

# LICHTGEDANKEN

Das Forschungsmagazin

11

THEMENJAHR GLAS UND NACHHALTIGKEIT

GALERIE GLASOBJEKTE IN UNIVERSITÄTSSAMMLUNGEN

FOTOREPORTAGE WIE EINE GLASFASER ENTSTEHT




FRIEDRICH-SCHILLER-  
UNIVERSITÄT  
JENA

A close-up photograph of a glassblower's hands using tongs to hold a glowing, rounded piece of molten glass. The glass is bright orange and yellow, indicating high temperature. A single drop of molten glass is falling from the bottom of the piece. In the foreground, a rectangular mold is visible, containing a pool of molten glass.

**FESTE  
FLÜSSIGKEIT**

---



# EC<sup>2</sup>U SCIENCE BATTLE

**Save the date: 30.9.2022**



DAS Wissenschafts-Event des Jahres.  
4 europäische Unis. 4 Teams. 26 Forscher/innen.

**Seien Sie live dabei und  
unterstützen Sie das Team der Uni Jena!**

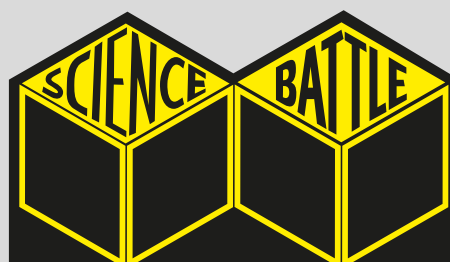
Beim Science Battle wetteifern interdisziplinäre  
Wissenschaftler/innen-Teams der European Campus  
of City-Universities Jena, Iasi (RO), Coimbra (P)  
und Salamanca (E) um die cleverste und unter-  
haltsamste Antwort auf Publikumsfragen.  
Das Publikum und eine Jury vergeben Punkte.  
Gewinnt dieses Jahr das Team der Uni Jena?  
Und was wollten Sie schon immer mal wissen?

**Mehr Informationen:**  
[www.uni-jena.de/ec2usciencebattle](http://www.uni-jena.de/ec2usciencebattle)

**Senden Sie Ihre Fragen an**  
[ec2u@uni-jena.de](mailto:ec2u@uni-jena.de)

**und seien Sie live dabei:**

Freitag, 30. September 2022, 15–18 Uhr  
Hörsaal 1, Carl-Zeiß-Straße 3 (Campus)  
oder im Livestream auf YouTube





**Dr. Ute Schönfelder, Redakteurin**  
**Abteilung Hochschulkommunikation**  
**der Friedrich-Schiller-Universität Jena**  
**Foto: Anne Günther**

#### HERAUSGEBER:

Abteilung Hochschulkommunikation/Bereich Presse  
 und Information im Auftrag des Präsidenten der Friedrich-  
 Schiller-Universität Jena

#### REDAKTION UND GESTALTUNG:

Katja Bär, Axel Burchardt (v.i.S.d.P.), Vivien Busse,  
 Liana Franke, Sebastian Hollstein, Marco Körner,  
 Stephan Laudien, Dr. Ute Schönfelder, Laura Weißert,  
 Kerstin Apel (Sekretariat), Monika Paschwitz (Redaktions-  
 assistenz)

Titelfoto: Jens Meyer

Grafisches Konzept: Timespin – Digital Communication  
 GmbH, Schenkstr. 7, 07749 Jena

#### ANSCHRIFT:

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Fürstengraben 1, 07743 Jena

Telefon: 03641 9-401400

E-Mail: presse@uni-jena.de

#### GESAMTHERSTELLUNG:

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

INTERNET: [www.lichtgedanken.uni-jena.de](http://www.lichtgedanken.uni-jena.de)

ISSN: 2510-3849

ERSCHEINUNGSDATUM: Juni 2022

Nachdruck nur mit Genehmigung gestattet. Für unverlangt  
 eingesandte Manuskripte, Fotos u. Ä. wird keine Haftung  
 übernommen. Namentlich gekennzeichnete Artikel müs-  
 sen nicht mit den Auffassungen des Herausgebers und der  
 Redaktion übereinstimmen. Für den Inhalt sind die Unter-  
 zeichner verantwortlich. Zur besseren Lesbarkeit haben  
 wir in den Texten teilweise nur die männliche Sprachform  
 verwendet. Mit den gewählten Formulierungen sind jedoch  
 alle Geschlechter gleichermaßen angesprochen.

## Glanzpunkt und Hoffnungsträger

Haben Sie heute schon aus dem Fenster geschaut, die Brille aufgesetzt oder auf dem Handy eine Nachricht getippt? Praktisch bei allem, was wir im Alltag tun, kommen wir mit Glas in Berührung. Dieses Material ist heute allgegenwärtig – so sehr, dass wir es oft gar nicht wahrnehmen. Ganz selbstverständlich sehen wir durch es hindurch oder füllen es als Gefäß, beleuchten Gebäude oder schmücken uns selbst damit, schicken Daten durch Glas in Echtzeit in jeden Winkel der Welt.

Ohne Übertreibung lässt sich sagen, wir leben im »Zeitalter des Glases«. Das unterstreichen auch die Vereinten Nationen, die 2022 zum »International Year of Glass« (IYOG) ausgerufen haben, mit dem Ziel, diesem Material die Wahrnehmung zu verschaffen, die seiner Bedeutung für uns gerecht wird. Glas ist nichts weniger als die Voraussetzung für unsere moderne Zivilisation: Seit Tausenden von Jahren von Menschenhand hergestellt, hat es sich dank seiner mechanischen und chemischen Eigenschaften, dank seiner Vielseitigkeit, Farbigkeit, seines Glanzes und seiner Transparenz zum Hightechmaterial für Zukunftstechnologien entwickelt.

Glas ist das Schwerpunktthema der vorliegenden Ausgabe der LICHTGEDANKEN. Aus Anlass des IYOG stellen wir die Glasforschung am Standort Jena vor, die im 19. Jahrhundert von Otto Schott hier begründet wurde (S. 32). Wir beleuchten Forschungsprojekte aus der Glaschemie und zeigen, wie Glas in vielfältiger Weise Anwendung findet. So entwickeln Forschende beispielsweise bioaktive, lösliche Glasimplantate, die helfen, Knochen zu

regenerieren (S. 20), entschlüsseln die Geheimnisse von natürlichem Glas (S. 24) und von Glas, das älter ist als das Sonnensystem (S. 26). Eine Fotoreportage zeigt, wie eine Glasfaser, so dünn wie ein menschliches Haar, entsteht (S. 34) und eine Bildergalerie präsentiert glanzvolle gläserne Zeugnisse aus den Sammlungen der Universität (S. 28).

Neben seiner Bedeutung für unsere moderne Welt ist der Werkstoff Glas aber auch ein echter Hoffnungsträger für eine nachhaltige Zukunft. Seine chemische Beständigkeit macht es nahezu unbegrenzt recycelbar, es kann bis zu einer Million Jahre unbeschadet überdauern. Auch aus diesem Grund ist 2022 Jahr des Glases: Sauberes Trinkwasser, nachhaltige Energieversorgung, Infrastruktur und Architektur – für die Mehrzahl der von den Vereinten Nationen in ihrer Agenda 2030 formulierten Zielen für eine nachhaltige Entwicklung spielt Glas die entscheidende Rolle, wie Glaschemiker Prof. Dr. Lothar Wondraczek im LICHTGEDANKEN-Interview erläutert (S. 12).

Ich wünsche Ihnen eine erhellende Lektüre und den einen oder anderen neuen Blick auf das besondere Material Glas. Wie immer freue ich mich über Feedback, Anregungen oder Kritik. Sie erreichen das Redaktionsteam und mich unter: [presse@uni-jena.de](mailto:presse@uni-jena.de).

Jena, im Juni 2022

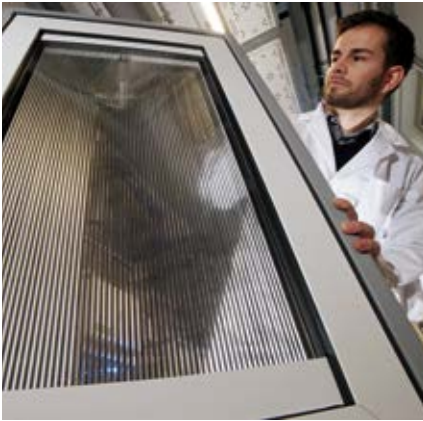


SCHWERPUNKT

# Feste Flüssigkeit

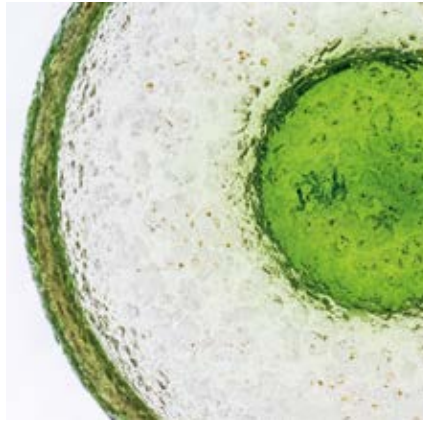
- 12 DAS GLÄSERNE ZEITALTER**  
Glaschemiker Lothar Wondraczek erklärt, wie Glas helfen kann, nachhaltiger zu leben.
- 14 MATERIAL DER MENSCHHEITSGESCHICHTE**  
Glas begleitet die Menschen seit Jahrtausenden und hat viele Innovationen erst ermöglicht.
- 18 DIE ORDNUNG IN DER UNORDNUNG**  
Forschungsteam untersucht, wie sich Glas kratz- und bruchfest machen lässt.
- 20 EIN ECHTER KNOCHENJOB**  
Bioaktive Glasimplantate können menschliche Knochen bei der Regeneration unterstützen.
- 22 SCHOCKGEFRORENES METALL**  
Glas ist nicht gleich Glas: Auch Metalllegierungen lassen sich zu Glas schmelzen.
- 24 GLAS ALS GEOBAROMETER**  
Mineralogin Franziska Scheffler analysiert Schmelzeinschlüsse in Mineralien.
- 26 GLÄSERNES UNIVERSUM**  
Wie Glas im All entsteht und was es über unser Sonnensystem verrät.
- 32 GESCHICHTE DER GLASFORSCHUNG IN JENA**  
Die Glaspioniere und ihr Wirken.
- 36 LICHT ALS GRENZGÄNGER**  
Andreas Tünnermann über Glasfasern und ihre Bedeutung für die Datenkommunikation.
- 38 DAS FENSTER ZUM GEHIRN**  
Forschende entwickeln holografisches Endoskop, mit dem sich Nervenzellen abbilden lassen.
- 40 MAßANFERTIGUNG IN HAARESBREITE**  
Wie optische Fasern für unterschiedliche Anwendungen designed und hergestellt werden.

FOTO: JAN-PETER KASPER



**17** | THEMENJAHR  
**GLAS UND NACHHALTIGKEIT**

FOTO: JENS MEYER



**28** | GALERIE  
**GLASOBJEKTE IN UNIVERSITÄTSSAMMLUNGEN**

FOTO: JENS MEYER



**34** | FOTOREPORTAGE  
**WIE EINE GLASFASER ENTSTEHT**

FOTO: CHRISTINE RÖRMERMANN



**44** | HINTER DEN KULISSEN  
**FORSCHUNG ZUM MITMACHEN**

FOTO: JENS MEYER



**64** | PORTRÄT  
**MIT HERZBLUT FÜR MINERALE UND GESTEINE**

FOTO: JENS MEYER



**66** | INTERVIEW  
**DER KRIEG IN DER UKRAINE**

NACHRICHTEN

06 | Aktuelles aus dem Uni-Alltag

SCHWERPUNKT

10 | Feste Flüssigkeit

HINTER DEN KULISSEN

44 | Forschung zum Mitmachen

TICKER

46 | Forschung kurz und knapp

THEMEN

48 | (Auf)Zeichnungen aus Haeckels Hörsaal

50 | Kosmischer Schallknall

52 | Die Zukunft der letzten Meile

54 | Gemeinschaftsgefühl verbessert Akzeptanz

56 | Das Ampèresche Gesetz auf dem Prüfstand

58 | Osteuropas Gewalterfahrung

NACHGEDACHT

59 | Wie geht es weiter nach der Pandemie?

DAS KALENDERBLATT

61 | Der Meister der Syntax

NEUE PROJEKTE

62 | Kooperationen und Förderungen

PORTRÄT

64 | Mit Herzblut für Minerale und Gesteine

INTERVIEW

66 | »Wir sollten über Putins Zeit hinausdenken«

## Kollidierende Neutronensterne

Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi hat einen Consolidator Grant des Europäischen Forschungsrates (ERC) erhalten. Sein Projekt »InspiReM« wird in den kommenden fünf Jahren mit knapp zwei Millionen Euro gefördert.

Sie gehören zu den extremsten und komplexesten Ereignissen des Universums: Kollisionen von Neutronensternen. Verschmelzen zwei dieser massereichen Himmelskörper, wird die Raumzeit enorm verzerrt und hochenergetische Strahlung und Materie ins All geschleudert. Die Kollision ist so heftig, dass sie von der Erde aus – selbst über Millionen Lichtjahre hinweg – sowohl als Gravitationswellen als auch als Licht beobachtet werden kann.

»Solche Ereignisse sind einzigartige astrophysikalische Laboratorien«, sagt Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi (Foto). Der 40-jährige Forscher und sein Team vom Theoretisch-Physikalischen Institut entwickeln theoretische Modelle, mit denen sich die Dynamik solcher kosmischer Kollisionen nachvollziehen lassen. Für sein Forschungsvorhaben »InspiReM« wird Sebastiano Bernuzzi vom Europäischen Forschungsrat mit einem »Consolidator Grant« gefördert und erhält dafür in den kommenden fünf Jahren knapp zwei Millionen Euro. Bernuzzi wurde bereits 2017 mit einem ERC »Starting Grant« gefördert. Seine Arbeitsgruppe gehört zu den führenden auf dem Gebiet der numerischen Simulation von Neutronensternverschmelzungen. Die Forschenden nutzen die größten Supercomputer Deutschlands, um mit Hilfe von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie detaillierte Vorhersagen für Gravitationswellen und elektromagnetische Beobachtungen zu machen, die von solchen Ereignissen ausgehen.



FOTO: JENS MEYER

»Indem wir simulieren, was mit der Raumzeit während der Verschmelzung der Sterne passiert, können wir detaillierte Modelle für die Interpretation der Strahlung erstellen, die wir beobachten.«

Erst kürzlich war Bernuzzi als Teil eines internationalen Teams an der Analyse von Daten beteiligt, die das NASA-Röntgenobservatorium »Chandra« im Objekt GW170817 aufgenommen hat (S. 50). US

## Auf dem Weg zur sauberen Katalyse

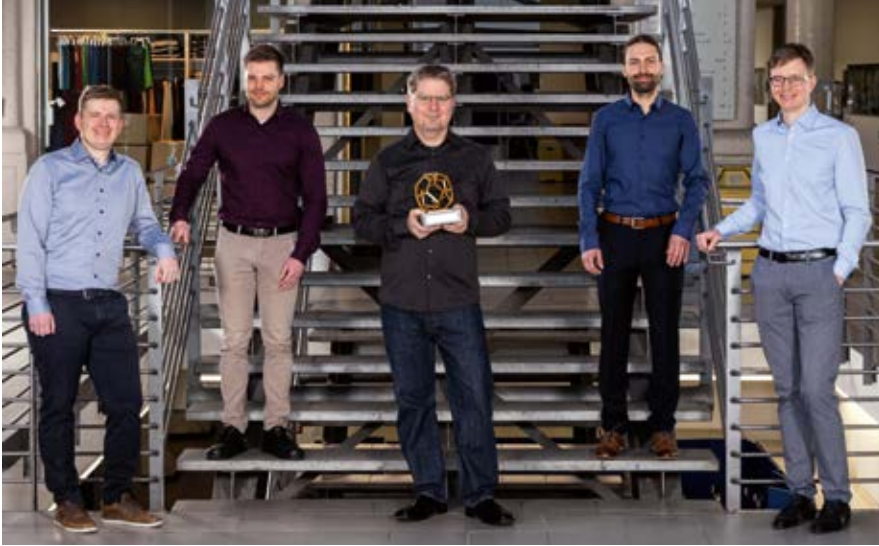
Prof. Dr. Martin Oschatz wird mit einem Starting Grant des Europäischen Forschungsrates (ERC) gefördert.



FOTO: ANNE GÜNTHER

Der Chemiker Prof. Dr. Martin Oschatz (Foto) möchte im Rahmen des Projekts »CILCat« neue Konzepte für die Katalyse entwickeln und wird dabei mit einem »Starting Grant« des ERC in Höhe von ca. 1,5 Millionen Euro unterstützt.

Auf dem Prinzip der Katalyse beruht die Herstellung fast aller Grundchemikalien und ihrer Folgeprodukte. Die sogenannte heterogene Katalyse nutzt dabei den Umstand, dass sich kleine Teilchen wie Moleküle oder Ionen an die Oberflächen fester Stoffe binden. Die Teilchen werden durch diese Wechselwirkung »aktiviert«, d. h. ihre Umwandlung in andere Stoffe wird beschleunigt. »Oftmals sind für katalytische Prozesse aber seltene Metalle nötig«, beschreibt der 34-Jährige eine Herausforderung, die er in seinem Forschungsprojekt angehen will, um Katalyseformen zu entwickeln, die ohne seltene, teure oder giftige Metalle auskommen. Ziel und die damit verbundenen Hoffnungen sind, die Chemie und ihre Prozesse nachhaltiger und ungefährlicher zu gestalten. AB



Prof. Dr. Sebastian Böcker, Lehrstuhl für Bioinformatik, 3. v. li, hält den Thüringer Forschungspreis 2022 in seinen Händen. Ausgezeichnet wurden außerdem Dr. Markus Fleischauer, li., Dr. Kai Dührkop, 2. v. li., Dr. Marcus Ludwig, 4. v. li., und Doktorand Martin Hoffmann, re. · Foto: Jens Meyer

## KI identifiziert kleine Moleküle

Bioinformatik-Team ist mit dem Thüringer Forschungspreis 2022 in der Kategorie Angewandte Forschung ausgezeichnet worden.

Zu den Preisträgern des Thüringer Forschungspreises 2022 gehört erneut ein Team der Universität Jena. Die Bioinformatiker um Prof. Dr. Sebastian Böcker sind für die Entwicklung informatischer Methoden zur Identifikation kleiner Moleküle geehrt worden und haben ein Preisgeld von 12500 Euro erhalten.

Kleine Moleküle – sogenannte Metabolite – sind allgegenwärtig. Alles, was lebt, produziert Metabolite. »Für den

Menschen spielen sie als Wirkstoffe eine immense Rolle«, macht Prof. Böcker deutlich. Neue Wirkstoffe aus der Natur zu identifizieren und nutzbar zu machen, ist jedoch zeit-, kosten- und arbeitsintensiv. »Hinzu kommt, dass wir oft gar nicht wissen, nach welchen unbekanntem Molekülstrukturen wir eigentlich suchen«, so Böcker. Um kleine Moleküle in Zell- und Gewebeproben beispielsweise von Heilpflanzen nachzuweisen, wird ein Massen-

spektrum aufgenommen und mit Daten von Referenzmessungen abgeglichen. Auf diese Weise lassen sich aber nur Moleküle identifizieren, deren Struktur bereits bekannt und in einer Datenbank hinterlegt ist.

Und genau hier setzt die Arbeit der Jenaer Bioinformatiker an. Sie entwickeln Methoden, die es erlauben, mit den Massenspektrometriedaten auch bislang unbekannte Molekülstrukturen zu identifizieren. Dafür nutzen sie Verfahren des maschinellen Lernens. So haben sie u. a. die Suchmaschine »CSI:FingerID« entwickelt, mit der sich Massenspektrometriedaten in Informationen über die chemische Struktur »übersetzen« lassen. US

## Batterien mit Selbstheilungskräften

Interdisziplinäres Team wirbt Förderung für die neue Forschungsgruppe »FuncHeal« von der DFG ein.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert das Projekt »FuncHeal« unter der Leitung von Prof. Dr. Ulrich S. Schubert in den kommenden vier Jahren mit rund 3,5 Millionen Euro. Ziel ist es, eine neue Generation selbstheilender Materialien zu entwickeln, die nicht nur mechanische Beschädigungen reparieren können, sondern auch funktionale Eigenschaften wiederherstellen.

Materialien, die die Forschungsgruppe entwickelt, sollen vor allem in flexiblen Energiespeicher- und -umwandlungsmaterialien zum Einsatz kommen. Anders als bei bisherigen Ansätzen selbstheilender Materialien geht es nicht nur darum, Risse und andere mechanische Beschädigungen



FOTO: JENS MEYER

zu heilen. Es soll auch möglich sein, Funktionen und Eigenschaften gezielt wiederherzustellen, beispielsweise die Leitfähigkeit von Elektrodenmaterialien in Batterien oder die optischen Eigenschaften von organischen Solarzellen.

So können etwa organische, flexible Solarzellen (Foto) durch Licht so beschädigt werden, dass eine Umwandlung der Sonnenstrahlung in Strom nicht mehr möglich ist. Im Rahmen von FuncHeal wollen die Forschenden Wege finden, mit denen die molekulare Struktur der Materialien wiederhergestellt und die Funktionalität der Solarzellen wiedergewonnen werden kann. US



Elias von Kreta verfasst einen Kommentar zu Gregor von Nazianz.  
· Foto: Universitätsbibliothek Basel

## Zwei neue Graduiertenkollegs

Die DFG fördert neue Kollegs in den Material- und Geisteswissenschaften, die Anfang 2023 starten werden. Ein internationales GRK wurde verlängert.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert in den kommenden fünf Jahren zwei neue Graduiertenkollegs (GRK) der Universität Jena mit mehr als zwölf Millionen Euro.

Am neuen GRK »Materials-Microbe-Microenvironment: Antimicrobial biomaterials with tailored structures and properties« sind Forschende aus Physik, Chemie, Biologie, klinischer Medizin und Mikrobiologie der Universität und des Universitätsklinikums beteiligt. Sie wollen eine maßgeschneiderte Plattform antimikrobieller Bio-

materialien entwickeln, um besser biomaterialassozierte Infektionen zu vermeiden. Geleitet wird das GRK vom Materialexperten Prof. Dr. Klaus Jandt und der Medizinerin Prof. Dr. Bettina Löffler.

Im Mittelpunkt des GRK »Autonomie heteronomer Texte in Antike und Mittelalter« stehen Texte, die ältere Texte aufgreifen und deren Inhalte in neuer Form weitergeben und aktualisieren. Dazu gehören Kommentare, Predigten, Wiedererzählungen, Paraphrasen u. A. Sie kommen in allen klassischen Fach-

disziplinen vor: in Philosophie und Literatur, Jurisprudenz und Medizin sowie in den Theologien von Judentum, Christentum und Islam. Sprecherin und Sprecher des Kollegs sind Prof. Dr. Katharina Bracht und Prof. Dr. Matthias Perkams.

Verlängert wurde das GRK »Tree Diversity Interactions: The role of tree-tree interactions in local neighbourhoods in Chinese subtropical forests« der Unis Halle-Wittenberg, Jena und Leipzig sowie chinesischer Partner. AB

## Überregionales Zentrum für Quantenphotonik

Carl-Zeiss-Stiftung fördert Standort- und Disziplinen-übergreifendes Konsortium in Ulm, Stuttgart und Jena.



FOTO: STEFFEN WALTHER

Das erste überregionale Zentrum für Quantenphotonik ist an den Universitäten Ulm, Stuttgart und Jena eröffnet worden. Das von der Carl-Zeiss-Stiftung mit zwölf Millionen Euro geförderte Zentrum soll rund 50 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern eine Standort- und Disziplinen-übergreifende Plattform für Forschung und Austausch bieten.

Die Photonik stellt im Bereich der

Quantenwissenschaft eine Schlüsseltechnologie dar: Photonen dienen als Sensorelemente, Datenübermittler und Quantensysteme. Die Vernetzung aus Quantentechnologien und Photonik bildet das Fundament von »QPhoton«. Ziel ist die Entwicklung einer neuen Generation von Bildgebungs- und Sensortechnologien. Sie sollen höhere Sensitivitäten und eine schnellere Datenverarbeitung ermöglichen. Marquardt



# Das koloniale Erbe Thüringens

Mit insgesamt 300 000 Euro fördert das Land an den Universitäten Jena und Erfurt den Aufbau einer hochschulübergreifenden Koordinationsstelle zur Auseinandersetzung mit dem kolonialen Erbe in Thüringen. Initiiert haben dies die Historikerinnen Prof. Dr. Christiane Kuller von der Universität Erfurt (l.) und Prof. Dr. Kim Siebenhüner von der Universität Jena (r.).



FOTOS: HAMISH JOHN APPLEBY/JENS MEYER

Über das Thema »Koloniales Erbe« wird gerade intensiv diskutiert, nicht nur in Thüringen. »Wir reagieren mit der Koordinationsstelle auf das gesteigerte Interesse in Bildungseinrichtungen, Medien und der Zivilgesellschaft an unserer kolonialen Vergangenheit«, benennt Christiane Kuller ihre Motivation, die Koordinationsstelle einzurichten. Es gehe darum, einen Beitrag, den Universitäten in dieser gesellschaftlichen Debatte leisten können, sichtbar zu machen. »Außerdem haben wir bereits Forschungsprojekte, Lehrveranstaltungen und Vortragsreihen zu diesem Thema. Die Initiative knüpft also im Grunde an die bereits bestehende Expertise an.«

## Forschungsaktivitäten in den Sammlungen miteinander vernetzen

Auf die besondere Rolle der Sammlungen der Universitäten bei der Aufarbeitung des kolonialen Erbes, weist Kim Siebenhüner hin. Noch sei die genaue Anzahl von Objekten mit kolonialem Bezug unbekannt. »Doch die Aktivitäten, die dies zu klären versuchen, stehen derzeit weitgehend unverbunden nebeneinander. Damit bleibt das große Potenzial ungenutzt, das sich aus einem strukturierten wissenschaftlichen Austausch und einer synergeti-

schen Bündelung der verschiedenen Prozesse für eine systematische Bearbeitung von Forschungsfragen ergibt.« Aus dieser Situation sei die Idee entstanden, die Aktivitäten der Universitäten Erfurt und Jena im Hinblick auf Forschung, Lehre und gesellschaftlichen Dialog stärker miteinander zu vernetzen und weiter auszubauen.

Die Koordinationsstelle wird in den kommenden drei Jahren ein Netzwerk für wissenschaftlichen Austausch aufbauen, das nicht nur Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen im Blick hat, sondern auch zivilgesellschaftliche Initiativen und andere Gruppen mit postkolonialen Zielrichtungen als Kooperationspartner und -partnerinnen einbezieht. Auch eine Kooperation mit Museen und Archiven, Bildungsinstitutionen wie der Landeszentrale für Politische Bildung, Gedenkstätten und Schulen ist vorgesehen.

Konkret wird es u. a. ein Kolloquium geben, an dem Vertreterinnen und Vertreter der Universitäten Erfurt und Jena beteiligt sind und das regelmäßig tagt. Hier werden laufende universitäre und außeruniversitäre Forschungsarbeiten vorgestellt und diskutiert. Darüber hinaus wollen die Forschenden auch ihre aktuellen »Lücken« sichtbar machen und eine Landkarte zum Thema Kolonialismus in Thüringen erstellen. Daraus sollen Ideen für Lehrveranstaltungen, für Master- und Qualifikationsarbeiten und für kooperative Drittmittelprojekte erwachsen. Objekte und Analysen werden auf einer Website bzw. in einem Sammelband vorgestellt, der Wissenschaft und »Public Science« verbindet. Und nicht zuletzt wird die Arbeit im Rahmen von öffentlichen Vorträgen, einem Blog und auf Social-Media-Kanälen präsentiert. Voigt

Iwi kúpuna während einer Rückführungszeremonie in der Aula der Universität im Februar 2022. · Foto: Jürgen Scheere



## Neubesetzte Arbeitsgruppe Kolonialismus

Eine Kopfhaut aus Namibia, Schädel aus Tansania und Papua. Dies sind Beispiele für menschliche Überreste aus Sammlungen der Universität Jena, die während der Kolonialzeit nach Deutschland gebracht wurden. Umfangreiche Forschungen waren notwendig, um die genaue Herkunft und die Geschichte dieser menschlichen Überreste nachvollziehen zu können, denn die Identifizierung ist fast immer schwierig und aufwendig. Dieser Aufgabe stellt sich die Universität Jena seit Jahren. Seit einigen Monaten wurde dazu auch die Arbeitsgruppe »Koloniales Erbe und rassismuskritische Bildungsarbeit« eingesetzt, der die Historiker Joachim Bauer und Stefan Gerber, der Biologiedidaktiker Uwe Hoßfeld und der Archäologe/Anthropologe Enrico Paust angehören, und die aus den Sammlungen und weiteren Bereichen der Universität unterstützt wird.

Das Expertenteam hat gerade neue Ergebnisse vorgelegt und sie für die interessierte Öffentlichkeit in der Publikation »Ernst Haeckels koloniale Schädel« publiziert. Sie zeigt am Beispiel von acht Schädeln aus der ehemaligen Osteologischen Sammlung und dem Phyletischen Museum auf, welche Wege solche Sammlungsobjekte im 19. und 20. Jahrhundert genommen haben und welche Möglichkeiten und Grenzen es gibt, ihre Herkunft ein Jahrhundert später zu rekonstruieren. AB



Die gläsernen Perlenketten datieren aus dem 6./7. Jahrhundert und stammen aus Ungarn. Sie sind Teil der Sammlung Ur- und Frühgeschichte der Universität Jena. - Foto: Jens Meyer

SCHWERPUNKT

## Feste Flüssigkeit

---

### Glas begleitet unser Leben und verändert die Welt

Glas gehört zu den ältesten von Menschen hergestellten Werkstoffen und gibt Forschenden trotzdem noch immer Rätsel auf. Glas ist eine Flüssigkeit, die nicht fließt. Obwohl es hart ist und nahezu unversehrt Jahrtausende überdauern kann, ist es doch zerbrechlich wie kaum ein anderes Material. Ohne Glas wäre die Welt heute nicht wie sie ist. Immer wieder haben Gläser wissenschaftliche und gesellschaftliche Innovationen ermöglicht, ohne Glasfasern wäre das Internet undenkbar. Im aktuellen »Internationalen Jahr des Glases« der Vereinten Nationen schaut dieser Schwerpunkt auf die Glasforschung an unserer Universität, die mit dem Wirken Otto Schotts ihren Anfang nahm und bis heute die Forschenden inspiriert, wo an neuartigen Gläsern und zukunftsweisenden Anwendungen geforscht wird und wo gläserne Zeugnisse der Menschheits- und Erdgeschichte immer noch neue, faszinierende Erkenntnisse bereithalten.

# Das gläserne Zeitalter

Das Jahr 2022 ist von den Vereinten Nationen (UN) zum Internationalen Jahr des Glases ausgerufen worden. An der zentralen Organisation dieses Themenjahres ist auch der Jenaer Glaschemiker Prof. Dr. Lothar Wondraczek beteiligt. Im Interview erläutert er, warum der jahrtausendealte Werkstoff mehr Aufmerksamkeit verdient und wie uns Glas helfen kann, nachhaltiger zu leben.

INTERVIEW: UTE SCHÖNFELDER

## Herr Wondraczek, warum haben die UN ein internationales Jahr für den Werkstoff Glas ausgerufen?

Ein Gedanke dahinter ist sicher, die Wahrnehmung dafür zu schärfen, wie bedeutend Gläser kulturhistorisch für uns sind. Innovationen aus Glas haben die Menschheit immer wieder entscheidend vorangebracht: angefangen von den ersten Werkzeugen aus Obsidian, über Glasgefäße, in denen man Lebensmittel aufbewahren konnte, Fensterglas, das es erstmals möglich machte, es im Inneren von Wohngebäuden hell und gleichzeitig warm zu haben. Das sind Erfindungen, die das Leben der Menschen fundamental verändert haben.

Hinzu kommen Entdeckungen, die dank Mikroskopen oder Teleskopen, in denen Glasoptiken vorkommen, gemacht wurden. Und nicht zuletzt bestehen heutige Datennetze, unsere Kommunikationswege, das Internet, letztlich aus Glasfasern. Man kann also durchaus sagen, dass wir in einem Zeitalter des Glases leben; ohne Glas wären viele alltägliche Dinge für uns in dieser Form nicht möglich – und doch ist dies vielen Menschen kaum bewusst. Das will das Themenjahr ändern.

## Was ist denn überhaupt so besonders am Material Glas?

Eigentlich alles und nichts. Glas stellt – neben Kristallen – einen der beiden wichtigsten Zustände dar, die Festkörper einnehmen können. Dabei ist die Vielfalt glasartiger Materialien praktisch unendlich: Über die uns ständig umgebenden Fensterscheiben, Flaschen und Mobiltelefone hinaus umspannen Gläser alle Materialklassen, chemischen Zusammensetzungen und daraus resultierende Eigenschaften. Besonders macht sie die Art, wie ihre

innere Struktur aufgebaut ist, d. h., wie die Atome, aus denen sie bestehen, zu einem räumlichen Netzwerk angeordnet sind. Diese unterscheidet sie ganz grundsätzlich von Kristallen. Gläser entstehen aus einer Flüssigkeit, die während eines Abkühlungsprozesses immer zähflüssiger wird. Irgendwann wird so ein Punkt erreicht, bei dem keine wahrnehmbare Bewegung mehr möglich ist. Ab diesem Zeitpunkt sprechen wir dann von einem Glas: eine eingefrorene, unterkühlte Flüssigkeit. Dieser Materiezustand beinhaltet zahlreiche faszinierende, teils sogar metaphorische Aspekte: Unordnung, Ungleichgewicht, Chaos, Unendlichkeit, das Wechselspiel zwischen Festigkeit und Härte auf der einen Seite, Transparenz und (Licht-)Durchlässigkeit auf der anderen.

## Glas wird schon seit Jahrtausenden hergestellt und vielfältig genutzt. Was gibt es heute noch Neues daran zu entdecken?

Es gibt tatsächlich überraschend viele offene Fragen. Da ist zuerst die Frage nach der grundlegenden Natur des Glases. Warum bilden sich Gläser überhaupt? Warum sind sie fest? In welcher Weise lässt sich strukturelle Unordnung und Dynamik beschreiben, so dass daraus – wie bei Kristallen seit langem etabliert – Eigenschaften vorhergesagt werden können? Das sind Fragen der Grundlagenforschung, auf die wir bisher noch keine Antwort haben.

Auf der anderen Seite steht die gesellschaftliche Bedeutung von Glaswerkstoffen. Viele Gläser sind Massenprodukte, die energieintensiv, aber mit sehr hohem Durchsatz hergestellt werden. Gläser sind in nahezu idealer Weise an zukünftige Kreislaufwirtschaften angepasst; sie versprechen das Urbild

der Recyclingfähigkeit. Andererseits lernen wir nicht erst seit den letzten Wochen, dass die Glastechnologie ganz neue Denkweisen erfordert, was Energieeinsatz und CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion, aber auch Fragen der Rohstoffe und der Produktgestaltung angeht.

## Das Internationale Jahr des Glases macht darauf aufmerksam, dass Glas entscheidend zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele beiträgt (siehe Infokasten). Können Sie das an einem Beispiel verdeutlichen?

Das lässt sich am Beispiel Recycling zeigen. Behälterglas zum Beispiel wird heute zu mehr als 90 Prozent aus recyceltem Glas hergestellt. Und selbst das ließe sich bei entsprechend angepassten Fabrikationstechnologien noch steigern.

Weitere Beispiele finden wir im Gebäudesektor, der immerhin einer der größten CO<sub>2</sub>-Emittenten Europas ist. Hier leisten moderne Glaswerkstoffe als Isolations- und Dämmmaterialien, Mehrfachverglasungen bis hin zu sogenannten »Smart Windows« einen ganz entscheidenden Beitrag zur Erreichung unserer Klimaziele. Interessanterweise können und sollen sie auch nicht substituiert werden. Sie dienen stattdessen selbst zur Substitution weniger nachhaltiger Materialien. So könnten zukünftige Wohnhäuser zu einem sehr viel größeren Anteil aus vollständig recyclingfähigem Glas (in Form von Verschiebungen und Dämmstoffen) und Holz bestehen.

## Hat Glas eigentlich auch Nachteile?

Wenn wir beim Thema Nachhaltigkeit bleiben, ist das vergleichsweise hohe Gewicht von Glas sicher kritisch. Glasflaschen sind schwer, was sich erheblich auf die Energiebilanz auswirken



**Glas begleitet Prof. Dr. Lothar Wondraczek bereits seit rund 20 Jahren (hier ein Block aus hochreinem Borosilikatglas). Ursprünglich konnte er sich lange nicht zwischen einem Kunststudium und »irgendetwas anderem« entscheiden. Studiert hat er schließlich Materialwissenschaft an der TU Clausthal und war danach mehrere Jahre in der Glasindustrie tätig. Was ihn bis heute an Glas fasziniert? Die Greifbarkeit des Materials und die metaphorische Rolle seines Unordnungszustandes. · Foto: Jens Meyer**

kann. Daneben steht die sprichwörtliche Zerbrechlichkeit von Glas, deren Überwindung auch zukünftig viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit erfordern wird.

Ganz grundlegend gibt es natürlich auch Eigenschaften, die unmittelbar aus der Natur des Glases und der strukturellen Unordnung resultieren. Diese kann – im Vergleich zu kristallinen Werkstoffen – zum Beispiel für optische Eigenschaften von Nachteil sein, hier v. a. die sogenannte optische Aktivität. Ausgleichen lässt sich dies teilweise, indem Glas in Form langer Fasern hergestellt wird, die in optische Anwendungen dann eine höhere Wechselwirkungslänge zwischen Licht und Material ermöglichen.

#### **Gibt es Lebensbereiche, wo Glas vorkommt, man es aber gar nicht so leicht bemerkt?**

Ja, durchaus. Zum Beispiel ist die schon erwähnte PET-Flasche streng genommen auch aus Glas. Auch dieser Kunststoff ist eine eingefrorene unterkühlte Flüssigkeit. Aber auch in Kosmetika, Zahncremes und vielen Haushaltsprodukten finden sich feinste Glaspartikel, und selbst Trinkwasser kann mit diesen versetzt werden, um Leitungen freizuhalten. Zudem sind in jedem Schaltkreis, in jedem elektrischen Bau-

teil heute auch Glaskomponenten enthalten.

#### **Welche Rolle spielt der Standort Jena für die Glasforschung und das internationale Glasjahr?**

Jena ist eines der weltweiten Zentren der akademischen Glasforschung (siehe S. 32), nicht nur mit der Universität, sondern auch dank der vielen benachbarten Forschungseinrichtungen auf dem Feld der Optik und Photonik. Hinzu kommen eine ganze Reihe von unterschiedlich großen Einrichtungen der forschenden Industrie.

Im Rahmen des Internationalen Jahres sind Jenaer Forscherinnen und Forscher in zahlreiche Aktivitäten eingebunden: angefangen vom Programmentwurf für die Eröffnungszereemonie bei den Vereinten Nationen in Genf über die Koordination des weltgrößten Glaskongresses in Berlin bis zur Beteiligung an der Abschlussveranstaltung in Tokio.

Gerade haben wir ein Nachwuchsprogramm gestartet, in dem junge Forschende als »Glass Future Fellows« gefördert werden. Rund 70 Prozent von ihnen sind junge Frauen. Im Herbst planen wir das zehnte Otto-Schott-Kolloquium, eine hochrangige wissenschaftliche Tagung an unserer Universität mit Gästen aus der

ganzen Welt. Zudem versuchen wir, über öffentliche Zusammenarbeit und Veranstaltungen in Kooperation mit Schulen und Museen, das Thema Glas in die breite Öffentlichkeit zu tragen.

#### **Welche Fragen wollen Sie selbst in Bezug auf das Material Glas mit Ihrer Arbeit klären?**

Die Forschung meiner Arbeitsgruppe betrifft eigentlich drei Kernthemen. Das sind erstens die mechanischen Eigenschaften von Glaswerkstoffen, also z. B. die Frage, wie man Glas dünner machen kann und es trotzdem mechanisch resistent bleibt (siehe S. 18).

Daneben beschäftigen wir uns mit dem gezielten Einstellen bestimmter optischer Eigenschaften von Glas, wie dem Lichtbrechungsverhalten oder der optischen Aktivität z. B. in Form von Fluoreszenz.

Verbindend steht unser drittes Arbeitsfeld, nämlich die Suche nach neuen und ungewöhnlichen Wegen der Glasherstellung. Dies können Gasphasen- oder lösungsbasierte Ansätze sein, aber auch Hochdrucksynthese oder alternative Schmelzverfahren, mit denen nicht nur neuartige Glaswerkstoffe (siehe S. 23), sondern zukünftig vielleicht auch energieeffizientere oder nachhaltigere Technologien ermöglicht werden. ■



Diese römischen Glasbalsamarien aus Garizim (Palästina) stammen aus dem 3./4. Jh. n. Chr. und gehören zur Antikensammlung des Instituts für Altertumswissenschaften der Universität Jena. · Foto: Jens Meyer

## Material der Menschheitsgeschichte

Die Möglichkeit, Glas herzustellen, zu formen und mit unterschiedlichsten Eigenschaften zu versehen, hat die Menschheit in ihrer Entwicklung immer wieder entscheidend vorangebracht: In Glasgefäßen konnten Lebensmittel haltbar gemacht und über lange Zeiten aufbewahrt werden; Fensterscheiben und Glühlampen aus Glas brachten Licht in Gebäude; mit Hilfe von Mikroskopen, Teleskopen und anderen optischen Geräten, die Linsen, Spiegel oder Prismen aus Glas enthalten, sind fundamentale Entdeckungen gemacht worden; Glasfaserkabel umspannen heute den gesamten Erdball und ermöglichen Kommunikation in Echtzeit und mit höchster Datenkapazität.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Der Werkstoff Glas begleitet uns schon seit Jahrtausenden. Bereits in der Steinzeit nutzten Menschen natürlich vorkommende Gläser. Diese stammten aus Vulkanen, wie »Obsidian«, und lieferten scharfe Werkzeuge, Speerspitzen und Klingen. Oder sie entstanden, wenn einschlagende Meteoriten Sand und Gestein auf der Erdoberfläche schmolzen, wie »Tektit«. Daraus ließen sich Gebrauchsgegenstände oder Schmuck herstellen.

Seit gut 4000 Jahren beherrschen die Menschen das Handwerk, selbst Glas herzustellen und inzwischen hat es Einzug in beinahe jeden Lebensbereich gefunden. Und doch gibt dieser vielleicht älteste von Menschen hergestellte Werkstoff noch immer Rätsel auf: Gläser faszinieren durch Transparenz, Reinheit und sanfte Formen. Sie sind gleichzeitig fest und sprichwörtlich zerbrechlich. Wie passen diese Eigenschaften zusammen? Und was ist Glas überhaupt?

Diese Frage lässt sich unterschiedlich beantworten. Antwort 1: Glas bildet einen von nur zwei Zuständen, den ein Feststoff annehmen kann. Entweder liegt er als Kristall vor, das heißt, die

Atome, aus denen er besteht, ordnen sich in einer periodischen Struktur an. Das ist etwa bei Salzen oder Metallen der Fall. Oder die Atome eines Feststoffes befinden sich in Unordnung und es gibt keine periodische Gitteranordnung. Zu diesen »amorphen« Festkörpern gehören Gläser.

### Glas ist eine Flüssigkeit

Antwort 2: Wenn man Glas aus seiner Entstehung heraus versteht, dann ist Glas eine »Flüssigkeit«. Allerdings eine erstarrte Flüssigkeit und damit nicht flüssig, sondern fest, wobei der Übergang buchstäblich »fließend« verläuft und vor allem vom Zeitraum abhängt, in dem man den Zustand beobachtet. Würde man nur lange genug darauf schauen, so könnte man eine Fensterscheibe durchaus als »Wasserfall« wahrnehmen (allerdings reicht dafür nicht einmal das Alter des Universums aus).

Interessant ist: Aus beiden Antworten folgt, dass sich unter geeigneten Bedingungen beinahe jede Schmelze in ein Glas überführen lässt. Nicht die

chemische Zusammensetzung, sondern die Unordnung der Struktur und der Flüssigkeitscharakter entscheiden über die Glasigkeit. Das weit verbreitete »Quarzglas« besteht wie der »Quarkristall« aus Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ). In beiden Formen besteht das Material aus Silizium- und Sauerstoffatomen, die sich zu symmetrischen Tetraedern anordnen. Während diese Baueinheiten im Kristall jedoch in festen Winkeln zueinander verknüpft sind und so eine hochgeordnete Struktur bilden, an der jedes Atom seinen festen Platz hat, variieren im Glas diese Verknüpfungswinkel. Der Unterschied ergibt sich beim Abkühlen der flüssigen Schmelze: Erfolgt dies sehr langsam, so haben die Baueinheiten ausreichend Zeit, ihre kristalline Ordnung einzunehmen. Wird die Schmelze jedoch schnell abgekühlt, so bleibt für die Ausbildung der Kristallordnung nicht genügend Zeit und die Schmelze erstarrt in Form eines Glases. Glas ist also als ein physikalischer Zustand definiert. Aufgrund seines Charakters als »eingefrorene Flüssigkeit« besitzt Glas auch ganz ähnliche Eigenschaften wie

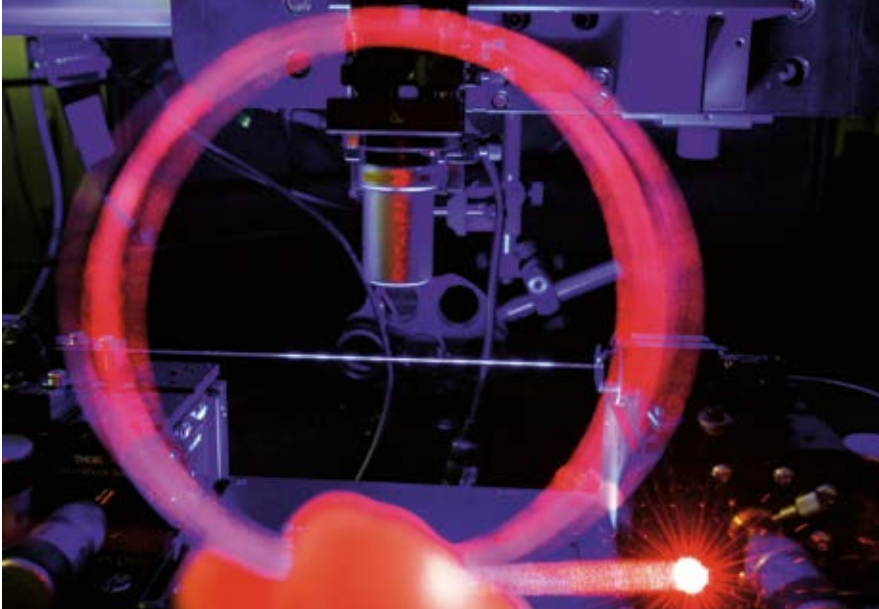


Bild links: Glasfasern in einem Labor des Instituts für Angewandte Physik der Universität Jena. · Foto: Jens Meyer

Bild unten: Glasfassade der Thüringer Universitäts- und Landesbibliothek. · Foto: Jan-Peter Kasper

echte Flüssigkeiten. Es ist beispielsweise in hohem Maße transparent, hat eine glänzende Oberfläche, lässt sich unterschiedlich einfärben und zeigt ein ähnliches Bruchverhalten wie Flüssigkeiten.

#### Wie Glas entsteht

Um Glas herzustellen, braucht es nur wenige Rohstoffe, die beinahe überall auf der Welt verfügbar sind: Quarzsand, Kalk, Soda und Pottasche. Die ersten Verfahren zur Glasherstellung wurden vermutlich in Mesopotamien und Ägypten um 3000 v. Chr. entwickelt: Zerkleinertes Quarzgestein wurde mit Pflanzenasche vermengt und in mehreren Schritten zu Glasbarren geschmolzen, die zu Tiegeln, Kelchen oder Schmuckgegenständen weiterverarbeitet wurden. Durch Beimischen von Metalloxiden oder Königswasser ließ sich das Glas in unterschiedlichen Tönen färben.

Mit der Erfindung der Glasmacherpfeife um das Jahr 100 v. Chr. konnten größere und dünnwandigere Gefäße hergestellt werden, wie Trinkgläser, Karaffen und andere Behälter. Im 12. Jahrhundert wurden dann runde Fensterscheiben in Kirchenfenstern eingesetzt (die Butzenscheiben), die aus einer vorgeblasenen Glaskugel durch Drehen ihre Form erhielten. Größere Fensterscheiben ließen sich erst ab dem 17. Jahrhundert herstellen, als entsprechende Walzverfahren entwickelt worden sind.

#### Das Glaszeitalter

Heute lässt sich Glas in nahezu jeder Form und Zusammensetzung für Anwendungen maßschneidern: von optischen Gläsern und Glaskeramiken, über flexible Displays und Beleuchtungsglas bis zu kilometerlangen Glasfaserkabeln, Solarzellen und Baustoffen. Je nach gewünschter Glaseigenschaft kommen weitere Zuschlagstoffe zum Einsatz. Boroxid etwa verändert die thermischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften des Glases, Aluminiumoxid erhöht die Bruchfestigkeit.

Neben den klassischen Silikat-Gläsern lassen sich auch Gläser herstellen, die

statt Siliziumdioxid als glasbildende Substanz andere Oxide verwenden, wie Phosphor- und Boroxide, wobei bioaktive Phosphat- oder besonders resistente Borosilikatgläser entstehen. Für Laseroptiken wird Glas mit Ytterbium oder Germanium dotiert, um Licht leiten, erzeugen und verstärken zu können.

Aus einer weiter gefassten Perspektive sind auch viele technische Kunststoffe Gläser, also »eingefrorene Flüssigkeiten«. Es gibt hochfeste metallische Gläser, infrarottransparente Chalcogenidgläser und weitere mehr. Glas, so viel steht fest, ist nicht gleich Glas. Es ist vielfältig, vielseitig und allgegenwärtig. Die Welt heute ist eine Welt des Glases. ■



# Glas in Zahlen



## 1 000 000

Jahre können vergehen, bis sich Glas auflöst. Der Grund: Glas kann chemisch absolut inert sein. Das heißt, ein Glasgefäß reagiert nicht mit seiner Umgebung oder seinem Inhalt. Dies ist für die Haltbarkeit von Lebensmitteln und Medikamenten ein großer Vorteil. Zudem kann das Material so nahezu unbegrenzt recycelt werden, indem es immer wieder zu neuen Flaschen, Gläsern oder Baumaterialien geformt wird. Gläser gelten aufgrund ihrer chemischen Stabilität schließlich als eine der wichtigsten Optionen für den dauerhaften Einschluss radioaktiver Elemente.

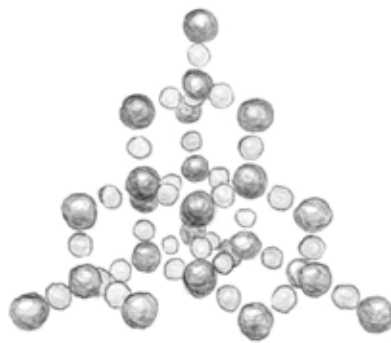


## 30 000 000

Jahre ist es etwa her, dass ein Meteorit die Wüste Nordafrikas getroffen hat und den Wüstensand in der Region aufschmelzen ließ. Dabei entstanden millimeter- bis dezimetergroße Stücke Quarzglas in verschiedenen Farbschattierungen. Aus diesem »Libyschen Wüstenglas« wurde im Alten Ägypten Schmuck hergestellt. So zierte beispielsweise ein Skarabäus aus diesem Glas die Brustplatte des Pharaos Tutanchamun, die vor genau 100 Jahren in seinem Grab entdeckt wurde.

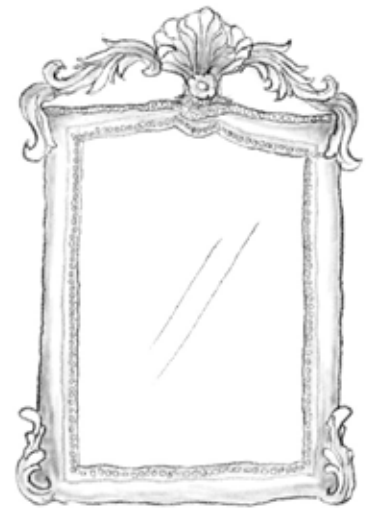
## 1875

wurde Otto Schott an der Universität Jena promoviert, wo er 1967 Namensgeber des Otto-Schott-Instituts für Glaschemie wurde (heute: Otto-Schott-Institut für Materialforschung). Otto Schott gilt als der Begründer der systematischen glaschemischen Forschung.



## 1 710

Grad Celsius beträgt die Schmelztemperatur von kristallinem Quarz. Dieser besteht aus  $\text{SiO}_2$  (Siliziumdioxid), dem Hauptbestandteil von Quarzsand. Wird diese chemische Verbindung geschmolzen, ordnen sich die  $\text{SiO}_2$ -Moleküle in einem ganz bestimmten Muster an: Die Sauerstoffatome bilden Tetraeder – Pyramiden mit vier dreieckigen Seitenflächen – und die Siliziumatome befinden sich jeweils in der Mitte dieser Tetraeder. In einem Quarzkristall setzt sich diese Tetraederstruktur periodisch ohne Abweichung fort. Bilden die Tetraeder keine durchgehend periodische Struktur und werden der Schmelze weitere Komponentenzugegeben, handelt es sich um ein Silikatglas. Dieses lässt sich bereits bei Temperaturen von 500 bis 800 Grad formen.



ILLUSTRATIONEN: LIANA FRANK

## 1665

erteilte der französische König Ludwig XIV. dem Finanzmann Nicolas Dunoier und seinen Partnern ein exklusives Herstellungsprivileg für Spiegelglas. Die königliche Spiegelglasmanufaktur entwickelte das revolutionäre Tischwalzverfahren und in dem kleinen Dorf Saint-Gobain in der Normandie entstand das erste industrielle Glasunternehmen der Welt. Spiegel von Saint-Gobain schmückten seit 1684 die Galerie des royalen Schlosses Versailles bei Paris.



## 1847

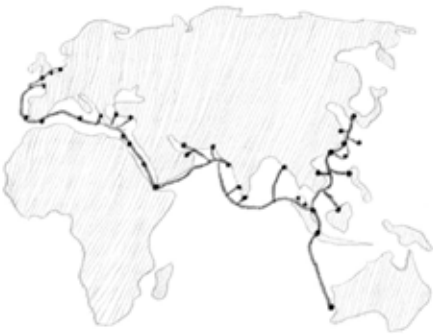
ist der Christbaumschmuck aus Glas im thüringischen Lauscha aus der Not geboren worden: Der Überlieferung nach war ein Glasbläser mit seiner Familie derart in Armut geraten, dass er den Weihnachtsbaum nicht wie üblich mit Nüssen, Früchten und Süßigkeiten schmücken konnte. Er formte deshalb Früchte und Nüsse aus hohlem Glas – die Vorläufer der Christbaumkugeln. Um 1880 machte zunächst der Kaufhaus-Gründer Frank Winfield Woolworth den Christbaumschmuck aus Lauscha zum Exportschlager, der seither in alle Welt verkauft wird.





4 000

Jahre lang wird Glas bereits von Menschen hergestellt. Etwa 1500 vor Christus stellten die Ägypter erstmals Hohlglas her. Es diente als Salben- und Ölbehälter. Das älteste bekannte Glasgefäß ist ein Kelch mit dem Namen des ägyptischen Pharaos Thutmosis III. und entstand um 1450 vor Christus.



39 000

Kilometer misst die längste Glasfaser im längsten Seekabel der Welt, dem »SeaMe-We 3«. Es umspannt das Internetnetz zwischen Deutschland, Japan und Australien.



650

vor Christus wurde die erste schriftliche Rezeptur für Glas auf Papyrus festgehalten und in der Bibliothek des assyrischen Königs Assurbanipal aufbewahrt. Es lautet: »Nimm 60 Teile Sand, 180 Teile Asche aus Meerespflanzen und 5 Teile Kreide – und du erhältst Glas.«

## International Year of Glass »IYOG«

Die Vereinten Nationen (UN) haben 2022 zum Internationalen Jahr des Glases ausgerufen, um die Bedeutung von Glas ins Bewusstsein zu rücken, die dieser Werkstoff seit Jahrtausenden für die Menschheit hat und der unsere Zukunft prägen wird.

Glas ist aus der modernen Welt nicht wegzudenken. Und auch die großen Aufgaben der Zukunft sind ohne das Material, das wie kaum ein anderes für Innovation und Transformation steht, nicht zu meistern. So stellt das »IYOG« die Bedeutung von Glas für die Agenda 2030 der UN mit ihren 17 Zielen für eine nachhaltige Entwicklung in den Blickpunkt. Hier eine Auswahl:

### Ziel 3: Gesundheit und Wohlergehen

Bioaktive Gläser kommen als Implantate zum Einsatz, glasbasierte Nanopartikel können Medikamente zielgenau an den Wirkort transportieren und inerte Glasgefäße schützen Impfstoffe und Arzneimittel – nicht zuletzt während der aktuellen Pandemie.

### Ziel 6: Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen

Noch immer sterben Jahr für Jahr Millionen von Menschen an Erkrankungen, die auf verunreinigtes Wasser zurückzuführen sind. Poröse und beschichtete Glasfilter können Schadstoffe und Verunreinigungen effektiv und kostengünstig aus Trinkwasser entfernen und so zur Versorgung mit sauberem Wasser weltweit beitragen. Photokatalytische Reaktoren und Aufbereitungssysteme auf Basis von Glaswerkstoffen machen Süßwasser trinkbar.

### Ziel 7: Bezahlbare und saubere Energie

Glas ermöglicht hochtransparente Schutzhüllen für Photovoltaikanlagen. Solarthermische Anlagen arbeiten mit Glasspiegeln, die Sonnenlicht reflektieren und so Flüssigkeiten in Glasröhren erhitzen, die Generatoren antreiben. Auch in Photobioreaktoren aus Glas können Mikroorganismen wachsen und Sonnenenergie in chemische Energie umwandeln. Glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe kommen in Turbinenblättern zum Einsatz, die Windenergie in Elektrizität umwandeln.

### Ziel 9: Industrie, Innovation und Infrastruktur

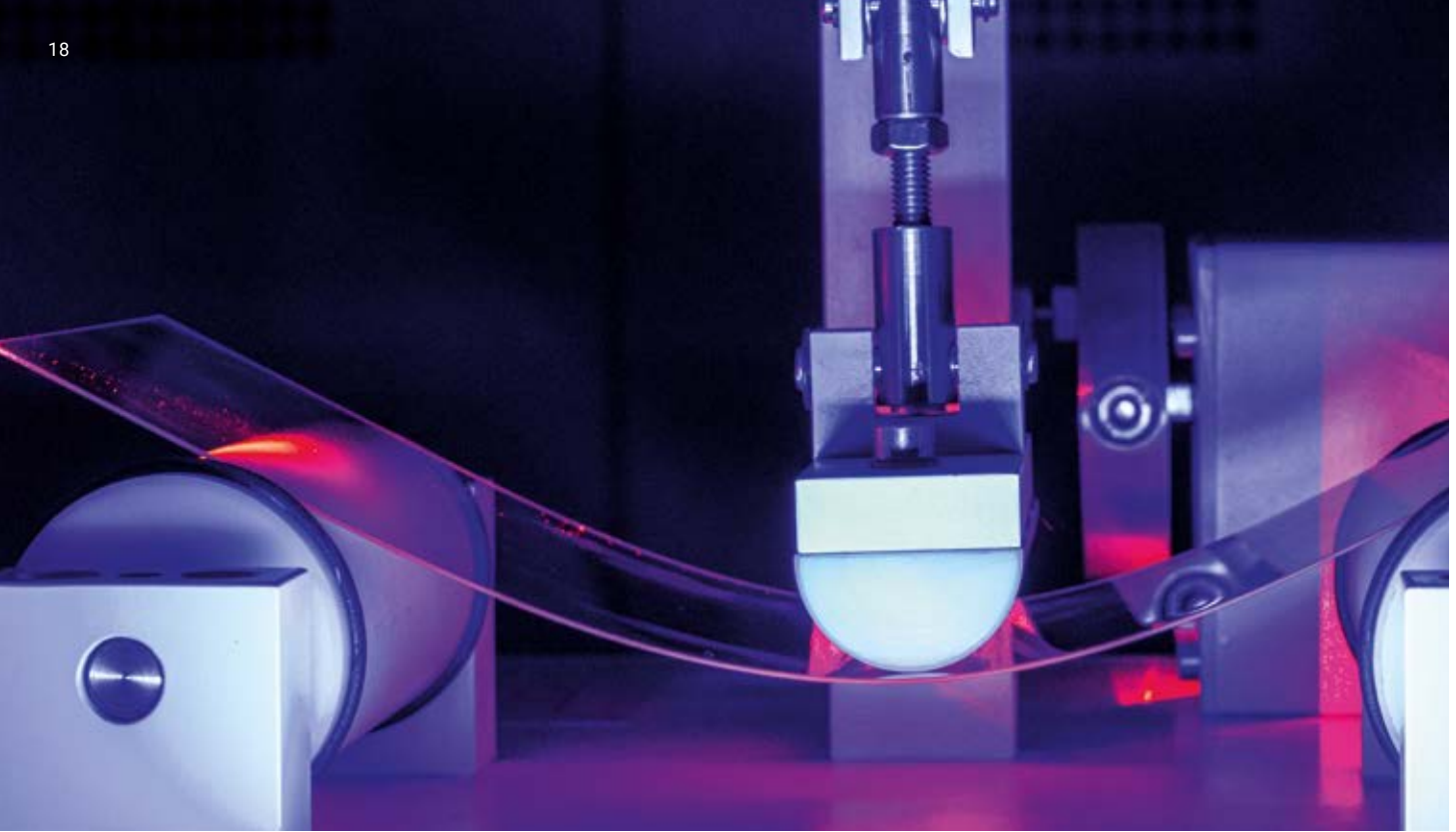
Die globale Kommunikation läuft über optische Glasfasern, die Daten verlustarm und schnell übertragen. Faserlaser nutzen mit seltenen Erden dotiertes Glas und sind heute Standard für viele Anwendungen. Ultradünne Gläser für biegsame, sogar faltbare Displays werden derzeit entwickelt. Informationsströme werden mit Schaltkreisen verwaltet, die ganz oder teilweise aus Glas gefertigte Bauteile verwenden, wie sphärische Linsen, Prismen und Strahlenteiler. Brillen ermöglichen die Visualisierung von Informationen durch Geräte der erweiterten und virtuellen Realität.

### Ziel 11: Nachhaltige Städte und Gemeinden

In modernen Fahr- und Flugzeugen kommen Windschutz- und Cockpitscheiben aus chemisch verstärktem Glas zum Einsatz, die Sicherheit bieten und zugleich die Treibstoffeffizienz durch Gewichtsreduzierung verbessern und Anzeigefunktionen integrieren. Beschichtete Fensterscheiben tragen dazu bei, dass Gebäude energieneutral werden oder sogar selbst Strom produzieren, wenn in die Verglasung Photovoltaik und andere neue Technologien integriert werden.

### Ziel 12: Nachhaltiger Konsum und Produktion

Glas ist von Natur aus umweltfreundlich. Die meisten Gläser werden aus natürlichen, leicht verfügbaren Rohstoffen hergestellt. Die Recyclingquoten sind hoch. Energieeffizientere Schmelztechnologien und optimierte Glaszusammensetzungen können den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck weiter reduzieren. Das Internationale Jahr des Glases kann dazu beitragen, nachhaltige Verfahren weiter zu verbreiten.



## Die Ordnung in der Unordnung

Anders als kristalline Feststoffe wie Metalle oder Salze haben Gläser in ihrem Inneren keine regelmäßige Struktur. Vielmehr sind sie ungeordnet und heterogen. Das stellt sowohl die Glasforschung wie die industrielle Anwendung vor Herausforderungen, denn durch das innere »Chaos« lassen sich die mechanischen Eigenschaften von Glas nur bedingt vorhersagen und kontrolliert herstellen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Otto-Schott-Instituts für Materialforschung versuchen dennoch, in der gläsernen Unordnung ordnende Prinzipien zu finden und so die Festigkeit von Gläsern zu verbessern.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

»Glück und Glas, wie leicht bricht das«, sagt der Volksmund. Und wohl jeder kann sich an irgendein zerbrochenes Glas erinnern, sei es das Kellerfenster, das dem Fußball nicht standhielt oder das Weinglas, das beim Abwasch zu Bruch ging. Und doch gibt es Glas, das Tonnen von Gewicht standhält, etwa begehbare Glasböden von Aussichtsplattformen oder Gebäudefassaden. Wie aber kann ein und dasselbe Material gleichzeitig fest und zerbrechlich sein?

»Gläser gehören rein theoretisch zu den festesten Materialien, die Menschen überhaupt herstellen können«, unterstreicht Prof. Dr. Lothar Wondraczek vom Otto-Schott-Institut für Materialforschung. »Allerdings fällt die tatsächliche Festigkeit meist um Größenordnungen geringer aus als die theoretisch erwartbare«, so der Professor für Glaschemie weiter. Das verhindere

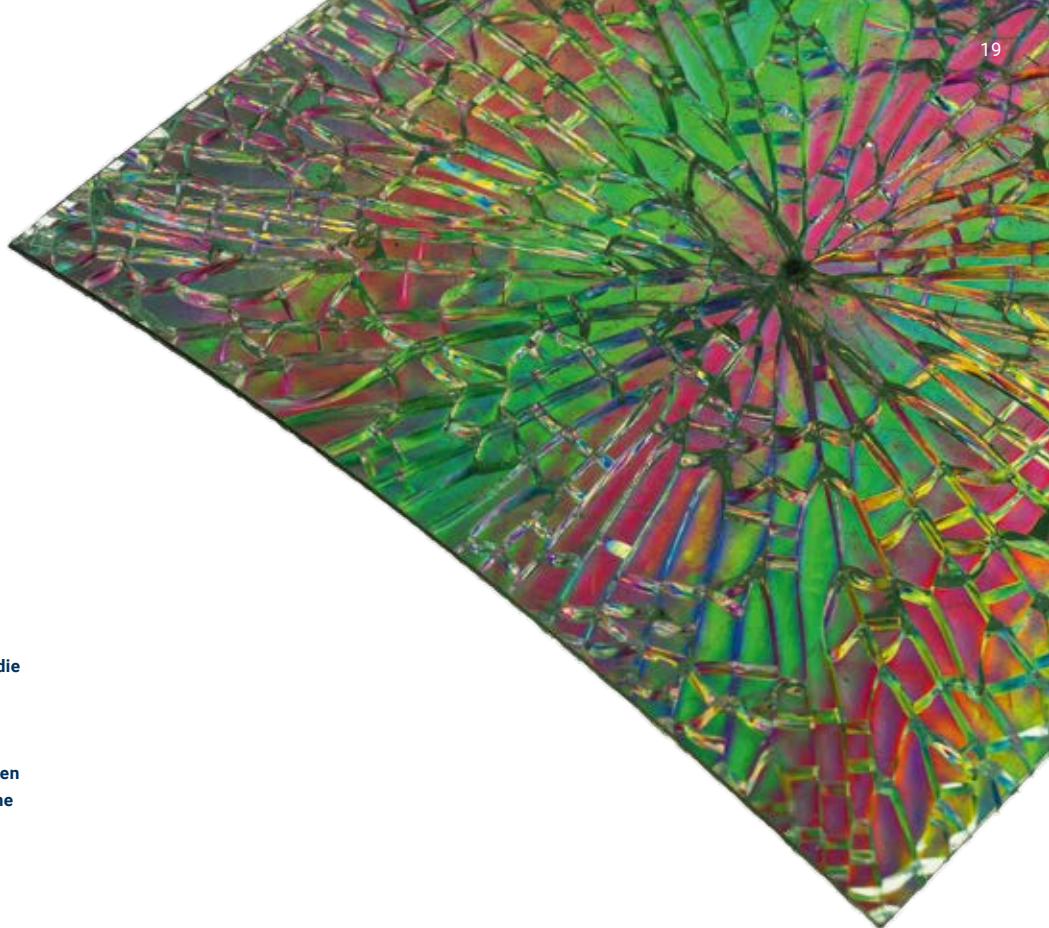
einerseits, dass Glas sein ganzes Potenzial an Einsatzmöglichkeiten entfalten kann. Andererseits stelle es die Forschenden immer wieder vor ungeklärte Fragen. Vor allem die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften wie die Kratz- und Bruchfestigkeit von gläsernen Materialien ist schwer. Und das liegt an ihrer inneren Unordnung: Regelmäßige kristalline Strukturen findet man in Glas nur selten, die Atome und Moleküle liegen hauptsächlich zufällig und ganz unterschiedlich strukturiert vor.

### Gleiche Zusammensetzung – unterschiedliche Eigenschaften

»Auch wenn Glas seit mehr als 4000 Jahren von Menschen hergestellt wird, sind zentrale Fragen zu diesem Werk-

stoff noch immer unbeantwortet«, sagt Wondraczek. Er und sein Team setzen bereits seit mehreren Jahren einen Schwerpunkt auf die Erforschung der mechanischen Eigenschaften von Glas und die Entwicklung hochfester, kratz- und bruchfester Gläser. »Uns interessiert zum Beispiel, wie sich im Herstellungsprozess die Eigenschaften des Materials kontrollieren und gezielt beeinflussen lassen.« Um das herauszufinden, müssen die Forschenden aber erst einmal verstehen, wie die molekulare Struktur in Gläsern, also das Fehlen von regelmäßig angeordneten Bindungen, sich auf die mechanischen Eigenschaften niederschlägt.

»Zwei Gläser können, selbst wenn sie, chemisch betrachtet, die exakt gleiche Zusammensetzung haben, doch ganz unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen«, so Wondraczek.



**Bild links: Hochfestes Dünnglas ist in eine Dreipunkt-Biegevorrichtung eingespannt. Damit wird die Stabilität des Glases geprüft. · Foto: Jens Meyer**

**Bild rechts: Vorgespanntes Glas besitzt nicht nur eine erhöhte Festigkeit. Geht es zu Bruch, entstehen statt großer, scharfer Splitter, kleine, ungefährliche Glaskrümel. · Foto: Jens Meyer**

Selbst innerhalb ein und desselben Materials fluktuieren die Eigenschaften. Glas besteht aus eher »harten« und eher »weichen« Bereichen, was die Vorhersage der makroskopischen Eigenschaften des Materials schwierig macht.

Hier setzen Wondraczek und seine Kolleginnen und Kollegen an: Mit spektroskopischen Methoden untersuchen sie das Maß der Unordnung in Glas bzw. das Ausmaß von Fluktuationen der Bindungsstärke innerhalb des Materials, um daraus Rückschlüsse auf die makroskopischen Eigenschaften ziehen zu können. Auf diese Weise lassen sich Verteilungsfunktionen für die Fluktuation einer Eigenschaft innerhalb eines räumlichen Ensembles experimentell ermitteln. Solche Funktionen können für Modelle zur Eigenschaftsvorhersage herangezogen werden. Gleichzeitig lassen sich so am Computer künstliche Gläser in sehr großer Zahl herstellen, aus denen mit Hilfe maschinellen Lernens Zusammenhänge zwischen lokaler Unordnung und praktischen Eigenschaften der Gläser ermittelt werden. Neben der inneren Unordnung spielen Oberflächendefekte – winzige Unebenheiten, die mit bloßem Auge in der Regel gar nicht wahrnehmbar sind – eine entscheidende Rolle für die mechanische Festigkeit von Glas. »Diese beeinflussen die Eigenschaften

um Größenordnungen stärker als die chemische Zusammensetzung«, weiß Wondraczek. Ausmaß und Verteilung dieser Effekte resultieren zumeist aus dem Herstellungsprozess. »Wir konnten zeigen, dass Glas, das chemisch nahezu identisch ist, aber auf unterschiedliche Weise hergestellt wurde, sehr unterschiedlich auf mechanische Beanspruchung reagiert.«

#### **Wechselbäder härten ab – das gilt auch für Glas**

Das erworbene theoretische Grundlagenwissen in praktische Anwendungen zu bringen und Glasoberflächen defektresistenter zu machen, das ist das Ziel der Glaschemiker. Neben der Glaszusammensetzung und der Herstellung bieten sich Prozesse der Nachbearbeitung dafür an. Wondraczek und sein Team entwickeln derzeit ein Verfahren weiter, das in der Industrie bereits seit Längerem etabliert ist, das sogenannte thermische Vorspannen. Das kommt unter anderem zur Herstellung von hochfesten Windschutzscheiben oder Abdeckgläsern auf Solarmodulen zum Einsatz und führt bei einem Unfall oder anderen Beschädigungen dazu, dass die Scheiben kontrolliert in kleine Krümel zerfallen, statt zu splintern. Allerdings funktioniert das bisher nur bei

Gläsern einer bestimmten Dicke. Mindestens zwei Millimeter müssen diese dick sein. Für eine Vielzahl moderner Glasprodukte spielen heute jedoch viel dünnere Schichten eine wichtige Rolle. Im Rahmen eines vom Europäischen Forschungsrat (European Research Council) geförderten »Proof of Concept« Grants entwickelt Glaschemiker Wondraczek aktuell ein thermisches Vorspannverfahren für dünnwandige Gläser von Stärken unter einem Millimeter.

Das Prinzip ist zunächst ähnlich wie das herkömmliche Vorspannen. Das Glas wird erhitzt – auf über 600 °C – und dann abrupt abgekühlt. Da sich die Oberfläche deutlich schneller abkühlt als das Innere des Glases entsteht ein Temperaturgradient, der zu einer oberflächlichen Druckspannung führt, die erhalten bleibt, wenn das Glas vollständig erstarrt.

Während das Abkühlen bei dicken Gläsern einfach durch Luft erfolgt, reicht der so erzeugte Temperaturgradient in sehr dünnwandigen Gläsern aber nicht aus, um eine Oberflächendruckspannung zu erzeugen. Daher nutzen die Forschenden statt Luft ein flüssiges Kühlmedium basierend auf Galliumlegierungen, die bereits nahe Raumtemperatur schmelzen. Auf diese Weise lassen sich auch deutlich dünnere Gläser stabilisieren. ■

**Bild rechts: Bioaktive Gläser bilden im menschlichen Körper eine Oberfläche aus Apatit, an der körpereigene Knochenzellen anwachsen können.**

· Foto: Jens Meyer

## Ein echter Knochenjob

Gläser kommen nach einiger Zeit oftmals getrübt aus der Spülmaschine. Grund dafür ist meist nicht etwa das Ablagern von Kalkresten, sondern Korrosion. Das heißt, der Kontakt mit Wasser und Reinigungsmitteln und die damit verbundenen chemischen und physikalischen Prozesse rauhen die Oberfläche auf und verändern die Struktur des Materials. Vereinfacht gesagt: Das Glas beginnt, sich aufzulösen. So störend dieser Vorgang im Haushalt ist, so interessant ist er für andere Anwendungen von Glas – sogar im menschlichen Körper.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

Glas besteht in der Regel aus Silikaten. Doch würde bei seiner Herstellung reines Siliziumdioxid zum Einsatz kommen, dann wäre die Verarbeitung nur bei sehr hohen Temperaturen möglich und somit sehr aufwendig. Deshalb integriert man in das robuste Silikatnetzwerk Metalloxide, etwa Kalzium- oder Natriumoxid. Das vereinfacht den Herstellungsprozess – reduziert allerdings die Beständigkeit. Denn das Glas reagiert dadurch stärker mit Wasser. Doch diese gesteigerte Löslichkeit muss kein Nachteil sein. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten beispielsweise seit rund 50 Jahren mit sogenannten bioaktiven Gläsern und entwickeln Anwendungen dafür im medizinischen Bereich – etwa bei der Reparatur von Knochenschäden. Damals war Glas das erste synthetische Material, das einen festen Verbund mit menschlichem Gewebe eingehen konnte.

### Körpereigene Knochenzellen wachsen auf Glasimplantat

»Reagieren Körperflüssigkeiten mit gezielt dafür gestaltetem bioaktiven Glas, dann werden dabei Kalzium- sowie Phosphationen herausgelöst«, erklärt Prof. Dr. Delia Brauer, Professorin für dieses besondere Material an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und eine der weltweit renommiertesten Expertinnen auf diesem Gebiet.

»Dabei entsteht auf der Oberfläche des Glases durch einen chemischen Prozess Apatit, also das Mineral, das den Grundbaustein für Knochen darstellt. An diese Schicht docken körpereigene Knochenzellen an und bilden neues Gewebe.« Alle Stoffe, aus denen das Glas besteht, sind auch Teil des menschlichen Körpers, und besonders die gebildete Oberfläche aus Apatit sorgt dafür, dass das Glas nicht als Fremdkörper wahrgenommen wird. Zusätzlich fördern gelöste Silikatbausteine den Heilungsprozess, da sie die Knochenbildung anregen.

Hat das Implantat seine Funktion erfüllt, wird es nach und nach abgebaut, bis es vollständig verschwunden ist. Wie lange das dauert, lässt sich über die Zusammensetzung des Glases genau einstellen.

Lösliche Glasimplantate kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn Schadstellen am Knochen wieder geschlossen werden müssen, etwa nach einer Krebserkrankung und der Beseitigung einer Zyste. Meist bringen Ärztinnen und Ärzte das Glas in Form von Granulat oder Gel in den Knochen ein. Darüber hinaus verbessern Brauer und ihr Team aktuell das Design und die mechanische Stabilität von porösen dreidimensionalen Körpern, die ebenfalls als Gerüst für neu entstehendes Knochengewebe dienen sollen. »Glas ist sicher nicht das erste Material, das einem einfällt, wenn es um die Rege-

neration von menschlichem Gewebe geht – und doch ist es aufgrund seiner variablen Zusammensetzung hervorragend dazu geeignet«, sagt die Chemikerin. »Genau das macht es so spannend.« Der Einsatz bioaktiver Gläser als Implantat sei inzwischen zwar etabliert, doch Brauer und ihr Team arbeiten an immer neuen Optimierungsmöglichkeiten.

Gegenüber ähnlichen Implantatmaterialien wie beispielsweise Keramik hat Glas den Vorteil, dass sich sehr flexibel weitere Komponenten hinzufügen lassen. Integrierte Silberionen etwa können Implantate zusätzlich antibakteriell gestalten und so Entzündungen verhindern und die Einnahme von Antibiotika vermeiden.

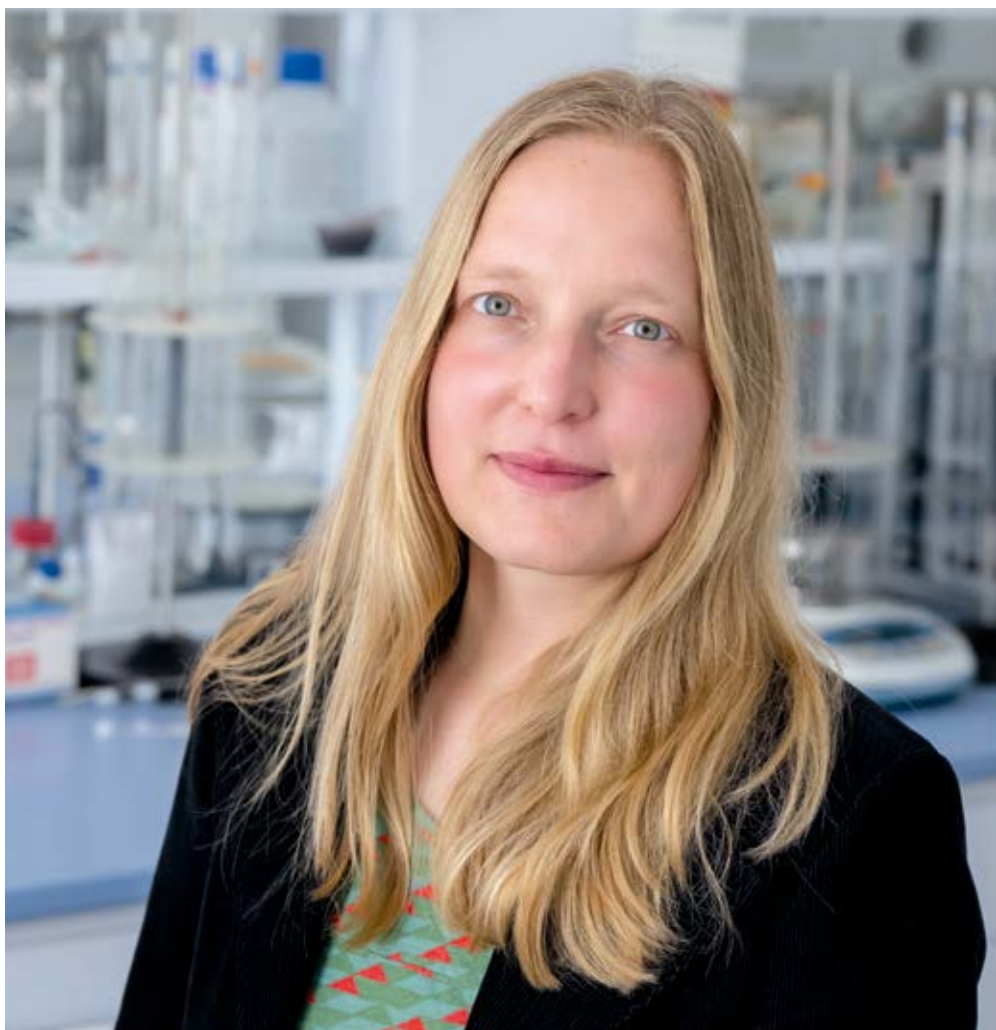
### Mundhygiene mit Glas

Neben Knochen sind Zähne ein Anwendungsgebiet von bioaktivem Glas. Delia Brauer war beispielsweise an der Entwicklung einer Zahncreme beteiligt, in der Bioglaspartikel enthalten sind. Diese lagern sich an den Zähnen an, so dass sie bei der Zahnreinigung nicht weggespült werden. Durch den Kontakt mit Speichel setzen sie schließlich Kalzium-, Fluorid- und Phosphationen frei, was die Bildung von Apatit – auch der Hauptbestandteil von Zahnschmelz – anregt. Erst kürzlich holten Forschende des



Londoner King's College die Expertise der Jenaer Glasexpertin ein. »Die englischen Kolleginnen und Kollegen hatten herausgefunden, dass Lithiumionen die Mineralisation von Dentin – auch Zahnbein genannt – fördern. Nun suchten sie nach einer wirkungsvollen Methode, Lithium gezielt einzubringen, um es kontrolliert und kontinuierlich freizusetzen«, erzählt Brauer. »Gemeinsam haben wir dafür ein inzwischen patentiertes Zementsystem entwickelt, das auf einem lithiumhaltigen Bioglas basiert.«

Neben solchen anwendungsbezogenen Materialentwicklungen konzentriert sich Delia Brauer in ihrer Forschung vor allem darauf, das bioaktive Glas und seine Verarbeitung besser zu verstehen. Denn noch immer sind dabei viele Fragen offen. »Bioaktive Gläser fangen während der Schmelze schneller an zu kristallisieren als andere Gläser. Das schränkt die Verarbeitungsmöglichkeiten ein«, sagt sie. Gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen von der Universität Erlangen-Nürnberg sowie dem Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen in Halle/Saale beobachtet sie deshalb derzeit den Kristallisationsprozess auf Nanometer-Ebene, um ihn verstehen und vermeiden zu können. Diese Grundlagenforschung bereitet die Basis für viele weitere Anwendungen von Bioglas. ■



**Prof. Dr. Delia Brauer entwickelt mit ihrem Team u. a. lösliche Glasimplantate, die helfen, Knochen nach einer Operation wieder zu regenerieren.**

· Foto: Jens Meyer



**Metallisches Glas sieht von außen betrachtet aus wie gewöhnliches Metall. Im Inneren aber fehlt ihm die kristalline Gitterstruktur. Das macht es fest und spröde. · Foto: Jens Meyer**

## Schockgefrorenes Metall

Glas kennen wir als durchsichtiges Material. Als Fensterscheibe ermöglicht es, dass Sonnenlicht Räume beleuchtet. Als Gefäß erlaubt es den Blick auf dessen Inhalt. Die Gläser, die das Team um Dr. René Limbach untersucht, sind jedoch ganz anders: Es sind Gläser aus undurchsichtigem Metall.

TEXT: MARCO KÖRNER

»Metallische Gläser sind nicht transparent«, das sagt Dr. René Limbach. Äußerlich sehen sie sogar genauso aus wie gewöhnliche Metalle: silbergrau glänzend. Das Besondere dieser Materialien, so der Ingenieur vom Otto-Schott-Institut für Materialforschung, seien ihre mechanischen Eigenschaften: Metallische Gläser sind besonders hart, fest und abriebbeständig. Das macht sie interessant für verschiedenste mechanische Anwendungen, etwa Zahnräder, Antriebswellen oder Beschichtungen. »Überall, wo es zu Reibung zwischen Bauteilen kommt, können metallische Gläser sehr gut genutzt werden und zu weniger Verschleiß führen.«

Doch was genau ist eigentlich metallisches Glas? »Damit ein Metall glasartig wird, muss es extrem schnell aus der Schmelze erstarren«, beschreibt Limbach den Herstellungsprozess. Das geschieht in sogenannten Kokillen: Hohlzylinder mit einer Doppelwand aus wärmeleitfähigem Material, wie etwa Kupfer. In der Doppelwand fließt Kühlwasser. Das verflüssigte Metall wird in den Hohlraum gegossen und erstarrt dabei schockartig. Damit die Wärme des flüssigen Metalls gut abgeführt werden kann, sind die Durchmesser der metallischen Gläser sehr gering – etwa zwei bis drei Millimeter bei Län-

gen von bis zu etwa fünf Zentimetern. »Durch das schnelle Abkühlen erstarrt das Metall in der Kokille, ohne dass die Atome Zeit finden, sich regelmäßig anzuordnen«, beschreibt er, wie Metall zu Glas wird. »Besonders gut geht das mit Legierungen, deren Metallatome möglichst unterschiedliche Durchmesser haben.« Dadurch ordnen sich die Atome beim Erstarren besonders unregelmäßig an. »Es gibt dann zwar eine Nahordnung um die einzelnen Metallatome herum, aber keine Fernordnung im Materialverbund. Genau diese amorphe Struktur macht den Glaszustand aus.« Die fehlende Fernordnung ist es auch, die metallischen Gläsern einen Nachteil beschert: Sie sind extrem spröde, weiß René Limbach. In seiner Forschung sucht er Wege, das zu ändern. »Im kristallinen Zustand liegen die Metallatome als regelmäßiges Gitter vor. Störungen von außen können dadurch einfach durch das Gitter abgeleitet werden. Im amorphen Glaszustand geschieht das nicht. Hier bilden sich bei einer Störung sogenannte Scherbänder, die sich unkontrolliert im Material ausbreiten. Dadurch kommt es zum Bruch.«

Um diese Scherbänder zu neutralisieren, wurde bislang versucht, eine definierte Mikrostruktur etwa durch

Phasentrennung oder kristalline Ausscheidungen zu erzeugen.

Einen gänzlich anderen Ansatz verfolgt Limbach in Kooperation mit Forschenden am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden: »Hier geht es darum, das Material durch eine gezielte thermische Behandlung oder mechanische Umformprozesse so zu behandeln, dass sich noch mehr Scherbänder bilden, die sich dann aber gegenseitig aufheben.« Um das zu erreichen, erzeugt er gezielt möglichst viele Inhomogenitäten, die lokal eine geringere mechanische Stabilität aufweisen. So entstehen an unterschiedlichsten Stellen solche Scherbänder, die dann miteinander wechselwirken. Das Material wird dadurch plastisch verformbar – es dauert also länger, bis es unter Lasteinwirkung zerbricht.

### Von der Kuriosität zur Funktionslegierung

»Der heilige Gral ist natürlich, das Material am Ende anwenden zu können«, erklärt der Ingenieur. »Ursprünglich waren metallische Gläser eine Art Kuriosität. Die Frage war: Lassen sich Metalle in einen Glaszustand überführen? Und die Antwort lautete: Ja, das ist möglich. Und sie haben hochinteressante mechanische Eigenschaften. Aber die hohe Sprödigkeit verhindert bisher eine breite Anwendung.« Wenn dieses Problem gelöst wird, ließe sich eine Vielzahl von Struktur- und Funktionslegierungen damit ersetzen, führt Limbach weiter aus. Zumindest in kleinem Maßstab: »Durch die Art der Herstellung haben die metallischen Gläser weiterhin sehr begrenzte Maße.« ■

DREI FRAGEN AN

## Prof. Dr. Thomas Douglas Bennett

Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge  
Gastprofessor im »Jena Excellence Fellowship Programme«

### Womit beschäftigen Sie sich in Ihrer Forschungsarbeit?

Der Schwerpunkt meiner Forschungsgruppe liegt auf einer aktuellen Materialklasse, den metallorganischen Gerüstverbindungen (engl.: metal-organic frameworks, MOFs). Diese dreidimensionalen porösen Materialien bestehen aus anorganischen »Knoten«, die durch organische Moleküle miteinander verbunden sind, und haben in den zurückliegenden drei Jahrzehnten in der Materialwissenschaft eine enorme Bedeutung erlangt (siehe Kasten rechts). Wir konzentrieren uns insbesondere auf die thermischen und mechanischen Eigenschaften von MOFs, um ihre Verarbeitbarkeit zu verbessern und sie beispielsweise in Hybridgläsern einzusetzen.

### Was ist das Besondere an Hybridgläsern?

Hybridgläser unterscheiden sich von anorganischen Gläsern durch ihre hochgradig abstimmbare Chemie. Derzeit arbeiten wir daran, ihre mechanischen Eigenschaften besser zu verstehen, um solche Materialien gezielt herstellen und einsetzen zu können.

### Welches Ziel verfolgt das Projekt, das Sie an der Universität Jena bearbeiten, und mit wem arbeiten Sie zusammen?

Dieses Projekt zielt darauf ab, neue Materialien an der Schnittstelle zwischen anorganischen Gläsern und MOFs zu entwickeln. Es geht darum zu verstehen, wie die kristallinen oder glasartigen Zustände von MOFs in anorganische Gläser integriert werden können. Zu den geplanten künftigen Anwendungen gehören Glasfassaden in Gebäuden in trockenen Klimazonen, die nachts Wasser aus der Luft aufnehmen und tags Wasser abgeben oder Han-



Prof. Dr. Thomas Bennett von der Universität Cambridge wird in diesem Jahr als Fellow des Excellence Programmes der Universität für drei Monate nach Jena kommen. · Foto: privat

dy-Bildschirme, die in der Lage sind, den Blutalkohol- oder Blutzuckergehalt zu messen.

Unser Konzept sieht vor, die Verarbeitbarkeit und Stabilität von anorganischem Glas mit der chemischen Funktionalität von MOFs zu kombinieren. Dafür wollen wir einerseits versuchen, anorganische Gläser mit kristallinen MOFs zu imprägnieren und andererseits anorganische und MOF-Schmelzen miteinander zu mischen und so neue Materialklassen entstehen zu lassen. Anschließend müssen wir diese neuen Materialien strukturell charakterisieren und ihre optischen, thermo-mechanischen und porösen Eigenschaften analysieren.

Ich werde in Jena intensiv mit Prof. Dr. Lothar Wondraczek und seinem Team zusammenarbeiten, ebenso mit Dr. Alexander Knebel, der mit seiner Nachwuchsgruppe auf dem Feld der Membrantechnologie arbeitet. ■

### Hybridmaterialien aus klassischen Gläsern und metallorganischen Gerüstverbindungen (MOFs)

Metallorganische Gerüstverbindungen (MOFs) bilden dreidimensionale molekulare Netzwerke, wobei die Größe der durch die Gitterstruktur gebildeten Poren bis auf einige Nanometer genau eingestellt werden kann. Dadurch lassen sich die chemischen Eigenschaften dieser Substanzklasse an eine Vielzahl von Anwendungen gezielt anpassen. MOFs werden beispielsweise als Trennmembranen eingesetzt, als Speicher für Gase und Flüssigkeiten, als Träger für Katalysatoren oder für elektrische Energiespeicher. Dabei werden MOFs bislang ausschließlich in ihrem kristallinen, geordneten Zustand genutzt. Dass sie sich aber auch schmelzen und zu Glas abschrecken lassen, ist erst seit wenigen Jahren bekannt. Neben den klassischen anorganischen Gläsern, organischen Kunststoff- und metallischen Gläsern, bilden die MOFs eine vierte Glas-Art, die aufgrund ihrer Porosität und ihrer mechanischen Eigenschaften für eine Vielzahl von Anwendungen interessant ist. Reines MOF-Glas ist jedoch in der Herstellung aufwendig und daher teuer. Deshalb versuchen die Forschungsteams aus Cambridge und Jena, neue hybride Gläser zu entwickeln, die die Eigenschaften anorganischer und MOF-Gläser miteinander kombinieren.

### Das Jena Excellence Fellowship Programme

Das Programm ist Teil der Strategie »LIGHT, LIFE, LIBERTY – Connecting Visions« der Universität Jena und soll die internationale Sichtbarkeit der Universität und ihre Attraktivität für internationale Spitzenforschende fördern. Das Programm steht Senior-Fellows und Post-docs offen, die in Jena forschen möchten. Alle Professorinnen und Professoren der Universität Jena können mögliche Fellows nominieren. Es werden jährlich ca. vier Senior-Fellowships und ca. vier Post-doctoral-Fellowships vergeben ([www.uni-jena.de/excellence-fellowship](http://www.uni-jena.de/excellence-fellowship)).

# Glas als Geobarometer

Bild rechts: Verschiedene Obsidiane  
(z. B. aus Mexiko, Island, Ungarn und  
Italien). · Foto: Jens Meyer

Seit Tausenden Jahren stellen Menschen Glas her. Es gibt aber auch zahlreiche natürliche Gläser, die beispielsweise durch Meteoriten- oder Blitzeinschläge entstehen. Die Mineralogin Dr. Franziska Scheffler untersucht ebenfalls natürliches Glas, das etwa dann entsteht, wenn Lava schockgefriert oder Minerale unter Druck geraten.

INTERVIEW: LAURA WEISSERT

## Was ist vulkanisches Glas und wie entsteht es?

Vulkanisches Glas ist erstarrte Lava, die während eines Vulkanausbruchs an die Erdoberfläche kommt. Wenn Lava langsam abkühlt, wird sie zu einem Gestein, weil dann genug Zeit da ist, damit sich kleine Minerale bilden können, beispielsweise Basalt- oder Rhyolith-Gestein. Aber wenn Lava schnell abkühlt, weil sie etwa ins Meer eruptiert, dann wird sie zu vulkanischem Glas, zum Beispiel Obsidian. Das ist ein meist tiefschwarzes Glas und wenn man es gegen das Licht hält, sieht man oft auch, dass es transparent durchschimmert. Und wenn es auf den Boden fällt, dann bricht es wie unser Fensterglas, ganz scharfkantig.

## Sie befassen sich in einem Forschungsprojekt mit vulkanischem Glas. Welches Material untersuchen Sie genau?

Ich nehme mir gar nicht das klassische vulkanische Glas vor, sondern schaue mir Schmelzeinschlüsse an, das sind kleine Teile der Lava, die in Minerale eingeschlossen sind und als Glas erhalten bleiben. Diese sind auch nicht unbedingt vulkanischen Ursprungs, es können auch metamorphe Gesteine sein, an denen eine Schmelze beteiligt ist. Wichtig ist, dass sie hohen Temperaturen und hohem Druck ausgesetzt waren, zum Beispiel Eklogit. Das ist ein Subduktionsgestein, das entsteht, wenn eine ozeanische Platte unter einer anderen tektonischen Platte abtaucht. In so einem Gestein kann es Indikatoren geben, die den hohen Druck konserviert haben, einerseits in der Mineralzusammensetzung, aber andererseits auch in diesen kleinen Glaseinschlüssen.



Mineralogin und Glasforscherin Dr. Franziska Scheffler. · Foto: Anne Günther

## Was erhoffen Sie sich von Ihrer Forschung?

Ich möchte mehr über den Entstehungsprozess der Gesteine lernen. Die zu Glas erstarrte Schmelze hat durch das Mineral, das sie umgibt, die Druck- und Temperaturbedingungen konserviert, die bei der Entstehung vorherrschten. Ich will die Schmelzeinschlüsse untersuchen, um den Druck zu rekonstruieren, unter dem das Gestein entstanden ist. Das Ziel dieser Untersuchung ist es, eine Art »Geobarometer« zu entwickeln. Dieses kann einerseits ergänzend zu bereits gängigen Methoden eingesetzt werden, deren Zusammensetzung bisher nicht geeignet war, um daraus den Druck, unter dem sie entstanden sind, zu bestimmen. Vielleicht lässt sich daraus sogar eine Methode entwickeln, um den Druck in Magmakammern

zu bestimmen – das wäre ein großer Schritt für die Vulkan-Risikoforschung.

## Wie gehen Sie bei der Untersuchung der Schmelzeinschlüsse vor?

Glas, das unter Druck abkühlt, zeigt veränderte Materialeigenschaften, da die chemischen Verbindungen komprimiert sind. Das können wir nutzen, indem wir zuerst das Spektrum des Einschlusses messen und dann ein Glas derselben Zusammensetzung herstellen, gezielt Drücken aussetzen und das Glas ebenfalls vermessen. Durch den Abgleich lässt sich der ursprünglich vorherrschende Druck einschätzen. Um den Einfluss von Druck experimentell zu verifizieren, nutzen wir die sogenannte Indentierung – also das Eindringen eines Diamantstempels – und Hochdruckzell-Experimente.

## Was ist für Sie das Spannende an Ihrem Forschungsgebiet?

Ich habe Mineralogie studiert und arbeite jetzt als Postdoc im Bereich Glaschemie der Materialwissenschaft. Da gibt es viele Gemeinsamkeiten, aber auch ein paar Unterschiede. Nun habe ich die Möglichkeit, meine Stärken aus der Mineralogie mit meinen neugewonnenen Kenntnissen aus der Glaswissenschaft zu verbinden. Mithilfe der Mineralogie kann man die kristalline feste Materie verstehen, etwa den Aufbau der Erde und ihrer Gebirge. Mineralogie prägt aber auch den technischen Fortschritt und damit unser tägliches Leben – von Halbleitertechnik bis zu den zartschmelzenden Eigenschaften, die Schokolade haben soll. Das Spannende an der Glasforschung ist, dass ich im Labor-Ofen meine eigene Lava und daraus Glas herstellen kann. Die Eigenschaften, die das Glas dann hat, sind unter anderem durch seine Zusammensetzung geprägt. Dabei sind kaum Grenzen gesetzt und es gibt noch so viel unerforschtes Potenzial wie das Periodensystem Elemente und Elementkombinationen hat. ■





176

178

173

171.93

LXXIX.68

524

54

172

175.62

INSS

INSS

562

Jena

Mineralog

Min

171.93

40

Jena

Min

Inseben  
(Mittelmeer)

Birkong

175.62

INSS

INSS

562 Mineralog

Jena

Mineralogisches Institut Jena



## Gläsernes Universum

Materie, die auf der Erde vorkommt, gibt es auch im Weltall, denn von dort stammt sie schließlich. Zumeist ist sie kristallin, doch sehr unterschiedliche Prozesse konnten aus den gleichen chemischen Bestandteilen Glas bilden. Jenaer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler analysieren dieses Glas aus dem All und simulieren seine Entstehung. Dadurch öffnet sich für sie ein Fenster in weit entfernte Regionen des Weltalls, zeitlich bis zurück in die Kinderstube unseres Sonnensystems – und manchmal sogar darüber hinaus.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

Wenn Meteoriten auf der Erde landen, dann schickt das All Post aus einer längst vergangenen Zeit. Denn viele dieser extraterrestrischen Gesteinsstücke sind uralt und stammen von Himmelskörpern, den Asteroiden, die vor etwas mehr als 4,5 Milliarden Jahren entstanden sind und sich seitdem kaum verändert haben. Diese primitiven Meteorite nennt man auch Chondrite. Ihr Name leitet sich von den Chondren ab – winzige, nur wenige Millimeter große Silikatkügelchen, die einen Großteil dieser außerirdischen Gesteine ausmachen. Sie enthalten häufig Glas.

Im Sonnenebel, der Gas-Staub-Wolke, aus der unser Sonnensystem hervorgegangen ist, gab es Prozesse, die räumlich und zeitlich begrenzt zu Temperatursteigerungen führten. Was genau diese Erhitzungen verursacht hat,

wissen wir bis heute nicht. In dieser Umgebung bildete die silikatische Materie Schmelztropfen, die dann wieder abkühlten und sich verfestigten. »Erfolgte die Abkühlung sehr schnell, so entstand Glas«, erklärt Prof. Dr. Falko Langenhorst. »Wie schnell das passierte, können wir noch heute mit thermischen Analyseverfahren bestimmen. Diese Daten verraten uns mehr über die Temperaturverteilung und -schwankungen in dem schon seit Milliarden Jahren nicht mehr existierenden Sonnenebel aus der Frühphase unseres Sonnensystems.«

Noch älteres Glas lässt sich möglicherweise in Kometen finden. Sie enthalten Staubteilchen, von denen einige aus dem interstellaren Medium – dem Raum zwischen den Sternen einer Galaxie – stammen. Die winzigen Parti-

kel wurden beim Sterben von uralten Sternen ins All entlassen und sind somit älter als unser Sonnensystem. Während der Entstehung unseres Sonnensystems wurden diese Teilchen in Planeten, Asteroiden und Kometen eingebaut. »Uns ist es nicht möglich, Proben aus den weit entfernten Bereichen zwischen den Sternen zu holen. Aber wir können Staub auch in für uns näheren Zonen des Weltalls sammeln, zum Beispiel aus dem Schweif von Kometen, etwa mit der Raumsonde Stardust, oder auf Himmelskörpern, wie dem Asteroiden Itokawa, von dem die Raumsonde Hayabusa 2010 Bodenproben auf die Erde brachte«, berichtet Langenhorst. »Mittels Untersuchung der Isotopenzusammensetzung können dann Partikel identifiziert werden, die aus dem interstellaren Medium stammen.«

**Bild links: Auf dieser polarisationsoptischen Aufnahme des Marsmeteoriten »Zagami« leuchten kristalline Minerale als farbige Bestandteile im homogen grauen Glas. · Foto: Jens Meyer**

Es wird vermutet, dass insbesondere der silikatische Sternenstaub ursprünglich amorph war und in dieser glasigen Form die beste Überlebenschance in Kometen hatte, da sie seit der Entstehung des Sonnensystems nie aufgeheizt wurden. Der Nachweis dieser Gläser gestaltete sich aber sehr schwierig, da die Partikel in der Regel kleiner als ein Millionstel Meter sind. Solche Teilchen gelangten im Rahmen der Stardust-Mission auch in die Hände des Jenaer Experten, der gemeinsam mit seinem Team unter dem Transmissionselektronenmikroskop, einem Bildgebungsverfahren mit nahezu atomarer Auflösung, erfolgreich nach diesen Partikeln suchte. »Das Glas im Sternenstaub entsteht im Wesentlichen durch die kosmische Strahlung, einem Strom hochenergetischer Elementarteilchen wie z. B. Protonen, der von Sternen ausgeht und kristalline Materie in Glas umwandelt. Solche Prozesse passieren im All fortwährend und da der Staub meist aus Silikaten besteht, kann man davon ausgehen, dass im interstellaren Medium sehr viel Glas vorhanden ist«, sagt Langenhorst.

### Die Folgen des Weltraumwetters

Das Bombardement mit hochenergetischen Elementarteilchen verändert aber nicht nur die Materie im interstellaren Medium, sondern auch die Oberflächen von Himmelskörpern im Sonnensystem, die keine Atmosphäre besitzen und somit dem Teilchenstrom ungeschützt ausgesetzt sind. Man spricht hierbei von Weltraumverwitterung, die in unserem Sonnensystem vor allem vom Teilchenstrom der Sonne – dem sogenannten Sonnenwind – ausgelöst wird. So wie auf der Erde das Wetter und damit verbundene chemische Prozesse Gestein zersetzen, so verändern äußere Einflüsse auch Asteroiden oder den Mond. Und häufig entsteht dabei Glas, wenn hochenergetische Kleinstteilchen auf die Oberfläche aufschlagen. Die Teilchen dringen nur Bruchteile eines Millimeters in die Materie ein und sorgen dafür, dass die



**Mineraloge Prof. Dr. Falko Langenhorst stellt in Laborexperimenten die extremen Bedingungen nach, unter denen im Weltall Glas entsteht. · Foto: Jens Meyer**

Oberflächen von einem gläsernen Film überzogen sind.

Um zu verstehen, wie genau diese Verwitterungsprozesse ablaufen, haben Langenhorst und sein Team mit Hilfe von Gaskanonen und Laserbeschuss solche Hochgeschwindigkeitskollisionen simuliert. Dabei konnten sie nachvollziehen, dass die Verwitterung nicht nur die Oberflächenstruktur von atmosphärenlosen Himmelskörpern verändert, sondern auch eine Umverteilung von chemischen Elementen im All bewirkt. Durch den Kontakt mit dem Sonnenwind beispielsweise werden Sulfide auf Itokawa oder auch auf dem Mond in amorphe Strukturen umgewandelt. Dabei wird Schwefel gasförmig ins All freigesetzt. »Zurück bleibt Eisen, das sich nadelförmig auf den Oberflächen ablagert«, berichtet Langenhorst. »Diese Informationen helfen uns dabei, Fernbeobachtungsspektren zu interpretieren und beispielsweise zu erklären, warum Asteroiden sehr variable Schwefelkonzentrationen aufweisen: Sie müssen unterschiedlich stark von der Raumverwitterung betroffen gewesen sein.« Extraterrestrische Einflüsse und Regionen bringen zudem ein Glas hervor, das auf ganz ungewöhnliche Weise entstan-

den ist. Während bei den Chondren das Ausgangsmaterial durch hohe Temperaturen geschmolzen und dann zu Glas abgeschreckt wurde, zerstört bei sogenannten diaplektischen Gläsern hoher Druck die kristalline Ausgangsstruktur eines Minerals und sorgt zudem für eine höhere Dichte des erzeugten Materials – ein wichtiges Erkennungsmerkmal. »Die dafür benötigten Drücke liegen im Bereich von hunderttausenden Bar und kommen auf der Erde vor allem dann vor, wenn ein Asteroid oder Komet auf dem Planeten einschlägt«, informiert der Jenaer Experte. »Solche Impaktereignisse lassen sich auf der Erde häufig nur schwer nachweisen, da Plattentektonik, Erosion und Verwitterung die morphologischen Spuren der Krater beseitigt haben. Ein deutliches Indiz ist allerdings das Vorhandensein dieses Glases im Auswurfmaterial von Impaktkratern, das teilweise weltweit verteilt sein kann.«

Diaplektisches Glas findet sich auf der Erde beispielsweise in ausgeworfenen Impaktgesteinen des Nördlinger Ries – einer Region östlich von Stuttgart, in der vor etwa 14,6 Millionen Jahren ein ein Kilometer großer Asteroid eingeschlagen ist.

Wie genau die Prozesse bei der Glasbildung unter Druck aussehen, das erforscht Falko Langenhorst mit Kolleginnen und Kollegen am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg. Hierbei setzen sie Proben in einer Diamantstempelzelle großem Druck aus und beobachten zeitaufgelöst, wann die Probe verglast. »Dabei haben wir herausgefunden, dass die Verglasung nicht direkt passiert, sondern dass das Material ein metastabiles Zwischenstadium durchläuft«, berichtet der Jenaer Mineraloge. »Das Glas bildet sich dabei nicht willkürlich im Volumen des Kristalls, sondern in Form von Lamellen. Der Ausgangskristall wird also von amorphen Lamellen durchzogen, die sich dann unter erhöhtem Druck verbreitern, so dass der ganze Kristall in ein Glas überführt wird.« Solche Forschungsergebnisse legen den Grundstein für mögliche Anwendungen diaplektischer Gläser. ■



Diese Fragmente von Bleiglasfenstern mit Glasmalerei datieren aus dem späten Mittelalter und wurden in Vogelsberg (Thüringen) gefunden. Sie sind in der Sammlung Ur- und Frühgeschichte der Universität Jena aufbewahrt.



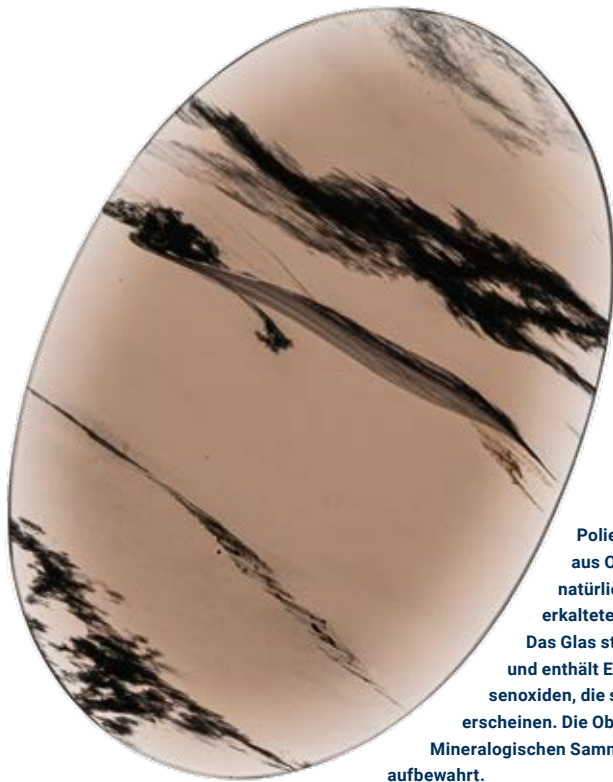
Die spätantiken Zwillingbalsamarien stammen aus Garizim (Palästina) und sind im 4./5. Jh. n. Chr. hergestellt worden. Sie sind Teil der Antikensammlungen der Universität Jena. · Fotos auf Seite 28 – 31: Jens Meyer



Das Fragment des Halses eines sogenannten »Kuttrolfs« (Weidekanter) wurde im Collegium Jenense aus einer Kloake neben der Kollegienkirche geborgen. Das Objekt stammt aus dem 16./17. Jh. und ist Teil der Sammlung Ur- und Frühgeschichte der Universität Jena.

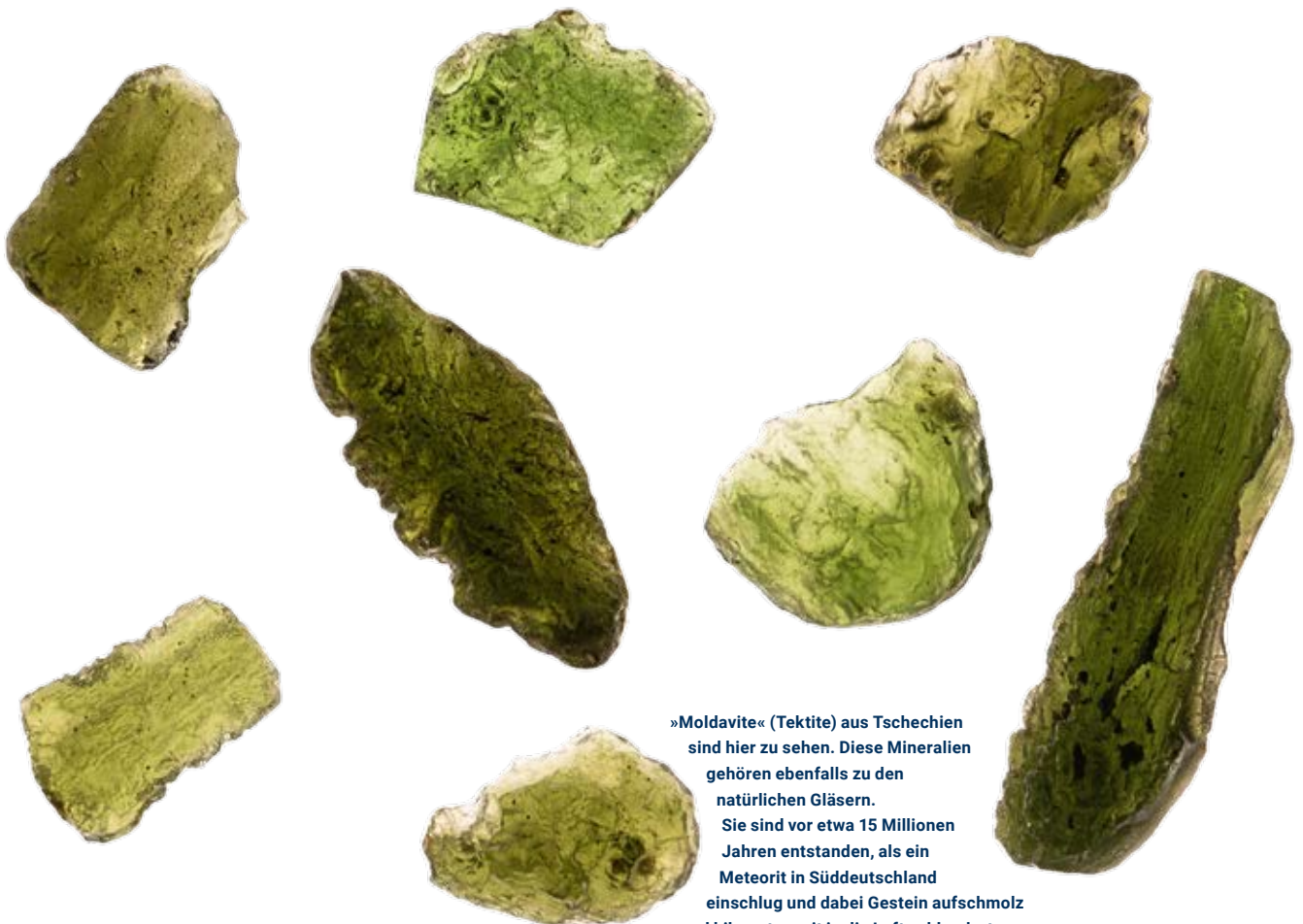


Die römische Glasschale aus Garizim (Palästina) datiert aus dem 3./4. Jh. n. Chr. und wird in den Antikensammlungen der Universität aufbewahrt.



**Polierte Scheiben  
aus Obsidian – einem  
natürlichen Glas, das aus  
erkalteter Lava entsteht.**

**Das Glas stammt aus Armenien  
und enthält Einlagerungen von Eisenoxiden, die schwarz und rotbraun  
erscheinen. Die Objekte werden in der  
Mineralogischen Sammlung der Universität  
aufbewahrt.**



**»Moldavite« (Tektite) aus Tschechien  
sind hier zu sehen. Diese Mineralien  
gehören ebenfalls zu den  
natürlichen Gläsern.**

**Sie sind vor etwa 15 Millionen  
Jahren entstanden, als ein  
Meteorit in Süddeutschland  
einschlug und dabei Gestein aufschmolz  
und kilometerweit in die Luft schleuderte.  
Dort kühlte die Schmelze ab und es entstand Glas.  
Die Moldavite sind nach ihrem Hauptfundort im heutigen  
Tschechien benannt und werden in der Mineralogischen  
Sammlung der Universität Jena aufbewahrt.**



Die Fragmente von Bleiglasfenstern mit Glasmalerei (oben und unten) aus Vogelsberg in Thüringen datieren aus dem späten Mittelalter und sind Teil der Sammlung Ur- und Frühgeschichte der Universität Jena.

# Geschichte der Glasforschung in Jena

Zeiss, Abbe, Schott – nicht zuletzt dank des »gläsernen Kleeblatts« blicken Jena und seine Universität auf eine lange Tradition der Glasforschung und -herstellung zurück. Hier folgt der Blick auf einige Meilensteine.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

## Glasschmelze im Garten

Um die richtige stoffliche Zusammensetzung für optische Gläser zu finden, blieb zu Beginn des 19. Jahrhunderts nur eine Methode: ausprobieren. Deshalb richtete sich Friedrich Körner – kurz nachdem er 1816 eine Stelle als Universitätsmechanikus in Jena angetreten hatte – neben seinem Wohnhaus in der Grietgasse 10 eine kleine Glasschmelze ein, finanziert vom Großherzog Carl August persönlich. Hier wollte er Flintglas herstellen, das sich aufgrund seiner optischen Eigenschaften gut für Okulare oder Fernrohre eignet und zu dieser Zeit in der Regel aus England eingeführt wurde. Dafür probierte er verschiedene Ofenkonstruktionen aus. Anschließend produzierte Körner in verschiedenen, durchaus vielbeachteten Versuchen zwar mehrere hundert Kilogramm Glas, doch das Material war nicht zufriedenstellend. Meist wies es eine farbige Trübung auf; ein weiteres, mit dem Körner eigentlich zufrieden war, fiel durch die Qualitätskontrolle von Joseph von Fraunhofer, dem damals angesehensten Experten in diesem Bereich. Um die Versuche voranzubringen, stellte der Großherzog Körner den Jenaer Professor Johann Wolfgang Döbereiner an die Seite. Der Chemiker konzentrierte sich vor allem auf die Stöchiometrie, also auf das korrekte Verhältnis aller Bestandteile. Die Zusammenarbeit war erfolgreich: So gelang dem Team beispielsweise 1828 die Herstellung von Barytglas. Eine Zeitschrift berichtete, dass es »klarer, härter, spezifisch schwerer, und von einer stärkeren lichtbrechenden Kraft, als das beste Kronglas ist«.

## Optiken berechnen

Körner legte nicht nur als Wissenschaftler den Grundstein für die Jenaer Glastradition, sondern auch als Lehrer eines später berühmten Schülers: 1834 begann der damals 18-jährige Carl Friedrich Zeiss eine vierjährige Ausbildung beim Privatdozenten Körner. Zeiss gründete 1846 schließlich eine eigene Werkstatt, die bereits ein Jahr später die ersten Mikroskope verließen. Zeiss begann sich intensiv mit den wissenschaftlichen Grundlagen von Mathematik und Optik zu befassen, weil er Linsensysteme nicht mehr durch Pröbeln, also das Ausprobieren von verschiedenen Linsenkombinationen, sondern durch Berechnungen herstellen wollte. Neben den eigenen Studien baute er dabei vor allem auf die Expertise eines 24 Jahre jüngeren Wissenschaftlers: Ernst Abbe. Dieser hat-

te sich 1863 an der Universität Jena habilitiert und seitdem als Privatdozent und freier wissenschaftlicher Mitarbeiter in Zeiss' Werkstatt gearbeitet. 1870 wurde er Professor an der Universität Jena. Seine Forschungen – allen voran seine Theorie der mikroskopischen Abbildung – führten schließlich zum Ziel: Ab 1872 verkaufte Zeiss die ersten Mikroskope, deren Optiken auf Berechnungen beruhten und die in ihrer Leistungsfähigkeit von keinem Konkurrenzprodukt übertroffen wurden. Um die Herstellung der Geräte weiter voranzubringen, fehlte nun nur noch der entsprechende Produzent optischer Gläser, die den hohen Ansprüchen genügten.

## »Schott & Genossen«

Die Glasforschung in Jena ist untrennbar mit einem weiteren Namen verbunden: Friedrich Otto Schott. Dem 1851 in Witten Geborenen war die Faszination für das transparente Zerbrechliche geradezu in die Wiege gelegt. Sein Großvater war Glaser, sein Vater betrieb ab 1853 eine Tafelglashütte. Kein Wunder also, dass Otto Schott in Aachen ein Studium der Chemie wählte, das er in Leipzig auf Glas fokussierte und schließlich mit seiner Dissertation »Beiträge zur Theorie und Praxis der Glasfabrikation« 1875 in Jena abschloss. Wichtiger für den Glasstandort Jena war allerdings ein anderes, weit weniger umfangreiches schriftliches Zeugnis: Am 27. Mai 1879 wandte sich Otto Schott per Brief an Ernst Abbe, um ihm mitzuteilen, dass es ihm gelungen sei, ein Glas herzustellen, in das »eine beträchtliche Menge Lithium eingeführt wurde«. »Ich vermuthe, dass bezeichnetes Glas nach irgend einer Richtung hervorragende optische Eigenschaften aufweisen wird und wollte mir hierdurch erlauben bei Ihnen anzufragen, ob Sie bereit sind dasselbe zu prüfen oder von einem Ihrer Practicanten auf Brechungs- und Zerstreungs-Verhältnisse in soweit untersuchen zu lassen als sich daraus ergibt, ob meine obige Vermuthung zutrifft. Durch Ihre Verbindungen mit dem dortigen Zeiss'schen optischen Institut wird es Ihnen ein Leichtes sein die nöthigen Schleifarbeiten am Glase ohne eigene Mühe vornehmen zu lassen.« Auch wenn Abbe und Zeiss mit dem mitgeschickten Material noch nicht viel anfangen konnten, so erkannten sie doch das Potenzial des jungen Glasmachers. Vor allem, dass es Schott gelungen war, die Schmelzproben in kleinen Tiegel herzustellen, imponierte ihnen. Sie bauten 1883 mit ihm





Eines der größten Glasarchive der Welt: Rund 94 000 Glasproben aus der Produktion der Firma SCHOTT befinden sich in Jena. Die Stiftung »Deutsches Optisches Museum« hat sie in ihr Eigentum übernommen. · Foto: Jens Meyer

eine »Glastechnische Versuchsstation« in Jena auf, aus der ein Jahr später das »Glastechnische Laboratorium Schott & Genossen« wurde – und das sich schnell zum zuverlässigen Lieferanten optischer Gläser entwickelte.

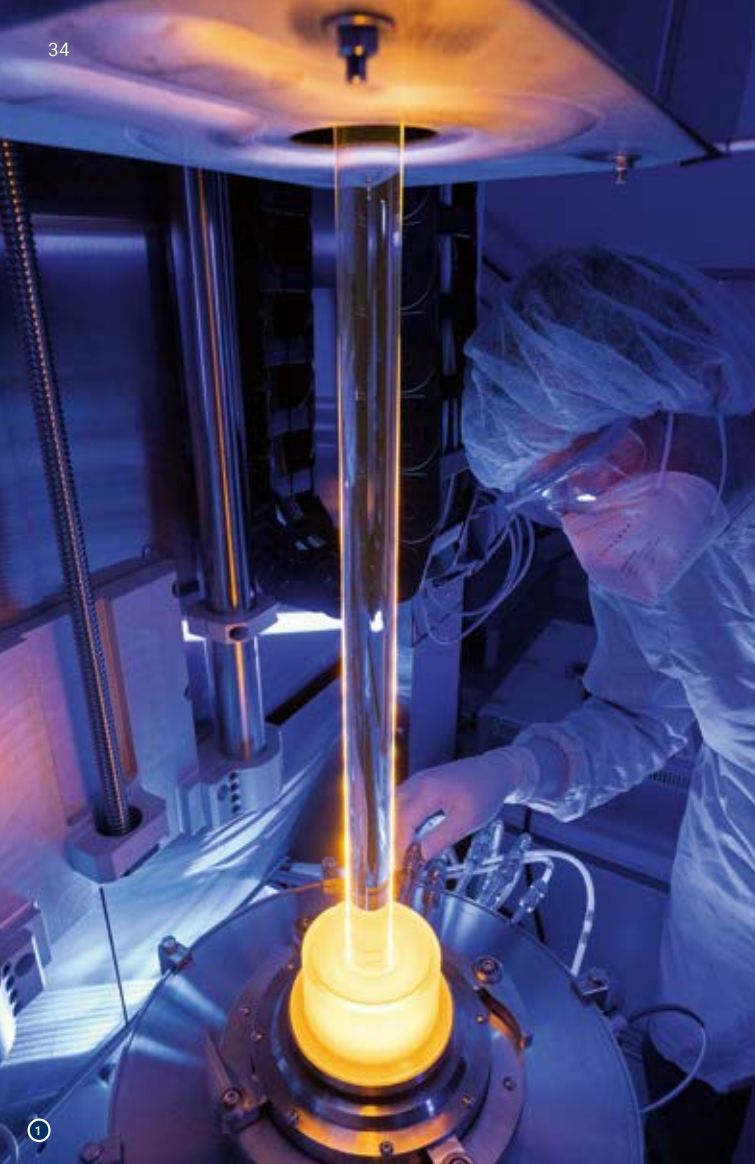
#### Die Neuerung des Glases

In dem neu gegründeten Unternehmen machte Otto Schott drei Jahre später eine bahnbrechende Erfindung, durch die Glas heute aus den Naturwissenschaften und aus technischen Anwendungen nicht mehr wegzudenken ist. Chemikalien und sogar Wasser griffen die bisher etablierten Glastypeen Kalknatron- und Bleiglas an. Zudem gingen sie durch zu hohe Hitze und zu schnelle Temperaturwechsel häufig zu Bruch. Experimentelle Untersuchungen im Labor erforderten also neues Material – das Schott lieferte. Er fügte dem klassischen Glasbestandteil Siliziumoxid Boroxid hinzu und behob so die Schwachstellen der anderen Glastypeen. Schnell setzte sich Borosilikatglas auf dem Markt durch: Zunächst produzierte das Unternehmen ab 1891 Thermometerglas aus dem neuen Werkstoff, zwei Jahre später wurden die ersten Laborgefäße, wie Bechergläser oder Erlenmeyerkolben, verkauft. Glaszylinder für Gaslampen erweiterten das Sortiment zusätzlich. Durch unterschiedliche Variationen der Zusammensetzung vergrößerte sich die Angebotspalette stetig, bis hin zum Haushaltsglas – dem berühmten Jenaer Glas, das Schott ab den 1920er Jahren produzierte. Noch heute findet Borosilikatglas vielfältige Anwendungen. In Form von besonders dün-

nen Floatgläsern wird es sogar in den Optiken von Welt- raumteleskopen verbaut.

#### Phasentrennung in Gläsern

Die Entwicklung der Elektronenmikroskopie bot Glaschemikerinnen und -chemikern weltweit neue Möglichkeiten für die tiefgreifende Erforschung der Glasstruktur – auch in Jena. Ab 1955 führte Werner Vogel im Glaswerk Schott & Gen. mit diesem Instrument umfangreiche wegweisende Untersuchungsreihen an Berylliumfluoridgläsern durch, um dem Phänomen der Phasentrennung im Glas, das bereits Otto Schott beobachtet hatte, genauer auf den Grund zu gehen. Denn anders als gemeinhin vermutet, mischen sich Glasbestandteile nicht zwangsläufig zu einem homogenen Material, sondern können während der Herstellung mikroheterogene Bereiche herausbilden, die – wie Werner durch seine Untersuchungen zeigte – etwa die Form von winzigen Tröpfchen einnehmen und mit bloßem Auge als Eintrübung wahrgenommen werden können. Dachte man noch zu Beginn der 1960er Jahre, dass diese Entmischungerscheinungen Ausnahmen seien, die möglicherweise sogar auf die Mikroskopie selbst zurückzuführen seien, so hat sich die Phasentrennung in Glas in der Folge als einer der wichtigsten Forschungszweige in diesem Bereich etabliert. Werner Vogel, der von 1969 bis 1990 an der Uni Jena forschte und lehrte, erlangte durch diese Arbeiten internationale Anerkennung. Seine Forschung bereitete den Weg für die Entwicklung neuer optischer und technischer Gläser. ■



①

## Wie eine Faser entsteht

Einblicke in das Faserkompetenzzentrum von Fraunhofer IOF, Leibniz-IPHT und Universität Jena

### 1 Schmelzofen

Die Vorform der Faser – ein rund ein Meter langer und etwa zwei Kilo schwerer Glasstab – wird auf 2 000 °C aufgeheizt.

### 2 Drop-off

Das erhitzte Glas wird formbar und bildet aufgrund seines Eigengewichts einen dicken Tropfen. Dieser wird entfernt und der nachfolgende Strang in die Ziehanlage gespannt.

### 3 Faserzug

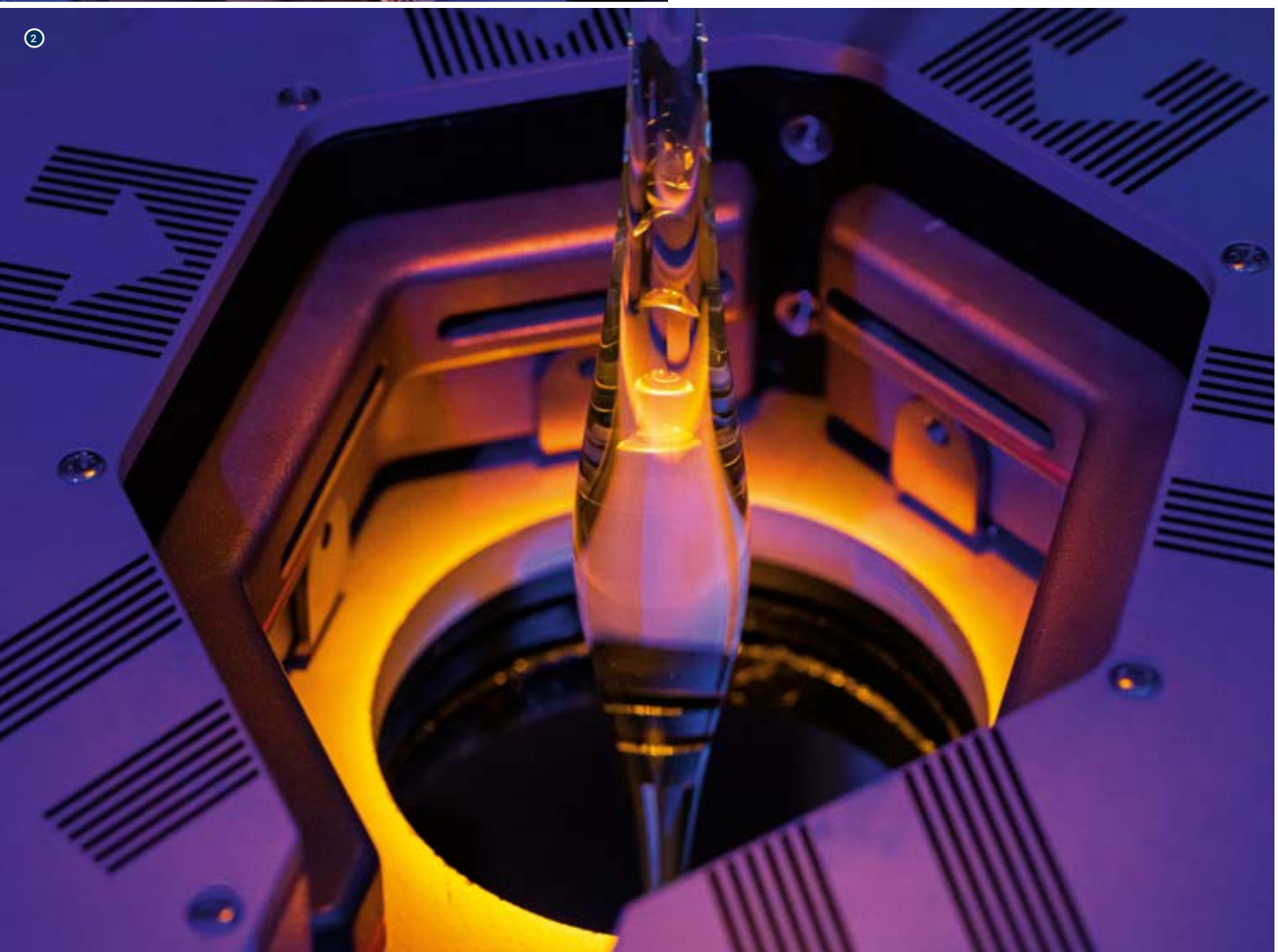
Auf ihrem Weg durch die sich über vier Stockwerke erstreckende Ziehanlage kann die Faser mit Polymeren mit abgestimmten Eigenschaften beschichtet werden.

### 4 Haaresbreite

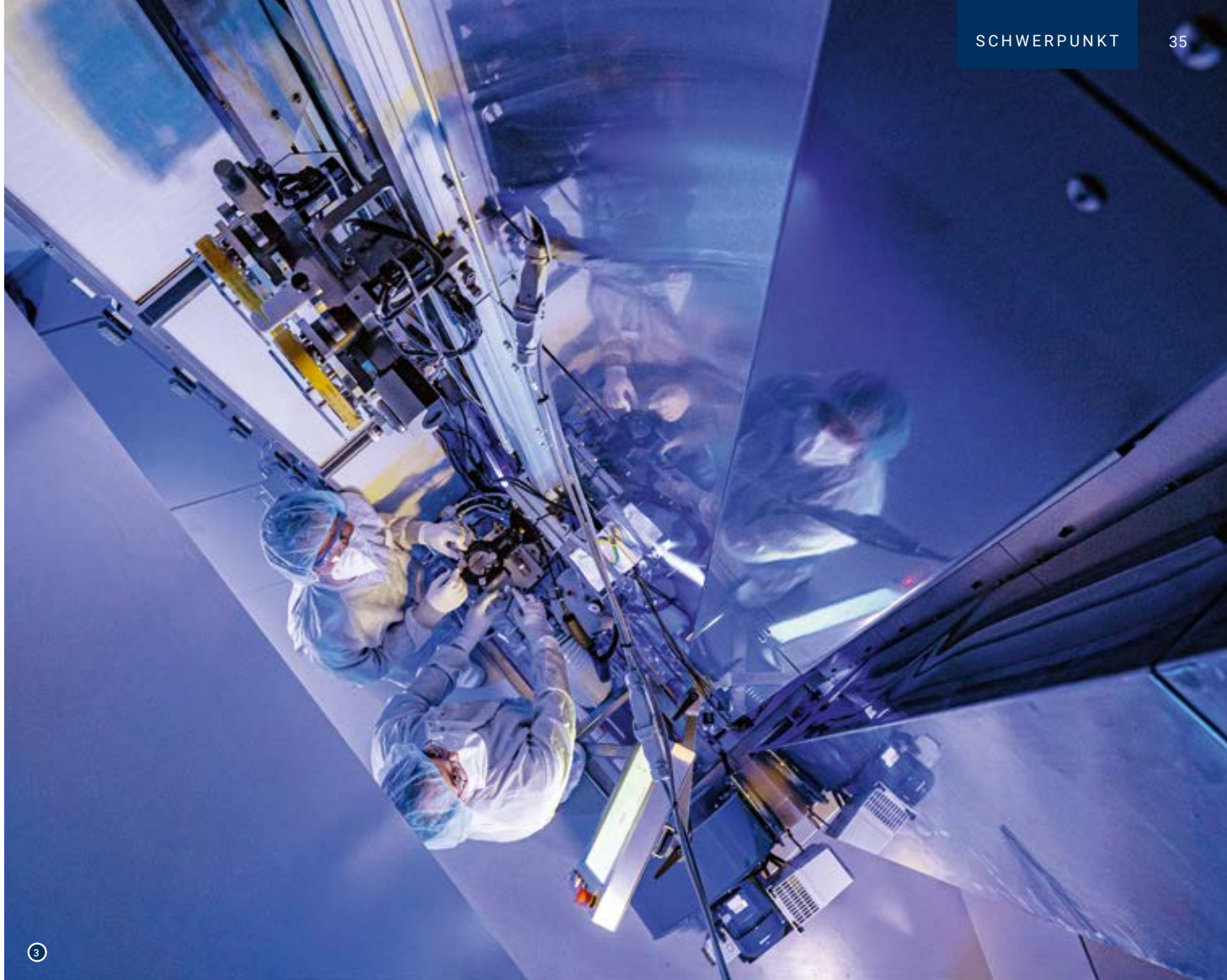
Die fertige mit Acrylat beschichtete Faser ist mit rund 150 Mikrometern Durchmesser nur noch etwa so dick wie ein menschliches Haar.

### 5 Auf die Rolle

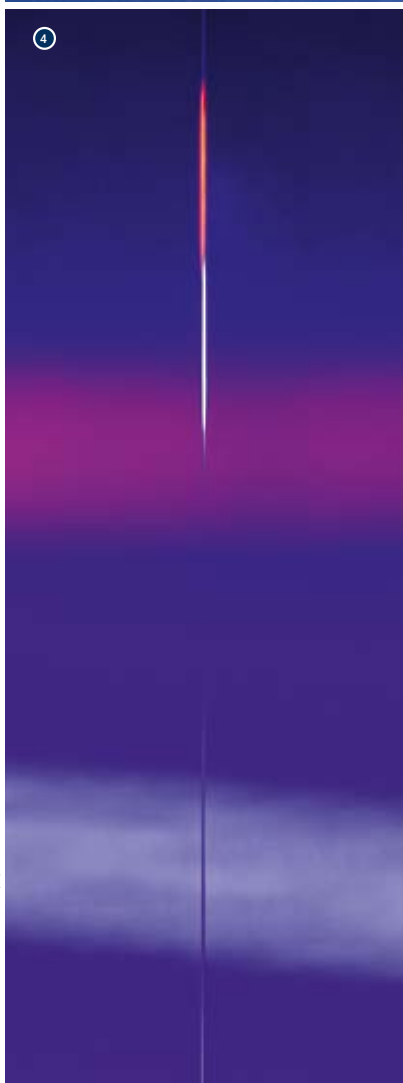
Im Kellergeschoss des Gebäudes wird die auf bis zu mehrere Kilometer Länge gezogene Faser schließlich aufgewickelt.



②



3



4



5

# Licht als Grenzgänger

Glasfasern spielen in der modernen Datenübertragung und Kommunikationstechnologie eine zentrale Rolle. Doch die Lichtführung in kilometerlangen und weniger als einen Millimeter dünnen Glasfasern ist keineswegs eine neue Erfindung: Schon im Altertum wurde Licht an Grenzflächen unterschiedlich stark lichtbrechender Medien geführt. Im Interview spricht Physiker Prof. Dr. Andreas Tünnermann darüber, wie eine Technologie aus dem vergangenen Jahrtausend die Datenkommunikation der Zukunft sicherer und effizienter machen kann.

INTERVIEW: UTE SCHÖNFELDER

## Welche Rolle spielt Glas in heutigen Kommunikationstechnologien?

Eine ganz zentrale Rolle. Denn praktisch alle Daten werden heute per Lichtsignal übertragen. Frei von jeglicher Übertreibung lässt sich feststellen, dass ohne die Kommunikation mit Licht und die Nutzung von Glasfasern, in denen das Licht geführt wird, das Internet, so wie wir es heute kennen, nicht denkbar wäre.

## Welche Vorteile bringt die Datenübermittlung per Licht?

Durch die Nutzung von Licht als Signalträger ist eine wesentlich höhere Übertragungskapazität möglich als beispielsweise in einem Kupferkabel oder im Vergleich zur Übertragung per Funkwellen. Außerdem erfolgt die Datenübertragung auch energieeffizienter in einer Glasfaser. Das liegt daran, dass eine Glasfaser das Signal wesentlich weniger dämpft als ein Kupferkabel.

Die Energieeffizienz ist heute im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik ein wichtiges Thema, insbesondere vor dem Hintergrund des enorm wachsenden Datenvolumens, das weltweit pro Jahr übertragen wird. Durch Streaming- oder Clouddienste vervielfacht sich der Datenaustausch stetig weiter, so dass heute ein signifikanter Teil des weltweiten Energiebedarfs für die

Übertragung und Speicherung von Daten aufgewendet wird. Eine dringende Aufgabe ist daher, die Verluste in Übertragungssystemen weiter zu reduzieren.

## Wie funktioniert die Lichtleitung in einer Glasfaser überhaupt?

Das Besondere an der Glasfaser ist, dass das Licht darin über den Mechanismus der totalen Reflexion geführt wird. Ein Material mit einem hohen Lichtbrechungsindex ist umgeben von einem Material, das einen niedrigeren Brechungsindex aufweist. Das Licht breitet sich in der Faser aus und wird an der Grenze zur Ummantelung nahezu vollständig reflektiert, also zurück in die Faser geleitet. Dadurch ist es geschützt und wechselwirkt nicht mit der Umgebung.

Dieses Phänomen ist schon seit vielen Tausend Jahren bekannt. Schon im Altertum war bekannt, dass man Licht in einem Wasserstrahl leiten kann. In dem Fall ist das Wasser das hochbrechende Material und die umgebende Luft das niedrigbrechende Material. Das Interessante daran ist, dass man so Licht in jede gewünschte Richtung leiten kann, zum Beispiel um die Ecke. Dies ist für Anwendungen in der Kommunikations-, Medizin- oder auch der Fertigungstechnik von Bedeutung, wo Licht als Informations- und Energieträger eingesetzt



Prof. Dr. Andreas Tünnermann ist Direktor des Instituts für Angewandte Physik (IAP) der Universität Jena und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF. · Foto: Jens Meyer  
Bild links: Abgeschnittener Glasstab unterhalb des heißen Faserziehofens in einer Faserziehanlage. · Foto: Jens Meyer

wird. Endoskop-Kameras sind hier ein prominentes Beispiel.

#### **Wie müssen die Glasfasern beschaffen sein, um Licht optimal zu übertragen?**

Generell geht es dabei darum, die Übertragung von Licht möglichst verlustarm zu gestalten. Zudem muss durch gezielte Dotierung mit Fremdatomen ein Brechzahlprofil eingestellt werden, das die Totalreflexion ermöglicht. Unterschiedliche Gläser werden zur Herstellung von Glasfasern eingesetzt, das wichtigste Material ist dabei Kieselglas: Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ). Heutige Telekommunikationsfasern sind inzwischen so optimiert, dass sie praktisch keine Verunreinigungen aufweisen und die Dämpfung des Signals in diesen Fasern nahezu auf das Material selbst, das Kieselglas zurückgeht. Damit lassen sich Daten über mehrere hundert Kilometer leiten, ohne dass sie nachverstärkt werden müssen. Diese Verlustfreiheit ist natürlich auch von Bedeutung in der Fertigungstechnik, wo Licht als Werkzeug beispielsweise für Schneid- und Schweißanwendungen eingesetzt wird und zu hohe Dämpfungen zu einer Zerstörung der Faser führen könnten.

#### **An welchen Fasern arbeiten Sie und Ihre Teams an der Universität und dem Fraunhofer IOF derzeit?**

Die klassische Kieselglasfaser ist aufgrund ihres Materials inzwischen nahezu ausgereizt, was die Dämpfungsverluste angeht. Wenn wir also Fasern wollen, die noch geringere Ausbreitungsverluste aufweisen, müssen wir ganz neue Prinzipien für die Leitung von Licht realisieren – und daran arbeiten wir hier. Wir versuchen beispielsweise, das Lichtsignal in der Faser innerhalb winziger Luftröhren zu führen, die von einem Glasmantel umgeben sind. Denn die Signalverluste bei der Ausbreitung von Licht in Luft sind geringer als in Glas. Der Führungsmechanismus des Lichtes in diesen Fasern basiert dabei dann nicht mehr auf der Totalreflexion.

Ein zweiter Schwerpunkt, an dem wir arbeiten, sind Laserfasern. Wir nutzen Glasfasern also nicht nur zur Übertragung von Licht, sondern auch dazu, Licht zu erzeugen. Eine Laserfaser unterscheidet sich von einer Datenfaser. Laserfasern sind dotiert mit Selten-Erd-Materialien wie Neodym oder Ytterbium, in denen eine Lichtverstärkung erfolgt.

#### **Inwieweit spielen Glasfasern auch eine Rolle beim Zukunftsthema Quantenkommunikation?**

Der Laser selbst ist ein Ergebnis der Quantenphysik. Er basiert auf der Nutzung kollektiver Quantenphänomene. Durch die Möglichkeit, einzelne Quan-

ten – damit auch Lichtteilchen, die Photonen – zu kontrollieren, können wir heute die Quantentechnologien nutzen, um Informationen zukunftsicher zu verschlüsseln und damit Datensicherheit generieren.

Die Kryptographie wird damit revolutioniert. Man erzeugt dabei unter Nutzung spezifischer Quanteneigenschaften sogenannte Quantenschlüssel, die Daten sehr sicher verschlüsseln, gleichzeitig kann durch die Anwendung von spezifischen Protokollen sogar sichergestellt werden, dass auch der Betreiber der Infrastruktur nicht in der Lage ist, den Schlüssel zu lesen. Sowohl der Datenschlüssel als auch die damit verschlüsselten Daten lassen sich über Glasfasern verschicken. Allerdings müssen für Anwendungen von Glasfasern in der Quantenkommunikation die Dämpfungsverluste noch einmal wesentlich verringert werden, daher auch unsere aktuellen Forschungsarbeiten zu Glasfasern mit neuen Mechanismen der Lichtführung. Warum ist die Kontrolle der Verluste gerade in der Quantenkommunikation so wichtig? Hier spielen grundlegende physikalische Quantenphänomene eine Rolle, im Gegensatz zur klassischen Übertragung von Licht in Glasfasern kann das Signal nicht einfach verstärkt werden. Quantenzustände lassen sich nicht klonen bzw. wiederherstellen. ■

# Das Fenster zum Gehirn

Neben Datenkabeln oder Faserlasern spielen Glasfasern auch für moderne Bildgebungsverfahren eine zentrale Rolle. Im Institut für Photonische Technologien (Leibniz-IPHT) und im Uni-Institut für Angewandte Optik entwickeln Forschende um Prof. Dr. Tomáš Čižmár mit der glasfaserbasierten holografischen Endoskopie ein Verfahren, mit dem man eines Tages Gehirnzellen beim Denken und Fühlen zuschauen kann.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Ultraschall, Magnetresonanz- oder Computertomografie – schon heute erlauben etliche nichtinvasive bildgebende Verfahren Einblicke in den lebenden menschlichen Körper. Damit lassen sich Krankheiten oder innere Verletzungen diagnostizieren sowie Heilungs- und Stoffwechselprozesse überwachen. Mit diesen etablierten Methoden lässt sich zwar der gesamte Körper bis ins Innerste durchleuchten, doch sie haben auch einen entscheidenden Nachteil: Die aufgenommenen Bilder haben eine maximale Auflösung von etwa einem Millimeter; kleinere Details lassen sich damit nicht abbilden. »Um einzelne Zellen oder gar Zellbestandteile sichtbar zu machen,

die tausendmal kleiner sind, braucht es andere Methoden«, erläutert Prof. Dr. Tomáš Čižmár. Zwar gibt es – etwa mit der Elektronenmikroskopie – solche hochauflösenden Verfahren. »Allerdings lassen sich damit wiederum nur oberflächliche Aufnahmen machen oder man muss durch sehr dünne Gewebeschnitte schauen, was den Einsatz am lebenden Organismus einschränkt«, so der Professor für Wellenleiteroptik und Faseroptik und Arbeitsgruppenleiter am IPHT.

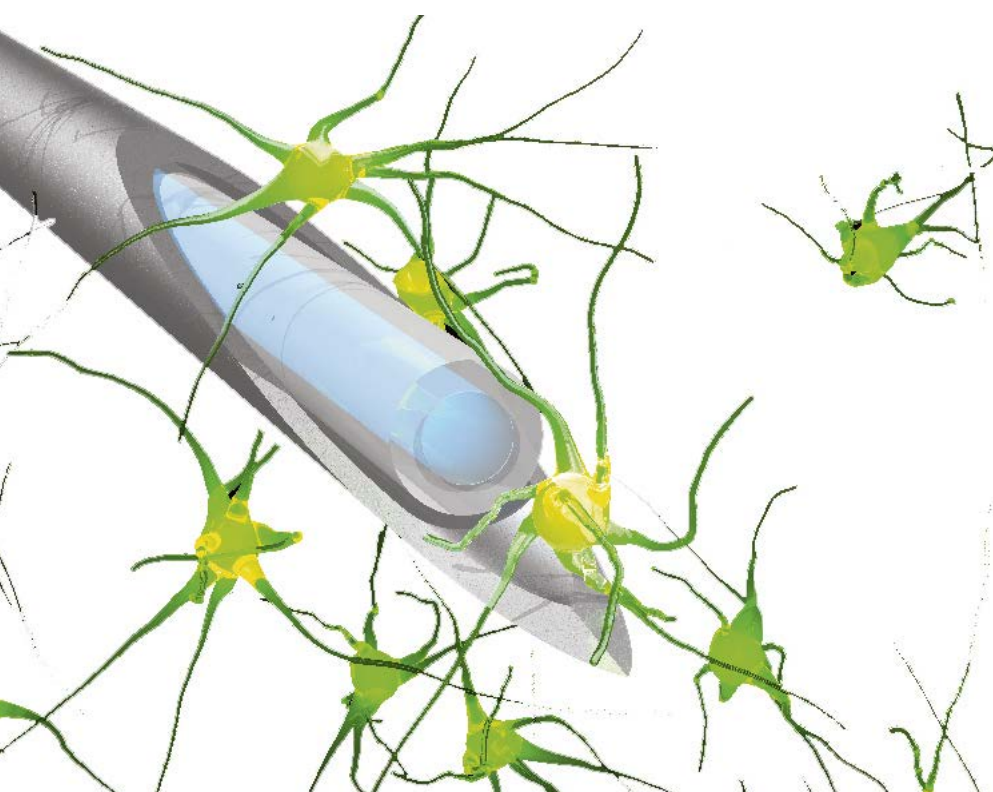
Genau solche hochauflösenden Einblicke tief ins Innere lebender Organismen zu ermöglichen, das ist das Ziel, das Tomáš Čižmár und sein Team verfolgen. Genauer gesagt wollen die For-

schenden ein Instrument entwickeln, mit dem sich das Gehirn buchstäblich bei der Arbeit beobachten lässt. Viele Details dieses hochkomplexen Organs sind noch nicht verstanden. »Diese Komplexität zu verstehen, kann langfristig helfen, Krankheiten wie Alzheimer oder Parkinson besser zu behandeln oder sogar zu heilen«, beschreibt Čižmár seine Motivation.

## Haardünne optische Faser scannt Nervengewebe

Für den Blick ins Gehirn – zunächst von Versuchstieren – nutzt das Forschungsteam hauchdünne optische Fasern, die in das Gewebe eingeführt werden. Anders als herkömmliche Endoskope, die für »Schlüsselloch-Operationen« oder zur Diagnostik von Magen oder Darm eingesetzt werden und aus einem bis zu einem Zentimeter dicken Faserbündel bestehen, sind die endoskopischen Fasern, um die es hier geht, nur so »dick« wie ein menschliches Haar. Darüber hinaus sind die Fasern biegsam und flexibel, so dass sie sich den Bewegungen des Körpers anpassen. Die Fasern sind mit ihren 100 Mikrometern Durchmesser nur wenig dicker als die Nervenzellen selbst (siehe Illustration links) und haben eine scharfe Spitze, die wie ein Skalpell ins Gewebe eindringt, dabei aber nur minimalste Verletzungen verursachen.

Die entscheidende technologische Herausforderung besteht darin, das Licht kontrolliert durch diese Fasern zu leiten. Sie bestehen aus einem lichtleitenden Kern aus Kieselglas und einer Ummantelung, die einen etwas niedrigeren Brechungsindex hat, wodurch





Prof. Dr. Tomáš Čížmár und sein Team entwickeln Endoskope auf Glasfaserbasis, um Einblicke in das lebende Gehirn zu gewinnen. · Foto: Anne Günther

das Licht in der Faser »gefangen« und durch sie hindurchgeführt wird (siehe S. 36). Allerdings ermöglicht eine solche »Multimode-Faser« zahlreiche unterschiedliche und kaum vorhersehbare Wege der Lichtausbreitung, was zu einer scheinbar chaotischen Lichtverteilung führt, die der eines diffusen, undurchsichtigen Mediums ähnelt.

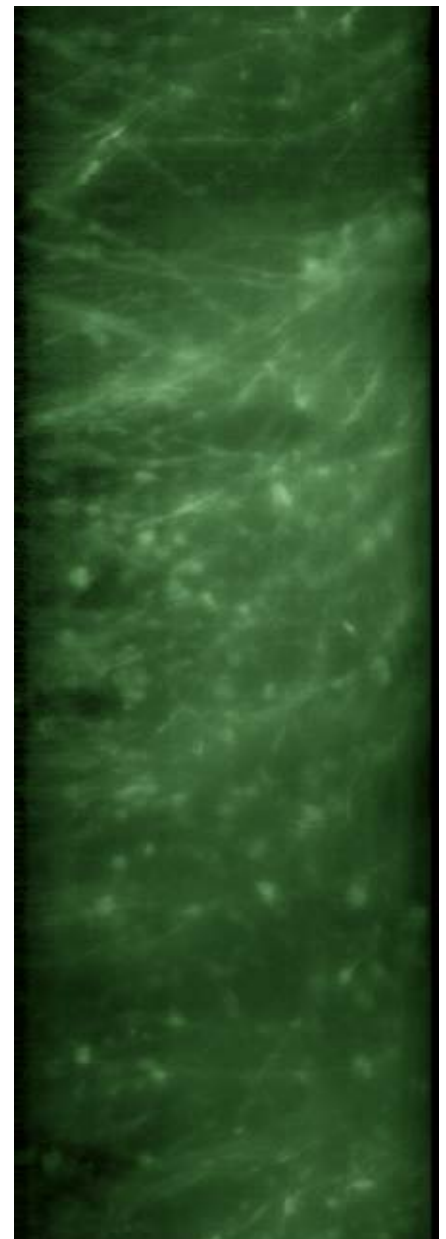
Die Forschenden schicken kohärentes Laserlicht durch die Faser in das zu untersuchende Gewebe. »Normalerweise führt die Interferenz der Lichtwege innerhalb des Faserkerns dazu, dass sich an einigen Stellen Wellenberge und an anderen Wellentäler ausbilden, was eine gesprenkelte »Karte« aus hellen und dunklen Pixeln erzeugt«, sagt Physiker Čížmár. Um dagegen scharfe Abbildungen zu erhalten, wird das Licht, bevor es in die Faser eintritt, mit einem holografischen Modulator »vorgeformt«. Dabei handelt es sich um eine programmierbare Anordnung von Mikrospiegeln, von denen jeder schnell zwischen zwei Ausrichtungen umgeschaltet werden kann. »Auf diese Weise können wir das Licht hinter der Faser eng fokussieren«, so Čížmár. Durch die Verwendung eines spezifischen Hologramms, einer Einstellung des Mikrospiegel-Arrays für jedes gewünschte Pixel des Bildes, tastet der Fokus den Bildausschnitt dann Punkt für Punkt ab und bildet Details mit einer Größe von weniger als einem Mikrometer ab. Bis das Verfahren der holografischen Endoskopie auch Einblicke in das menschliche Gehirn ermöglicht, ist es noch ein weiter Weg. Doch die bislang mit Versuchstieren erzielten Ergebnisse sind vielversprechend. Tomáš Čížmár und seine Forschungsteams in Jena und im tschechischen Brno konnten mit ih-

rer Technologie bereits Nervenzellen und ihre Zellfortsätze, über die sie miteinander kommunizieren, auch in tiefen Hirnstrukturen sichtbar machen.

Čížmár war an der Entwicklung der Methodik vor gut zehn Jahren selbst beteiligt und fokussiert seine Forschungsarbeit seither darauf. Für sein Projekt »LifeGATE«, das die Technik der Lichtausbreitung und Bildgebung in Multimode-Fasern weiterentwickelt, wird er seit 2017 mit einem Consolidator Grant des Europäischen Forschungsrates (ERC) unterstützt. »Seitdem haben wir bedeutende Fortschritte erzielt«, berichtet er. So lassen sich die untersuchten Bereiche nun mit einer viel höheren Geschwindigkeit scannen und somit insgesamt größere Flächen untersuchen.

#### Aus einem Forschungsprojekt soll ein Start-up-Unternehmen werden

Ihre Forschungsergebnisse wollen Čížmár und sein Team in den kommenden Jahren in ein Start-up-Unternehmen überführen und potenziellen Anwenderinnen und Anwendern in den Neurowissenschaften und der Medizin anbieten. Ihr Ausgründungsprojekt »DeepEn« (Minimally-invasive Endoscopes for Neuroscience and Medicine) wird durch das EXIST-Programm für Existenzgründungen aus der Wissenschaft des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert. Die Ausgründung ist für das kommende Jahr geplant. In zehn bis fünfzehn Jahren, so schätzt Čížmár, könnten sich daraus die ersten diagnostischen und therapeutischen Anwendungen entwickelt haben. ■



Detail eines endoskopischen Bildes, das die Fortsätze von Neuronen (Dendriten und Axone) im Gehirn einer lebenden Maus zeigt. · Foto: IPHT/ Institute of Scientific Instruments of the Czech Academy of Sciences

## Maßanfertigung in Haaresbreite

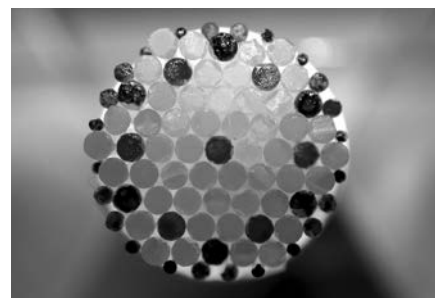
In der Arbeitsgruppe Optische Fasermaterialien und -strukturen am Leibniz-IPHT werden Glasfasern für haarfeine Endoskope der Zukunft und andere Anwendungen entwickelt. Denn solche Fasern gibt es nicht »von der Stange« und Faser ist nicht gleich Faser.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Viele der Fasern für die endoskopische Holografie (siehe S. 38) sind selbst entwickelt. Dabei stützen sich die Forschenden auf die Expertise im eigenen Institut. Das Team von Dr. Katrin Wondraczek am Leibniz-IPHT ist auf die Herstellung von Kernmaterialien für optische Glasfasern spezialisiert, die je nach geplanter Anwendung und Funktionalität »maßgeschneidert« werden. »Man kann sich das wie Kuchenbacken vorstellen«, sagt die Arbeitsgruppenleiterin mit einem Augenzwinkern. »Je nach gewünschtem Kuchen, stellen wir die passende Rezeptur zusammen.« Wie der Kuchen im Ofen, werden die Vorformen der Fasern aus unterschiedlichen Glaselementen zu einer Faser »zusammengebacken« und anschließend haarfein ausgezogen. Eine biegsame Faser für die endoskopische Bildgebung besteht beispielsweise aus Dutzenden einzelner Faserkerne, die unterschiedliche optische Eigenschaften aufweisen.

### »Spaghetti« bündeln und zehntausendfach verlängern

Doch wie entstehen solche haarfeinen Fasern überhaupt? »Ausgangspunkt jeder Glasfaser – egal, welcher Zusammensetzung – ist ein Glasstab, eine sogenannte Preform«, erläutert Chemikerin Katrin Wondraczek. »Dafür werden entsprechend dotierte und undotierte Stäbe im gewünschten Design zu einer Faser zusammengesetzt, nur ungefähr hundertmal dicker.« Das sieht etwa so aus, als würde man gläserne Spaghetti zu einem mehrere Zentimeter dicken Bündel stapeln (Querschnitt im Bild rechts). Anschließend wird aus dem »Spaghettibündel« von etwa einem halben Meter Länge eine Faser gezogen, die mehrere Kilometer lang sein kann (siehe S. 32). »Dabei wird das Material der Preform herunterskaliert«, erläutert Katrin Wondraczek. Wird der Durchmesser der Faser hundertmal kleiner als der der Preform, wächst die



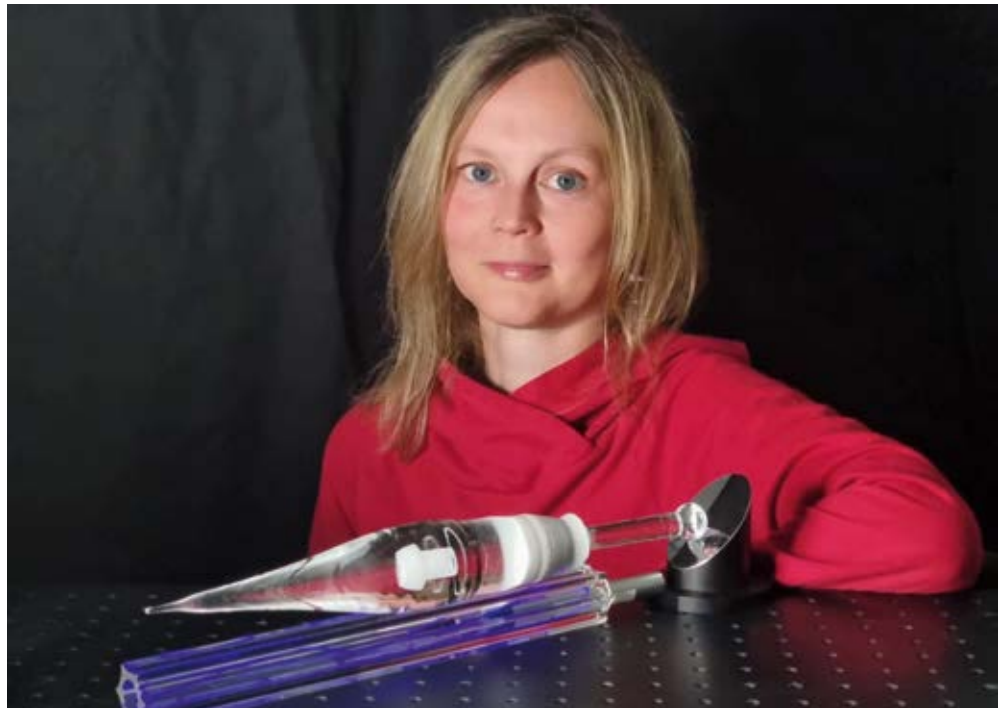
Querschnitt einer Packung aus dotierten und undotierten Quarzglasstäben in einem Hüllrohr. · Foto: Anne Matthes

Länge um den Faktor 10000. Konkret wird so aus einer Preform von einem Zentimeter Dicke eine Faser mit einem Durchmesser von etwa 100 Mikrometer – der Dicke eines menschlichen Haares. Die Preformen, die »Spaghetti«, bestehen überwiegend aus  $\text{SiO}_2$ , dem gängigen Glasmaterial. Entscheidend für die Funktion von Spezialglasfasern ist es, dieses Grundmaterial mit zusätzlichen Substanzen zu dotieren. So wird etwa Ytterbiumoxid für Laserfasern benö-



**Bild links: Mit der »modifizierten chemischen Gasphasenabscheidung« werden Glasstäbe erzeugt, aus denen sich Fasern ziehen lassen. Hier zu sehen, der Moment des Kollabierens eines Rohres am Versuchsende. · Foto: Sven Döring**

**Bild rechts: Dr. Katrin Wondraczek und ihr Team entwickeln Preformen für optische Glasfasern. · Foto: Lothar Wondraczek**



tigt, Datenfasern enthalten meist Germaniumoxid. Katrin Wondraczek und ihre Kolleginnen und Kollegen arbeiten nun daran, dotiertes Glas so herzustellen, dass die Dotanten darin möglichst homogen verteilt sind und in exakter Konzentration vorliegen, was entscheidend für die Funktionsweise in der Glasfaser ist.

Und spätestens hier zeigt sich, dass das Ganze doch etwas komplizierter ist, als Kuchenbacken. Denn für die Herstellung von Spezialglasfasern sind nicht allein die geeigneten Zutaten wichtig. Auch der Herstellungsprozess selbst ist für das Ergebnis entscheidend. Und anders als man annehmen könnte, kommen die Glasvorstufen, die Katrin Wondraczek und ihr Team entwickeln, auch nicht aus einem Schmelzofen. Vielmehr werden sie aus gasförmigen, flüssigen oder festen Ausgangsstoffen hergestellt.

#### Glas aus Gas

Für Endoskop-Fasern werden beispielsweise Germanium-dotierte Glas-Preformen gebraucht, die Wondraczeks Team mittels der sogenannten Gasphasenabscheidung herstellt. Dabei werden die zunächst flüssigen chemischen »Zutaten« – Silizium- und Germaniumchlorid – mit Sauerstoff in einem Heliumstrom durch

eine Glasröhre geleitet und währenddessen an einer über 1800 °C heißen Flamme erhitzt. Dabei verdampfen sie, reagieren mit Sauerstoff und bilden  $\text{SiO}_2$  dotiert mit  $\text{GeO}_2$ . Dieses setzt sich zunächst als sehr trockenes Pulver an der Glasinnenwand ab und wird dort durch weiteres Erhitzen »verglast«. Da sich während des Vorgangs der Brenner langsam an der Röhre entlang bewegt, wächst auf diese Weise im Inneren Schicht für Schicht mit dem dotierten Glas heran. Diese Röhre wird abschließend zum Kollabieren gebracht und fügt sich zu einem Glasstab zusammen: einen knappen Zentimeter dick und bis zu einem halben Meter lang.

»Mit der Gasphasenabscheidung erhalten wir im Vergleich zum klassischen Schmelzen Glasstäbe mit sehr homogener Dotierung im Kernbereich und hoher Reinheit«, nennt Wondraczek einen Vorteil dieser Technik. Außerdem weisen die mit dieser Methode hergestellten Materialien einen sehr geringen Dämpfungsverlust auf – ein weiteres entscheidendes Kriterium für einen Einsatz in langen Datenfasern. »Nachteilig ist jedoch, dass wir mittels Gasphasenabscheidung nur Glasstäbe mit relativ dünnen dotierten Kernbereichen von unter einem Zentimeter Durchmesser gewinnen können, was die Länge und den maximalen Kerndurchmesser der daraus zu ziehenden Fasern ebenfalls limitiert«, ordnet Ka-

trine Wondraczek ein.

Deshalb arbeiten die Glaswissenschaftler auch an weiteren Alternativen. Ein Verfahren, bei dem Glas ebenfalls nicht aus einer Schmelze, sondern aus festen Ausgangsstoffen entsteht, ist das Dotieren von bereits vorhandenen  $\text{SiO}_2$ -Partikeln. Beim sogenannten »Reactive Powder Sintering« (REPUSIL) wird aus Silica-Nanopartikeln und den gewünschten Dotanten letztendlich ein Granulat hergestellt, aus dem sich feste Zylinder pressen lassen. Diese Grünkörper geben bereits Form und Größe des fertigen Glasstabes vor.

Anschließend erfolgt das Sintern: Das Material wird erhitzt, bleibt aber unterhalb seiner Schmelztemperatur, wodurch es verglast. So gewonnene Glasstäbe können mehrere Zentimeter dick sein, weshalb sich daraus in der Regel längere Fasern oder Fasern mit größeren Kernen ziehen lassen als mit der Gasphasenabscheidung.

Wie auch immer die Preform hergestellt wird, am Ende wird daraus eine einzigartige Faser, mit individuellem Design, unterschiedlicher Zusammensetzung und Struktur, je nachdem, ob es sich um eine Laserfaser handelt, eine Faser zur Datenkommunikation, zur Bildgebung oder Spektroskopie. Und doch beginnt die Entwicklung jeder Faser mit den gleichen Voraussetzungen: Quarzsand, hohen Temperaturen und dem richtigen Know-how. ■

# Das Auge des Lasers

Der Kurzpuls laser POLARIS gehört zu den leistungsstärksten seiner Art. Seine Stärke bezieht er aus einem Parcours aus Dioden, Linsen, Spiegeln und einem sehr homogenen Kristall. Ein Blick dorthin, wo Laserlicht verstärkt wird, bis es Rekorde bricht, und wo nicht alles, was nach Glas aussieht, auch wirklich ein Glas ist.

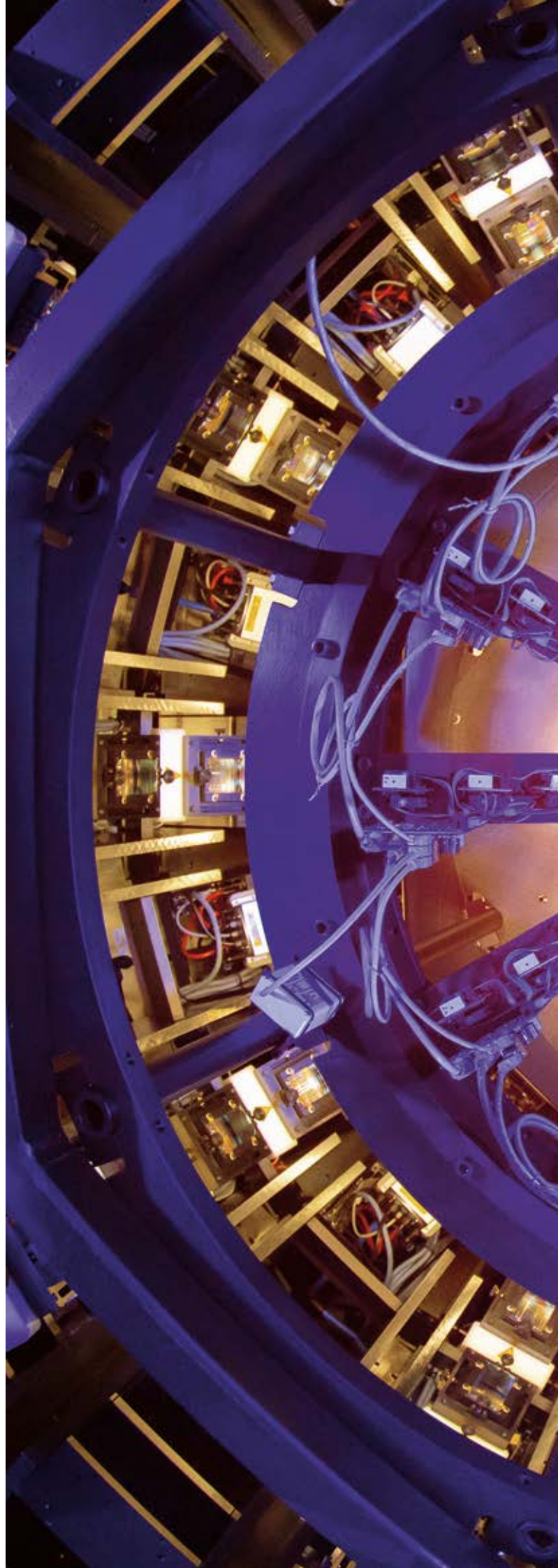
TEXT: UTE SCHÖNFELDER

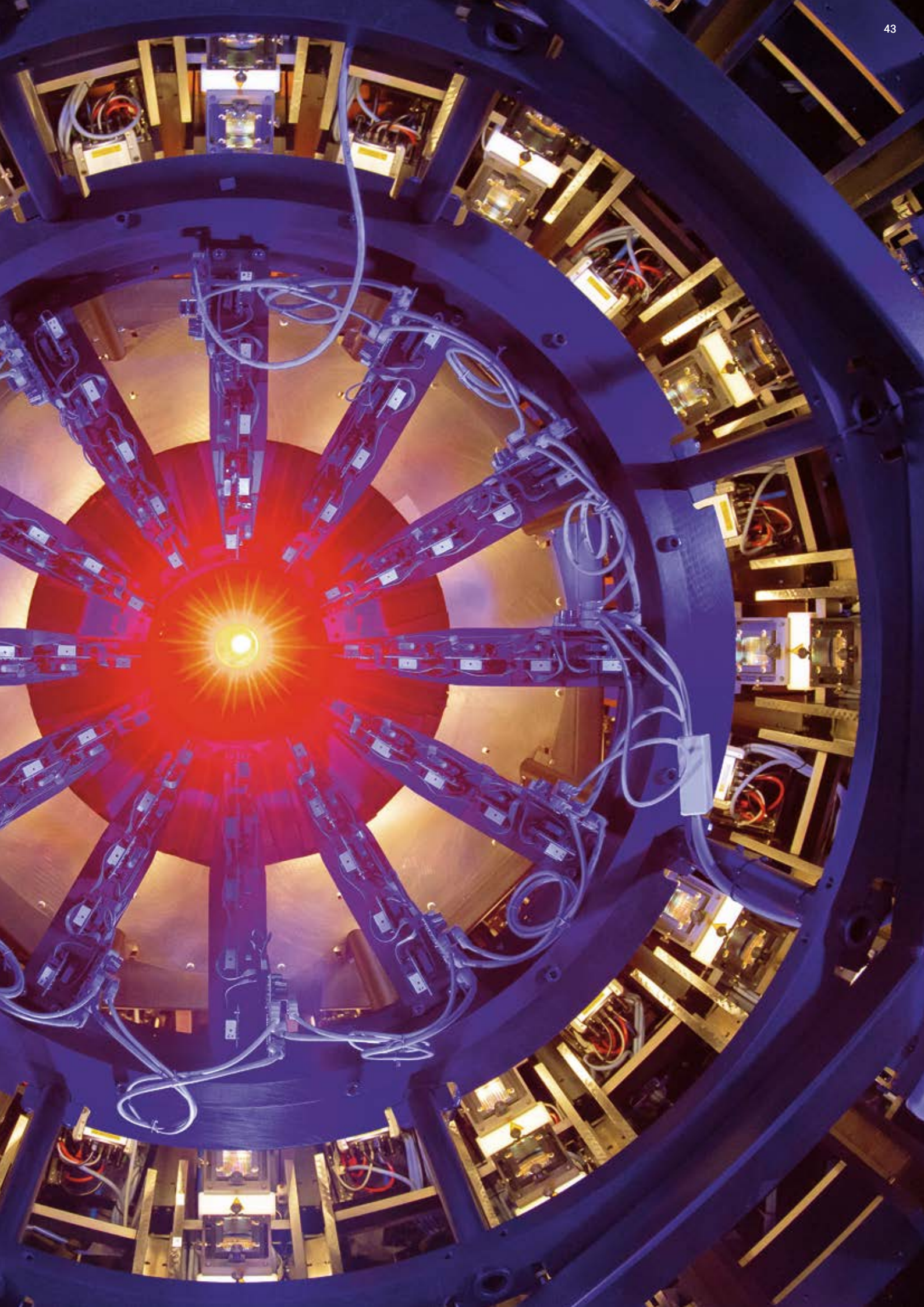
Eines der leistungsstärksten vollständig Dioden-gepumpten Lasersysteme der Welt steht in Jena. Der POLARIS-Laser von Universität und Helmholtz-Institut erreicht Spitzenleistungen von mehr als 170 Terawatt. Herzstück des sich über drei Stockwerke erstreckenden Lasersystems ist die letzte Verstärkerstufe: ein zweieinhalb mal zweieinhalb mal zweieinhalb Meter messendes Stahlgerüst, das ein wenig an eine überdimensionierte Waschmaschinentrommel erinnert. Dieses ist bestückt mit 120 Laserdiodenstacks und einem Vielfachen an Zylinderlinsen. Ist der Laser in Betrieb, geben die Dioden synchrone Lichtblitze ab, die über die Linsen auf eine Fläche von etwa fünf Zentimetern Durchmesser fokussiert werden, die sich in der Mitte des Stahlgerüsts befindet (im Bild der orange leuchtende Bereich). Hier sitzt der eigentliche Laserverstärker: ein sehr homogener Kalziumfluorid-Kristall, rund sechseinhalb Zentimeter im Durchmesser und etwa dreieinhalb Zentimeter dick.

Auf den ersten Blick sieht der Kristall aus wie gewöhnliches Glas. Doch anders als in einem Glas, in dem es unterschiedlich stark geordnete und ungeordnete Bereiche gibt, liegt der Kristall als regelmäßiges Gitter vor. Wie Glas (siehe S. 14), das hauptsächlich aus  $\text{SiO}_2$  besteht, bildet auch Kalziumfluorid ( $\text{CaF}_2$ ) eine Tetraederstruktur. Doch anders als in Glas setzt sich diese Struktur regelmäßig durch den gesamten Kristall fort. Der Kalziumfluorid-Kristall ist zusätzlich mit Ytterbiumionen dotiert. Treffen die gebündelten Blitze der Laserdioden den Kristall, werden die Elektronen der Ytterbiumionen angeregt und der Kristall dadurch mit Energie »aufgepumpt«. Wird anschließend der eigentliche Laserstrahl auf seinem mehrere hundert Meter langen, durch mehrere hundert Spiegel geleiteten Weg durch den aufgeladenen Kristall geführt, geben die Elektronen diese Energie wieder ab und verstärken damit den Laserpuls. Für jedes eingestrahelte Laser-Photon wird ein weiteres Photon aus dem Kristall abgestrahlt; dieser Vorgang wird als »stimulierte Emission« bezeichnet.

Insgesamt durchläuft der Laser diesen Kristall siebenmal, bevor er mit Höchstleistung in der Targetkammer im Keller des Gebäudes eintrifft. ■

FOTO: JENS MEYER







Ausgabe der Pflanzenpakete im Botanischen Garten der Uni Jena im März 2022. - Foto: Christine Römermann

## Forschung zum Mitmachen

Immer häufiger beziehen Forschende Bürgerinnen und Bürger in ihre wissenschaftliche Arbeit ein. Dabei sollen diese jedoch nicht – wie häufig üblich – als Probanden die Forschung unterstützen. Vielmehr wird bei »Citizen Science« gemeinsam geforscht. Auch die Universität Jena lädt zu Mitmachprojekten ein. Hier stellen wir zwei Beispiele vor.

TEXT: VIVIEN BUSSE

»Citizen Science« definiert das Oxford Dictionary als »wissenschaftliche Arbeit, die von Mitgliedern der allgemeinen Öffentlichkeit« ausgeführt wird. Dabei arbeiten diese häufig gemeinsam oder unter Anleitung von professionellen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern oder wissenschaftlichen Einrichtungen. In Deutschland wird dafür auch der Begriff »Bürgerwissenschaft« verwendet. Es sind also Laien, die bei »Citizen Science« beim Erheben, Sammeln, Recherchieren und Auswerten von Forschungsdaten helfen.

### Pflanzen beobachten vom Stadtrand bis in die Innenstadt

Die Mitarbeit der breiten Öffentlichkeit hilft aktuell Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Projektes »PflanzeKlimaKultur«. Das Verbundprojekt, an dem u. a. die Universitäten Jena, Halle und Leipzig beteiligt sind,

hat zum Ziel, die Phänologie, also die saisonalen Entwicklungsstadien, von heimischen Pflanzen zu beobachten. Denn Pflanzen spiegeln klimatische Veränderungen wider – zum Beispiel wird ihr Lebenszyklus stark von der Temperatur beeinflusst.

Das Jenaer Projektteam hat über Naturschutzorganisationen, Kleingartenvereine, Schulen und über einen Aufruf in der Lokalpresse Bürgerinnen und Bürger zur Teilnahme gesucht. Seit März läuft das Projekt: Die Teilnehmenden haben Pflanzenpakete erhalten und in eigenen Beeten angepflanzt. Seitdem beobachten sie ihre Pflanzen – und das Ganze über eine Dauer von zwei Jahren. Wöchentlich werden die phänologischen Stadien der Pflanzen dokumentiert, z. B. der Austrieb, die erste Blüte und auch die Blattverfärbung. Über eine App werden die Daten in einer Datenbank gesammelt. Zur Erfassung und Dokumentation der benötigten Beobachtungen und Daten

stellten die Forschenden zusätzlich Anleitungen zur Verfügung. Parallel zur manuellen Erhebung wurden in allen Beeten Sensoren angebracht, die die Luft- und Bodentemperatur und Bodenfeuchte messen.

Die teilweise privaten und teilweise öffentlichen Beete in Jena sind quer über die Stadt verteilt, vom Stadtrand bis in die Innenstadt. Zwei Modellbeete befinden sich im Botanischen Garten der Universität Jena und auf dem Naturerlebniszentrum am Schottplatz. Erstere werden durch die Arbeitsgruppe Biodiversität der Pflanzen des Instituts für Ökologie und Evolution der Universität Jena betreut, die Betreuung im Naturerlebniszentrum hat der Stadtforst des KommunalService Jena übernommen. Bei den Modellpflanzen handelt es sich um insektenfreundliche und leicht zu kultivierende Wildpflanzen, wie Wildtulpen, Kronwicken, Steppen-Salbei und Winterlinge. »Wir haben viele passionierte und engagierte Bürgerinnen

und Bürger dabei, auch viele Schulen beteiligen sich am Projekt«, berichtet Prof. Dr. Christine Römermann, Leiterin des Projektteils in Jena. »Sie möchten einen Beitrag zur Klimafolgenforschung leisten.« Auch die Umweltbildung spiele eine Rolle, so Römermann. Eine Schule habe gleich zwei Beete mit ganz unterschiedlichen Umweltbedingungen angelegt, um auch im Kleinen Unterschiede beobachten zu können.

In Bürgerdialogen erfolgt parallel zur Datenerhebung ein Austausch mit den Forschenden und gemeinsam werden Konzepte für Naturschutz und Klimaanpassung erarbeitet. Mit Hilfe der gesammelten Daten wollen die Forschenden den Einfluss des Mikroklimas auf die Entwicklung von Pflanzen erfassen, der insbesondere in Städten groß ist.

Die Forschenden nutzen die Daten zudem im Forschungsprojekt »PhenObs«, welches die Phänologie an über 200 Pflanzen in Botanischen Gärten weltweit dokumentiert. Der Vergleich der Auswertung gibt Aufschluss über den Einfluss des Makro- im Vergleich zum Mikroklima.

### Perspektiven der Geschichte

Eine andere Art der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Öffentlichkeit plant derzeit die Masterstudentin Emilia Henkel. Während die Studentin der Geschichte und Politik des 20. Jahrhunderts an ihrer Masterarbeit schrieb, stellte sie sich die Frage, wer eigentlich dazu berechtigt ist, historische Geschichten aufzuschreiben oder zu erzählen. »Wie verändert sich die Geschichte durch die individuelle Biografie des Erzählers oder der Forscherin? Was sehen wir in Quellen und was bleibt uns verborgen, das anderen auffällt?« Am Beispiel der ersten Thüringer Asylunterkunft bei Tambach-Dietharz will sie diesen Fragen auf den Grund gehen – gemeinsam mit Bürgerinnen und Bürgern. »Mich interessieren vor allem die unterschiedlichen Sichtweisen auf die damaligen Ereignisse von Betroffenen: den ehemaligen Bewohnerinnen und Bewohnern des Asylheims sowie des benachbarten Ortes, Menschen, die in anderen Zeiten und an anderen Orten Erfahrungen



Das »Neue Haus« in der Nähe von Tambach-Dietharz wurde zwischen 1991 und 2003 als erste Asylunterkunft Thüringens genutzt. · Foto: Emilia Henkel

mit Flucht und Massenunterbringung gemacht haben, Historikerinnen und Historiker sowie Menschen, die nicht vom Fach sind«, so die Studentin. Um an ihre Gesprächspartnerinnen und -partner zu gelangen, nutzt sie ihre Kontakte aus vorherigen Arbeiten und aus ihren Recherchen. Vor allem über Vereine will Emilia Henkel Teilnehmerinnen und Teilnehmer für ihr Projekt gewinnen, etwa den Verein Camp Impact e. V., der in den Gebäuden der ehemaligen Asylunterkunft christliche Kinderfreizeiten anbietet.

Im Herbst sollen zudem junge Menschen mit migrantischer Geschichte und ehemalige Bewohnerinnen und Bewohner der Asylunterkunft eingeladen werden. Emilia Henkel hofft, dass durch die Auseinandersetzung mit dem historischen Ort spannende, die Generationen übergreifende Gespräche entstehen werden.

Ziel des Projektes ist es, herauszufinden, welchen Einfluss eigene Erfahrungen und persönliche Hintergründe auf die Interpretation und das Verständnis von geschichtlichen Quellen haben. Dafür nutzt sie verschiedene Textquellen, die die teilnehmenden Bürgerinnen und Bürger interpretieren sollen. Diese Quellen, etwa ein Protestbrief ehemaliger Bewohnerinnen und Bewohner der

Asylunterkunft und ein Lokalzeitungsartikel, werden in den historischen Kontext der Asylunterkunft eingeordnet, damit die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Projektes erfahren, zu welcher Zeit und unter welchen Umständen die Texte entstanden. Zur Interpretation der Quellen geben Henkel und ihr Team den Beteiligten einige Fragen an die Hand, die zum Nachdenken über die Inhalte anregen. In gemeinsamen Workshops soll anhand der Fragen ein Austausch entstehen.

Wer nicht an den Workshops teilnimmt, kann die Quellen, Hintergrundinfos und die bereits im Projektverlauf gesammelten Interpretationen auf einer Webseite einsehen. Dort ermöglicht die Kommentarfunktion, auch von zuhause, neue Perspektiven hinzuzufügen. »Über die Webseite möchte ich die Öffentlichkeit einladen, über den von persönlichen Erfahrungen geprägten Entstehungskontext von geschichtswissenschaftlichem Wissen nachzudenken und auch nach den Lücken zu suchen. Die Asylunterkunft bei Tambach-Dietharz eignet sich hervorragend, um etwa zu hinterfragen, was verloren geht, wenn die Geschichte von einer weißen, deutschen Studierenden geschrieben wird und nicht von einer Person mit Fluchterfahrung.« ■



FOTO: JENS MEYER

## Emotionen mit Implantat erkennen

Cochlea-Implantate können Menschen mit Hörverminderung dabei helfen, akustische Reize wahrzunehmen. Anders als Hörgeräte, die meist nur die Lautstärke von Geräuschen verstärken, regen die elektronischen Prothesen direkt den Hörnerv an. Ob sich mit den Implantaten auch »Zwischentöne« von Gesprochenem, also wie etwas gesagt wird, wahrnehmen lassen, das haben Forschende um Celina von Eiff vom Institut für Psychologie untersucht. Im Rahmen einer umfangreichen Studie haben die Forschenden festgestellt, dass die Wahrnehmung von sogenannten stimmlichen Emotionen bei Trägerinnen und Trägern von Cochlea-Implantaten deutlich vermindert ist. Über ihre Ergebnisse berichteten sie im Fachjournal »Ear and Hearing« (DOI: 10.1097/AUD.0000000000001181). sh

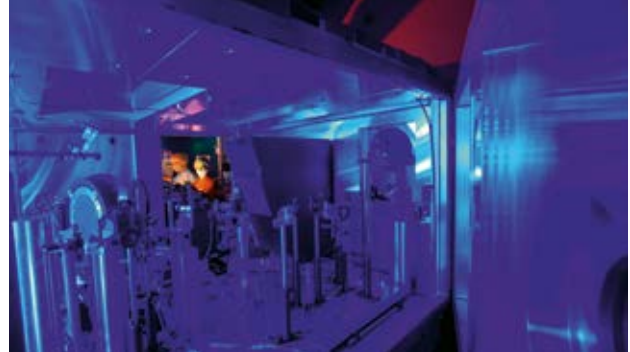


FOTO: JENS MEYER

## Energierreiche Protonenstrahlen

Für die Protonenstrahltherapie zur Tumorbehandlung werden derzeit noch große Beschleunigungsanlagen benötigt. Forschende um Prof. Dr. Malte Kaluza tüfteln daran, wie sich die Protonenstrahlen auch mit kleineren Lasersystemen, mittels der sogenannten Laser-Plasma-Wechselwirkungen, erzeugen lassen und haben verschiedene Parameter, die dabei eine Rolle spielen, analysiert. Aus den Ergebnissen, die sie im Fachmagazin »Physical Review Research« (DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.013065) veröffentlichten, konnten sie ein Set an optimalen Bedingungen ableiten, das zur maximalen Energieausbeute des Protonenstrahls führt. So lassen sich in Zukunft Lasersysteme so konfigurieren, dass damit deutlich energiereichere Protonenstrahlen erzeugt werden können als bisher. US



FOTO: HEIKO GRANDEL

## Grüner Wasserstoff auf Knopfdruck

Ein Team des Sonderforschungsbereichs/Transregio »CatalLight« hat einen Lösungsansatz für eine der größten Herausforderungen der solaren Energiewandlung präsentiert: Den Forschenden, unter ihnen auch Prof. Dr. Benjamin Dietzek-Ivanšić und Prof. Dr. Ulrich S. Schubert von der Uni Jena, ist es gelungen, ein System zu entwickeln, das die lichtgetriebene Herstellung von Wasserstoff zu jeder Tages- und Jahreszeit ermöglicht. Zukünftige Anwendungsbereiche dieser photochemischen Einheit reichen von der bedarfsgerechten Wärmeerzeugung bis zur Versorgung wasserstoffbetriebener Fahrzeuge »on demand«. Die Forschenden der Universitäten Ulm und Jena stellten ihr System, das auf einem einzigen Molekül beruht, das Sonnenlicht aufnehmen, Energie speichern und Wasserstoff herstellen kann, im Fachjournal »Nature Chemistry« vor (DOI: 10.1038/s41557-021-00850-8). Bingmann/AB



FOTO: IDIV

## Chemischer Hilferuf von Bäumen

Waldbäume senden bei Befall durch Raupen Duftstoffe aus. Damit locken sie räuberische Insekten und Vögel an und befreien sich so von ihren Plagegeistern. Was bislang nur in Labor- oder Gartenexperimenten nachgewiesen worden war, konnten Forschende des Deutschen Zentrums für integrative Biodiversitätsforschung Halle-Jena-Leipzig (iDiv), der Universitäten Jena und Leipzig, unter der Leitung von Prof. Dr. Nicole van Dam, nun erstmals in einem natürlichen Lebensraum zeigen – im 40 Meter hohen Kronendach des Leipziger Auwaldes. Die chemischen Hilferufe sind so wirksam, dass sie die Zusammensetzung der Insektengemeinschaft im Blätterdach maßgeblich bestimmen. Dieses Wissen könnte künftig für die natürliche Schädlingsbekämpfung in Land- und Forstwirtschaft genutzt werden, so die Forschenden im Fachmagazin »Ecology Letters« (DOI: 10.1111/ele.13943). Tilch



FOTO: JAN-PETER KASPER

## Das Phänomen Terrorismus

Gemeinsam mit ihrer Fachkollegin Claudia Verhoeven von der Cornell University hat die Jenaer Historikerin Prof. Dr. Carola Dietze »The Oxford Handbook of the History of Terrorism« (ISBN: 978-0199858569) herausgegeben. Darin gehen die Wissenschaftlerinnen Fragen zum Terrorismus nach und untersuchen seine gesellschaftlichen Voraussetzungen und Folgen. Terrorismus, so die Herausgeberinnen, benötige heute die Massenmedien, damit er seine Wirkung entfalten kann. Das Internet sei dafür ideal: Täter können das Medium eigenständig bedienen, sie liefern selbst die Bilder, die ihnen wichtig sind. Die Botschaft der Gewalt richtet sich dabei immer an zwei Zielgruppen: Die Gruppe, deren Sympathie erhofft wird, und die andere, die in Angst und Schrecken versetzt werden soll. sl



FOTO: JENS MEYER

## Pilzgattung geht eigenen Weg

Ein bislang unbekanntes Beispiel der »konvergenten Evolution«, der gleichartigen Anpassung unterschiedlicher Organismen an ihre Umwelt, haben Forschende vom Institut für Pharmazie der Universität Jena, des Leibniz-Instituts für Naturstoffforschung und Infektionsbiologie Jena und der Universität Freiburg i. Br. in der Pilzgattung der Schleierlinge entdeckt. Sie fanden heraus, dass die Pilze bestimmte Naturstoffe (Anthrachinone) produzieren, wie sie auch in Bakterien, Pflanzen und Schimmelpilzen vorkommen. Allerdings haben die Schleierlinge dafür einen ganz eigenen Stoffwechselweg entwickelt. Seine Ergebnisse legte das Team um den Mykologen Prof. Dr. Dirk Hoffmeister im Fachmagazin »Angewandte Chemie« (DOI: 10.1002/anie.202116142) vor. Schleierlinge sind eine der artenreichsten Gattungen der Pilze überhaupt. Etwa 2000 Arten gibt es weltweit. US



FOTO: JAN-PETER KASPER

## Renaissance des Klassenbegriffs

Soziologinnen und Soziologen der Universität Jena haben das Buch »Die Wiederkehr der Klassen. Theorien, Analysen, Kontroversen« (ISBN: 978-3-593-51359-1) herausgegeben. Darin greifen sie die These von Prof. Dr. Klaus Dörre auf, der von einer »demobilisierten Klassengesellschaft« spricht. Zwar stehe noch immer eine Klasse der Vermögenden der Klasse der Lohnabhängigen gegenüber. Doch die Lohnabhängigen sehen heute anders aus als die Arbeiterklasse, wie sie etwa bei Karl Marx beschrieben wird. Außerdem lassen sich neue Gruppen innerhalb der lohnabhängigen Klasse unterscheiden: etwa eine arrivierte Klasse von »Besserverdienenden«, die traditionelle Arbeiterklasse und eine prekär beschäftigte Unterklasse, die zwischen Jobs und Hartz IV pendelt. sl

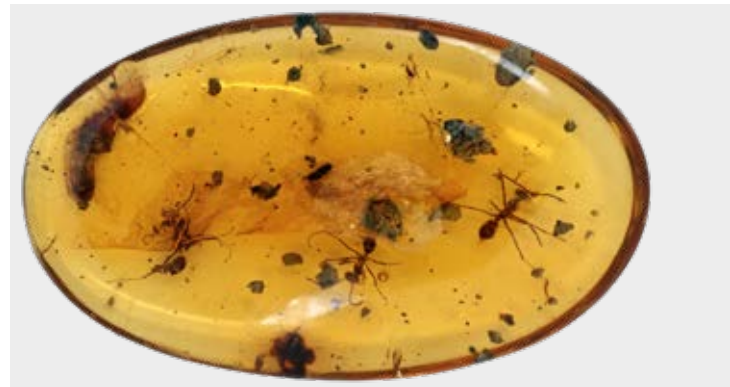


FOTO: SHÜHEI YAMAMOTO

## Arbeitsteilung der Ameisen

Ein internationales Forschungsteam unter Leitung von Biologen der Universität Jena hat in Fossilien den bislang frühesten Beweis für kooperatives Verhalten bei Ameisen entdeckt. Die Forschenden konnten anhand der Körperstrukturen von in Bernstein eingeschlossenen Ameisen der ausgestorbenen Gattung »Gerontoformica« (siehe Foto) zeigen, dass die Tiere bereits vor über 100 Millionen Jahren, also in der frühen Kreidezeit bzw. zur Zeit der Dinosaurier, einem arbeitsteiligen Sozialsystem folgten. Aufschluss über Art und Körperbau gaben den Forschenden Mikro-Computertomographie-Aufnahmen der Fossilien, darunter die erste Ameisenpuppe, die jemals in einem kreidezeitlichen Bernstein gefunden wurde. Die Ergebnisse ihrer Arbeit veröffentlichten die Forschenden im Magazin »Zoological Journey of the Linnean Society« (DOI: 10.1093/zoolinnean/zlab097). sh

# (Auf)Zeichnungen aus Haeckels Hörsaal

Mit Bleistift und Tusche hielt der russische Forschungsreisende Nikolai Miklucho-Maclay die Vorlesungen von Ernst Haeckel und Carl Gegenbaur fest, die er Mitte des 19. Jahrhunderts an der Universität Jena hörte. Biologiedidaktiker haben diese Mitschriften im Archiv der Russischen Geographischen Gesellschaft aufgespürt und nun veröffentlicht.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

»Diese Entdeckung ist eine Sensation!«, schwärmt Prof. Dr. Uwe Hoßfeld. Der Biologiedidaktiker hatte gemeinsam mit seinem Kollegen PD Dr. Georgy S. Levit die Vorlesungsmitschriften aus Lehrveranstaltungen des Anatomen Carl Gegenbaur und des Zoologen und Evolutionsforschers Ernst Haeckel 2018 entdeckt. Beide Gelehrte wirkten Mitte des 19. Jahrhunderts an der Universität Jena. Aufgespürt wurden die Schriften im Nachlass des russischen Forschungsreisenden Nikolai Miklucho-Maclay, der im Archiv der Russischen Geographischen Gesellschaft in St. Petersburg aufbewahrt wird. Gemeinsam mit weiteren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern haben Hoßfeld und Levit die beiden wertvollen Vorlesungsmitschriften jetzt publiziert.

## Nikolai Miklucho-Maclay brach mit Ernst Haeckel

»Die Mitschriften erlauben uns spannende Einblicke in die Geschichte und Visualisierung der Zoologie und der vergleichenden Anatomie jener Jahre«, sagt Uwe Hoßfeld. Tatsächlich seien die beiden Texte die bislang einzig überlieferten Mitschriften dieser Dozenten. Sie zeigen den Wissensstand und die Methoden der Wissensvermittlung in den Fachbereichen von Zoologie und vergleichender Anatomie in der Mitte des 19. Jahrhunderts, konkret aus dem Jahr 1865. Ihr Autor ist der Haeckel-Schüler Nikolai Miklucho-Maclay, der als Forschungsreisender 1870 erstmals nach Neuguinea reiste, um die



Sowohl der Dozent Ernst Haeckel als auch sein Student Nikolai Miklucho-Maclay waren ausgewiesene gute Zeichner und Ästheten. Hier die Zeichnungen eines Froschskeletts (oben) und einer Gottesanbeterin von Miklucho-Maclay, die sich in der Mitschrift einer Zoologie-Vorlesung bei Haeckel findet. · Foto: RGO St. Petersburg/Russland

dortige einheimische Bevölkerung, die Papua, zu erforschen.

Miklucho-Maclay stand in einem spannungsvollen Verhältnis zu Ernst Haeckel. Er war Student bei Haeckel, ging als Assistent und wissenschaftlicher Mitarbeiter mit ihm auf Forschungsreisen. Später kam es jedoch vermutlich zum Bruch, weil der russische Gelehrte Haeckels Ansichten zu den Menschenrassen in Frage stellte und wissenschaftlich widerlegte.

»Miklucho-Maclay kann mit gutem Recht als erster empirischer Antirassist in den Naturwissenschaften bezeichnet werden«, sagt Uwe Hoßfeld. Seine Beobachtungen und Erlebnisse bei den Papua zeigten, dass die Annahme Haeckels falsch war, es gebe verschiedene Entwicklungsstufen unter den derzeit lebenden Menschen und damit verschiedene menschliche »Arten/Rassen«.

Pikant war zudem, dass Ernst Haeckel selbst postuliert hatte, wissenschaftliche Erkenntnisse setzten voraus, die Organismen in ihrem natürlichen Lebensumfeld zu beobachten und zu untersuchen. Nikolai Miklucho-Maclay hielt sich an diese Kriterien. Der Russe weilte zudem noch mehrere Male bei den Menschen in Neuguinea.

## Die Aufzeichnungen aufzubereiten, war eine Mammutaufgabe

Die nun publizierten Vorlesungsmitschriften zeigen nicht nur den Forschungsstand der Zeit, sie weisen auch Haeckel, Gegenbaur und Miklu-

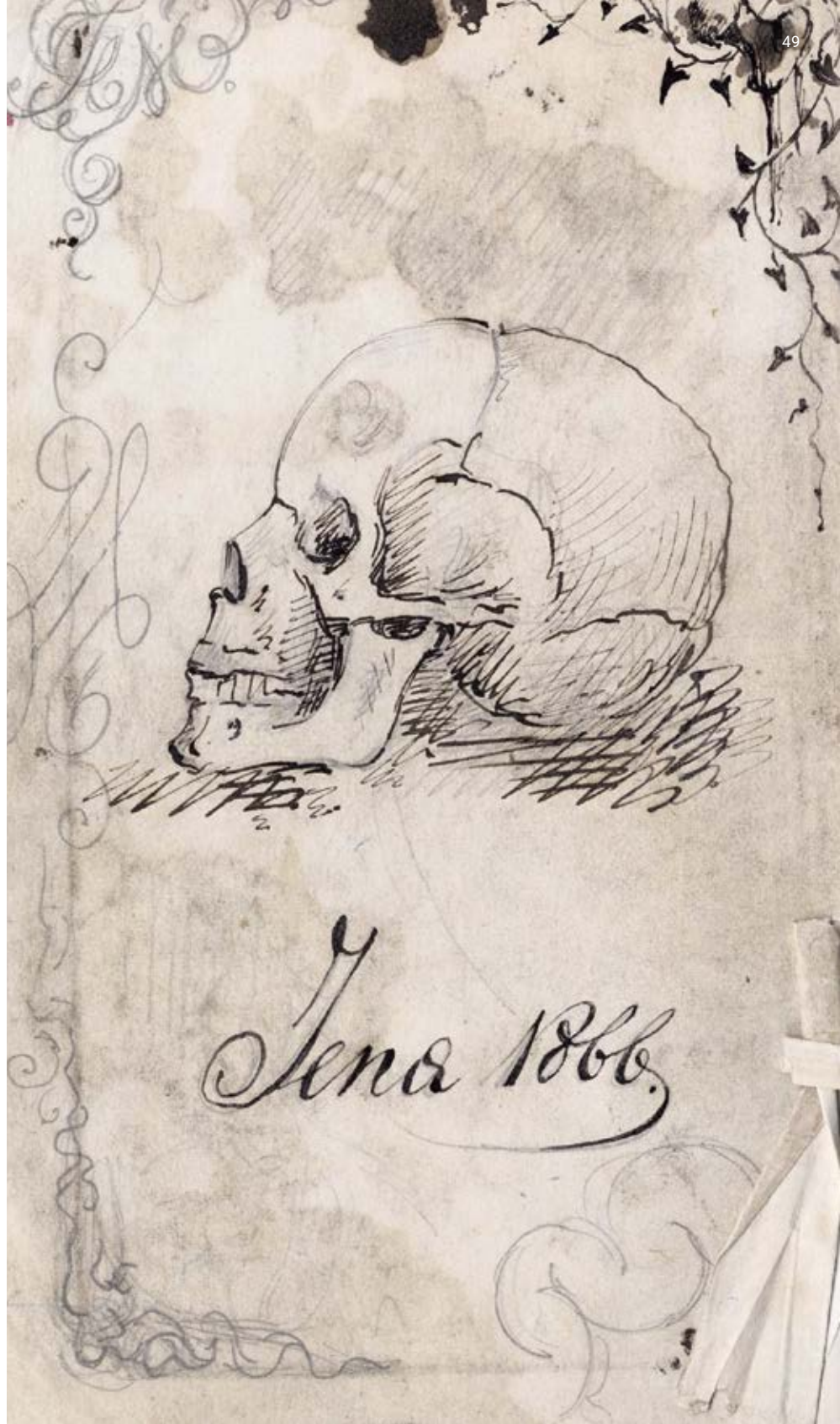


Diese Darstellung eines menschlichen Schädels fertigte Nikolai Miklucho-Maclay als Illustration zur Vorlesungsmitschrift bei Carl Gegenbaur an.  
· Foto: RGO St. Petersburg/Russland

cho-Maclay als kunstfertige Zeichner und Ästheten aus. Werden die Mitschriften doch durch zahlreiche detailgetreue Illustrationen ergänzt, die offensichtlich in den Vorlesungen gezeigt wurden. »Nikolai Miklucho-Maclay übertrug die Vorlesungen auf den Tag genau in seine Aufzeichnungen«, sagt Uwe Hoßfeld. Dabei schrieb er mal auf Deutsch, mal auf Russisch, zudem gespickt mit zahlreichen Abkürzungen. Die Texte zu transkribieren, sei deshalb eine Mammutaufgabe gewesen, die drei Jahre beanspruchte.

#### Weitere Jenaer Expertise war gefragt

Möglich wurde das nur durch die Unterstützung weiterer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler: Anatomin Dr. Rosemarie Fröber brachte ihre Kenntnis der anatomischen Fachtermini und des Kontextes ein; bei der Transkription der Zoologie-Vorlesungen haben Gerta Puchert und Achim Blankenburg mit ihrer Expertise unterstützt. ■



Original-Publikation:  
Vorlesungen über Menschliche  
Anatomie von Carl Gegenbaur,  
THK-Verlag, Arnstadt 2022,  
ISBN: 978-3-945068-56-4

#### Kontakt

apl. Prof. Dr. Uwe Hoßfeld  
Arbeitsgruppe Biologiedidaktik  
Am Steiger 3 (Bienenhaus), 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-49 491  
E-Mail: [uwe.hossfeld@uni-jena.de](mailto:uwe.hossfeld@uni-jena.de)  
<http://www.biodidaktik.uni-jena.de>



Künstlerische Darstellung einer Kilonova, die nach der Verschmelzung von Neutronensternen auftritt. · Abbildung: M. Weiss/CfA

# Kosmischer Schallknall

Was der Röntgenblick über eine Kilonova enthüllt: Ein internationales Forschungsteam hat die Folgen einer gigantischen kosmischen Explosion mit Hilfe des NASA-Röntgenobservatoriums »Chandra« untersucht. Beteiligt waren auch Jenaer Physiker. Sie lieferten detaillierte Vorhersagen und Simulationen, die eine Interpretation der Röntgendaten von Chandra erst möglich machten.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Als Kilonova bezeichnet man die gewaltige Explosion, die entsteht, wenn zwei Neutronensterne miteinander kollidieren. Die Kilonova »GW170817« im Sternbild Hydra ist das erste Objekt überhaupt, bei dem sowohl Gravitationswellen als auch elektromagnetische Strahlung gemessen werden konnten. Seinen Namen trägt das Objekt »GW170817«, weil es am 17. August 2017 entdeckt wurde: Die Laser-Interferometer LIGO (in den USA) und Virgo (in Italien) haben die Gravitationswellen registriert, die mit einem Ausbruch von Gammastrahlen zusammenfielen.

## Verschmolzene Neutronensterne strahlen Materie-Jet ab

Bisher ging man davon aus, dass nach der Verschmelzung von Neutronensternen deren Trümmer sichtbares und infrarotes Licht abstrahlen, das beim Zerfall radioaktiver Elemente entsteht. Im Fall von »GW170817« konnten tatsächlich auch sichtbares Licht und Infrarotstrahlung mehrere Stunden nach den Gravitationswellen entdeckt werden. Im Röntgenspektrum sah die Neutronensternverschmelzung jedoch ganz anders aus: Unmittelbar nach der Entdeckung von »GW170817« richtete Chandra seinen Röntgenblick auf das Objekt und registrierte – nichts. Erst mehrere Tage später konnte Chandra »GW170817« als punktförmige Röntgenstrahlungsquelle ausmachen. Diesen Umstand erklären die For-

schenden damit, dass die verschmolzenen Neutronensterne einen schmalen »Jet« aus hochenergetischen Teilchen abstrahlen, der »off-axis«, also nicht direkt auf die Erde ausgerichtet ist. Sie vermuten, dass Chandra den schmalen Jet ursprünglich von der Seite beobachtete und daher unmittelbar nach der Entdeckung der Gravitationswellen noch keine Röntgenstrahlen sah. Im Laufe der Zeit verlangsamte sich jedoch das abgestrahlte Material und der Jet-Kegel verbreiterte sich, da er auf umgebende Materie prallte. Dies führte dazu, dass sich der Kegel des Jets immer mehr in die direkte Sichtlinie von Chandra ausdehnte und so die Röntgenstrahlung gemessen werden konnte.

Seit Anfang 2018 wurde die von dem Jet verursachte Röntgenstrahlung immer schwächer, da sich der Jet weiter verlangsamte und ausdehnte. Das Team stellte jedoch fest, dass der Helligkeitsrückgang ab März 2020 bis Ende 2020 stoppte und die Strahlung in diesem Zeitraum konstant blieb.

Eine mögliche Erklärung für diese neue Röntgenstrahlungsquelle war, dass die sich ausdehnenden Trümmer der Verschmelzung einen »Schock« erzeugt haben, ähnlich dem Überschallknall eines Überschallflugzeugs. Dieser Schock erhitzt Material, das selbst Strahlung erzeugt und als Kilonova-Nachglühen bezeichnet wird. Eine alternative Erklärung wäre, dass die zusätzlichen Röntgenstrahlen von Material stammen, das in ein Schwar-

zes Loch fällt, welches sich nach der Verschmelzung der Neutronensterne gebildet haben müsste.

Um zu ermitteln, welche der beiden Erklärungen zutreffend ist, müssen die Forschenden »GW170817« weiterhin beobachten und neben den Röntgenstrahlen auch mögliche Radiowellen messen. Wenn es sich um ein Kilonova-Nachglühen handelt, wird die Radioemission voraussichtlich mit der Zeit heller werden. Handelt es sich dagegen um Materie, die auf ein neu entstandenes Schwarzes Loch fällt, dann sollte die Röntgenstrahlung konstant bleiben oder schnell abnehmen und es wird keine Radioemission auftreten.

## Einsteins Relativitätstheorie kann die Beobachtungen erklären

Hier kommen nun Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi und der ehemalige Doktorand Vsevolod Nedora von der Universität Jena ins Spiel: Sie haben die Massenausflüsse, von denen das Kilonova-Signal ausgeht, in einem großen Satz von Simulationen analysiert und berechneten das zu erwartende Kilonova-Nachleuchten. Dabei konnten sie eine Übereinstimmung mit den Chandra-Beobachtungen feststellen. Kürzlich ist bei neuen Chandra-Beobachtungen weitere Strahlung entdeckt worden, Radiowellen in Verbindung mit der aufkommenden Röntgenstrahlung bisher jedoch nicht. ■



Original-Publikation:

Evidence for X-ray Emission in Excess to the Jet Afterglow Decay 3.5 yrs After the Binary Neutron Star Merger GW 170817, The Astrophysical Journal Letters (2022); DOI:10.3847/2041-8213/ac504a

### Kontakt

Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi  
Theoretisch-Physikalisches Institut  
Fröbelstieg 1, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-47 111  
E-Mail: [sebastiano.bernuzzi@uni-jena.de](mailto:sebastiano.bernuzzi@uni-jena.de)  
[www.physik.uni-jena.de/tpi](http://www.physik.uni-jena.de/tpi)



Projektleiter Nils Boysen ist Professor für Operations Management. · Foto: Anne Günther

## Die Zukunft der letzten Meile

Statt des Postboten klingelt künftig die mobile Packstation: Wirtschaftsexperten haben in einer Studie neuartige Zustellsysteme anhand von eigens entwickelten Optimierungsalgorithmen unter die Lupe genommen. Ihr Ziel ist es, den Versand von Paketen in Städten möglichst umweltfreundlich zu gestalten.

TEXT: VIVIEN BUSSE

Kaum noch zu bewältigende Paketmengen, Lieferfahrzeuge, die in zweiter Reihe parkend die Straßen verstopfen und harte Arbeitsbedingungen für Paketboten – Meldungen wie diese häufen sich. Es ist also an der Zeit, dass sich auf der »letzten Meile«, dem Verbindungsstück vom Post-Verteilzentrum zu den privaten Haushalten, etwas ändert. Technikunternehmen wie zum Beispiel der Schweizer Hersteller Rinspeed entwickeln derzeit mobile Paketstationen, die von Algorithmen gesteuert bis fast vor die Haustür fahren. Mit der Entwicklung und Verbesserung solcher Algorithmen befassen sich Prof. Dr. Nils Boysen und sein Team vom Lehrstuhl für Operations Management. In einer aktuellen Studie haben sie neuartige Zustellsysteme verschiedener Anbieter mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen verglichen.

### Algorithmen für die Steuerung von mobilen Paketstationen

Zukünftig könnte statt des Postboten vielleicht das Smartphone mit der

Nachricht klingeln, dass eine mobile Paketstation gerade an der nächsten Straßenecke angekommen ist und das Paket dort abgeholt werden kann. Damit diese Lösung funktioniert, müssen die Paketstationen wissen, wann sie wo parken sollen. »Stationäre Paketstationen gibt es schon lange«, sagt der Leiter des Forschungsprojektes Prof. Dr. Nils Boysen. »Sie sind aber noch selten, so dass die Wege weit sind und viele ihre Pakete lieber mit dem Auto als zu Fuß dort abholen. Damit ist wenig gewonnen.« Dr. Stefan Schwerdfeger, verantwortlich für die Algorithmenentwicklung im Projekt, ergänzt: »Mobile Paketstationen kommen viel näher zum Kunden und halten an der nächsten Straßenecke. Dort können alle Nachbarn dann zu Fuß ihr Paket abholen. Das schont nicht nur die Umwelt, sondern spart den Paketlogistikern auch Zeit und Geld, besonders wenn die Paketstationen zukünftig auch autonom fahren können.«

Unterstützt durch Informationen von Kooperationspartner Rinspeed haben die Forschenden der Universität Optimierungsalgorithmen entwickelt, die den mobilen Paketstationen sagen, wo



Prototyp einer mobilen Paketstation des Herstellers Rinspeed.  
Foto: Rinspeed AG

sie wie lange halten sollen. »Das klingt einfach, aber dabei müssen zahlreiche Rahmenbedingungen eingehalten werden«, so Prof. Boysen. Die Kunden müssen zunächst einmal bekanntgeben, wann sie zu Hause sind oder ob sie ihr Paket lieber an einem anderen Ort, etwa in der Nähe der Arbeitsstelle, abholen möchten. Zudem müssen die Kunden genug Zeit zur Abholung haben, bevor die Paketstation weiterfährt. Schließlich könne eine Station nicht irgendwo abgestellt werden; die Sicherheit müsse gewährleistet sein, so Boysen. Unter diesen und weiteren Rahmenbedingungen bestimmen die Forscher die Wege der mobilen Paketstationen durch die Stadt. »Unser Ziel ist es, eine gegebene Paketmenge

zu möglichst geringen Kosten und mit möglichst wenig Umweltbelastung auszuliefern«, so Stefan Schwerdfeger.

#### Vergleich unterschiedlicher Konzepte für mobile Paketstationen

Mit Hilfe der Algorithmen können die Forscher unterschiedliche Konzepte verschiedener Anbieter von mobilen Paketstationen miteinander vergleichen. Stefan Schwerdfeger erläutert dies wie folgt: »Rinspeed etwa will nicht die ganze Paketstation mitsamt Fahrzeug an der Straßenecke parken lassen, sondern die mobile Paketstation dort vollautomatisch abladen und später wieder abholen. Das Fahrzeug

kann dann weiterfahren und in der Zwischenzeit weitere Paketstationen ausliefern.« Nils Boysen ergänzt: »Unsere Algorithmen sagen uns dann, ob so ein Konzept vorteilhaft ist. In diesem Fall haben wir herausgefunden, dass das Abladen der Stationen vor allem dann erheblich die Kosten senkt, wenn man den Kunden mehr Zeit für die Abholung geben will. Manchmal kann man ja nicht immer gleich alles stehen und liegen lassen, um zur Paketstation zu rennen.« Die Forscher wollen auch zukünftig mit ihren Algorithmen die Belieferung auf der letzten Meile verbessern und dazu beitragen, die Menschen in den Städten möglichst umweltschonend mit ihren Paketen zu versorgen. ■

Original-Publikation:

Who moves the locker? A benchmark study of alternative mobile parcel locker concepts (2022) DOI: 10.2139/ssrn.4063099

#### Kontakt

Prof. Dr. Nils Boysen  
Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät  
Carl-Zeiß-Straße 3, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-43 100  
E-Mail: nils.boysen@uni-jena.de  
www.om.uni-jena.de





## Gemeinschaftsgefühl verbessert Akzeptanz

Psychologinnen und Psychologen haben im Rahmen eines internationalen Forschungsnetzwerks die Akzeptanz von Corona-Maßnahmen weltweit untersucht. Sie fanden dabei heraus, dass sich eine hohe nationale Identifikation positiv auf die Bereitschaft auswirkt, einschränkende Regeln zu akzeptieren. Offenbar motiviert ein starkes Zusammengehörigkeitsgefühl mit den eigenen Landsleuten Menschen dazu, sich für die öffentliche Gesundheit zu engagieren. Für die Studie wurden mehr als 50 000 Personen in 67 Staaten befragt.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

Nahezu jedes Land auf der Welt war von der COVID-19-Pandemie betroffen. Dementsprechend haben Regierungen weltweit weitreichende Maßnahmen veranlasst, die tiefgreifende kollektive Verhaltensänderungen der Bürgerinnen und Bürger erforderten und teilweise immer noch erfordern. Vor allem im ersten Jahr der Pandemie, als Impfstoffe noch nicht zur Verfügung standen, war es von besonderer großer Bedeutung, dass Menschen den Anweisungen folgten und beispielsweise physische Kontakte einschränkten, auf Reisen verzichteten sowie Masken trugen.

Ein Netzwerk aus mehr als 250 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaft-

lern – unter ihnen Psychologen und Psychologinnen der Universität Jena – ging bereits zu Beginn der Pandemie der Frage nach, was die Akzeptanz solcher Maßnahmen besonders fördert. Ihr Ergebnis: Die nationale Identifikation motiviert Menschen besonders, sich stärker für die öffentliche Gesundheit zu engagieren. Wer ein stärkeres Zusammengehörigkeitsgefühl besitzt, unterstützt die gesundheitspolitischen Vorgaben stärker. Über ihre Forschungsergebnisse berichteten die Forschenden im Wissenschaftsmagazin »Nature Communications«.

»Eine nationale Identität ist der stärkste Prädiktor, also eine Vorhersagevariable, für die Unterstützung gesund-

heitspolitischer Maßnahmen während der Pandemie«, sagt Flavio Azevedo. »Personen, die sich stärker mit ihrer Nation identifizieren, sind am meisten bereit, die hohen Belastungen in Kauf zu nehmen, die sich aus schützenden Verhaltensweisen und der Unterstützung der öffentlichen Gesundheitspolitik ergeben.« Wichtig dabei: Der Wert der nationalen Identität gibt den Grad der Identifikation mit der eigenen Nation wieder, der anhand eines Fragenkatalogs erhoben wurde, etwa durch die Selbsteinschätzung der Befragten in einer vorgegebenen Skala. Er ist nicht gleichzusetzen mit Nationalismus. Diese Erkenntnisse gehen aus einer einzigartigen Studie hervor. Um zu er-

**Bild links: Im Laufe von zwei Jahren Pandemie galt für viele öffentliche Bereiche: Zutritt nur nach negativem Corona-Test. · Foto: Jens Meyer**  
**Bild rechts: Kommunikationswissenschaftler Flavio Azevedo hat den Jenaer Teil der internationalen Studie geleitet. · Foto: Jens Meyer**



forschen, wie Menschen weltweit mit der Ausnahmesituation einer Pandemie und den entsprechenden Schutzmaßnahmen in den jeweiligen Staaten umgehen, rief eine Gruppe von Psychologinnen und Psychologen um den US-Amerikaner Jay van Bavel während der ersten Welle der Pandemie über Twitter Kolleginnen und Kollegen auf, Daten in den jeweiligen Ländern zusammenzutragen. Daraufhin beteiligten sich mehr als 250 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Sie befragten im April und Mai 2020 rund 50000 Personen in 67 Staaten darüber, wie stark sie die Einschränkungen physischer Kontakte und Hygienevorgaben befolgten sowie die politischen Maßnahmen unterstützten. Ihre Ergebnisse verifizierten die Forschenden durch eine weitere Studie. Hierfür verglichen sie Daten zur nationalen Identifikation aus dem World Values Survey – einer regelmäßigen internationalen Umfrage zu menschl-

chen Werten – aus einem Zeitraum vor der Pandemie mit von Google erhobenen Mobilitätsdaten aus dem Frühjahr 2020. Die Untersuchung bestätigte das Ergebnis der ersten Studie: In Ländern mit einer durchschnittlich höheren nationalen Identifikation schränkten die Bürgerinnen und Bürger während der Monate April und Mai 2020 ihre Mobilität stärker ein.

#### **Durch Gemeinschaftsgefühl Gefahrensituation bewältigen**

»Wir wissen, dass bereits vor 100 Jahren drei psychologische Faktoren die Ausbreitung der Spanischen Grippe unterstützt haben: eine falsche Risikobewertung, Widerstand gegen soziale Isolation und die Unfähigkeit, Präventivmaßnahmen gegen eine unsichtbare Bedrohung einzuhalten«, sagt Flavio Azevedo. »Deshalb ist es für uns Verhaltenswissenschaftlerin-

nen und -wissenschaftler besonders wichtig, eine solche Ausnahmesituation intensiv zu beobachten, in der Menschen kollektiv dazu aufgerufen sind, ihre Gewohnheiten zu ändern«, erklärt der Psychologe. »Sie liefert grundlegende Einblicke in die Verhaltensweisen sowie in die Entscheidungsfindung der Menschen und kann so dabei helfen, die Schutzmaßnahmen vor und während einer Pandemie zu gestalten.« Aus den aktuellen Forschungsergebnissen lässt sich beispielsweise ablesen, wie wichtig die Förderung eines Gemeinschafts- und Zusammengehörigkeitsgefühls für die Bewältigung einer solchen globalen Gefahrensituation ist. Die gesammelten Daten wird das Netzwerk weiterhin auswerten und weitere Forschungsergebnisse vorlegen.

Weitere Informationen sind zu finden unter: <https://icsmp-covid19.netlify.app/index.html>. ■

Original-Publikation:  
National identity predicts public health support during a global pandemic, Nature Communications, 2022,  
DOI: 10.1038/s41467-021-27668-9

**Kontakt**  
Flavio Azevedo  
Institut für Kommunikationswissenschaft  
Ernst-Abbe-Platz 8, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-44 950  
E-Mail: [carolin.junold@uni-jena.de](mailto:carolin.junold@uni-jena.de)  
[www.ifkw.uni-jena.de](http://www.ifkw.uni-jena.de)



# Lehrbuchwissen korrigiert

In zahlreichen Lehrbüchern steht seit rund 200 Jahren, dass das Magnetfeld außerhalb einer langen Spule gleich null sei. Diese Behauptung wurde durch den Studenten Jonathan Bollig im Sommersemester 2020 während einer Vorlesung von Prof. Dr. Gerhard G. Paulus hinterfragt. Ein durchgeführtes Experiment gab ihm Recht: Diese Aussage ist falsch. Im Interview erklären die Physiker, was es damit konkret auf sich hat.

INTERVIEW: MARCO KÖRNER

## Den Stein ins Rollen brachte eine Frage: Herr Bollig, was genau wollten Sie wissen?

Bollig: In einer Online-Physik-Vorlesung im Sommersemester 2020 ging es um die lange Spule, durch die ein elektrischer Strom fließt. Prof. Paulus stellt die Frage, wie sich das Magnetfeld außerhalb der Spule verhält. Dabei gab es verschiedene Antwortmöglichkeiten. Intuitiv habe ich gesagt, dass das Magnetfeld linear mit dem Abstand abnimmt. Dann hieß es aber, dass es außerhalb der Spule gar kein Magnetfeld gäbe, jedenfalls nicht längs zur Spulenachse. Darüber musste ich nachdenken und kam zu dem Schluss, dass es dennoch ein Magnetfeld geben müsste,

nämlich entlang der Wicklung. Also so, als wäre die Spule einfach ein Draht. Darauf habe ich Herrn Paulus dann angesprochen.

Paulus: Es gibt für das Ampèresche Gesetz nur zwei Möglichkeiten, die leicht ausrechenbar sind. Das eine ist der unendlich lange Draht und das andere ist die unendlich lange Spule. Und für die unendlich lange Spule kommt heraus: Außerhalb der langen Spule ist das Magnetfeld gleich null. So steht es in allen Lehrbüchern und so habe ich es auch immer gelehrt; seit mehr als zehn Jahren. So habe ich es auch im Studium gelernt. Und dann kommt Herr Bollig eines Abends ins Tutorium und

sagt: »Der Strom muss doch eine kleine Komponente haben, die in Richtung der Spulenachse fließt!« Das hatte mich zunächst sehr überrascht und dann hat es mich ziemlich gewurmt, dass ich das 30 Jahre lang nicht bemerkt habe. Ich habe zwar sofort erkannt, wie das Magnetfeld außerhalb der Spule aussehen muss, aber trotzdem habe ich mich am nächsten Wochenende hingesetzt, eine Spule gewickelt und das Magnetfeld auf meiner Terrasse nachgemessen. Herr Bollig hatte Recht!

## Woher kommt denn die Annahme, dass das Magnetfeld außerhalb der Spule null wäre?

Paulus: Das ist keine Annahme, sondern eine Folge der fundamentalen Tatsache, dass Magnetfeldlinien geschlossen sind. Und dieses Faktum kommt wiederum von der wohlbekannteren Tatsache, dass magnetische Nord- und Südpole nur paarweise vorkommen.

Abgesehen von der Feinheit, die wir in unserem Artikel diskutieren, verlaufen die Magnetfeldlinien in einer Spule parallel zur Spulenachse. Je dichter die Magnetfeldlinien in der Spule, desto stärker das Magnetfeld. Wenn die Feldlinien an den Spulenden austreten, müssen sie außerhalb der Spule den Rückweg zum anderen Spulende antreten – sonst wären die Feldlinien ja nicht geschlossen. Jetzt können Sie sich vorstellen, was passiert, wenn man die Spule länger und länger macht: Die Dichte der Magnetfeldlinien und damit die Stärke des Magnetfeldes außerhalb der Spule nimmt immer weiter ab.

## Nun war die Spule, die Sie auf der Terrasse gebaut haben, aber nicht unendlich lang!

Paulus: Sie ist schon einen halben Meter lang. Und ihr Durchmesser beträgt zwei Zentimeter. Im Vergleich zum

## Das Ampèresche Gesetz auf dem Prüfstand

Fließt durch einen elektrischen Leiter ein Strom, so wird um diesen Leiter ein Magnetfeld induziert, dessen Feldlinien kreisförmig um den Leiter herum verlaufen. Die Stärke des Magnetfeldes wird durch die Stärke des elektrischen Stroms bestimmt. Das beschreibt das Ampèresche Gesetz. André-Marie Ampère hat es 1822 formuliert. Er stellte auch fest, dass das durch einen Draht erzeugte Magnetfeld proportional mit der Entfernung zum Draht abnimmt.

Bei dem Gedankenexperiment einer extrem langen – oder gar unendlich langen – Spulenhälfte bislang an, dass das Magnetfeld nur im Inneren der Spule vorhanden und dort parallel entlang der Spulenachse ausgerichtet ist. Außerhalb der gedachten unendlich langen Spule sei das Magnetfeld gleich Null. Und so steht es seit rund 200 Jahren in den Physik-Lehrbüchern.

Doch diese Annahme ist falsch, wie der Physiker Gerhard G. Paulus und Physik-Student Jonathan Bollig in der Fachzeitschrift »Physik in unserer Zeit« schreiben. Das Magnetfeld im Außenraum einer langen Spule, so die Autoren, gleicht dem eines Drahtes, der von einem gleich starken Strom durchflossen wird. Der gedachte Draht verläuft parallel zur Spulenachse. Zwar verschwinden außerhalb einer unendlich langen Spule die Magnetfeldkomponenten in dieser Richtung und radial nach außen, aber nicht die zur Spulenwicklung tangentielle Komponente.

Dies haben die Jenaer Physik-Experten in einem einfachen selbstgebauten Experiment demonstriert: Sie haben dazu eine zwar nicht unendlich lange, doch mit 166 Windungen und 50 Zentimetern Gesamtlänge beachtlich lange Spule aus handelsüblichem Installationsdraht gewickelt und einen Strom angelegt. Auf einem unter der Spule angebrachten höhenverstellbaren Aufbau aus Lego-Bausteinen haben sie eine Kompassnadel platziert und konnten damit das Magnetfeld außerhalb der Spule in Abhängigkeit vom Abstand zu ihr messen. Mit dieser Anordnung kann man zudem die lokale Stärke des Erdmagnetfeldes bestimmen.



Durchmesser ist sie also – fast – unendlich lang.

Bollig: Das Set-up ist ganz einfach: Es muss ein isolierter Draht sein, damit es keinen Kurzschluss gibt. Der wird um ein Rohr gewickelt und dann ein elektrischer Strom durchgeleitet.

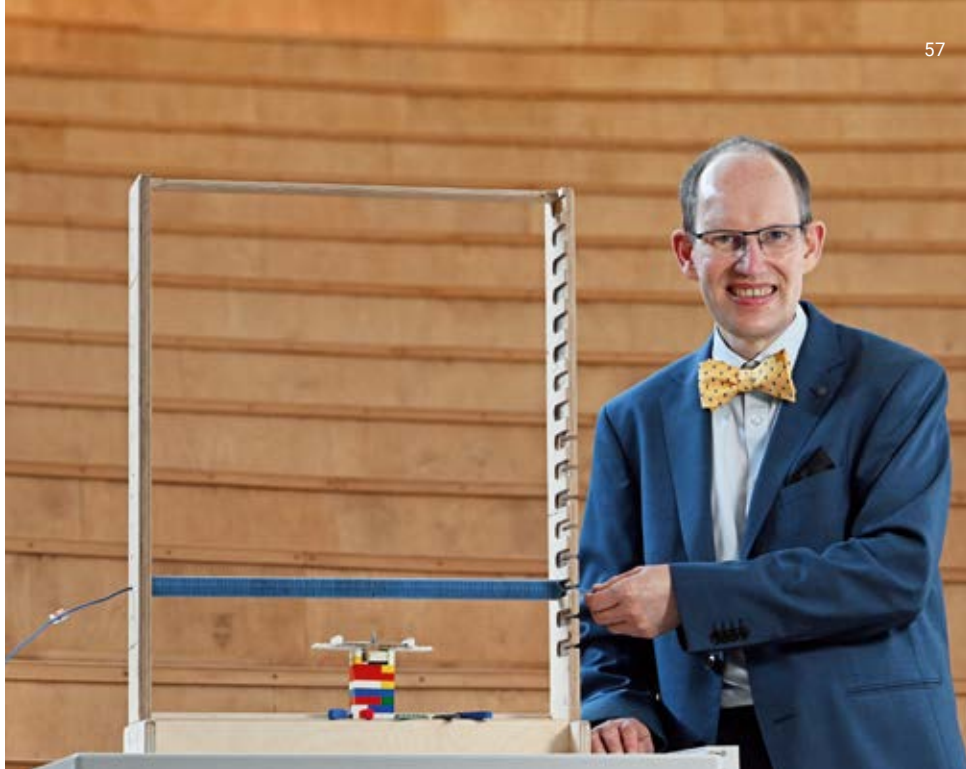
Paulus: Um das Magnetfeld quantitativ zu messen, haben wir ein Gestell für eine Magnetnadel gebaut, mit dem wir das Magnetfeld in verschiedenen Abständen von der Spule bestimmen konnten. Das Gestell wird so ausgerichtet, dass die Achse der Spule nach Norden zeigt. Wenn der Strom ausgeschaltet ist, richtet sich die Magnetnadel parallel zur Spulenchse aus – also einfach nach dem Erdmagnetfeld. Wenn ich nun den Strom einschalte und so reguliere, dass die Magnetnadel in einem 45-Grad-Winkel steht – also nach Nordwesten oder Nordosten – dann ist das Magnetfeld im Außenraum der Spule genauso groß wie das Magnetfeld der Erde. Wenn ich den Abstand der Magnetnadel zur Spule vergrößere, muss ich entsprechend den Stromfluss erhöhen, um dieselbe Auslenkung der Magnetnadel zu erreichen.

#### **Zeigen Sie Ihr Experiment eigentlich auch in Ihrer Vorlesung?**

Paulus: Das habe ich bisher aus Zeitgründen nicht gemacht. Es ist ja eine Feinheit und könnte eher zu Verwirrung führen, wenn man sich nicht hinreichend Zeit nimmt. Aber vielleicht eignet es sich als Übungsaufgabe.

#### **Das heißt, alle, die gemäß der Lehrbücher antworten, lägen dann falsch?**

Paulus: Aus Fehlern können wir ja lernen! Und die Übungen werden nicht benotet.



Prof. Dr. Gerhard G. Paulus präsentiert den Versuchsaufbau »Marke Eigenbau«, mit dem er und Physik-Student Jonathan Bollig einen wissenschaftlichen Irrtum aufgedeckt haben. · Foto: Jens Meyer

**Sie schreiben in der Publikation, dass Sie sicher nicht die ersten sind, denen dieser Sachverhalt aufgefallen ist. Aber Sie staunen darüber, wie lange sich so ein Irrtum in den Fachbüchern hält. Abgesehen von dieser Publikation; haben Sie Ideen, wie die Fachbücher korrigiert werden könnten?**

Paulus (lacht): Der erste Schritt wäre ja, dass ich der Sache selber in meiner Vorlesung Raum gebe ...

**Was genau ist eigentlich mit »Lehrbüchern« gemeint? Heißt das, dass das Ampèresche Gesetz Schulstoff ist?**

Paulus: Schulstoff in Teilaspekten. In meiner 40 Jahre alten Formelsammlung aus der Schule steht die Formel zu der Frage, wie groß das Magnetfeld im Inneren einer langen Spule ist. Ich glaube aber, die Herleitung wird in der Schule nicht gemacht.

**In Ihrer Publikation schreiben Sie, dass der dänische Physiker Hans Christian Oersted bereits 1820 – zwei Jahre vor Ampère – beobachtete, dass ein elektrischer Strom in einem Draht eine Magnetnadel ablenken kann; der Italiener Gian Domenico Romagnosi publizierte das sogar noch 18 Jahre früher.**

Paulus: Romagnosi war Jurist und hat seine Beobachtung, soweit ich weiß, in einer Tageszeitung veröffentlicht, was natürlich kein besonderes Aufsehen erregte. Wahrscheinlich war ihm die Bedeutung dieser Entdeckung nicht klar. Oersted dagegen war sofort »elektrisiert« und ließ sie sofort auf eigene Kosten drucken und das Manuskript an alle Akademien in Europa schicken. So wurde er hochberühmt. Zeitweise wurde sogar die Einheit des Magnetfeldes nach ihm benannt – die ultimative Ehre für einen Physiker. ■

Original-Publikation:

Das Magnetfeld einer langen Spule, Physik in unserer Zeit 1/2022 (53), DOI: 10.1002/piuz.202101627

#### **Kontakt**

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

Telefon: +49 36 41 9-47 200  
E-Mail: gerhard.paulus@uni-jena.de  
www.physik.uni-jena.de/ioq



# Osteuropas Gewalterfahrung

Das »Imre Kertész Kolleg« der Universität Jena legt den vierten und letzten Band seiner Handbuch-Reihe der Geschichte des östlichen Europas im 20. Jahrhundert vor.

TEXT: STEPHAN LAUDIEN

Das »Imre Kertész Kolleg« hat mit dem jüngst herausgegebenen Band »Violence« das vierbändige Handbuch der Geschichte des östlichen Europas im 20. Jahrhundert abgeschlossen. Der Band untersucht zum einen die Gewalt, die durch kriegshungrige Mächte und totalitäre Regime im 20. Jahrhundert auf die Gesellschaften des östlichen Europas ausgeübt wurde. Zum anderen nimmt es die Gewalt in den Blick, die durch Konflikte zwischen ethnischen, sozialen und nationalen Gruppen entstanden ist, und die Interaktion beider Phänomene. »Angesichts des Krieges in der Ukraine ist es eine Ironie der Geschichte, dass der abschließende Band der Reihe ausgerechnet die Gewaltgeschichte des östlichen Europas zum Inhalt hat«, sagt Prof. Dr. Joachim von Puttkamer, der Direktor des »Imre Kertész Kollegs«.

Untersucht wurden die Gewalterfahrungen durch die Kriege auf dem Balkan, die 1912 begannen und erst mit den Jugoslawienkriegen 1992 bis 1995 endeten, sowie die Geschichte der beiden Weltkriege, die insbesondere im östlichen Europa tobten.

Ein weiterer Aspekt des neuen Bandes sei es, danach zu fragen, wie diese Gewalterfahrungen nach 1945 weiterwirkten, sagt von Puttkamer. Vereinfacht gesagt, lasse sich eine allmähliche Veränderung der Gewalterfahrung konstatieren: von brutaler Gewalt hin zu subtileren Methoden, die dennoch

das Selbsterstörungspotenzial von Gewalt aufzeigen. Das Kapitel über Polen und Rumänien geriet zudem zum Vermächtnis von Włodzimierz Borodziej. Der zweite Direktor des Kollegs verstarb 2021.

## Buchreihe bündelt Forschungsarbeit aus zwölf Jahren

»The Routledge History Handbook of Central and Eastern Europe in the Twentieth Century« krönt die Arbeit des Kollegs, das seit zwölf Jahren besteht. Die vier Bände nehmen den gesamten Staatengürtel zwischen Deutschland und Russland in den Blick, vom Baltikum bis Bulgarien. Dabei werden größere Länder wie Polen, die ehemalige Tschechoslowakei, Rumänien und das einstige Jugoslawien etwas ausführlicher behandelt.

Der Band »Challenges of Modernity« untersucht den tiefen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Wandel hin von den Agrargesellschaften an der europäischen Peripherie über die staatssozialistische Industrialisierung zu den Transformationsgesellschaften der Gegenwart. Der Band »Statehood« fragt nach den imperialen und nationalstaatlichen, demokratischen und diktatorischen Traditionen in einem Jahrhundert, in dem staatliche Institutionen auch hier weit in den Lebensalltag der Menschen vorgedrungen



gen sind. Im Band »Intellectual Horizons« stehen Geschichtsbilder und Identitäten, Literatur und Kultur im Mittelpunkt.

Die Beiträge betrachten in länderübergreifender und vergleichender Weise Schlüssellinien der Entwicklung, was zu einem tiefgreifenden Verständnis der Region führt. Die Handbücher bieten einen umfassenden Überblick über die Geschichte einer Region, die von der Beherrschung durch Imperien vor dem ersten Weltkrieg, über den langen Schatten deutscher Besatzung im Zweiten Weltkrieg und anschließend die Erfahrungen des Staatssozialismus, bis hin zur Transformation und in weiten Teilen zur Mitgliedschaft in der Europäischen Union im späten 20. Jahrhundert geht.

Geschrieben von einer ganzen Reihe renommierter, internationaler Autorinnen und Autoren, viele selbst aus der Region kommend, werden die Handbücher das Standardwerk für Geschichte Mittel-, Ost- und Südosteuropas im 20. Jahrhundert sein. Auch nach Abschluss des Projekts wird die Arbeit des Kollegs fortgeführt, versichert Prof. von Puttkamer. Gerade angesichts des Krieges in der Ukraine werde die Osteuropa-Expertise dringend gebraucht. Dabei kann das Kolleg auf sein stabiles Netzwerk von internationalen Expertinnen und Experten bauen – allein knapp 170 Forschende arbeiteten als Fellows am Kolleg. ■

Original-Publikation:

The Routledge History Handbook of Central and Eastern Europe in the Twentieth Century, Vol. 1-4, Taylor & Francis Group, London/New York 2022

## Kontakt

Prof. Dr. Joachim von Puttkamer  
Historisches Institut  
Am Planetarium 7, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-44 070  
E-Mail: joachim.puttkamer@uni-jena.de  
www.imre-kertesz-kolleg.uni-jena.de



# Wie geht es weiter nach der Pandemie?

Obwohl die Corona-Pandemie noch immer nicht vorbei ist, wurden Anfang April Maßnahmen zum Infektionsschutz an Universitäten und Schulen weitgehend aufgehoben. Aus Sicht der Lernenden zu recht, findet Prof. Dr. Alexander Gröschner. Der Professor für Schulpädagogik und Unterrichtsforschung zeigt auf, wie die sozialen Beziehungen und Interaktionen unter dem (bloßen) digitalen Austausch leiden. Denn Lernen sei nicht nur ein individueller, sondern auch ein zutiefst sozialer Prozess.

KOMMENTAR: ALEXANDER GRÖSCHNER

## Zwischen »Digitalisierungseuphorie« und »Distanzlernmüdigkeit«

Distanzlernen, so zeigt eine unserer Studien, führt besonders im schulischen Kontext zu einer Zunahme emotionaler Ängste (z. B. verursacht durch die verminderte Unterstützung durch Lehrpersonen) sowie eine Verschärfung des sozialen Ungleichgewichts (z. B. durch fehlende technische Ausstattung). Damit verstärkt sich ein Zustand, den das deutsche Bildungssystem seit etlichen Jahren prägt. Aktuelle Studien im Universitätskontext kommen zu einem ähnlichen Ergebnis: Auch hier hat die digitale Lehre zu einer Zunahme des Stresserlebens geführt und es zeigen sich signifikante Zusammenhänge zwischen den wahrgenommenen Studienbedingungen und depressiven Symptomen von Studierenden.

Lernen ist per definitionem ein aktiver, konstruktiver und individueller Prozess. Umso überraschter waren Lehrende in der Corona-Pandemie, wenn Studierende, die im Vergleich zu Schülerinnen und Schülern über vermeintlich mehr Eigenverantwortung, Selbstregulation und intrinsische Motivation verfügen (sollten), mit dem neuen Lehralltag und den Freiheiten des virtuellen Lernens vom Schreibtisch in zunehmendem Maße nichts mehr anfangen können und wollen.

Zugleich haben die Umstände des Distanzlernangebots einen Digitalisierungsschub im sonst innovations-trüben Schulbetrieb des föderalen Bildungswesens möglich gemacht, wie ihn viele nicht erwartet hätten. Das

zeigen eindrucksvoll u. a. die Preisträger-schulen des renommierten »Deutschen Schulpreis Spezial 2021«, die mit klugen Ideen und eindrucksvollen Maßnahmen lernförderliche Bildungsangebote für Schülerinnen und Schüler aller Altersstufen und Schulformen unterbreitet haben.

Auch in der Hochschullehre haben neue Technologien, z. B. der Einsatz von Augmented und Virtual Realities in unseren Lehr-Lern-Laboren, neue Wege des Wissenserwerbs eröffnet. Der virtuelle Austausch, z. B. mit den Studierenden in den Begleitveranstaltungen des Praxissemesters im Lehramtsstudium, hat innovative Formate des kollaborativen Lernens über die Distanz möglich gemacht.

Die aktuellen Lockerungen dürfen nicht den Umstand übersehen, dass die Corona-Schutzmaßnahmen insgesamt wichtig sind und eine umsichtige Handhabung noch für eine ganze Weile bedeutsam bleibt. Für den Schul- wie Universitätsbetrieb zeigt sich allerdings mittlerweile deutlich, dass Lernen eben nicht nur ein individueller, sondern auch ein zutiefst sozialer Prozess ist. Nicht nur eine gute technologische Ausstattung zählt für den gelungenen Austausch, sondern es braucht neben dem virtuellen Raum auch den physischen Raum für Austausch und Dialog in Präsenz sowie den sozialen Kontakt vor und nach einer Lehrveranstaltung.

## Was bleibt? Der Wunsch nach Binnendifferenzierung und lernförderlichen Interaktionen



Erziehungswissenschaftler Prof. Dr. Alexander Gröschner. · Foto: Jens Meyer

Wenn für alle Schülerinnen, Schüler und Studierenden die bestmöglichen Bildungschancen gegeben sein sollen, dann benötigen wir einen zunehmend differenzierten Blick auf die Gestaltung des Lehr- und Unterrichtsalltags. Im »Rucksack« bieten uns die neuen Technologien Möglichkeiten, u. a. das individuelle Lerntempo von Studierenden zu berücksichtigen, Unterstützungsformate, Feedbacksysteme und formative Leistungsrückmeldungen anzubieten.

In Zukunft sollte Lehren und Lernen deshalb ein differenzierteres Angebot aus synchronen und asynchronen Lerngelegenheiten, in Präsenz und virtuell, umfassen. Entscheidend ist dafür, dass Lehrende ihr Lehrangebot zielklar planen und dabei individuelle Voraussetzungen der Studierenden mit im Blick behalten. Viel zu oft betrachten wir Lernende noch als eine »homogene« Gruppe, mit gleichen Stärken und Schwächen.

Als Perspektive bleibt ein Wunsch, wie lernförderliche Interaktionen im universitären Alltag ihren Anfang nehmen sollten. So schrieb Jürgen Habermas in einem 1986 in der Zeitschrift für Pädagogik erschienenen Aufsatz über universitäre Lernprozesse: »Die Türen stehen offen, in jedem Augenblick kann ein neues Gesicht auftauchen, ein neuer Gedanke unerwartet eintreten.« Dieser kreative Anfang des Lehr-Lern-Prozesses möge zurückkehren, wenn zugleich Vieles vom Neuen bleiben darf. ■



## Umfangreiches Pflanzenarchiv

Kurator Dr. Jörn Hentschel sortiert Herbarbelege im Depot des Herbarium Haussknecht der Universität Jena. Mit mehr als drei Millionen Belegen getrockneter Pflanzen, der rund 170 000 bibliographischen Einheiten umfassenden Bibliothek und dem umfangreichen Archiv gehört das Herbarium Haussknecht zu den 20 größten Herbarien weltweit.

# Der Meister der Syntax

Vor 100 Jahren starb Berthold Delbrück. Der Sprachwissenschaftler gilt hierzulande als bedeutender Indogermanist, der mehr als 40 Jahre lang an der Universität Jena forschte und lehrte. Darüber hinaus verließ sich die Universität vier Mal auf sein organisatorisches Talent als Rektor – unter anderem auch im wichtigen Jubiläumsjahr 1908.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

In seiner letzten Amtszeit als »Prorektor«, was dem heutigen Rektor bzw. Präsident entspricht, setzte Berthold Delbrück eine wichtige Neuerung durch, von der sowohl alte als auch junge Wissenschaftler profitierten: Er ermöglichte Jenaer Professoren, sich mit 70 Jahren in den Ruhestand verabschieden zu können und sich nicht bis ins hohe Alter verschleifen zu müssen. »Das gab wohl vielen die Möglichkeit, bei geistiger Frische von der Stätte der Wirksamkeit abzutreten und bei Kollegen und Hörern ein Gefühl des Bedauerns zu hinterlassen, daß der Schritt eigentlich zu früh erfolge. Denn der Professor, der über gesunde Organe verfügt, altert bei seinem steten Verkehr mit der Jugend und infolge eines Berufs, den er über alles zu lieben pflegt, meist nicht so schnell wie andre Menschen«, schreibt Delbrücks Biograf Eduard Hermann zu dieser Maßnahme, die auch eine Verjüngung des Lehrpersonals bedeutete.

Das Gefühl des Bedauerns dürfte sowohl unter Schülern als auch unter Kollegen sehr groß gewesen sein, als Delbrück selbst fünf Jahre später den Ruhestand antrat. Denn der Sprachforscher hatte als »Meister der Syntax« (Hermann), also der Satzlehre, nicht nur seine noch junge Wissenschaft, die Indogermanistik, bereichert, sondern auch die Universität Jena als Institution.

Geboren 1842 in Putbus auf Rügen als Sohn eines Juristen gelangte Berthold Delbrück nach dem Tod des Vaters 1852 nach Halle/Saale. Dort nahm er 1859 ein Studium der vergleichenden Sprachwissenschaften auf, das er 1861 in Berlin fortführte und ein Jahr später in Halle beendete. Nach dem anschließenden Staatsexamen, einer Tätigkeit

als Lehrer sowie einem Forschungsaufenthalt in St. Petersburg, aus dem auch seine Habilitationsschrift hervorging, berief ihn die Universität Jena 1870 zum außerordentlichen – und 1873 zum ordentlichen – Professor des Sanskrit und der vergleichenden Sprachforschung.

## Jena war ein Zentrum der jungen Disziplin Indogermanistik

Jena hatte sich bereits früh als Zentrum der noch jungen Indogermanistik etabliert – vor allem dank August Schleicher, der sich von 1857 bis 1868 als erster Linguist intensiv mit der Rekonstruktion einer indogermanischen Ursprache beschäftigte.

Zwei Jahre später übernahm Berthold Delbrück in Jena die Erforschung der indogermanischen Sprachen – und ergänzte sie um einen wichtigen Aspekt: »Er führte nicht nur das bis dahin in der Indogermanistik vorhandene Wissen zusammen, er etablierte auch ein völlig neues Forschungsgebiet, nämlich die Syntax der indogermanischen Sprachen«, schreibt seine Nachfolgerin Rosemarie Lühr 2011. Zuvor hatten seine Kollegen ausschließlich die Formen- und die Lautlehre in den Blick genommen. Schriften wie seine »Altindische Syntax« und die »Vergleichende Syntax der indogermanischen Sprachen« gelten nach wie vor als Standardwerke. In späteren Jahren widmete er sich vor allem der germanischen Syntax. Außerdem machte Delbrück immer wieder Ausflüge in andere Disziplinen, etwa die Rechtswissenschaft, und er konzentrierte sich neben der Forschung intensiv auf die Lehre.

Der Indogermanist fügte sich mit seiner Präsenz in die Riege wichtiger Ge-



FOTO: UNIVERSITÄTSARCHIV

lehrter dieser Zeit in Jena ein. Mit Ernst Haeckel, Rudolf Eucken, Ernst Abbe sowie Eduard Rosenthal stand er in regem Austausch oder war sogar freundschaftlich mit ihnen verbunden.

Auch politisch war Delbrück aktiv. Wenngleich nicht frei von antisemitischen Ressentiments sprach er sich gegen politischen Antisemitismus aus. Als Bewunderer Bismarcks hatte er sich der Nationalliberalen Partei angeschlossen und war für sie bei der Reichstagswahl 1887 als Kandidat angetreten. Vor allem sein rhetorisches Talent brachte ihn bis in die Stichwahl, die er aber verlor, möglicherweise aufgrund von »Fake News«. Die Konkurrenz hatte das Gerücht in Umlauf gebracht, dass die Liberalen einigen Wahlzetteln als Entscheidungshilfe 20 Pfennig beigelegt hätten.

Zumindest blieben er und sein organisatorisches Talent so der Universität Jena erhalten, der er nach 1878 noch drei weitere Male als Rektor vorstand: in den Wintersemestern 1885 und 1897 sowie im Sommersemester 1908, als man für die Feierlichkeiten zum 350. Gründungsjubiläum eine erfahrene Persönlichkeit benötigte. Neben jenen Feierlichkeiten standen 1908 zudem wichtige Termine wie die Eröffnung des Universitätshauptgebäudes sowie des Phyletischen Museums an. Delbrück erhielt im Zuge der Festivitäten den Ehrenbürgerbrief der Stadt Jena. Auch nach seiner Emeritierung 1913 setzte er seine wissenschaftliche Tätigkeit fort, veröffentlichte Schriften und hielt bis 1921 noch Vorträge. Doch ein Augenleiden, das ihn viele Jahrzehnte begleitet hatte, erschwerte zunehmend seinen Alltag. Am 3. Januar 1922 schließlich starb Berthold Delbrück in Jena. ■

## Nordäthiopiens Kulturerbe bewahren

### Forschungsteam der Universität Jena erstellt mit Partnern ein digitales Kulturerbe-Register

Ein Forschungsteam der Universität Jena um Prof. Dr. Norbert Nebes und des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) erstellt in den kommenden zwei Jahren den »Ethiopian Heritage Digital Atlas« (EHDA). Das gemeinsam mit der äthiopischen Antikenbehörde und der Universität Addis Abeba durchgeführte Projekt wird von der Gerda-Henkel-Stiftung mit rund 215500 Euro gefördert. Ziel des



FOTO: KLAUS MEHELKE

webbasierten Denkmalinformationssystems ist es, den Erhalt der Kulturdenkmäler Nordäthiopiens zu sichern, jener Region, in der das antike Volk der Sabäer vor fast 3000 Jahren seine Spuren hinterlassen hat. Kernstück des EHDA ist ein Geoinformationssystem, das Fundplätze, Monumente und Objekte erfasst und in einer Landkarte mit archäologischen und geografischen Informationen verknüpft. US



FOTO: BESIM MAZHIQI

## Quantenchips

### Universität Jena beteiligt sich an Quanten-Start-up Q.ANT

Das Institut für Angewandte Physik (IAP) der Universität Jena sowie das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF gehören dem Konsortium um das Stuttgarter Quanten-Start-up Q.ANT an. Das

Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert das Konsortium mit 42 Millionen Euro, weitere acht Millionen Euro steuern die Konsortialpartner bei. Mit den Fördermitteln soll eine Demonstrations- und Testanlage für photonische Quantencomputer-Chips aufgebaut werden. Die Jenaer Beteiligten um Prof. Dr. Andreas Tünnermann übernehmen im Projekt Entwicklungsaufgaben im Umfang von 12,6 Millionen Euro, u. a. für den Bereich der Lichtquellen. Zusätzlich steuern sie ihr dafür notwendiges Know-how in der hybriden Aufbau- und Verbindungstechnik bei. Innerhalb von zweieinhalb Jahren wollen die Projektpartner einen ersten Prototyp vorstellen. Haak

## Selbstinszenierungspraktiken

### Projekt untersucht Kompetenzen von Jugendlichen mit Benachteiligungen beim Berufseinstieg

Wie gelingt es Jugendlichen mit Benachteiligungen besser, nach der Schule ins Arbeitsleben zu kommen? Dieser Frage gehen Forschende der Universitäten Jena und Paderborn im neuen Forschungsprojekt »SeiP: Selbstinszenierungspraktiken – Zugänge zu einer selbstbestimmten, multimodalen Kompetenzfeststellung für Jugendliche mit Benachteiligungen/Behinderungen« nach. Das interdisziplinäre Projekt unter der Leitung von



FOTO: JAN-PETER KASPER

Wirtschaftspädagogin Prof. Dr. Petra Frehe-Halliwell wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme »Inklusive Bildung« über einen Zeitraum von drei Jahren mit insgesamt rund 700000 Euro gefördert. Ziel ist ein Weiterbildungsprogramm, das Jugendlichen hilft, die eigenen Stärken zu erkennen und für den Weg in den Beruf zu nutzen. Reckendorf/AB



FOTO: JAN-PETER KASPER

## KI im Studium

### Projekt THInKI verstärkt das Thema KI in der Lehre

Künstliche Intelligenz (KI) durchdringt zunehmend sämtliche Bereiche der Gesellschaft. Deshalb werden im neuen Forschungsprojekt »THInKI« (»Thüringer Hochschulinitiative für KI im Studium«) KI-Inhalte für das Studienangebot der

Universitäten Jena und Ilmenau entwickelt. Das Projekt wird durch das Thüringer Zentrum für Lernende Systeme und Robotik (TZLR) als gemeinsame Einrichtung beider Universitäten koordiniert. Es werden in den kommenden vier Jahren Studieninhalte, Lehrmaterialien und Qualifizierungsangebote für Lehrende sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zur Vermittlung von KI-Kompetenzen erarbeitet. Studierenden und Lehrenden soll so ermöglicht werden, verstärkt Kenntnisse und Fähigkeiten über Künstliche Intelligenz zu erlangen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert das Projekt mit rund 3,8 Millionen Euro für vier Jahre. Frezzella/AB

## Den Geruchssinn digitalisieren

### EU-Projekt zur Erkennung von veränderten Körpergerüchen

Im April startete das Projekt SMELLODI – »Smart Electronic Olfaction for Body Odor Diagnostics«, an dem die Psychologin Prof. Dr. Ilona Croy sowie Dr. Alexander Croy vom Institut für Physikalische Chemie beteiligt sind. Gemeinsam mit Partnerinstituten aus Dresden, Israel und Finnland wollen sie in den nächsten drei Jahren intelligente elektronische Sensoren entwickeln, die gesunde und durch Krankheit veränderte

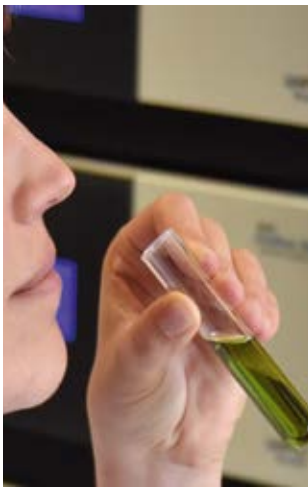


FOTO: ANNE GÜNTHER

Körpergerüche erkennen und digital übertragen können. Diese Technologie soll den Weg für die Digitalisierung des Geruchssinns ebnen. Zudem kann sie helfen, als schnelles, unmittelbares und nicht-invasives Diagnoseinstrument wertvolle Informationen für die Medizin verfügbar und interpretierbar zu machen. Gefördert wird das Projekt mit rund drei Millionen Euro von der Europäischen Union. AB

## Effizientere Verwaltung dank KI

### Forschungsteams entwickeln KI-basierte Lösungen für die Digitalisierung der öffentlichen Verwaltung

Mit dem »Onlinezugangsgesetz« verpflichten sich Bund, Länder und Kommunen dazu, Verwaltungsleistungen digital anzubieten. Forschende der Universität Jena entwerfen jetzt mit Partnern vom Thüringer Finanzministerium, dem Institut für Datenwissenschaften des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt sowie der Universität Bielefeld im Rahmen zweier Forschungsprojekte KI-basierte Lösungen, um die öffentliche Verwaltung dafür



FOTO: JENS MEYER

fit zu machen. Das Bundesinnenministerium fördert die Projekte »Canareno: Computerunterstützte Analyse elektronisch verfügbarer Rechtsnormen« und »SimpLEX: Vereinfachung der Erstellung und Verarbeitung elektronischer Dokumente durch Zuhilfenahme maschinenlesbarer Normentexte und Dokumentenbausteine« mit rund fünf Millionen Euro. sh



FOTO: SANDER MÜNSTER

### Jena4D

#### Virtuelles Stadtgeschichtsbuch zum Mitmachen

Durch die Jenaer Innenstadt spazieren und dabei auf dem Smartphone sehen, wie diese früher aussah? Jena4D macht diese Zeitreise bald möglich. Das neue Projekt unter Leitung von Dr. Andreas Christoph und Juniorprof. Dr. Sander

Münster will Bürgerinnen und Bürger zum Erinnern und Teilen historischer Fotografien einladen. Jena4D erweitert eine bereits bestehende Browseranwendung zur 4D-Darstellung der gesamten Innenstadt. Historische Fotografien werden mit Anekdoten und Geschichten verknüpft. Außerdem können die Teilnehmenden digitale Stadtrundgänge erstellen und mitgestalten. Dabei entsteht Stück für Stück ein digitales 4D-Geschichtsbuch für Touristinnen und Touristen, Zeitzeugen und kommende Generationen. Das einjährige Projekt wird im Rahmen von »dive in«, einem Programm der Kulturstiftung des Bundes, mit rund 200000 Euro gefördert. Barbutev



FOTO: UKJ

### Wie will ich sein?

#### Lehrprojekt unterstützt Persönlichkeitsentwicklung in der Medizin

Das Medizinstudium vermittelt Fachwissen und praktische Fertigkeiten – hohe Erwartungen haben Patienten, Kolleginnen und die Gesellschaft auch an das Verantwortungsbewusstsein und die Integrität von Ärztinnen und Ärzten. Mit

einem neuen langfristigen Lehrangebot zur ärztlichen Professionalitätsentwicklung will das Universitätsklinikum Jena die Entwicklung eines wissenschaftlichen und beruflichen Ethos der angehenden Medizinerinnen und Mediziner unterstützen. Das »Longitudinale Curriculum zur Ärztlichen Professionalitätsentwicklung« – kurz: »LongProf« – befindet sich zurzeit in der Pilotphase und ist auf zwei Jahre angelegt. Die Lehrangebote richten sich an die Studierenden ab dem fünften Fachsemester. Leiter des Projektes ist Dr. Sven Schulz, dessen Institut für Allgemeinmedizin am Klinikum die Gesamtkoordination übernimmt. vdG

# Mit Herzblut für Minerale und Gesteine

Dr. Birgit Kreher-Hartmanns Herz schlägt für Minerale und Gesteine. Schon als Kind begeisterte sie sich für das, was andere am Wegesrand achtlos übersehen. Heute ist sie Kustodin der Mineralogischen Sammlung der Universität Jena. Ihr Wissen und ihre Faszination möchte sie nicht nur Studierenden weitergeben, sondern vor allem Schülerinnen und Schülern. Das Porträt stellt die engagierte Wissenschaftlerin und ihre Leidenschaften vor.

TEXT: VIVIEN BUSSE

Beim Eintritt in die Mineralogische Sammlung erblickt man in fast jedem Winkel Vitrinen mit Mineralen und auch Gesteinen, die im Licht glitzernd und glänzend den Blick auf sich ziehen. Gleich im ersten Raum steht ein besonders großes und beeindruckendes Exemplar davon – ein Quarz, der aus nächster Nähe und ohne Glasvitrine um ihn herum bestaunt werden kann. Herrin der glänzenden, bunten und funkelnden Stücke ist Kustodin Dr. Birgit Kreher-Hartmann.

## Liebe zur unbelebten Natur

Die Liebe zur unbelebten Natur wurde ihr bereits in die Wiege gelegt. Gemeinsam mit den Großeltern sammelte sie schon früh Steine und Minerale, die am Wegesrand lagen. »Das hat in der dritten Klasse im Heimat- und Sachkundeunterricht mit den Mineralen aus dem Harz angefangen«, erinnert sich Kreher-Hartmann. Später besuchte sie als Schülerin öffentliche Vorträge an der Universität in Braunschweig, in denen es um die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Mineralen, aber auch um ihr Vorkommen und ihre Bildung ging. Besonders faszinierte sie die Mikroskopie der Minerale. Die Sammelleidenschaft hat sie sich bis heute erhalten. Neben Zustiftungen, Schenkungen und Nachlässen stammen einige Stücke der Mineralogischen Sammlung auch von privaten Reisen Kreher-Hartmanns. Als sie die Frage gestellt bekommt, ob und wie sehr ihre Leidenschaft für das Sammeln ihr Privatleben beeinflusst, muss sie lachen. »Mein Mann hat schnell gelernt, dass ›Handstücke‹ Geländeproben sind, für die man beide Hände zum Tragen benötigt«, sagt sie.

Mittlerweile umfasst die Mineralogische Sammlung, die Birgit Kreher-Hartmann seit knapp 30 Jahren leitet, mehr als 80000 Objekte. Im Jahr 1779 gegründet ist die Sammlung heute am Lehrstuhl für Allgemeine und Angewandte Mineralogie des Instituts für Geowissenschaften angesiedelt.

Ihr Einstieg als Kustodin sei damals nicht ganz leicht gewesen, erzählt die heute 58-Jährige und fasst sich beim Erzählen an ihren Kettenanhänger – ein Stück geschliffenes, dunkelrotes Gestein. Über einen ihrer Promotionskollegen an der Universität Würzburg hatte sie von der ausgeschriebenen Stelle in Jena erfahren. Gleich an ihrem ersten Arbeitstag als Leiterin der Sammlung sollte sie spontan eine Führung übernehmen. »Alle Kollegen gingen, aber ich hatte am Telefon – perplex wie ich war – die Führung für eine Schulklasse bestätigt. Über Mineralogie konnte ich einiges erzählen nach meinem Studium. Aber ich hatte zu dem Zeitpunkt noch überhaupt keine Ahnung davon, was sich alles in der Sammlung befindet.« Das ist heute natürlich anders.

## Liebingsobjekt in Grün

Ihr Lieblingsstück der Sammlung ist ein Smaragdkristall aus Muzo in Kolumbien. »Eigentlich ist Grün nicht so meine Farbe, auch wenn ich gerne im Grünen, in der Natur bin«, erklärt die begeisterte Radfahrerin. »Aber dieses Grün ist berauschend schön.« Der besagte Kristall ist vollkommen transparent und hebt sich von den umgebenden Calcit-Kristallen deutlich ab.

Die Sammlung ist für Birgit Kreher-Hartmann aber nicht nur ein Museum, sondern auch ein pädagogisch wichtiger Bildungsort. »Minerale sind das, woraus wir unsere Welt





Wissenschaftlerin, Musikerin, Sammlerin – Dr. Birgit Kreher-Hartmann in »ihrem Reich«, der Mineralogischen Sammlung der Universität Jena. · Foto: Jens Meyer

aufbauen. Sie sind die Bausteine und die Rohstoffe für alles, was wir im täglichen Leben verwenden.« Dass Mineralogie im Lehrplan von Schulen nur am Rande vorkommt, sieht sie kritisch. »Wenn ich eine Birke nicht von einem Nadelbaum unterscheiden kann, ist das ein Problem. Aber wenn man einen Basalt vom Granit nicht unterscheiden kann, stört das niemanden.« Kreher-Hartmann bietet deshalb verschiedene Workshops für Schulen und Weiterbildungen für Lehrende an. Auch Gäste der Universität führt sie regelmäßig durch die Sammlung.

Ihre Leidenschaft für Minerale und Gesteine und die wissenschaftliche Sammlung wird auch außerhalb der Universität wahrgenommen. Für ihr Engagement ist sie mit der Bernhard-von-Lindenau-Medaille vom Museumsverband Thüringen ausgezeichnet worden.

Doch damit ist bei Birgit Kreher-Hartmann das Engagement bei Weitem nicht ausgeschöpft. Seit vielen Jahren ist sie Jury-Mitglied beim Wettbewerb »Jugend forscht« in Thüringen, sie ist Pressereferentin der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft und leitet zudem noch die Mineralien-AG am Staatlichen Naturhistorischen Museum Braunschweig. Zudem war sie viele Jahre Sprecherin und stellvertretende Sprecherin des Arbeitskreises der Mineralogischen Museen und Sammlungen im deutschsprachigen Raum.

Ausgleich zu ihrem beruflichen und ehrenamtlichen Engagement findet Birgit Kreher-Hartmann in der Musik. Sie spielt seit 25 Jahren Bratsche in der Akademischen Orchestervereinigung. Seit der 10. Klasse ist die Bratsche ihr Instrument, davor lernte sie vier Jahre lang Geige. Neben dem Orchester spielt Kreher-Hartmann zusätzlich in einem Streich-Quartett. »Die Musik ist ein Ausgleich, der für innere Ruhe sorgt«, sagt sie. Zudem bringe die Musik Menschen zusammen, etwa beim Austausch mit einem japanischen Orchester und Orchesterfahrten nach Italien oder Dänemark. Auch der Austausch innerhalb des Orchesters in Jena mit den Menschen aus anderen Bereichen der Universität tue ihr gut.

#### Ausgleich auf dem Rad

Als weiteren Ausgleich zur Arbeit freue sie sich auch immer auf ein paar ruhige Urlaubstage mit ihrer Familie, sagt Kreher-Hartmann, die mit ihrem Mann und ihrem Sohn in Jena wohnt. »Zum Beispiel beim Fahrradfahren in Brandenburg.« Doch die Liebe und das wache Auge für Minerale lässt sie auch im Urlaub nicht los. So wird sie auch weiterhin hier und da sammeln oder die Natur und ihre Wunderwerke bestaunen. ■

# »Wir sollten über Putins Zeit hinausdenken«

Am 24. Februar begann der russische Überfall auf die Ukraine. Geschockt verfolgt die Weltöffentlichkeit seitdem das Geschehen, die fortlaufenden gewaltsamen Auseinandersetzungen. Wir baten den Osteuropahistoriker und Direktor des »Imre Kertész Kollegs« der Universität Jena, Prof. Dr. Joachim von Puttkamer, um eine Einschätzung der Lage. Als das Interview geführt wurde, lag der Kriegsbeginn beinahe sieben Wochen zurück.

INTERVIEW: STEPHAN LAUDIEN

## Herr von Puttkamer, können Sie uns den Krieg in der Ukraine erklären?

Wir Historiker können Orientierung bieten, Dinge in größere Zusammenhänge einordnen. Wir blicken dabei auf größere Zeiträume als die letzten zehn oder 20 Jahre zurück. Das östliche Europa wurde im 20. Jahrhundert stark durch Kriege und massenhafte Gewalt geprägt. Wir unterscheiden Gewalt, die ihren Ursprung in der Region hatte, und Gewalt, die von außen, von aggressiven Nachbarn, hereingetragen wurde. Diese Gewalt von außen überwiegt dabei deutlich. In jüngerer Zeit, konkret ab 1991, war die Ukraine jedoch im Inneren ein friedliches Land. Es gab Spannungen, ja, aber Gewalt wurde erst wieder 2014 von außen hereingetragen.

## Wir hören in den Medien von Putins Krieg, Putins Überfall auf die Ukraine. Doch Putin allein kann keinen Krieg führen.

Interessant sind in diesem Zusammenhang die sogenannten Siloviki, die den Machtapparat kontrollieren. Wir haben gesehen, wie Putin diese Männer vor laufender Kamera abkanzelt, nicht zuletzt, um sie in die Pflicht zu nehmen und so die Verantwortung zu teilen.

## Dennoch bleibt Putin die bestimmende Kraft. Was treibt diesen Mann an?

Ich denke, Putin verfolgt ein Projekt und sieht jetzt einen geeigneten Zeitpunkt, es zu vollenden. Wir sehen zudem, dass er womöglich gesundheitliche Probleme hat, ihm wohl bewusst ist, dass seine Präsidentschaft endlich ist. Die ganze Propaganda zielt darauf, Putins Pläne als nationales Projekt zu beschwören.

## Dennoch ist der Präsident nicht Russland.

Natürlich nicht. Und wir tun gut daran, über den Krieg hinaus zu denken, die



Joachim von Puttkamer ist Professor für Osteuropäische Geschichte an der Universität Jena und leitet das »Imre Kertész Kolleg«. · Foto: Anne Günther

Zeit nach Putin einzubeziehen. Es wird sich zeigen, wie lange die Zustimmung zu diesem Krieg anhält, wenn tausende, vielleicht zehntausende russische Soldaten ihr Leben lassen, wenn tausende Familien betroffen sein werden.

## Können wir auf die russische Zivilgesellschaft bauen?

Das ist eine schwierige Frage. Aktuell erleben wir enormen Druck, der auf Demonstranten lastet, die sich gegen den Krieg äußern. Jeglicher Widerstand, schon der Verdacht, stößt auf heftige Gegenwehr der Behörden. Studierende, die sich gegen den Krieg positionieren, stehen in der Gefahr, exmatrikuliert und zur Armee eingezogen zu werden.

## Also kann sich Putin der eigenen Bevölkerung keineswegs sicher sein?

Die offizielle Lesart lautet »Wir gegen die Welt, die Welt gegen uns!« Damit

lässt sich die russische Bevölkerung ruhigstellen. Wie lange der Konsens hält, das vermag kaum jemand zu sagen.

## Um die Hintergründe dieses Krieges zu erklären, wird gern weit in die Geschichte zurückgeblickt. Trifft denn das Narrativ der »Brudervölker« überhaupt zu?

Russland, die Ukraine und Belarus können sich auf gemeinsame Ursprünge in der Kiewer Rus berufen. Da sprechen wir vom 9. und 10. Jahrhundert, also einer Zeit, in der die Christianisierung Altrusslands begann. Weite Teile der heutigen Ukraine gehörten später zur polnischen Krone und danach war die Ukraine genau wie Russland ein Teil der Sowjetunion. Seit 1991 ist die Ukraine unbestritten ein souveräner Staat, dessen Grenzen übrigens 1994 von Russland garantiert worden sind. Natürlich gibt es weiterhin viele enge Verbindungen zwischen Ukrainern und Russen, doch der aktuelle Konflikt trägt dazu bei, vorhandene Gräben noch zu vertiefen.

## Hat der Ukraine-Krieg konkrete Auswirkungen auf die Arbeit des Imre Kertész Kollegs?

Ja, in vielerlei Hinsicht. So werden wir vermehrt von Journalistinnen und Journalisten um Einschätzungen zur Lage gebeten, wir haben gleich zu Beginn des Krieges eine Podiumsdiskussion angeboten, die überaus große Resonanz fand und wir unterstützen Kolleginnen und Kollegen. So konnten wir Irina Scherbakowa von der NGO »Memorial« aus Russland mit Unterstützung der Körber-Stiftung und der Thüringer Staatskanzlei gemeinsam mit der Stiftung Buchenwald und Mittelbau-Dora für ein Jahr als Fellow ans Kolleg holen. Außerdem bieten wir einem Wissenschaftler-Paar aus der Ukraine direkt Asyl im Kolleg. ■

# LIEGESTUHL »(S)CHILLER«

Material: Buchenholz natur,  
Stoffbezug 100% Polyester, ISO zertifiziert  
Getränkhalter in der rechten Armlehne  
3-fach verstellbare Rückenlehne  
hoher Sitzkomfort  
produziert in der EU

89 €

**UNI-SHOP**  
made to connect

Campus-Foyer · Carl-Zeiß-Straße 3 · 07743 Jena  
Öffnungszeiten: Mo – Fr 9.30–14.00 Uhr  
[www.uni-shop-jena.de](http://www.uni-shop-jena.de)



# LICHTGEDANKEN

ONLINE

Das Forschungsmagazin der  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

[www.lichtgedanken.uni-jena.de](http://www.lichtgedanken.uni-jena.de)



FRIEDRICH-SCHILLER-  
UNIVERSITÄT  
JENA