deutschland durchsetzen. Die 10 000 Euro nutzte Alivernini für eine Reise nach Ghana, bei der er und zwei Kollegen umfangreiche Bodenproben sammelten, sowie die nun anstehenden Analysen. Zwei Journalisten der GEO-Redaktion haben den Italiener mehrere Tage lang während seiner Feldforschung in Afrika begleitet. Über die Arbeit des Nachwuchswissenschaftlers wird das Magazin in einer seiner nächsten Ausgaben berichten.



GEO-Fotoreporter Dominic Nahr (M.) beobachtet Thomas Biehl (l.) und Mauro Alivernini bei der Probenaufbereitung in ihrem Freiluftlabor an der Universität Accra. Der Fotograf und zwei Journalisten des Reportagemagazins haben die Arbeiten der Jenaer Wissenschaftler eine ganze Woche lang begleitet.

Die Sedimentproben aus den unterschiedlichen Küstenregionen werden gewaschen, gesiebt und anschließend getrocknet, bevor sie unter dem Mikroskop landen. Rund zehn Kilo getrocknetes Material haben die Forscher nach Jena mitgebracht, um es hier weiter zu analysieren.



Foraminiferen aus Sedimentproben, die Alivernini und seine Mitstreiter in der stark verschmutzten Region um Accra entnommen haben. Die Schalen der marinen Einzeller sind stark deformiert. Oben links ist ein normal geformtes Exemplar der Gattung *Quinqueloculina* sp. zu sehen.



Forschung schwerelos

Der Materialforscher Prof. Dr. Markus Rettenmayr (Foto oben) absolvierte im Sommer einen Parabelflug. Über die Faszination der Schwerelosigkeit und das Leiden im Dienste der Wissenschaft.

TEXT: STEPHAN LAUDIEN

Wer schwerelos durch den Raum schweben möchte, muss nicht eigens zur ISS fliegen. Das Phänomen lässt sich ebenso auf einem Parabelflug erleben. Die Europäische Weltraumagentur ESA bietet die Flüge gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) vom französischen Bordeaux aus an. Geflogen wird im Dienste der Wissenschaft oder der Neugier, denn gelegentlich können auch Touristen einen Parabelflug buchen.

»Die Schwerelosigkeit setzt von jetzt auf gleich ein, da gibt es keinen Übergang«, sagt Prof. Dr. Markus Rettenmayr. Vorsicht sei geboten, unbedachte Bewegungen können schnell zu heftigen Stößen führen, fügt der Wissenschaftler vom Otto-Schott-Institut für Materialforschung hinzu. Wer etwa bei einsetzender Schwerelosigkeit auf dem Boden des Flugzeugs hockt und sich wie üblich aufzurichten versucht, knallt mit dem Kopf gegen die Decke. Nicht von ungefähr sind vier Helfer und ein Arzt mit an Bord, zudem ist die Decke des Fliegers sicherheitshalber gepolstert.

Im vergangenen Sommer hat Rettenmayr seinen ersten Parabelflug absolviert – es war wohl auch sein letzter. Nicht weil es ihm nicht gefallen hätte, sondern eher, weil die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen im Forschungsprojekt ebenfalls das Gefühl der Schwerelosigkeit erfahren möchten. Rettenmayr und sein Team untersuchen während der Flüge, wie geschmolzene metallische Legierungen kristallin oder glasartig wieder erstarren. Der Einfluss der Gravitation soll dabei möglichst ausgeschaltet werden. Zum Einsatz kommen hochempfindliche Messgeräte, mit denen die Viskosität, die Wärmeleitfähigkeit und die Erstarrungsgeschwindigkeit gemessen werden. »Diese Experimente werden später auf der ISS wiederholt«, sagt der wissenschaftliche Mitarbeiter Robert Hanke. Die Parabelflüge sind Voraussetzung für die Experimente in der Raumstation. Langfristiges Ziel ist ein möglichst exaktes Modell für das Erstarrungsverhalten metallischer Legierungen.



Doktorand Robert Hanke (hier bei einem Flug 2016) blieb dieses Mal am Boden in Bordeaux und unterstützte das Team bei der Technik.

Bei den Parabelflügen kommt die ehemalige Kanzlermaschine der Bundeswehr zum Einsatz, ein Airbus A 310. Wo früher Angela Merkel mit ihrer Entourage saß, stehen heute die Apparaturen für diverse Experimente. Dazu gibt es ein Gurtsystem, um schwebend nicht komplett die Kontrolle zu verlieren. Lediglich im Heck des Flugzeugs gibt es noch Sitze.

»Es fühlt sich an wie seekrank, nur schlimmer!«

Vor dem Flug nehmen die Passagiere ein Medikament gegen Motion Sickness ein, eine Form der Reisekrankheit: »Es fühlt sich an, als wäre man seekrank, nur schlimmer«, sagt Prof. Rettenmayr. Kopfschmerz, Übelkeit, Erbrechen zählen zu den Symptomen – früher wurden die Parabel-Flieger deshalb als »Kotzbomber« bezeichnet. Nach dem Start in Bordeaux geht es erst einmal hinaus aufs offene Meer. Für die Parabelflüge wird eine möglichst ruhige Zone gesucht. Dann beschleunigen die Piloten den Airbus auf zwei g, also die doppelte Erdbeschleunigung, und ziehen die Nase des Flugzeugs in einen Steigwinkel von 50 Grad. Nach dem Steigflug werden die Triebwerke gedrosselt, das Flugzeug folgt der Linie einer Wurfparabel, dabei wird für 22 Sekunden annähernd die Schwerelosigkeit erreicht. Danach kippt das Flugzeug wieder in die Horizontale, worauf ein Sturzflug folgt. Dabei gehen die Piloten hart an die Grenzen des Flugzeugs, sagt Markus Rettenmayr: »Diese Flugmanöver erfordern höchstes Geschick.« Nicht von ungefähr besteht die Crew aus drei ehemaligen Militärpiloten. Etwa 30 Parabeln werden pro Flugtag absolviert, zwischen den Phasen der Schwerelosigkeit ist jeweils eine Minute Pause.

Die Passagiere genießen das Schweben im Flugzeug. Die Beschwerden der Motion Sickness sind der Preis dafür. Aber: »Nach ein bis zwei Tagen ist alles wieder in Ordnung!«

HIT 2018

Hochschulinformationstag an der Universität Jena
Samstag, 26. Mai 2018, ab 9:30 Uhr am Ernst-Abbe-Platz

Studienmöglichkeiten von A wie Alte Geschichte bis Z wie Zahnmedizin. Die Universität Jena präsentiert beim Hochschulinformationstag rund 200 verschiedene Studienmöglichkeiten. Alle 10 Fakultäten stellen sich mit ihren Studienangeboten vor. Informationsstände, fachspezifische Angebote und Besichtigungen warten auf Studieninteressierte und ihre Eltern. Mehr als 50 Vorträge sowie Campus- und Stadtführungen stehen auf dem Programm.

NOCH MEHR MÖGLICHKEITEN

Orientierungsseminare

7. Februar, 28. März, 4. Oktober 2018

Schnupperstudium

In der Vorlesungszeit möglich

16. April – 6. Juli 2018 (SoSe)

22. Oktober 2018 – 1. Februar 2019 (WiSe)

Ein Draht zur Uni

☎ +49 157 · 34 56 32 84

www.uni-jena.de/schueler

FRIEDRICH-SCHILLER-
UNIVERSITÄT
JENA



LICHTGEDANKEN

Das Magazin der
Friedrich-Schiller-Universität Jena **Online**

Das Magazin der Friedrich-Schiller-Universität Jena –
auch als ePaper im Internet:

www.uni-jena.de/lichtgedanken



FRIEDRICH-SCHILLER-
UNIVERSITÄT
JENA