

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 01/18

EXTREM!

Physik unter Hochdruck

Superstarkes Biomaterial
Künstliche Zellulosefasern
schlagen Stahl
und Spinnenseide

Ecken gegen Abgas
Viele Kanten steigern
Wirksamkeit von
Katalysatoren

Vier in einem
Mini-Beschleuniger als
„Schweizer Taschenmesser“
für Elektronenstrahlen



Wie Nanodrähte wachsen

Winzige Drähte aus Galliumarsenid mit Abmessungen von millionstel Millimetern standen im Fokus einer Untersuchung an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III. Forscher um Philipp Schroth von der Universität Siegen und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfolgten im Detail, wie solche Nanodrähte wachsen und ihre spezielle Form und Kristallstruktur bilden.

Für die Herstellung der Drähte nutzen die Wissenschaftler den sogenannten selbstkatalysierenden Vapour-Liquid-Solid-Prozess (VLS-Prozess). Dabei werden zuerst winzige flüssige Galliumtröpfchen auf einen rund 600 Grad Celsius heißen Siliziumkristall aufgebracht. Danach wird dieser Wafer mit gerichteten Strahlen aus Galliumatomen und Arsenmolekülen bedampft, die sich in den Galliumtröpfchen auflösen. Nach einer gewissen Zeit setzt das Kristallwachstum der Nanodrähte unterhalb der Tröpfchen ein, wobei die Tröpfchen Schritt für Schritt nach oben geschoben werden. Die Galliumtröpfchen wirken hierbei als Katalysator für das Längenwachstum der Drähte.

Ziel der Forscher ist es, die Kristallstruktur so hergestellter Nanodrähte gezielt zu steuern, um zukünftig Nanodrähte mit speziellen Eigenschaften für bestimmte Anwendungen maßzuschneidern. Galliumarsenid (GaAs) ist ein breit verwendeter Halbleiterwerkstoff, der beispielsweise in Infrarotfernbedienungen, in der Hochfrequenztechnik für Handys, für die Umwandlung von elektrischen Signalen in Licht für Glasfaserkabel und auch für Solarzellen in der Raumfahrt eingesetzt wird.

Nano Letters, 2018; DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b03486

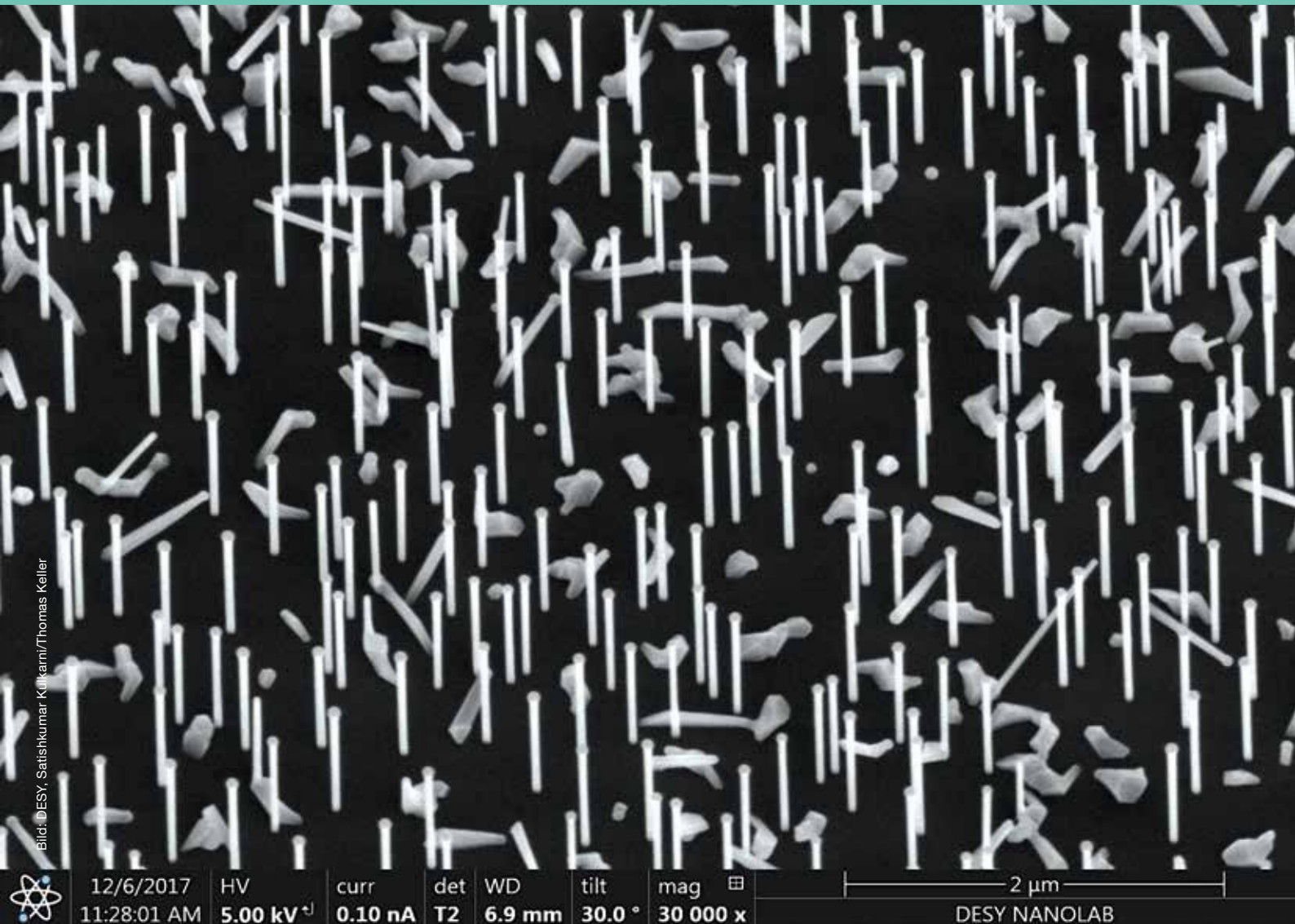
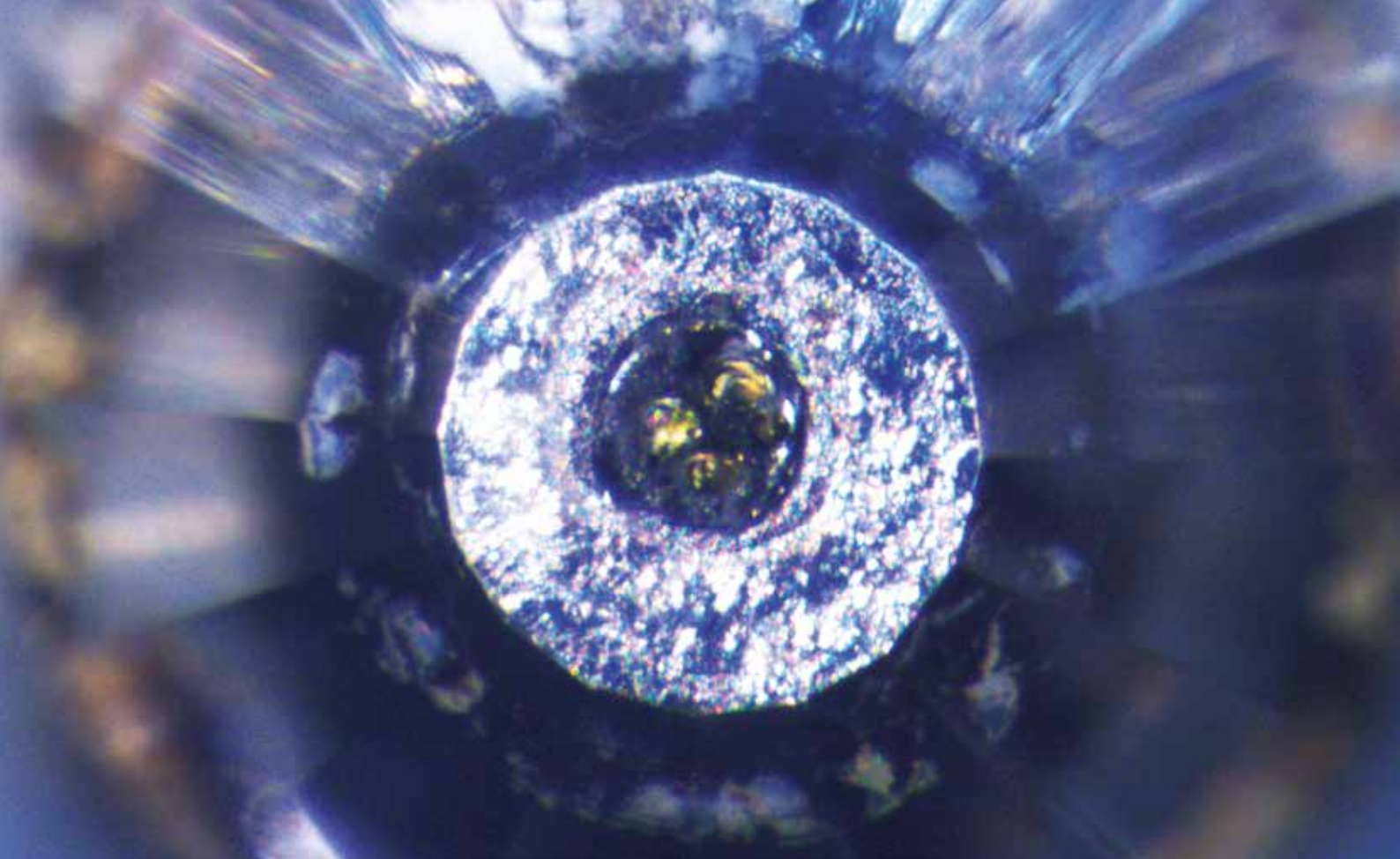


Bild: DESY, Satischumar Kulkarni/Thomas Keller

Nadel-Wald

Nanodrähte auf einem Siliziumträger, aufgenommen mit einem Elektronenmikroskop im DESY NanoLab

Inhalt

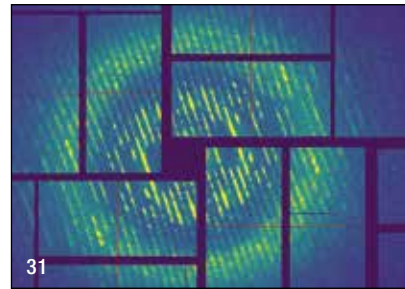
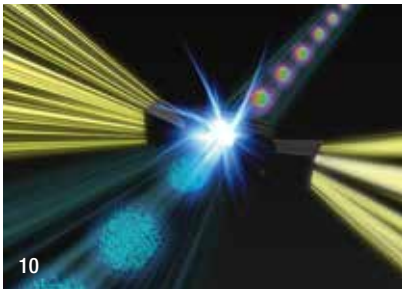


ZOOM

EXTREM!

**Forscher erzeugen Hochdruck und Hitze
wie im Erdinneren**

Polierte Facetten, symmetrischer Schliff – was da unterm Mikroskop funkelt, ist ein echter Diamant. Der wertvolle Winzling dient einem außergewöhnlichen Zweck: Er presst winzigste Materialproben extrem stark zusammen und erzeugt einen Druck, wie er im Inneren der Erde herrscht. Bei DESY durchleuchten Experten die komprimierten Proben mit hochintensivem Röntgenlicht. Dadurch liefern sie wichtiges Grundlagenwissen für die Geo- und Materialwissenschaften, für die Chemie und sogar für die Astrophysik.



CAMPUS

- 06 Welthafen der Wissenschaft**
DESYs Strategie für Forschung und Innovation
- 07 Das stärkste Biomaterial der Welt**
Künstliche Zellulosefasern schlagen Stahl und Spinnenseide
- 08 Wasser mit Spin**
Para- und ortho-Moleküle reagieren unterschiedlich
- 10 Vier in einem**
Vielseitiger Mini-Beschleuniger für Elektronenstrahlen
- 34 Wirksame Ecken und Kanten**
Nanogenaue Einblicke in Katalysator-Nanopartikel
- 36 Top-Resultat**
LHC zeigt Wechselwirkung von Top-Quark und Higgs-Boson
- 37 3D-Röntgenbilder von Zellen**
Neuartiges Mikroskopkonzept ermöglicht Blick in intakte biologische Zellen

ZOOM

- 12 Physik unter Hochdruck**
Wenn Gesteine weich und biegsam werden
- 22 Wasserspalter und Stromwandler**
Interview mit John Parise, Experte für die Hochdruck-synthese neuer Werkstoffe
- 24 Eisplaneten, Gasriesen und weiße Zwerge**
Wie der European XFEL ins Innere ferner Himmelskörper späht
- 28 Astrophysik im Labor**
Exotischer Materiezustand im Visier von FLASH

SPEKTRUM

- 30 Forschung kurzgefasst**
- LEAPS – Licht für die Forschung
 - Erstes Röntgenlicht aus Plasmabeschleuniger
 - Kollisionen im Belle-II-Detektor
 - Amyloide im Röntgenfokus
 - Nickel im Kohlenstoffmantel
 - Neue Lichtquellen am European XFEL
 - Flüssigkristalle formen Nano-Ringe

RUBRIKEN

- 02 femtoskop**
Wie Nanodrähte wachsen
- 23 femtopolis**
Warum Forscher Diamanten verpulvern

- 33 femtomenal**
0,000 000 000 000 075 Sekunden
- 40 femtofinale**
Kreative Kollisionen

„Welthafen der Wissenschaft“

DESY stellt die Weichen für Forschung und Innovation

Nach einem umfangreichen Strategieprozess legt DESY seine Schwerpunkte in Wissenschaft und Innovation für die nächsten Jahre fest und plant die Weiterentwicklung seiner großen Forschungsanlagen. Die Kernelemente der neuen Strategie erläutert der Vorsitzende des DESY-Direktoriums, Helmut Dosch.



Bild: DESY, Rüdiger Nehmzow

Helmut Dosch,
Vorsitzender des DESY-Direktoriums

femto: Wo geht die Reise für DESY hin?

Dosch: Wir entwickeln den Campus in Hamburg gemeinsam mit unseren Partnern von Bund, Stadt und Universität Hamburg sowie weiteren Forschungsinstitutionen zu einem „Welthafen der Wissenschaft“ mit neuen Forschungszentren und -anlagen. Eine ähnlich spektakuläre Entwicklung macht unser Standort in Zeuthen bei Berlin, den wir zu einem internationalen Zentrum der Astroteilchenphysik ausbauen.

femto: Was bedeutet das konkret?

Dosch: Mit PETRA IV planen wir das ultimative 3D-Röntgenmikroskop; es wird 100 Mal detailreichere Bilder von Abläufen im Nanokosmos liefern, als es heute möglich ist. 2026 könnten erste Experimente am dann weltbesten Synchrotron beginnen, die revolutionäre Erkenntnisse etwa für Elektromobilität, Energiegewinnung, Informationstechnologie und Infektionsforschung versprechen.

femto: Wie passt das zum europäischen Röntgenlaser European XFEL?

Dosch: PETRA IV ist die optimale Ergänzung zum European XFEL. DESY ist Hauptgesellschafter und arbeitet eng mit der European XFEL GmbH zusammen, um das volle Potenzial dieses neuen „Superlasers“ zu erschließen. Gemeinsam mit unseren

Partnern wollen wir unsere Rolle als weltweit führendes Zentrum für die Erforschung der Materie mit Röntgenstrahlung entscheidend stärken. Unser Ziel ist es, künftig neue Hochleistungsmaterialien und medizinische Wirkstoffe auf der molekularen Ebene maßzuschneidern.

femto: Welche neuen Technologien stehen auf dem Programm?

Dosch: Ein entscheidender technologischer Fortschritt für Röntgenlichtquellen könnte die Entwicklung sogenannter Plasmabeschleuniger sein, die Elektronen um einen Faktor 1000 effizienter antreiben können als existierende Anlagen. Dazu testen wir in den kommenden Jahren neue Konzepte. Außerdem soll technologische Exzellenz künftig gezielt zu Innovationen führen. Dazu bauen wir unseren Technologietransfer deutlich aus. Wir wollen zu einem „Innovationsbeschleuniger“ für Gründungen und Start-ups in den Regionen Hamburg und Brandenburg werden.

femto: Welche Rolle wird die Teilchenphysik künftig spielen?

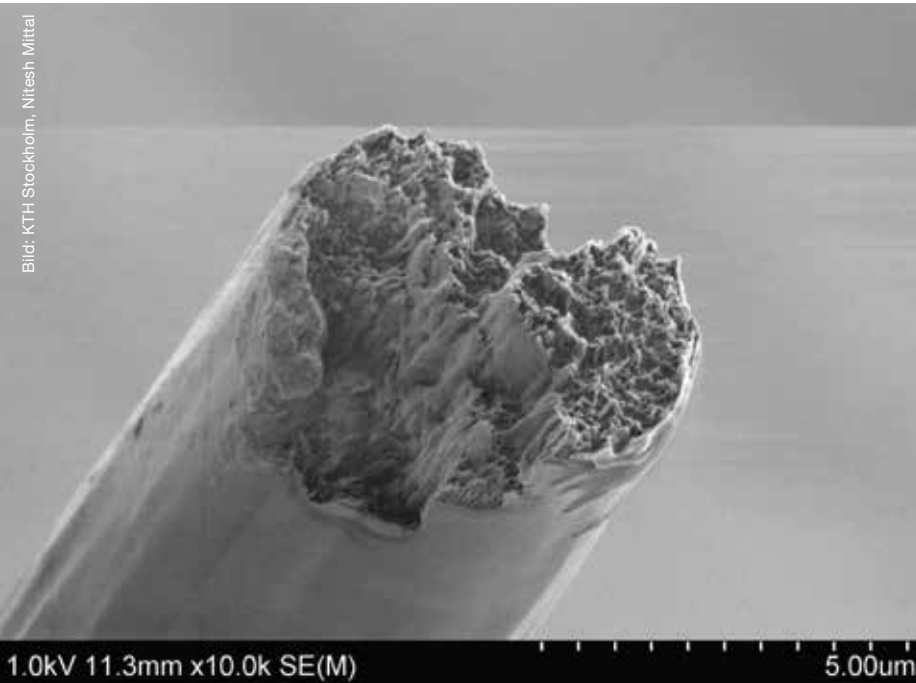
Dosch: DESY ist Deutschlands wichtigstes Zentrum für Teilchenphysik und wir wollen unsere Führungsposition als Schlüsselpartner in internationalen Projekten weiter ausbauen. Wir suchen Antworten

auf elementare Fragen zur Quantenstruktur unseres Universums, namentlich nach dem Ursprung der sogenannten Dunklen Materie, die nur im engen Zusammenspiel zwischen unseren Teilchen- und Astroteilchenphysikern gefunden werden können. Unsere Teilchenphysik genießt weltweit einen exzellenten Ruf. Und unser Forschungscampus in Zeuthen vereint herausragende Expertise in der Neutrino- und Gammastrahlenastronomie sowie in der theoretischen Astroteilchenphysik.

femto: Und der Campus in Hamburg?

Dosch: Gemeinsam mit der Universität und der Freien und Hansestadt Hamburg planen wir einen internationalen Wissenschaftspark und die Ansiedlung weiterer interdisziplinärer Forschungszentren. Das Wolfgang Pauli Centre etwa vereint Kompetenzen zu theoretischen Methoden, im Centre for Water Science stehen neue analytische Fragen zu der lebenswichtigen Flüssigkeit im Fokus und das neue Centre for Data and Computing Science widmet sich dem Thema Big Data, um den steigenden Anforderungen datenintensiver Forschung gerecht zu werden. Nicht zuletzt planen wir hier ein Besucherzentrum, das allen Interessierten die faszinierende Entschlüsselung der Materie nahebringt.

Das stärkste Biomaterial der Welt



Rasterelektronen-
mikroskopaufnahme
einer fertigen Faser

Selbst Stahl und Spinnenseide schlägt das stärkste Biomaterial, das je produziert worden ist. Ein Forscherteam um Daniel Söderberg von der Königlichen Technischen Hochschule (KTH) Stockholm hat die biologisch abbaubaren künstlichen Zellulosefasern an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III hergestellt und untersucht. Die Fasern sind stärker als Stahl und sogar als die noch stärkere Spinnenseide, die als das stärkste biologische Material gilt.

Das ultrastarke Material besteht aus Zellulose-Nanofasern (CNF), den „Grundbausteinen“ von Holz und anderen Pflanzen. Mit Hilfe einer neuen Produktionsmethode haben die Forscher erfolgreich die besonderen mechanischen Eigenschaften der Nanofasern auf ein makroskopisches Material übertragen, das sich außerdem durch sein geringes Gewicht auszeichnet und beispielsweise als umweltfreundliche Kunststoffalternative in Autos, für Möbel und in Flugzeugen Anwendung finden könnte. „Unser neues Material hat auch Potenzial für die Biomedizin, da Zellulose vom Körper nicht abgestoßen wird“, erläutert Söderberg.

Die Wissenschaftler nutzen kommerziell angebotene Zellulose-Nanofasern, die nur etwa 2 bis 5 Nanometer dünn und bis zu 700 Nanometer lang sind (ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter). Die Nanofasern werden in Wasser durch einen dünnen, nur einen Millimeter breiten Kanal in einem Stahlblock geschickt. Dieser Kanal besitzt zwei Paare seitlicher Zuflüsse, durch die entionisiertes Wasser sowie Wasser mit niedrigem pH-Wert einfließen. Dadurch wird der Strom der Nanofasern zusammengepresst und beschleunigt.

Diese sogenannte hydrodynamische Fokussierung sorgt dafür, dass sich die Nanofasern in der gewünschten Orientierung ausrichten und sich von selbst zu einem eng gepackten Faden zusammenlagern. Die Nanofasern haften dabei ganz ohne Klebstoff oder irgendeine andere Zutat durch sogenannte supramolekulare Kräfte zusammen, die zwischen den Nanofasern wirken, beispielsweise elektrostatische und Van-der-Waals-Kräfte.

„Die biobasierten Nanozellulosefäden sind achtmal steifer und einige Male zugfester als die Abseilfäden aus natürlicher Spinnenseide“

Daniel Söderberg, KTH Stockholm

Im hellen Röntgenstrahl von PETRA III konnten die Forscher den Prozess im Detail verfolgen und optimieren. „Das Röntgenlicht erlaubt uns, die detaillierte Struktur des Fadens zu analysieren, während er entsteht. Das schließt sowohl die Materialstruktur ein als auch die hierarchische Ordnung in den superstarken Fasern“, erläutert Stephan Roth, Leiter der PETRA-Messstation, an der die Fäden gesponnen wurden. „Wir haben Fäden von bis zu 15 Mikrometern Dicke und mehreren Metern Länge hergestellt“, berichtet Roth. Ein Mikrometer ist ein tausendstel Millimeter. Die Fäden lassen sich den Forschern zufolge auch in größerer Dicke fertigen.

Die Untersuchung zeigte eine Biegesteifigkeit des Materials von 86 Gigapascal und eine Zugfestigkeit von 1,57 Gigapascal. „Die von uns hergestellten biobasierten Nanozellulosefäden sind achtmal steifer und einige Male zugfester als die Abseilfäden aus natürlicher Spinnenseide“, betont Söderberg. „Wenn man ein biobasiertes Material sucht, gibt es nichts wirklich Vergleichbares. Es ist auch stärker als Stahl und alle anderen Metalle oder Legierungen sowie als Fiberglas und die meisten anderen synthetischen Materialien.“ Die künstlich hergestellten Zellulosefäden lassen sich etwa zu einem Stoff für verschiedenste Anwendungen weben. Die Forscher schätzen, dass die Produktionskosten des neuen Materials dabei mit denen besonders fester synthetischer Stoffe konkurrieren können. „Aus dem neuen Material lassen sich im Prinzip biologisch abbaubare Bauteile entwickeln“, ergänzt Roth.

„Aus dem neuen Material lassen sich im Prinzip biologisch abbaubare Bauteile entwickeln“

Stephan Roth, DESY

Die in der Untersuchung beschriebene neue Methode ahmt die Fähigkeit der Natur nach, Zellulose-Nanofasern zu nahezu perfekten makroskopischen Anordnungen zu arrangieren, wie etwa in Holz. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, ein Material aus Nanofasern zu entwickeln, das sich für größere Werkstücke nutzen lässt, und dabei die Zugfestigkeit und die mechanische Belastbarkeit der Nanofasern zu erhalten.

„Wir können jetzt die überragende Leistung aus dem Nanokosmos in den Makrokosmos übertragen“, betont Söderberg. „Ermöglicht wurde diese Entdeckung dadurch, dass wir gelernt haben, die fundamentalen Schlüsselparameter für die perfekte Nanostrukturierung, wie beispielsweise Partikelgröße, Wechselwirkungen, Ausrichtung, Ausbreitung, Netzwerkbildung und Gruppierung, zu verstehen und zu kontrollieren.“ Der Prozess kann den Wissenschaftlern zufolge auch benutzt werden, um beispielsweise die Gruppierung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen oder anderen Nanofasern zu steuern.

ACS Nano, 2018; DOI: 10.1021/acsnano.8b0108

Wasser mit Spin

Wasser ist nicht nur die wichtigste, sondern auch eine der kompliziertesten Flüssigkeiten der Erde. Das Leben um uns herum, wäre ohne die besonderen Eigenschaften des Wassers nicht so, wie es ist. Chemisch gesehen ist Wasser ein Molekül aus einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen. Weniger bekannt ist, dass Wasser auf molekularer Ebene in zwei unterschiedlichen Formen existiert. Der Unterschied liegt in der Richtung der Kernspins der beiden Wasserstoffatome. Je nachdem, ob die Spins der beiden Wasserstoffkerne im Molekül gleich oder entgegengesetzt ausgerichtet sind, spricht man von *ortho*- oder *para*-Wasser. Diese beiden sogenannten Isomere existieren parallel und wandeln sich, beispielsweise durch Stöße mit anderen Molekülen, fortwährend ineinander um.

Eine Forschungsgruppe um Stefan Willitsch von der Universität Basel hat nun untersucht, wie sich die beiden Formen von Wasser in ihrer chemischen Reaktivität unterscheiden – ihrer Fähigkeit, eine chemische Reaktion einzugehen.

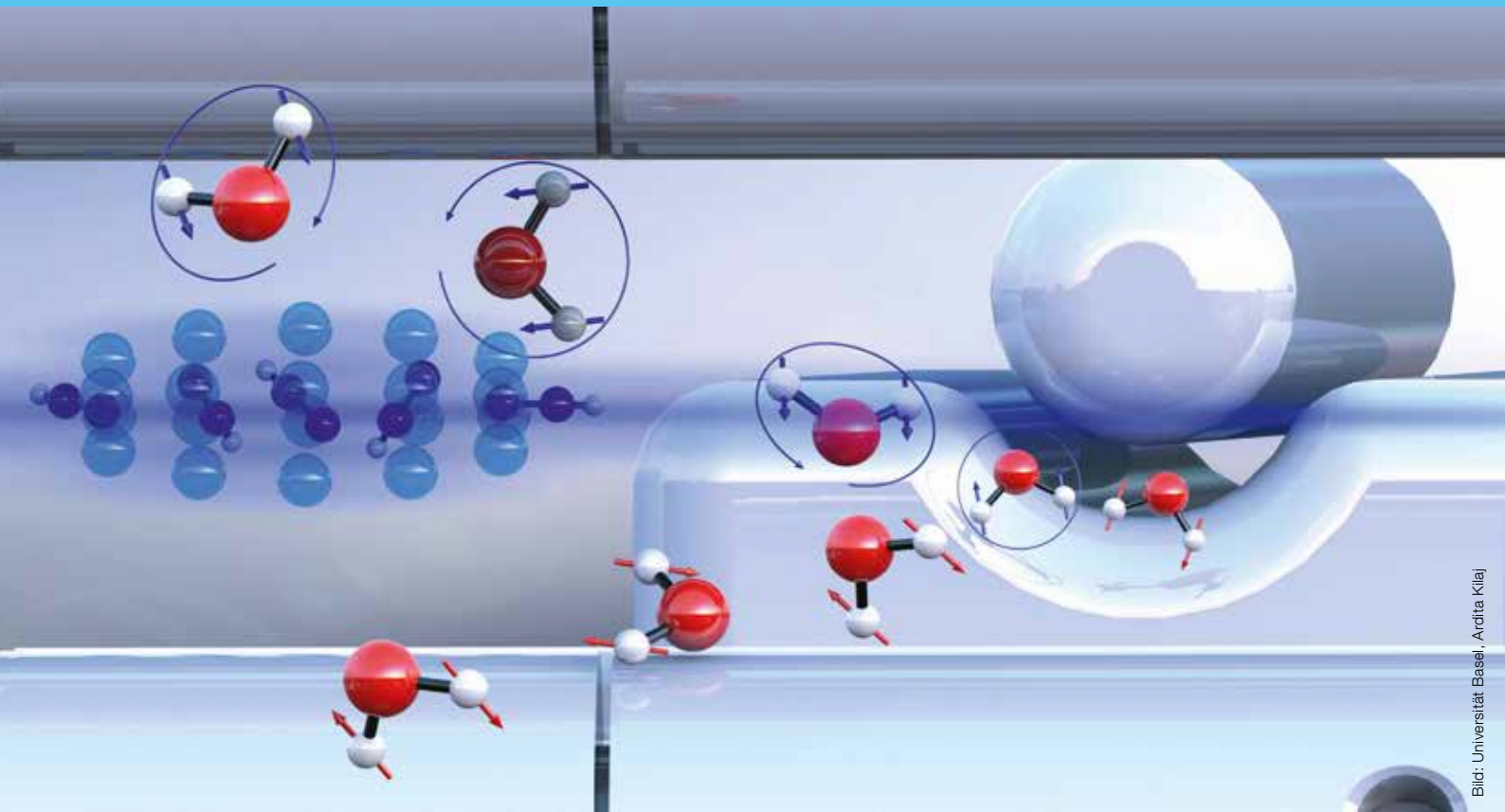


Bild: Universität Basel, Ardita Kilaj

Vorsortierte *ortho*- und *para*-Wassermoleküle mit unterschiedlich orientierten Kernspins (blaue bzw. rote Pfeile) reagieren unterschiedlich schnell mit Diazenylium-Ionen (Mitte links).

Dazu müssen die beiden Isomere allerdings zunächst voneinander getrennt werden. „*Para*- und *ortho*-Wasser haben fast identische physikalische Eigenschaften, was ihre Trennung sehr schwierig macht“, sagt Ardita Kilaj aus dem Basler Team. Die Trennung der beiden Wasserformen gelang den Forschern mit einem in der Gruppe von DESY-Forscher Jochen Küpper entwickelten „elektrischen Prisma“: Die Forscher schicken darin einen extrem feinen Strahl aus Wassermolekülen durch ein starkes elektrisches Feld. „*Para*- und *ortho*-Wasser werden dabei unterschiedlich stark abgelenkt“, erläutert Küpper. „Das ermöglicht uns, sie räumlich zu trennen und weitgehend reine *para*- und *ortho*-Proben zu erzeugen.“

Der Spin macht den Unterschied

Ausgehend davon konnten die Basler Forscher zusammen mit den Hamburger Kollegen die vorsortierten Wasser-Isomere mit ultrakalten Diazenylium-Ionen („protonierter Stickstoff“) kontrolliert zur Reaktion bringen. Dabei überträgt ein Diazenylium-Ion einen Wasserstoffkern

„Es zeigte sich, dass *para*-Wasser um rund 25 Prozent schneller reagiert als *ortho*-Wasser“

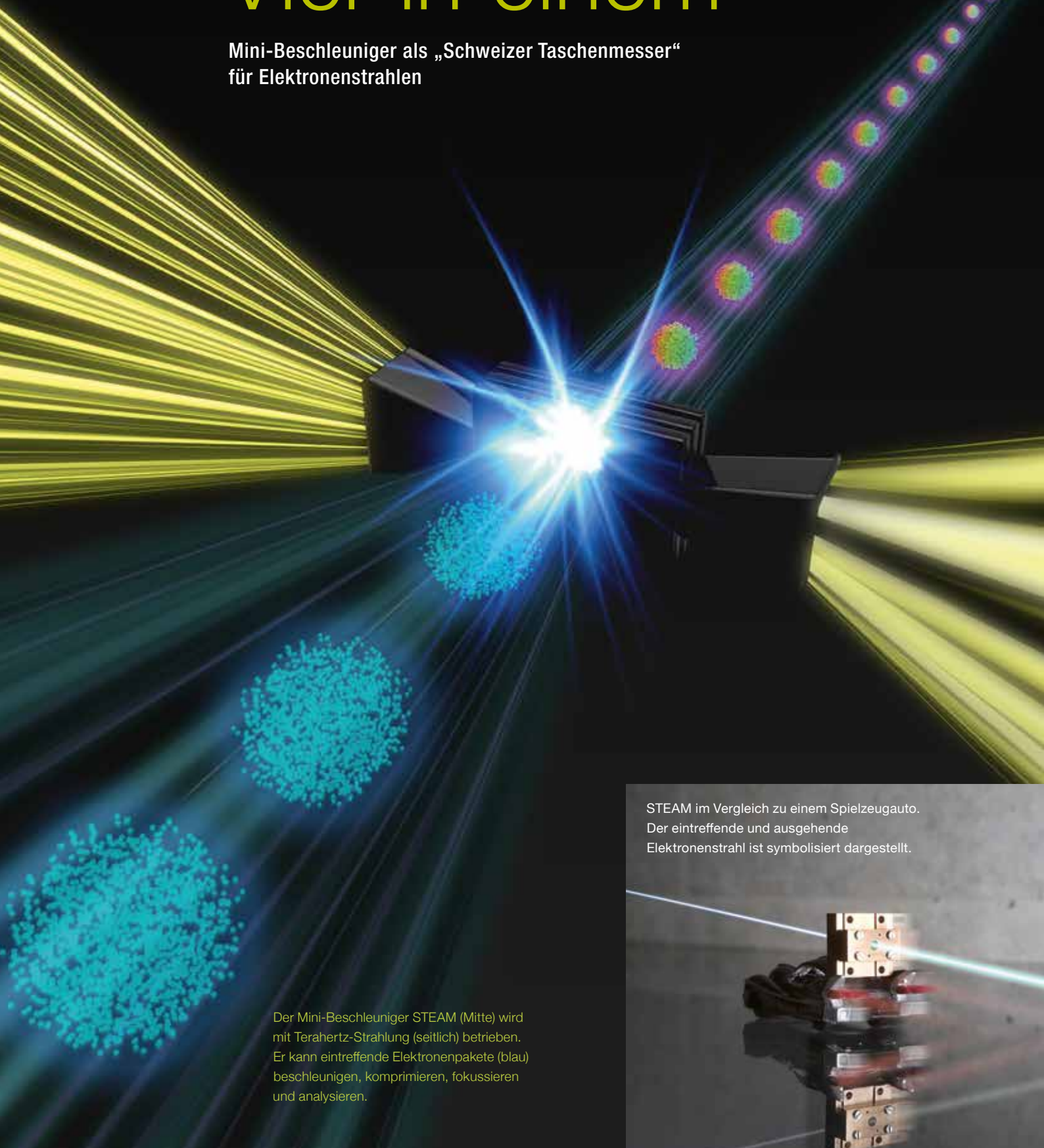
Stefan Willitsch, Universität Basel

auf ein Wassermolekül. Diese Reaktion ist auch aus der Chemie des Weltraums bekannt. „Es zeigte sich, dass *para*-Wasser um rund 25 Prozent schneller reagiert als *ortho*-Wasser“, berichtet Forschungsleiter Willitsch. „Dieser Effekt lässt sich damit erklären, dass der Kernspin auch die Drehbewegung der Wassermoleküle beeinflusst. Als Folge davon herrschen unterschiedlich starke Anziehungskräfte zwischen den Reaktionspartnern. *Para*-Wasser vermag seine Reaktionspartner stärker anzuziehen als die *ortho*-Form, was sich in einer erhöhten chemischen Reaktivität auswirkt.“ Computersimulationen bestätigten diese experimentellen Ergebnisse.

Nature Communications, 2018;
DOI: 10.1038/s41467-018-04483-3

Vier in einem

Mini-Beschleuniger als „Schweizer Taschenmesser“
für Elektronenstrahlen



Der Mini-Beschleuniger STEAM (Mitte) wird mit Terahertz-Strahlung (seitlich) betrieben. Er kann eintreffende Elektronenpakete (blau) beschleunigen, komprimieren, fokussieren und analysieren.

STEAM im Vergleich zu einem Spielzeugauto. Der eintreffende und ausgehende Elektronenstrahl ist symbolisiert dargestellt.



Forscher bei DESY haben einen Mini-Teilchenbeschleuniger gebaut, der auf Knopfdruck vier verschiedene Funktionen ausführen kann. Das neuartige Gerät namens STEAM wird mit Terahertz-Strahlung betrieben und kann Elektronenpakete beschleunigen, komprimieren, fokussieren und analysieren – und das, obwohl seine aktive Struktur nur einige Millimeter groß ist. Terahertz-Strahlung liegt im elektromagnetischen Spektrum zwischen Mikrowellen und dem Infrarot.

„Die aktiven Strukturen liegen auf der Millimeterskala“

Dongfang Zhang, DESY

Eine der zentralen Eigenschaften von STEAM (Segmented Terahertz Electron Accelerator and Manipulator) ist die perfekte zeitliche Abstimmung mit dem Elektronenstrahl. Diese beruht darauf, dass mit jeweils demselben Laserpuls sowohl ein Elektronenpaket erzeugt als auch das Gerät betrieben wird. „Wir starten mit einem infraroten Laserpuls und teilen ihn auf“, erläutert Dongfang Zhang vom Center for Free-Electron Laser Science CFEL bei DESY. „Beide Teile werden durch nichtlineare Kristalle geleitet, die die Laserwellenlänge verschieben: Für die Erzeugung des Elektronenpakets wird die Wellenlänge des Lasers ins Ultraviolette verkürzt und der Laser auf eine Photokathode geleitet, aus der er die Elektronenpakete herauslöst. Für STEAM wird die Wellenlänge in den Terahertz-Bereich verlängert. Das Timing zwischen beiden Teilen des ursprünglichen Laserpulses hängt dabei nur von der Länge des Wegs ab, den sie nehmen, und lässt sich sehr genau einstellen.“

Elektronen unter Kontrolle

Auf diese Weise können die Wissenschaftler sehr genau kontrollieren, bei welchem Zustand des wechselnden Terahertz-Feldes ein Elektronenpaket im Gerät eintrifft. Je nach der genauen Ankunftszeit führt STEAM dann seine unterschiedlichen Funktionen aus. „Ein Elektronenpaket, das den negativen Teil des elektrischen Terahertz-Feldes trifft, wird beispielsweise beschleunigt“, erläutert Zhang. „Andere Teile des Feldes führen zum Fokussieren oder gezielten Defokussieren des Pakets oder zu einer Komprimierung um ungefähr den Faktor zehn.“ Komprimierung

bedeutet dabei ein Zusammenstauchen des Elektronenpakets in Flugrichtung, während bei der Fokussierung der Durchmesser des Pakets senkrecht zur Flugrichtung schrumpft.

Darüber hinaus ermöglicht STEAM eine Untersuchung der Struktur des Elektronenpakets entlang der Flugrichtung. Dafür wird das Paket seitlich aufgefächert. Wenn das aufgefächerte Paket einen Detektor trifft, entsteht ein Profil entlang der Längsachse des Pakets. Diese Methode heißt Streaking und wird regelmäßig für die Analyse von Elektronenpaketen in Teilchenbeschleunigern eingesetzt. STEAM kann zusätzlich zu seinen drei anderen Funktionen auch Elektronenpakete für das Streaking passend aufgefächern. „STEAM ist eine Art Schweizer Taschenmesser für Elektronenstrahlen“, sagt Zhang. Um verschiedene Funktionen an demselben Elektronenpaket auszuführen, lassen sich mehrere der Geräte kombinieren.

Hundertmal kleiner

Der Einsatz von Terahertz-Strahlung ist dabei auch verantwortlich für die kompakte Bauweise des experimentellen Manipulators. „Terahertz-Strahlung hat typischerweise eine hundertmal kleinere Wellenlänge als die Hochfrequenz-Strahlung, die in den großen Teilchenbeschleunigern heute eingesetzt wird. Daher lassen sich alle Strukturen in dem Gerät entsprechend schrumpfen“, erläutert Franz Kärtner, Leitender Wissenschaftler bei DESY und Professor an der Universität Hamburg. Mit nur etwas mehr als zwei Zentimetern Breite passt STEAM bequem in eine Streichholzschatel. „Und das ist nur das Gehäuse. Die aktiven Strukturen liegen auf der Millimeterskala“, ergänzt Zhang.

Die STEAM-Technologie befindet sich noch in einem experimentellen Stadium. Die Entwickler sehen STEAM als einen ersten wichtigen Schritt auf dem Weg zu einer künftigen Generation kompakter Terahertz-Elektronenbeschleuniger, die heutige Anlagen ergänzen und ganz neue Anwendungen ermöglichen kann. Der Mini-Manipulator kann aber bereits heute Anwendung finden, Beschleunigerforscher rund um den Globus haben bereits Interesse für einen Einsatz zur Untersuchung ihrer Elektronenpakete signalisiert, wie Kärtner betont. „STEAM kann für zukünftige Tisch-Beschleuniger benutzt werden, aber seine verschiedenen Funktionen sind auch für existierende Anlagen interessant.“

Nature Photonics, 2018; DOI: 10.1038/s41566-018-0138-zvv

Die Diamantstempel in einer Hochdruckzelle benötigen einen Spezialschliff, um den Belastungen standzuhalten.



EXTREM!

Forscher erzeugen Hochdruck und Hitze wie im Erdinneren

Polierte Facetten, symmetrischer Schliff – was da unterm Mikroskop funkelt, ist ein Edelstein. „Ein echter Diamant“, sagt Hanns-Peter Liermann. „Er besitzt einen Spezialschliff, und es gibt nur wenige Firmen auf der Welt, die so etwas herstellen.“ Der wertvolle Winzling dient einem außergewöhnlichen Zweck: Er presst winzigste Materialproben extrem stark zusammen und erzeugt einen Druck, wie er im Inneren der Erde herrscht. Bei DESY in Hamburg durchleuchten Experten wie Hanns-Peter Liermann die komprimierten Proben mit hochintensivem Röntgenlicht. Dadurch liefern sie wichtiges Grundlagenwissen für die Geo- und Materialwissenschaften, für die Chemie und sogar für die Astrophysik.

PHYSIK UNTER HOCHDRUCK

Im Inneren der Erde herrschen Extrembedingungen: Der Druck steigt bis auf mehrere Millionen Bar, es ist einige tausend Grad heiß. Die weichen, biegsamen Gesteine sind ständig in Bewegung und verändern das Antlitz unseres Planeten: Kontinente werden verschoben, Gebirge falten sich auf, Gräben klaffen im Ozean. Das turbulente Treiben löst Erdbeben aus und lässt Vulkane entstehen. Würde man die zugrunde liegenden Prozesse besser verstehen, wären präzisere Vorhersagen über Beben und Vulkanausbrüche denkbar – ein lang gehegter Traum von Geoforschern.

Ein direkter Weg, das Erdinnere zu erkunden, sind Bohrungen. Das Problem: Das tiefste Bohrloch, das Menschen bislang zu Forschungszwecken in den Grund getrieben haben, misst gerade mal zwölf Kilometer. „Bei einem Erdradius von 6370 Kilometern kratzen wir damit nur an der Oberfläche unseres Planeten“, sagt Hanns-Peter Liermann, Forscher bei DESY in Hamburg. „Bis ins Innere der Erde können wir damit nicht blicken.“ Deshalb weichen die Geowissenschaftler auf indirekte Methoden aus: Unter anderem simulieren sie die im Erdinneren herrschenden Extrembedingungen mit Diamantstempeln und analysieren die Proben mit starker, gebündelter Röntgenstrahlung, erzeugt durch Teilchenbeschleuniger wie den Speicherring PETRA III in Hamburg.

Im Labor zeigt Liermann eine Diamantstempelzelle – ein Metallgehäuse vom Format einer Bonbondose. In ihr stehen sich zwei Diamanten mit abgeschliffenen Spitzen gegenüber – die beiden Druckflächen, die die Probe in die Mangel nehmen. Je kleiner diese Flächen sind, umso mehr Druck können sie auf eine Probe ausüben – ebenso wie der Abdruck eines Stöckelschuh-Absatzes stärker ist als der eines Pantoffels. Die Diamantflächen sind winzig, zum Teil messen sie nur wenige Dutzend Mikrometer. Noch kleiner sind die Proben, die sie komprimieren. Sie sind oft nur wenige Mikrometer groß. Ein Mikrometer ist ein tausendstel Millimeter.

Mit diesen Stempeln lassen sich Drücke wie im Erdkern erreichen – rund 3,5 Megabar, mehr als das Dreimillionenfache des Atmosphärendrucks. Seit einigen Jahren kann eine zweistufige Zelle, entwickelt an der Universität Bayreuth, sogar noch höhere Werte erzeugen – und damit die Verhältnisse in noch größeren Planeten als der Erde nachbilden. Das ermöglicht eine zusätzliche, winzige Halbkugel aus nanokristallinem

„Mit Tiefenbohrungen kratzen wir nur an der Oberfläche unseres Planeten“

Hanns-Peter Liermann, DESY

Die Probe in einer Hochdruckzelle wie dieser wird meist unter dem Mikroskop auf dem Diamantstempel platziert, der in der Regel kleiner als ein zehntel Millimeter im Durchmesser ist.





Bild: DESY, Marta Mayer

DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III erlaubt einen detaillierten Blick in die Struktur der Materie. Die einzelnen Messstationen haben sich auf unterschiedliche Methoden spezialisiert.

Diamant, angebracht auf der Fläche des ersten, größeren Stempels. Mit dieser Technik war einem internationalen Forscherteam unter Leitung der Universität Bayreuth 2015 ein beeindruckender Weltrekord gelungen: Es konnte den höchsten statischen Druck erzeugen, der bis dahin in einem Labor erreicht wurde. Dank Doppel-Diamantstempelzelle ließ sich eine Probe aus Osmiummetall auf 7,7-millionenfachen Atmosphärendruck komprimieren (knapp 7,7 Megabar) – mehr als der doppelte Druck im Erdkern. Mittlerweile werden mit der Technik sogar Werte bis zu zehn Megabar erreicht.

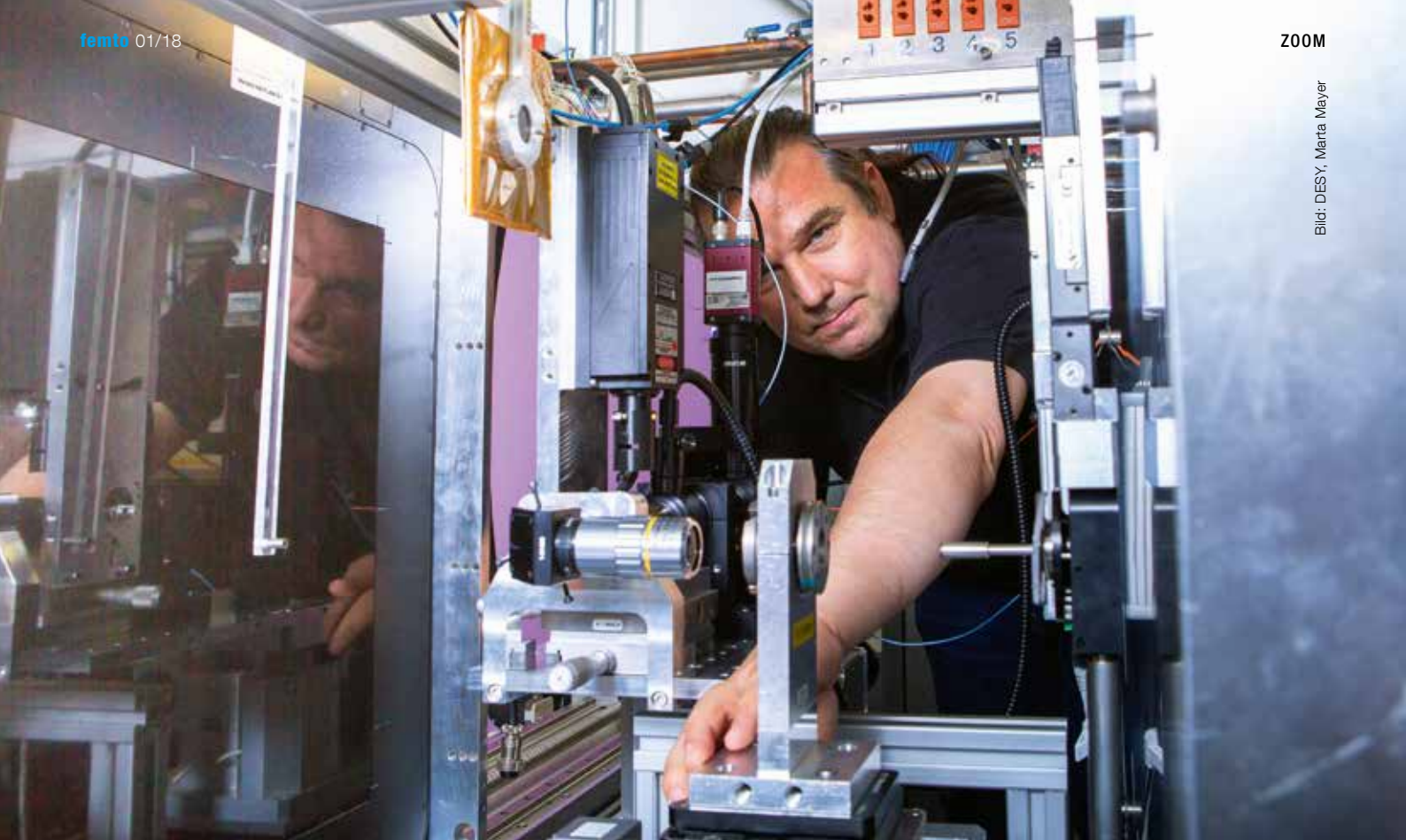
Die Messungen finden in der großen Experimentierhalle von PETRA III statt – an der „Extreme Conditions Beamline“, einer der Messstationen in der Halle. Der Versuchsaufbau steht auf einem massiven, vibrationsgedämpften Tisch. „Er muss möglichst schwingungsfrei sein, sonst erhalten wir kein klares Röntgenbild von der Probe“, erläutert Liermann.

Dann zeigt der gelernte Mineraloge auf ein Arrangement von Spiegeln, Linsen und Blenden – Teile eines Speziallasers, der kräftige Infrarotstrahlen erzeugt. Damit heizen die Fachleute ihre

Proben – schließlich herrschen im Erdinneren nicht nur enorme Drücke, sondern auch Temperaturen von einigen tausend Grad. Mit einem gepulsten Laser lassen sich bis zu 10 000 Grad Celsius erreichen. Braucht es für ein Experiment nur 2000 Grad, tut es auch ein simpleres Heizverfahren, bei dem Strom durch ein Graphitplättchen geschickt wird.

Simulierte Reise zum Mittelpunkt der Erde

Um mit der Apparatur eine simulierte Reise zum Mittelpunkt der Erde zu unternehmen, ziehen die Forscher zunächst mehrere Präzisionsschrauben an der Zelle vorsichtig an. Dadurch richten sie die beiden Diamantstempel aus. Mit Hilfe weiterer Schrauben schieben sie dann die Stempel behutsam gegeneinander, um den Druck zwischen ihnen kontrolliert zu erhöhen. „Große Kräfte sind dafür gar nicht nötig“, erläutert Liermann. „Zieht man die Schrauben zu stark an, würde man so hohe Drücke erzeugen, dass die Diamanten kaputtgehen.“ Auch ohne solch ein Missgeschick halten die Edelsteine nicht ewig: Nach spätestens fünfzehn Experimenten sind sie so stark lädiert, dass sie repariert werden müssen.



„Da die Proben so klein sind, brauchen wir sehr feine, intensive und kurzweilige Strahlung“

Hanns-Peter Liermann, DESY

Zu Beginn eines Experiments wird der Druck auf die Probe nach und nach erhöht. Zugleich heizen die Forscher sie immer weiter auf und scannen dadurch einen großen Druck- und Temperaturbereich ab. Um zu analysieren, wie sich das Material unter der Tortur verändert, wird es mit hellem Röntgenlicht durchleuchtet. „Da die Proben so klein sind, brauchen wir sehr feine, intensive und kurzweilige Strahlung“, betont Hanns-Peter Liermann. „Dafür eignet sich PETRA III ideal, denn die Anlage kann mikrometerfeine Röntgenstrahlen erzeugen.“

Die Strahlung wird von den Atomen der Probe gestreut, ein Detektor zeichnet das resultierende Streubild auf. Anhand dieser Messdaten können die Forscher rekonstruieren, wie sich Dichte und Kristallstruktur der Probe bei hohen Drücken und Temperaturen verändern. Zwar kennen die Geowissenschaftler die ungefähre chemische Zusammensetzung im Erdinneren.

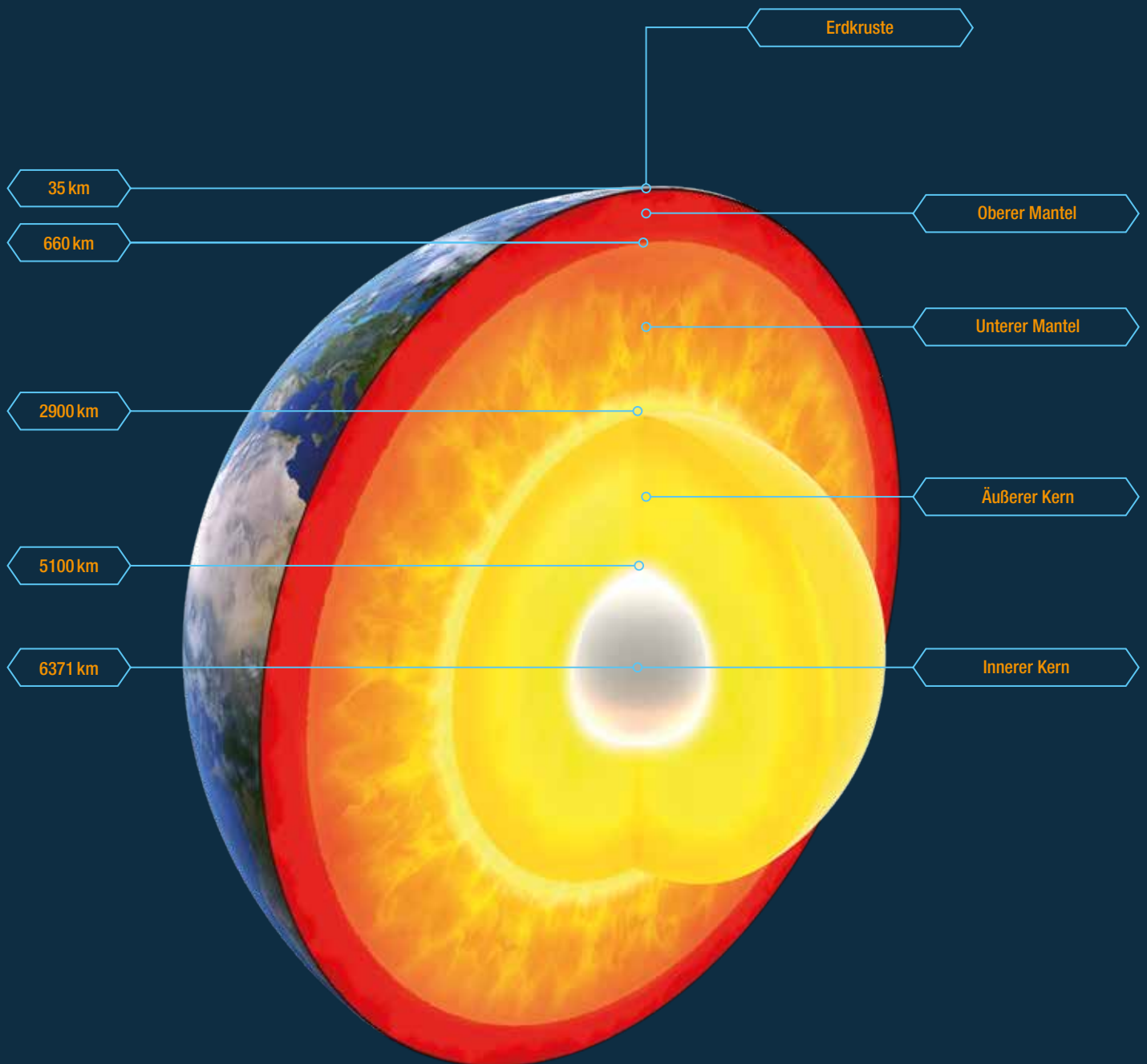
Doch welche Kristallphasen sich dort finden, verraten erst die Hochdruckexperimente.

Wichtig sind diese Informationen für die Seismologen. Sie messen jene seismischen Wellen, die durch Beben ausgelöst werden und anschließend durch die Erde wandern. Die Wellen können dabei als Sonden fungieren – sie geben Auskunft über die verschiedenen Gesteinsarten und -zustände, die sie auf ihrer Reise passieren. Nur: Um die Signale richtig interpretieren zu können, muss man die Eigenschaften der Gesteine bei hohen Drücken und Temperaturen kennen. „Hier kommen wir ins Spiel“, sagt Liermann. „Wir können diese physikalischen Eigenschaften im Labor gezielt untersuchen.“

Magma-Ozeane

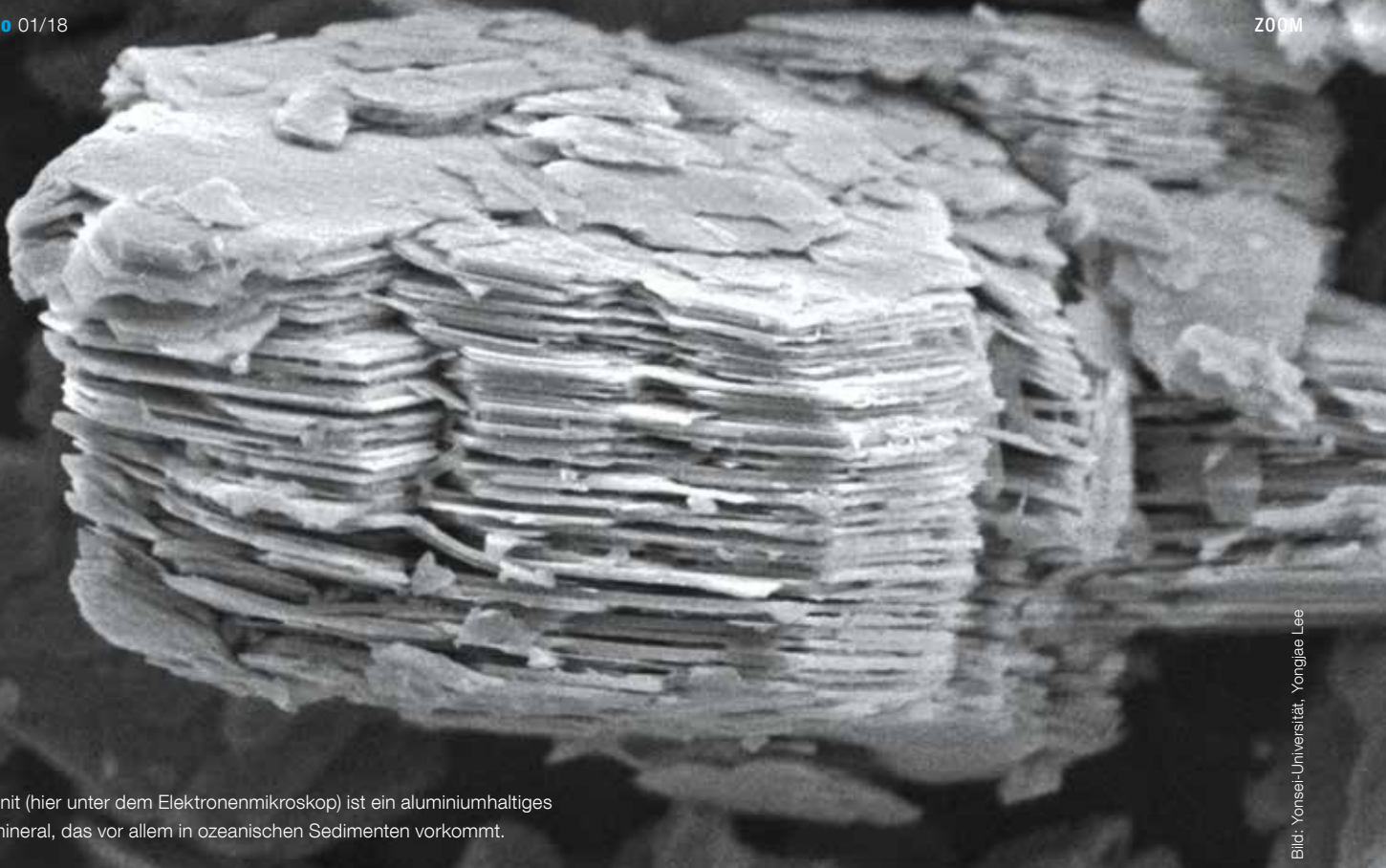
An der „Extreme Conditions Beamline“ messen Forscherteams aus aller Welt – im Laufe der Zeit gelangen ihnen eindrucksvolle Experimente. So fanden sie heraus, dass geschmolzener Basalt im unteren Erdmantel, in Tiefen von 1500 Kilometern, seine Struktur verändert und in einen steiferen und dichteren Zustand übergeht. Das Resultat gibt Aufschluss über die Entstehung unseres Planeten und stützt die Hypothese, dass der Mantel der jungen Erde zwei unterirdische Magma-Ozeane beherbergt hat, getrennt durch eine feste Schicht. Heute sind diese urzeitlichen

Hanns-Peter Liermann leitet die Messstation „Extreme Conditions Beamline“ an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III.



Expedition in die Tiefe

Geologisch gesehen ist die Erde eine Art Zwiebel aus mehreren Schalen. Innen befindet sich der Kern mit einem Radius von knapp 3500 Kilometern. Er besteht vor allem aus Eisen und ist bis zu 6000 Grad Celsius heiß. Dann kommt der Mantel, er setzt sich aus mittelschweren Stoffen zusammen, es herrschen Temperaturen bis zu 2000 Grad. Darüber folgt die Erdkruste, auf deren Oberfläche wir leben. Sie besteht aus leichteren Gesteinen und ist im Schnitt nur etwa 35 Kilometer dick – ein winziger Bruchteil des Erdradius von 6370 Kilometern.



Kaolinit (hier unter dem Elektronenmikroskop) ist ein aluminiumhaltiges Tonmineral, das vor allem in ozeanischen Sedimenten vorkommt.

Bild: Yonsei-Universität, Yongjae Lee

Magma-Ozeane kristallisiert, aber geschmolzener Basalt dürfte noch in lokalen Taschen existieren.

Ein anderes Forscherteam spürte eine neue, wasserreiche Variante des Tonminerals Kaolinit auf, die eine Rolle in der Entstehung von Vulkanismus spielen dürfte. Kaolinit gelangt in die Tiefe, wenn sich eine ozeanische Platte in einer sogenannten Subduktionszone unter eine Kontinentalplatte schiebt. In ihren Versuchen konnten die Forscher die in den Subduktionszonen herrschenden Bedingungen simulieren und dabei eine neue Kristallform von Kaolinit entdecken, die außergewöhnlich viel Wasser speichert. Diese wasserreiche Kaolinit-Phase bildet sich in Tiefen um die 70 Kilometer. Dann wird sie per Subduktion in größere Tiefen verfrachtet, bis sie sich bei etwa 200 Kilometern umwandelt und dabei große Teile des Wassers freigibt. Dieses Wasser könnte die Entstehung von Magma begünstigen – und dadurch die Bildung von eruptiven Vulkanen.

Meteoriteneinschläge im Mikroformat

Bei PETRA III lassen sich sogar Meteoriteneinschläge nachbilden – allerdings im Mikroformat. Bei diesen Versuchen werden die „Daumenschrauben“ nicht allmählich angezogen. Stattdessen sorgen spezielle Piezoaktuatoren dafür, dass sich der Druck zwischen den Diamanten innerhalb von wenigen Millisekunden schlagartig

„Bislang können wir mit dynamischen Stempelzellen nur die Randbereiche eines Asteroideneinschlags simulieren. Am European XFEL werden wir ab 2019 zum Kernbereich eines Impakts vorstoßen“

Hanns-Peter Liermann, DESY

erhöht. Die in diesen „dynamischen Diamantstempelzellen“ entstehenden Kristallformen vergleichen die Geologen dann mit Mineralproben, die sie in Meteoriten oder nahe alten Einschlagstellen von Asteroiden gefunden haben. Die Resultate können helfen, Größe und Art eines Einschlags genauer abzuschätzen.

Bei DESY wurde unter anderem untersucht, wie sich Quarz bei einem heftigen Einschlag verhält. So deuten die Versuche darauf hin, dass gewisse Hochdruck-Kristallphasen am Rand eines Einschlagkraters gar nicht entstehen – überraschend für die Fachwelt. Und ein Team der Uni

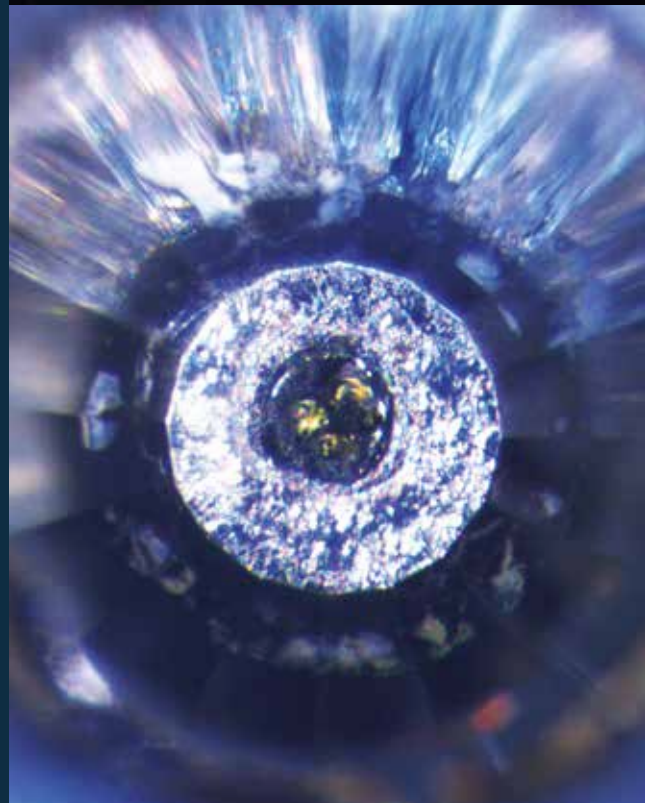
Bayreuth konnte enträtseln, weshalb verschiedene Quarz-Formen in ein- und demselben Mondmeteoriten existieren können. Zuvor hatte man angenommen, dass die verschiedenen Formen unter sehr unterschiedlichen Bedingungen entstehen. Nach den Versuchen an PETRA III war klar, dass sie sich auch unter ähnlichen Bedingungen bilden können – vorausgesetzt, die Materialien werden bei einem Einschlag nicht gleichmäßig, sondern ungleichmäßig zusammengepresst.

Eine dynamische Diamantstempelzelle bauen Liermann und seine Kollegen nun auch für den europäischen Röntgenlaser European XFEL im Rahmen des HIBEF-Konsortiums (Helmholtz International Beamline for Extreme Fields). Der Grund: Der neue Gigant liefert deutlich kürzere Röntgenblitze als PETRA III. „Das wird die Analyse von noch schnelleren Kompressionsvorgängen erlauben“, erläutert der Mineraloge. „Bislang können wir nur die Randbereiche eines Asteroideneinschlags simulieren. Am European XFEL werden wir ab 2019 zum Kernbereich eines Impakts vorstoßen können.“

Wuchtiger Klotz

Etwa zur gleichen Zeit wird ein weiterer Hochdruck-Messstand bei PETRA III seinen Betrieb aufnehmen: In der neuen Experimentierhalle „Paul P. Ewald“ wird gerade die „Large Volume Press“-Beamline aufgebaut. Basis ist ein wuchtiger Klotz, viereinhalb Meter hoch und 35 Tonnen schwer – die Riesenstempelzelle. Ihre sechs Hydraulikstempel schaffen einen Druck bis zu einem Megabar. Das ist zwar weniger als bei der Diamantstempelzelle, dafür lassen sich deutlich größere Proben komprimieren und mit Röntgenstrahlung untersuchen: Statt einigen zehn Mikrometern können die Proben Millimeter-Ausmaße haben, bei manchen Versuchen dürfen sie sogar Zentimeter messen – die Größe eines Zuckerwürfels. Der Vorteil: „Wir können richtige Gesteinsproben analysieren, die aus mehreren Phasen bestehen“, sagt DESY-Forscher Robert Farla. „Dadurch lassen sich Fragestellungen angehen, die man mit den Diamantstempeln kaum beantworten kann – zum Beispiel, wie eine Flüssigkeit oder eine Schmelze in einem unter Hochdruck stehenden Mineralgemisch transportiert wird.“

Alle sechs Stempel der Presse lassen sich unabhängig voneinander bewegen. Dadurch können die Experten eine Gesteinsprobe gezielt zusammendrücken und deformieren. Ein Laser-Positioniersystem sorgt dafür, dass sich alle sechs Stempel mit einer Präzision von unter einem Mikrometer einstellen lassen. Die Hydraulikstempel pressen die Probe nicht direkt zu-



Künstliches Magma: Mit starken Infrarotlasern haben Forscher um Chrystèle Sanloup von der Universität Edinburgh (heute Sorbonne Paris) Basaltproben in einer Stempelzelle (unten) durch den Diamanten hindurch auf mehrere tausend Grad Celsius aufgeheizt. Die Untersuchung lieferte Belege für die Existenz unterirdischer Magma-Ozeane im Mantel der jungen Erde. In der Probe sind drei Löcher zu erkennen (oben), die von drei Erhitzungs- und Messdurchgängen stammen.

sammen, sondern geben den Druck an mehrere Sekundärstempel weiter, die aus extrem hartem Wolframcarbid bestehen. Diese wiederum komprimieren eine Halterung aus Magnesiumoxid, in der dann die eigentliche Gesteinsprobe steckt.

„Für gewöhnlich braucht es ein bis zwei Stunden, um den angestrebten Druck zu schaffen“, sagt Farla. „Außerdem können wir die Probe auf bis zu 2400 Grad Celsius heizen, indem wir

Strom durch Graphit oder ein anderes Heizmaterial schicken, das um die Probe herum angebracht ist.“ Auf Wunsch kann die Presse den Druck dauerhaft halten, wodurch sie wochenlange Syntheseexperimente erlaubt. Damit lassen sich hochreine Gesteinsproben ohne natürliche Verunreinigungen herstellen sowie Proben, die selektiv mit Elementen dotiert sind – eine Laborküche für synthetische kristalline Materialien.

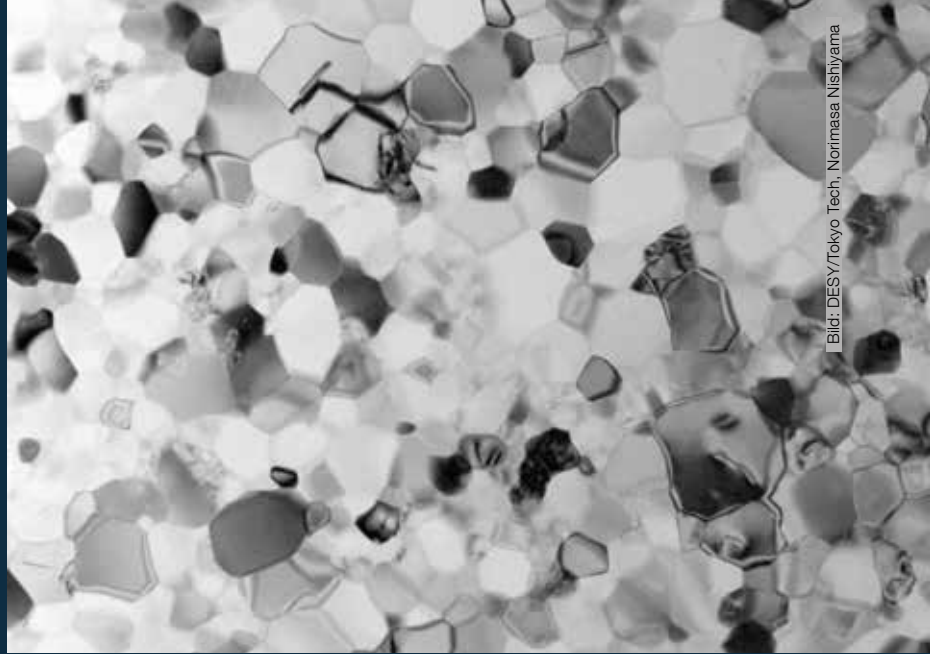


Bild: DESY/Tokyo Tech, Norimasa Nishiyama

„Mit unserer Riesenstempelzelle wollen wir herausfinden, wie sich Mineralien verwandeln und Flüssigkeiten oder Schmelzen in einem Gestein unter extremen Bedingungen transportiert werden“

Robert Farla, DESY

Gequetschte Proben

Seit 2015 ist die Presse in Betrieb – allerdings noch ohne die Möglichkeit, sie mit der Röntgenstrahlung von PETRA III zu untersuchen. Doch auch ohne Strahl waren Experimente machbar: Unter anderem gelang erstmals die Herstellung eines neuen Spezialmaterials – einer transparenten Variante von kubischem Siliziumnitrid. Der Werkstoff ist nicht nur durchsichtig, sondern auch extrem hart und hitzebeständig, was ihn für Spezialanwendungen in der Industrie interessant machen könnte.

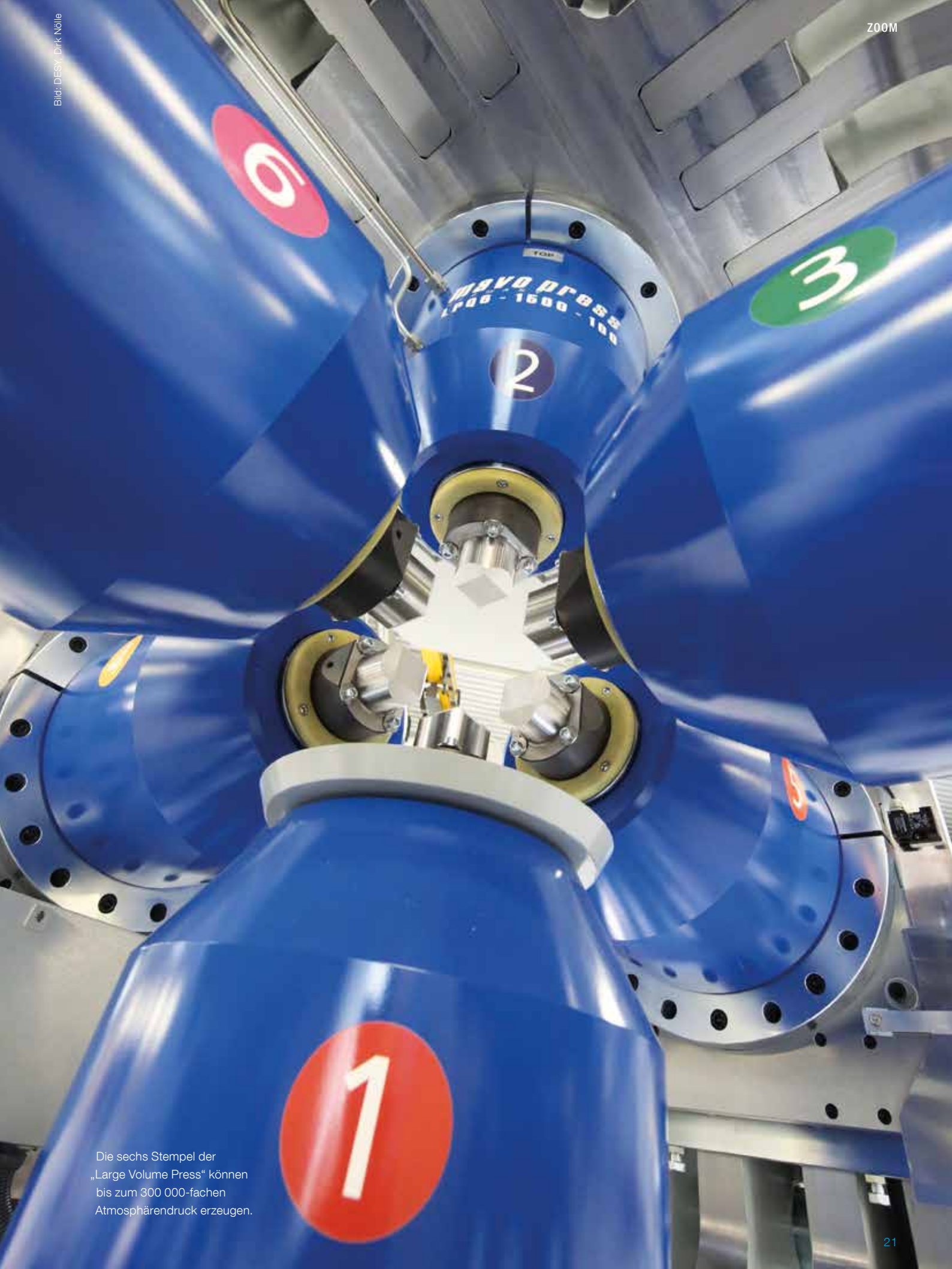
Ab 2019 können Wissenschaftler aus aller Welt die von der Riesenstempelzelle gequetschten Proben auch mit dem millimetergroßen, polychromatischen Röntgenstrahl von PETRA III analysieren. Um die Proben komplett durchleuchten zu können, muss die Strahlung sehr hochenergetisch und intensiv sein. Damit sie nicht nach außen dringt, bestehen die Wände der Experimentierhütte aus bis zu 50 Zentimeter dickem Spezialbeton.

„Mit unserer Riesenstempelzelle wollen wir unter anderem herausfinden, wie sich Mineralien verwandeln und Flüssigkeiten oder Schmelzen in einem Gestein unter extremen Bedingungen transportiert werden“, sagt Robert Farla. „Wie zum Beispiel hängt das Fließverhalten eines Gesteins im Inneren der Erde von seinem Schmelzgrad und der Größe seiner Körnchen ab?“ Die Resultate sollen helfen, eine der spannendsten Frage der Geowissenschaften zu beantworten – wie im Detail die Erde entstanden ist und was sie zu einem bewohnbaren Planeten machte.

Elektronenmikroskopaufnahme von kubischem Siliziumnitrid. Die Korngröße beträgt rund 150 Nanometer (millionstel Millimeter).

PETRA IV

Seit 2010 steht PETRA III der internationalen Forschungsgemeinschaft zu Verfügung – als leistungsfähigste Röntgenquelle ihrer Art. Doch schon jetzt arbeitet DESY an den Plänen für ein Upgrade des Speicherrings: PETRA IV soll noch feinere Strahlen liefern, die zudem eine deutlich höhere Kohärenz aufweisen, also in ihren Eigenschaften einem Laser ähnlicher werden. Für Hochdruckexperimente würde PETRA IV neue Horizonte eröffnen: Unter anderem könnte man mit Diamantstempelzellen nicht nur reine Phasen, sondern Mineralgemische analysieren und die Qualität der Abbildungen deutlich steigern.



Die sechs Stempel der „Large Volume Press“ können bis zum 300 000-fachen Atmosphärendruck erzeugen.

WASSERSPALTER UND STROMWANDLER

Wie Hochdruckexperimente helfen, neue Werkstoffe zu entwickeln

Hochdruckexperimente, wie sie bei DESY in Hamburg stattfinden, sind nicht nur für Geowissenschaftler und Astrophysiker interessant. Auch Materialforscher profitieren, denn bei hohen Drücken und Temperaturen können neuartige Werkstoffe mit interessanten Eigenschaften entstehen – klassisches Beispiel ist die Fertigung von Industriediamanten aus Graphit. John Parise von der Stony Brook University in den USA ist ein renommierter Experte für die Hochdrucksynthese neuartiger Materialien. Sein Team sucht nach Katalysatoren, die Wassermoleküle effizient aufspalten.

femto: Was ließe sich mit solchen Wasserspalter-Katalysatoren anfangen?

John Parise: Unsere Katalysatoren könnten unter anderem dazu dienen, Wasserstoff als umwelt- und klimafreundlichen Treibstoff zu gewinnen. Die Idee klingt simpel: Man gibt den Katalysator ins Wasser, setzt ihn Licht aus – und heraus kommen Wasserstoff und Sauerstoff.

femto: Warum benötigen Sie für Ihre Experimente hohe Drücke?

John Parise: Die Katalysatoren, die wir entwickeln, basieren auf sogenannten Metall-Oxinitriden, das sind Verbindungen eines Metalls mit Sauerstoff und Stickstoff. Stellt man diese Stoffe unter Normaldruck her, neigt der Stickstoff dazu zu entweichen. Lässt man die Reaktion dagegen in einer Druckkammer bei mehreren zehntausend Atmosphären ablaufen, kann der Stickstoff in der Verbindung gehalten werden. Außerdem lässt sich unter Hochdruck das Verhältnis zwischen Sauerstoff und Stickstoff im Molekül besser einstellen. Dadurch können

wir gezielter steuern, welche Art von Molekül entsteht.

femto: Einige Ihrer Experimente machen Sie an einem Synchrotron, wo Sie die Reaktionsabläufe mit intensiver Röntgenstrahlung beobachten können. Welchen Vorteil bringt das?

John Parise: Hochdruckexperimente sind schwierig und langwierig – oft dauert ein einziger Versuch einen Tag. Doch mit einem Experiment ist es meist nicht getan: Um herauszufinden, bei welchem Druck und welcher Temperatur das gewünschte Molekül entsteht, musste man früher oft monatelang herumtüfteln und aufwendige Versuchsreihen fahren. Heute können wir die Reaktion, während sie abläuft, mit der intensiven Röntgenstrahlung aus dem Synchrotron beobachten. Damit können wir in wenigen Stunden herausfinden, bei welchem Druck und welcher Temperatur die gewünschte Verbindung entsteht. Dann kennen wir die Reaktionsbedingungen und können zuhause in unserem Labor größere Mengen gezielt herstellen und anschließend herausfinden, wie effektiv sie Wasser spalten. Der Einsatz von Synchrotronstrahlung

beschleunigt unsere Forschung also enorm, um das 30- bis 40-Fache.

femto: Helfen die Experimente am Synchrotron auch, das Verständnis über die Katalysatoren zu vertiefen?

John Parise: Auf jeden Fall. Die Theoretiker haben immer neue Ideen, wie ein effektiver Wasserspalter aussehen könnte. Mithilfe der Synchrotronstrahlung können wir dann relativ schnell sagen: Ja, diese Stoffe gibt es tatsächlich, aber sie haben eine etwas andere Kristallstruktur als prognostiziert. Das wiederum hilft den Theoretikern dabei, ihre Modelle zu verbessern und zu verfeinern.

femto: Arbeiten Sie noch an den Grundlagen, oder ist bald mit konkreten Anwendungen zu rechnen?

John Parise: Im Moment stehen wir noch am Anfang und versuchen, das Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment zu verbessern. Wir machen Fortschritte, aber es ist schwer vorzusagen, ob und wann sich das in marktreife Produkte übersetzen lässt. Solche Hochdrucksynthesen sind teuer. Deswegen suchen wir, wenn wir ein vielversprechendes Material gefunden haben, immer nach Möglichkeiten, es auch bei weniger hohen Drücken herstellen zu können. Das gilt nicht nur für unsere Katalysatoren, sondern auch für Forscher, die mit Hochdruckexperimenten nach neuen Supraleitern suchen oder nach sogenannten thermoelektrischen Materialien, die Wärme effizient in Strom umwandeln können.

Warum Forscher Diamanten verpulvern

femtopolis

Bild: DESY, Gesine Bönn

„**D**iamonds Are Forever“, sang Shirley Bassey in dem gleichnamigen James-Bond-Film aus dem Jahr 1971. Auch heute noch gelten Diamanten als Inbegriff von Dauerhaftigkeit und Härte – auch wenn die funkelnden Kleinode aus Kohlenstoff unter bestimmten Bedingungen verbrennen. Im Verlobungsring symbolisiert der in Gold gefasste Diamant die Unzerbrechlichkeit der Liebe. Weit weniger romantisch nutzen Wissenschaftler die stabilen Steine, um Materialproben in Diamantstempelzellen so stark zu quetschen, dass diese die Geheimnisse von Materie unter Hochdruck wie im Erdinneren preisgeben. Das ist nur eine der vielseitigen Anwendungen für Diamanten in der Forschung.

Die edlen Steine sind aber auch selbst Forschungsobjekte: So hat ein Forscherteam an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III aufgedeckt, dass winzige Einschlüsse von Granat in einem Diamanten ungewöhnlich stark

Diamant und Graphit sind zwei unterschiedliche Formen von Kohlenstoff, die sich ineinander umwandeln lassen. Den Ablauf der sogenannten Graphitisierung von Diamant haben die Forscher nun per Röntgenlaser erstmals detailliert verfolgt.

oxidiertes Eisen enthalten, wenn die Steine in großer Tiefe entstanden sind. Die Forscher vermuten, dass in der Übergangszone zum unteren Erdmantel chemische Reaktionen zwischen Eisen und Kohlenstoff stattfinden, die möglicherweise eine wichtige Rolle im Kohlenstoffkreislauf der Erde spielen. Diamanten lassen also tief blicken.

Doch warum verpulverte ein anderes Forscherteam mit einigem Aufwand die edlen Steine in schnödes Graphit, das in jeder Bleistiftmine vorhanden ist? Was den materiellen Wert drastisch mindert, dient dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn. Mit einem Röntgenlaser ließ sich die Phasenumwandlung zwischen Diamant und Graphit, die beide nichts weiter sind als verschiedene Zustände von Kohlenstoff, zum ersten Mal detailliert beobachten. Den Prozess dieser Graphitisierung zu verstehen, ist für alle diamantbasierten Technologien von Bedeutung, da Diamant zuneh-

mend für industrielle Anwendungen genutzt wird.

Diamant und Graphit unterscheiden sich durch ihre innere Kristallstruktur. Diamant ist die Hochdruckvariante des Kohlenstoffs, die sich im Inneren der Erde bildet und unter unseren Normalbedingungen an der Erdoberfläche metastabil ist. Das bedeutet, Diamant wandelt sich unter Normalbedingungen von selbst in Graphit um, wenn der Vorgang mit ausreichender Energiezufuhr angestoßen wird. Es gibt dazu verschiedene Wege, unter anderem durch Erhitzen unter Ausschluss von Sauerstoff oder sogar durch mechanische Schläge. Der umgekehrte Weg funktioniert auch: Mit Hitze und Hochdruck lassen sich aus Graphit künstliche Diamanten formen, die bereits einen erheblichen weltweiten Markt darstellen. Entwarnung also für Juwelenfans!

EISPLANETEN, GASRIESEN UND WEISSE ZWERGE

Wie der europäische Röntgenlaser European XFEL das Innenleben ferner Himmelskörper erkunden soll

Schenefeld bei Hamburg, die Experimentierhalle des European XFEL. Carsten Bähzt steuert das hintere Ende der Halle an und zeigt auf eine Hütte aus Schwerbeton, um die herum noch fleißig gebaut wird: „In dieser Hütte werden wir extreme Materiezustände erzeugen“, erklärt der Physiker vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. „Wir wollen Bedingungen herstellen, wie sie zum Beispiel im Inneren riesiger Gasplaneten herrschen.“ Die Hütte gehört zu HED, einer der sechs Experimentierstationen am European XFEL. Der Name ist Programm: HED steht für „High Energy Density“ – hohe Energiedichte. 2019 sollen die Versuche starten und neue Details über die Entstehung von Jupiter, Saturn und fernen Exoplaneten liefern.

„Wir wollen Bedingungen herstellen, wie sie zum Beispiel im Inneren riesiger Gasplaneten herrschen“

Carsten Bähzt, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

„Wir wollen Drücke bis zu zehn Megabar und Temperaturen bis zu einer Million Grad erzeugen“, erläutert Ulf Zastra, beim European XFEL verantwortlich für HED. „Solche Bedingungen lassen sich statisch nur noch sehr mühsam mit Diamantstempelzellen herstellen.“ Stattdessen setzen die Fachleute auf eine andere Methode: Sie feuern ultrastarke Laserpulse auf Materialproben. Dadurch werden die Proben so stark erhitzt und komprimiert, dass sie in einen speziellen, exotischen Zustand geraten – die „warme dichte Materie“.

Damit bezeichnen Experten den Übergang vom gewöhnlichen Festkörper zu einem Plasma: Zwar ist die Materie ähnlich gepackt wie in einem Kristall, aber fast so energiereich wie ein Plasma, ein elektrisch leitfähiges, heißes Gas. „Warme

dichte Materie gibt es unter anderem im Inneren großer Planeten“, beschreibt Gianluca Gregori, Physikprofessor an der Universität Oxford. „Aber wir vermuten sie auch in weißen Zwergen.“ Das sind alte Sterne, deren Brennstoff zur Neige gegangen ist.

Eine Million Grad

Um warme dichte Materie im Labor zu erzeugen, braucht es große, starke Laser. Sie stehen auf dem Dach der HED-Betonhütte, quasi im ersten Stock. Zur Verfügung gestellt werden sie von HIBEF (Helmholtz International Beamline for Extreme Fields), einem internationalen Nutzerkonsortium angeführt vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. „Wir bauen zwei Laser auf“, sagt HIBEF-Projektleiter Toma Toncian. „Der eine generiert sehr kurze und starke Lichtblitze mit einer Leistung von bis zu 300 Terawatt pro Puls.“ Der andere ist auf die Erzeugung von Pulsen mit hoher Energie gedrillt. Sie sollen bis zu 100 Joule stark sein. Beide Anlagen sollen bis zu zehn Blitze pro Sekunde abfeuern können.

Innerhalb von Sekundenbruchteilen kann so ein 100-Joule-Laserpuls die Oberfläche einer Materialprobe auf bis zu eine Million Grad Celsius aufheizen. „Bildlich gesprochen generiert der Laser dabei einen Hammerschlag“, erläutert Zastra. „Und dieser Hammerschlag schickt eine Schockwelle durchs Material.“ Diese Welle komprimiert und erhitzt die Probe und erzeugt dadurch den Zustand der warmen dichten



Ulf Zastra,
European XFEL

Bild: European XFEL

Experimentierkammer
des High-Energy-Density-
Instruments am Röntgen-
laser European XFEL.



Bild: European XFEL

Der 3,4 Kilometer lange Röntgenlaser versorgt insgesamt sechs Messstationen mit ultrahellen Röntgenblitzen.



Bild: European XFEL, Jan Hosan

„Bildlich gesprochen generiert der Laser einen Hammerschlag“

Ulf Zastrau, European XFEL

Materie. Allerdings währt das Ganze keine milliardstel Sekunde lang – danach ist die Probe verdampft und regelrecht pulverisiert. „Es bleibt also nur ein winziges Zeitfenster, um das Phänomen zu untersuchen“, sagt Zastrau. „Das schaffen wir nur mit den Röntgenblitzen des European XFEL.“

Mit einer Länge von 3,4 Kilometern ist die Anlage der größte Röntgenlaser der Welt. Basis ist der weltweit längste supraleitende Teilchenbeschleuniger. Er bringt Elektronen nahezu auf Lichtgeschwindigkeit und schickt sie durch spezielle Magnetstrukturen, sogenannte Undulatoren. Diese zwingen die schnellen Elektronen auf eine Slalombahn – mit der Folge, dass die Teilchen kurze, starke Röntgenblitze aussenden. Sie landen in der unterirdischen Riesenhalle in Schenefeld, aufgeteilt auf sechs Experimentierstationen.

Ultraschnelle Schnappschüsse

Während Synchrotron-Röntgenquellen wie PETRA III optimal sind, um chemische und physikalische Vorgänge beispielsweise in Materialien unter Hochdruck kontinuierlich und zerstörungsfrei räumlich und zeitlich zu verfolgen, liefern Röntgenlaser wie der European XFEL ultrakurze Röntgenpulse, die milliardenfach heller sind und Lasereigenschaften haben, so dass sie Schnappschüsse von extrem schnellen Vorgängen erlauben. Damit sind sie bestens geeignet, um die warme dichte Materie detailliert zu studieren.

„Da dieser Materiezustand nur sehr kurz existiert, brauchen wir extrem kurze Röntgenblitze, um ihn analysieren zu können“, sagt Oxford-Physiker Gianluca Gregori. „Dafür ist der European XFEL das ideale Werkzeug.“

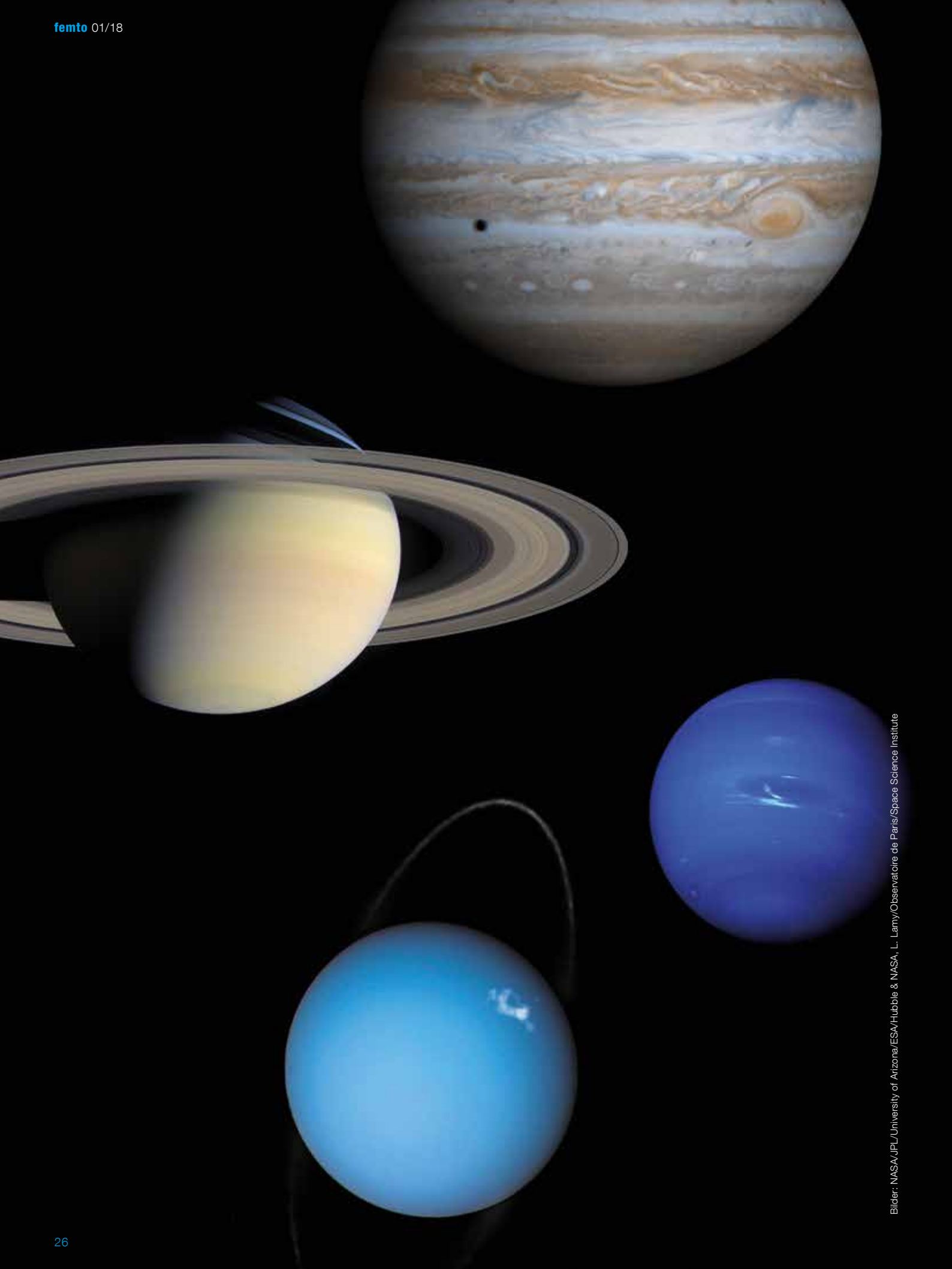
Erforschen wollen die Wissenschaftler unter anderem das Innenleben von Planeten – von Eiswelten wie Neptun und Gasriesen wie Jupiter, aber auch von fernen „Supererden“. Das sind Gesteinsplaneten außerhalb des Sonnensystems, von denen Astronomen immer mehr entdecken. Die spannendste Frage: Könnten manche dieser Welten Bedingungen bieten, die das Entstehen von Leben erlauben?

Günstig dürfte sein, wenn ein Planet ebenso wie die Erde ein Magnetfeld besitzt, das ihn vor der kosmischen Strahlung schützt. „Von den Eigenschaften der warmen dichten Materie könnte es abhängen, ob ein Planet ein Magnetfeld hat oder nicht“, erklärt Gregori. „Dieses Magnetfeld könnte dann als Schutzschild für die Entstehung von Leben dienen.“ Die Versuche am European XFEL sollen die Eigenschaften der warmen dichten Materie näher beleuchten und wichtige Daten liefern, um die Theorien der Planetenentstehung zu verfeinern.

Gasplaneten im Labor

Bei Eisriesen wie Neptun und Uranus wollen die Fachleute erkunden, wie sich Wasser und Methan bei hohen Drücken und Temperaturen verhalten. Wissenschaftler vermuten, dass sich Methan im Planeteninneren in Kohlenstoff und Wasserstoff aufspaltet. Der Kohlenstoff dürfte sich dann sogar zu Nanodiamanten verdichten – ein Prozess, den Forscher bereits im Labor nachweisen konnten. Interessant ist auch die Frage, was mit jenem Wasser passiert, das in großen Mengen im Inneren von Neptun vermutet wird: Wird es unter Hochdruck zu Eis oder verwandelt es sich zu einer bislang hypothetischen Phase – dem „superionischen“, elektrisch höchst leitfähigen Wasser?

Außerdem im Fokus: das Innenleben von Gasriesen wie Saturn und Jupiter, bestehend aus Wasserstoff und Helium. Jupiter ist nach der Sonne der größte Himmelskörper unseres Sonnensystems und besitzt mehr Masse als alle



Bilder: NASA/JPL/University of Arizona/ESA/Hubble & NASA, L. Lamy/Observatoire de Paris/Space Science Institute



Gasriesen und Supererden

Mit dem Röntgenlaser European XFEL stoßen die Forscher auch in ferne Welten vor. Mit der Anlage lassen sich beispielsweise die Bedingungen in großen Gasplaneten wie Jupiter, Saturn, Neptun und Uranus (links, von oben nach unten) simulieren und untersuchen. Die Astrophysik im Labor soll aber auch Fragen zur Entstehung großer Gesteinsplaneten in anderen Sonnensystemen beantworten, sogenannter Supererden (rechts, Zeichnungen).

ASTROPHYSIK IM LABOR

Der Freie-Elektronen-Laser FLASH nimmt exotischen Materiezustand ins Visier

Am European XFEL planen die Experten spektakuläre Experimente, um das Innere riesiger Planeten und auch bestimmter Sterntypen zu simulieren. Wichtige Pionierexperimente dafür wurden bereits am Prototyp aller Freie-Elektronen-Röntgenlaser bei DESY gemacht: Die Anlage FLASH erzeugt intensive Laserpulse aus „weichem“, also relativ langwelligem Röntgenlicht.

„FLASH liefert kurze Laserblitze, die wir mit einer speziellen Technik in zwei Hälften teilen“, erläutert DESY-Physiker Sven Toleikis. „Mit der ersten Hälfte erzeugen wir die warme dichte Materie. Den zweiten Blitz können wir ein wenig verzögern, um mit ihm diesen Materiezustand zu analysieren.“ Der zeitliche Abstand zwischen dem „Erzeuger“ und dem „Beobachter“

lässt sich dabei gezielt variieren. Dadurch können die Forscher in einer Art Diashow verfolgen, wie sich die Erzeugung des exotischen Materiezustands entwickelt.

Unter anderem feuern die Fachleute ihre FLASH-Blitze auf dünne Aluminiumfolien. Dabei bildet sich für wenige Nanosekunden der Zustand der warmen dichten Materie – zigtausend Grad heiß. Eine Zehntelsekunde später folgt an einer anderen Stelle der nächste Schuss – die Folie wird buchstäblich abgerastert.

Mit diesen Versuchen gelangen relevante Basiserkenntnisse: Die Forscher fanden heraus, wie sich die Energie der Laserpulse zuerst an die Elektronen, dann an die Atomkerne des Aluminiums übertrug. „Solche experimentellen Daten sind wichtig, um die Theorien über die warme

dichte Materie zu verbessern“, sagt Toleikis. „Die nämlich sind derzeit noch ziemlich fehlerbehaftet.“

Außerdem schossen die Physiker die Laserblitze auf feinste Tröpfchen aus minus 250 Grad Celsius kaltem und damit flüssigem Wasserstoff. Das Gas ist Hauptbestandteil von Riesenplaneten wie Jupiter und Saturn, und flüssiger Wasserstoff besitzt eine Dichte, wie sie in den unteren Atmosphärenschichten der Gasriesen vermutet wird.

Die Versuche bei FLASH zeigten in einer Art Superzeitlupe, wie sich der kalte Wasserstoff schlagartig auf 12 000 Grad erhitzte. Daraus konnten die Wissenschaftler auf dessen Wärmeleitfähigkeit und auf bestimmte Energieaustauschprozesse schließen – Größen, die für Planetenmodelle von Bedeutung sind.



Bild: DESY, Heiner Müller-Elsner

anderen Planeten zusammen. In seinem Inneren dürften Drücke von bis zu 50 Millionen Atmosphären und Temperatur von bis zu 10 000 Grad herrschen – und damit der Zustand der warmen dichten Materie.

Im Inneren eines solchen Gasriesen werden Wasserstoff und Helium ab einer gewissen Tiefe flüssig – so hoch ist der Druck. „Sind beide gasförmig oder flüssig, mischen sich Helium und Wasserstoff gut“, erläutert Ulf Zastrau. „Anders, wenn nur eines von beiden flüssig ist und das andere noch gasförmig.“ Dann nämlich könnten sich zum Beispiel Heliumtröpfchen in einer Wasserstoffatmosphäre bilden – so die Theorie. Um sie zu prüfen, sind die Forscher auf Laborexperimente angewiesen. „Eine Sonde wird niemals so tief in einen Gasriesen hineinfliegen können“, sagt Zastrau. „Das würde sie nie überstehen.“

Künstliche Sonnenatmosphäre

Gleiches gilt für Prozesse, die sich in noch größeren Tiefen abspielen: Hier könnte Wasserstoff unter dem gewaltigen Druck metallisch werden, also elektrisch leitend. Vor einiger Zeit hatten mehrere Forscherteams behauptet, experimentelle Hinweise auf eine metallische Wasserstoff-Phase gefunden zu haben. Doch die Ergebnisse sind umstritten und werden kontrovers diskutiert. „Mit den Röntgenblitzen des European XFEL wird man deutlich genauer hinschauen und die Debatte klären können“, hofft Zastrau.

„Eine Sonde wird niemals so tief in einen Gasriesen hineinfliegen können“

Ulf Zastrau, European XFEL

Die Forschungsergebnisse werden dazu beitragen, die Entstehung von Gasriesen besser zu verstehen und ihr künftiges Schicksal genauer voraussagen zu können. So könnten ein metallischer Wasserstoffmantel ebenso wie ausgedehnte Entmischungszonen dazu führen, dass Wärme effektiv aus dem Planeteninneren nach außen transportiert wird – der Himmelskörper würde relativ schnell abkühlen. Das wiederum würde verhindern, dass in seinem Inneren die Kernfusion zündet – der Gasriese bleibt ein Planet und wird nicht zu einer Sonne.

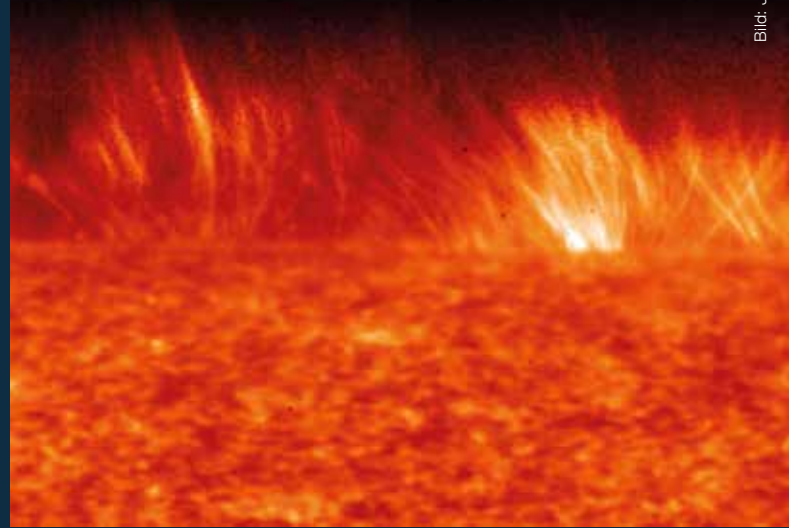
An der HED-Experimentierstation werden sich auch Bedingungen nachbilden lassen, wie

sie in der Atmosphäre eines Sterns herrschen. Interessant ist etwa die Frage, wie sich Eisen, das in Spuren in der Sonnenatmosphäre vorkommt, auf die Ausbreitung von Licht auf unserem Mutterstern auswirkt. „Eisenatome können Licht quasi speichern“, erläutert Ulf Zastrau. „Das Licht braucht länger, um die Sonne zu verlassen.“ Am European XFEL wollen Physiker eine künstliche Sonnenatmosphäre herstellen – ein Plasma aus hochgeladenem Eisen. Dann wollen sie mithilfe der Röntgenblitze messen, wie viel Licht das Eisen abhängig von seinem Ionisationsgrad verschluckt – ein Detail, das unser Verständnis der Sonne verfeinern dürfte.

Teilchen auf Hochtouren

Schließlich könnte der Röntgenlaser ein Rätsel der Astrophysik lösen helfen: Seit längerem registrieren Spezialteleskope eine hochenergetische Strahlung ausgehend unter anderem von Supernova-Explosionen, deren Ursprung bis heute rätselhaft ist. Fachleute vermuten, dass ein spezieller Beschleunigungsmechanismus dahintersteckt: Demnach sollen sogenannte kollisionslose Schockwellen elektrisch geladene Teilchen auf Hochtouren bringen – ähnlich wie eine Atlantikwelle einen Surfer vor sich herschiebt.

„Um herauszufinden, ob es ein solches Phänomen tatsächlich gibt, wollen wir es an der HED-Experimentierstation modellhaft nachbilden und mit Röntgenblitzen unter die Lupe nehmen“, sagt Zastrau. Das Prinzip: Ein Hochintensitäts-Laser feuert auf eine Materialprobe und setzt dadurch Unmengen von Elektronen im Material frei. Diese werden in eine Richtung beschleunigt – und sollten in Gegenrichtung eine Art langsamen elektrischen Gegenstrom erzeugen. Dabei könnte sich, so die Hypothese, die lange gesuchte Schockwelle bilden – ein Phänomen, das sich mit dem European XFEL nachweisen lassen sollte.



Die unteren Regionen der Sonnenatmosphäre, fotografiert von der Sonde „Hinode“ der japanischen Raumfahrtagentur JAXA

LEAPS – Licht für die Forschung

Die kürzlich gegründete Liga der europäischen beschleunigerbasierten Forschungslichtquellen LEAPS (League of European Accelerator-based Photon Sources) hat ihre gemeinsame Strategie für die nächsten zehn bis fünfzehn Jahre aufgestellt. Die LEAPS Strategie 2030 wurde Jean-David Malo übergeben, Direktor in der Generaldirektion Forschung und Innovation der Europäischen Kommission.

„Licht aus Teilchenbeschleunigern spielt heute für Untersuchungen in nahezu jedem naturwissenschaftlichen Bereich eine entscheidende Rolle – von Physik, Chemie und Biologie über Energie, Medizin und Verkehr bis hin zu kulturgeschichtlichen Studien“,

sagt DESY-Direktor Helmut Dosch, der den Anstoß zu LEAPS gegeben hat und auch Vorsitzender des Konsortiums ist. „Bisher wurden die Lichtquellen in den verschiedenen Ländern im Wesentlichen unabhängig voneinander entwickelt und betrieben. Doch sie haben eine Menge gemeinsam, denn die meisten ihrer wissenschaftlichen Zielsetzungen sind sehr ähnlich.“

In Europa gibt es 13 Synchrotronstrahlungsquellen und sechs Freie-Elektronen-Laser, die alle Gründungsmitglieder von LEAPS sind. Sie stellen eine Multimilliarden-Investition dar und dienen jährlich mehr als 24 000 direkten Nutzern. „Durch das Zusammenbringen der Gemeinschaft nationaler und paneuropäischer Synchrotrone und Freie-Elektronen-Laser sollte die LEAPS-Initiative in ihren Zielen gestärkt werden, die europäische Landschaft der Forschungsinfrastrukturen zu gestalten, strategische Investitionen zu koordinieren und den transnationalen Zugang zu erleichtern“, sagte Malo.



Caterina Biscari, Direktorin des ALBA-Synchrotrons in Spanien und stellvertretende Vorsitzende von LEAPS, überreichte Jean-David Malo von der Generaldirektion Forschung und Innovation der Europäischen Kommission, die LEAPS-Strategie 2030.

Erstes Röntgenlicht aus Plasmabeschleuniger

Erstmals hat ein Plasmabeschleuniger bei DESY Röntgenlicht erzeugt. Die Anlage LUX unter Leitung von Andreas Maier von der Universität Hamburg lieferte ultrakurze Strahlungspulse mit einer Wellenlänge von neun Nanometern (millionstel Millimetern). Das entspricht sogenannter weicher Röntgenstrahlung. „Das ist ein wichtiger Meilenstein für die Entwicklung neuartiger beschleunigergetriebener Röntgenlichtquellen“, betont der Leiter der Beschleunigerphysik an der Universität Hamburg, Florian Grüner. LUX (lateinisch „Licht“) ist Teil der LAOLA-Kooperation zwischen DESY und Universität. „Ich freue mich sehr, dass bei den vor einigen Jahren neu aufgestellten Aktivitäten zur Beschleunigerforschung ein weiterer wichtiger Erfolg

erzielt werden konnte“, sagt der Direktor des DESY-Beschleunigerbereichs, Reinhard Brinkmann. „Die Entwicklung der nächsten Generation von kompakten Beschleunigern ist ein essenzieller Pfeiler unserer Zukunftsstrategie am Forschungscampus.“

Von der Technik der Plasmabeschleunigung versprechen sich Physiker eine

neue Generation leistungsfähiger Teilchenbeschleuniger mit einzigartigen Eigenschaften für verschiedene Anwendungen. Bei dieser Methode erzeugt ein Laser oder ein energiereicher Teilchenstrahl eine Plasmawelle in einer feinen Kapillare. Als Plasma wird ein elektrisch leitfähiges Gas bezeichnet. Gegenwärtig befindet sich die Technik im experimentellen Stadium, bis zu einem Einsatz in der Praxis ist noch einige Entwicklungsarbeit nötig.

Die Plasmazelle von LUX (Mitte) erzeugt die schnellen Elektronen.

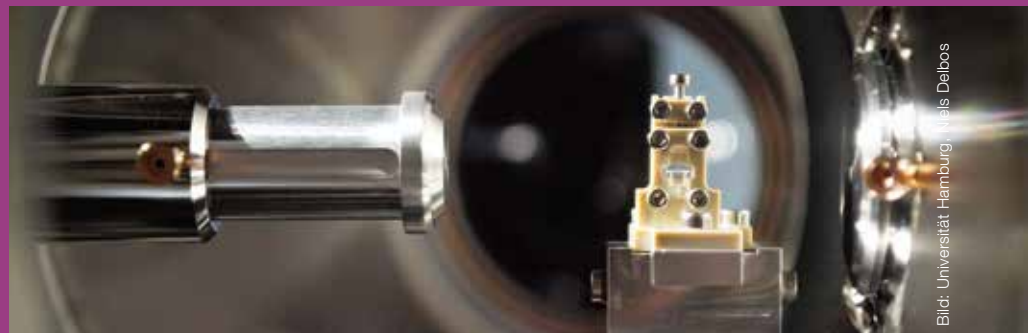


Bild: Universität Hamburg, Nils Delbos

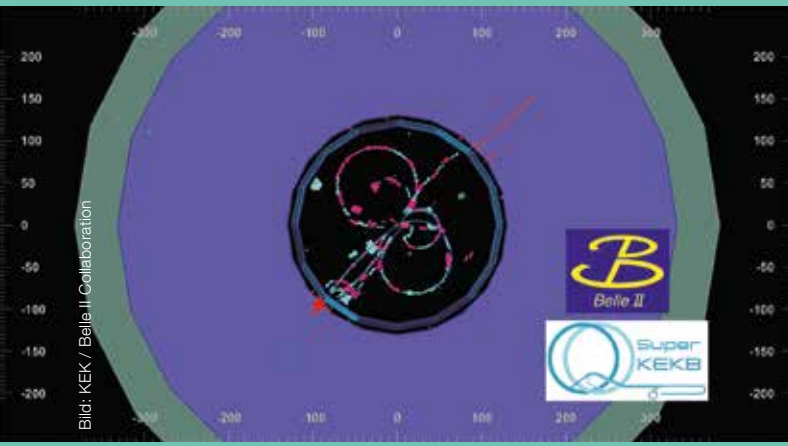
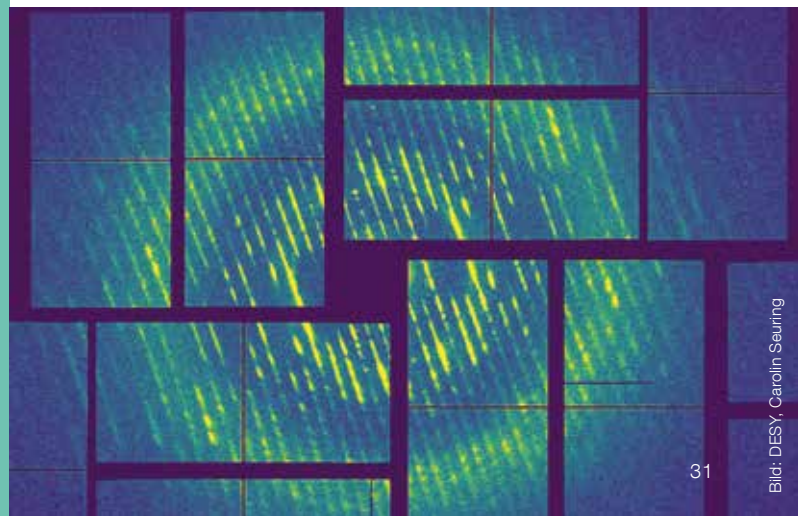
Amyloide im Röntgenfokus

Eine neue Untersuchungsmethode ermöglicht die Röntgenanalyse sogenannter Amyloide, einer Klasse großer, faserähnlich angeordneter Biomoleküle, die unter anderem bei Krankheiten wie Alzheimer und Parkinson eine wichtige Rolle spielen. Einem internationalen Forscherteam unter Leitung von DESY-Wissenschaftlern ist es gelungen, mit Hilfe eines Röntgenlasers Einblick in die Strukturen verschiedener Amyloidproben zu erlangen. Damit eröffnet sich ein neuer Weg zur Strukturanalyse dieser Proteinfilamente.

Die Streuung von Röntgenlicht an Amyloidfibrillen liefert ähnliche Muster wie jene, die Rosalind Franklin 1952 von der Erbsubstanz DNS gewann und die schließlich zur Entdeckung der heute wohlbekannten Struktur der Doppelhelix führten. Der jetzt verwendete Freie-Elektronen-Röntgenlaser LCLS am US-Forschungszentrum SLAC ist allerdings Billionen Mal heller als Franklins Röntgenröhre und ermöglicht, einzelne Amyloidfibrillen zu untersuchen, die Bestandteile der Amyloidfilamente. In dem hellen Röntgenlicht geht das Signal der winzigen Fibrillen allerdings leicht im Streulicht von Umgebungsmaterial unter, etwa der Trägerflüssigkeit für die Proben. Dieses Problem lösten die Forscher, indem sie ihre Proben auf einem ultradünnen Träger aus Graphen lagerten, einem nur eine Atomlage dicken Film aus Kohlenstoff. Dieser dünne Probenträger streut so wenig, dass sich selbst extrem schwache Signale aufzeichnen lassen. Damit bedeutet die Methode auch einen wichtigen Schritt hin zur Untersuchung einzelner Moleküle an Röntgenlasern, ein langgehegtes Ziel der Strukturbiologie. Die Forscher testeten ihre Methode mit Amyloiden und Proben des Tabak-Mosaikvirus, das ebenfalls Filamente bildet.

Nature Communications, 2018; DOI: 10.1038/s41467-018-04116-9

Röntgenstreubild von Tabak-Mosaikvirus-Filamenten, aufgenommen am Freie-Elektronen-Laser LCLS des US-Forschungszentrums SLAC



So zeichnet der Detektor die Teilchenkollisionen auf.

Kollisionen im Belle-II-Detektor

Nach achtjähriger Umbauzeit kollidieren erstmals Teilchen im SuperKEKB-Beschleuniger. SuperKEKB steht am Forschungszentrum KEK im japanischen Tsukuba und soll während seiner Laufzeit mehr Teilchenkollisionen erzeugen als jeder andere Teilchenbeschleuniger zuvor. Diese Kollisionen zwischen Elektronen und ihren Antiteilchen, den Positronen, passieren im Inneren des ebenfalls grundlegend umgebauten Teilchendetektors Belle II, an dem DESY und andere deutsche Gruppen zentral beteiligt sind.

Belle II ist speziell darauf ausgelegt, nach physikalischen Phänomenen zu suchen, die über die bisher erforschte Physiklandschaft hinausgehen. Seine Spezialität ist die Vermessung von seltenen Teilchenzerfällen, zum Beispiel von sogenannten Bottom-Quarks, Charm-Quarks oder Tau-Leptonen. Damit hoffen die über 750 am Projekt beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, unter anderem der Dunklen Materie, neuen Phänomenen oder dem Missverhältnis von Materie zu Antimaterie im Universum auf die Spur zu kommen.

Die ersten Kollisionen sind ein entscheidender Meilenstein auf dem Weg zum Beginn des Forschungsprogramms bei Belle II. Der Teilchenbeschleuniger ist mit einem neuen System von Fokussiermagneten und einem neuen Dämpfungsring ausgestattet. Beide sorgen dafür, dass die Teilchenstrahlen extrem gebündelt werden, so dass möglichst viele Teilchen miteinander kollidieren.

Nickel im Kohlenstoffmantel

Nickel saugt Kohlenstoff auf wie ein Schwamm und bildet wegen des ähnlichen Kristallgitters besonders fehlerarme Graphenschichten an der Oberfläche.

Forscher haben einen vielversprechenden Weg für die Produktion besonders fehlerarmer Graphenschichten erkundet. Das begehrte Kohlenstoff-Material formt sich spontan auf der Oberfläche von Nickel, das zuvor Kohlenstoff aufgenommen hat. Die extrem gute Qualität des Graphens und die relativ niedrige Prozesstemperatur von gut 400 Grad Celsius machen die Methode interessant für die praktische Anwendung, betont das Team um Bernhard Klötzer von der Universität Innsbruck, zu dem auch Wissenschaftler des DESY NanoLabs gehören.

Graphen besteht aus nur einer einzigen Lage von Kohlenstoffatomen, die wie ein atomarer Maschendrahtzaun an-

geordnet sind. Das Material besitzt eine erstaunliche chemische und strukturelle Stabilität und eine hohe elektrische Leitfähigkeit, was es insbesondere für die Elektronik interessant macht – etwa für Transistoren, durchsichtige Elektroden, Solarzellen und Akkus. Außerdem weist es besondere mechanische Eigenschaften auf, durch die sich Filter und Dichtungen im Subnanometer-Maßstab bauen lassen. So ist Graphen beispiels-

weise gasdicht sogar für Helium und Wasser und kann daher als transparente Elektrode oder Membran verwendet werden. „Angesichts seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten sind optimierte und kostengünstige Wege zur Produktion von großflächigem und zugleich defektarmer Graphen sehr gefragt“, erläutert Forschungsleiter Klötzer.

Scientific Reports, 2018;
DOI: 10.1038/s41598-018-20777-4

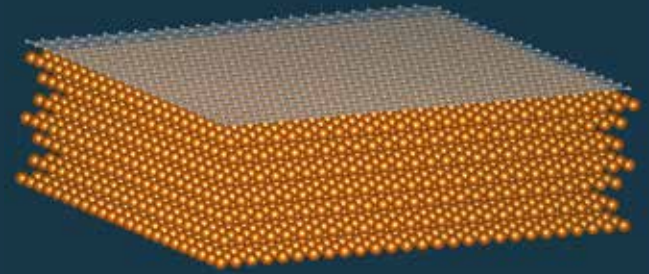


Bild: DESY, Vedran Vonić

Neue Lichtquellen am European XFEL

European XFEL hat die mittlerweile dritte Lichtquelle der Röntgenlaseranlage erfolgreich in Betrieb genommen. Diese Strecke aus sogenannten Undulatoren – speziellen Magnetanordnungen für die Lichterzeugung – liefert Röntgenstrahlung für die Experimentierstationen MID (Materials Imaging and Dynamics) und HED (High Energy Density Science), die 2019 den Nutzerbetrieb aufnehmen sollen. Die insgesamt drei Lichtquellen der Anlage werden mindestens sechs Instrumente mit Röntgenlicht versorgen. Jeweils drei der sechs Instrumente können gleichzeitig Röntgenstrahlen für

Experimente erhalten. „Der Betrieb der dritten Lichtquelle und die parallele Erzeugung von Licht aus allen Quellen sind ein wichtiger Schritt in Richtung unseres Ziels, den Nutzerbetrieb an allen sechs Experimentierstationen aufzunehmen“, erklärte Robert Feidenhansl, Geschäftsführer von European XFEL.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von DESY und European XFEL haben im vergangenen Jahr intensiv

darán gearbeitet, alle drei Lichtquellen zügig in Betrieb zu nehmen und die Parameter des Röntgenstrahls und der Instrumente kontinuierlich zu verbessern. Seit Ankunft der ersten Nutzer im September 2017 wurde die Anzahl der für Experimente zur Verfügung stehenden Röntgenpulse von 300 auf 3000 pro Sekunde erhöht. Bei voller Kapazität soll der European XFEL 27 000 Pulse pro Sekunde produzieren.



Der Monitor im Beschleunigerkontrollraum zeigt alle drei Röntgenlaserstrecken des European XFEL im Parallelbetrieb.

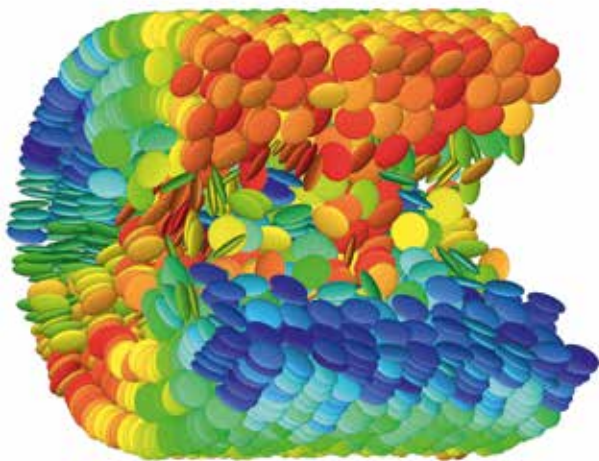
Bild: DESY/European XFEL

Nano-Ringe

An DESYs Röntgenquelle PETRA III haben Forscher eine verblüffende Form der Selbstorganisation in Flüssigkristallen untersucht: Werden die Flüssigkristalle in zylindrische Nanoporen gefüllt und erhitzt, bilden ihre Moleküle beim Abkühlen geordnete Ringe – ein Zustand, der in dem Material sonst nicht natürlicherweise vorkommt. Dieses Verhalten ermöglicht Nanomaterialien mit neuen optischen und elektrischen Eigenschaften. Das Team unter Leitung von Patrick Huber von der Technischen Universität Hamburg (TUHH) hatte eine besondere Form von Flüssigkristallen untersucht, die aus scheibenförmigen Molekülen aufgebaut sind, sogenannte diskotische Flüssigkristalle. In diesen Materialien können die Scheibenmoleküle von selbst hohe, elektrisch leitfähige Säulen bilden, indem sie sich wie Münzen aufeinanderstapeln.

Da sich die opto-elektrischen Eigenschaften diskotischer Flüssigkristalle mit dem Entstehen von Molekülsäulen ändern, ist die in Nanoporen eingeschlossene Variante ein vielversprechender Kandidat für das Design neuer optischer Metamaterialien, deren Eigenschaften sich schrittweise über die Temperatur steuern lassen. Die untersuchten Nanostrukturen könnten auch zu neuen Anwendungen in organischen Halbleitern führen, etwa zu temperaturschaltbaren Nanodrähten.

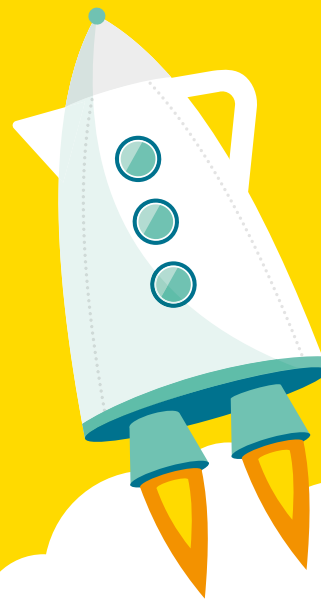
Physical Review Letters, 2018; DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.067801



Blick in einen weitgehend geordneten Flüssigkristall in einer Nanopore

Bild: Max-Planck Institut für Dynamik und Selbstorganisation/Technische Universität Hamburg (TUHH), A. Zantop/M. Mazza/K. Sentker/P. Huber

femtomenal



0,000 000 000 000 075 Sekunden

So lange, oder besser: so unvorstellbar kurz, benötigten Forscher, um Wasser mit einem Röntgenlaser von Raumtemperatur auf 100 000 Grad Celsius aufzuheizen. Das Experiment, das neue Einblicke in die besonderen Eigenschaften von Wasser liefert, kann als schnellster Wasserkocher der Welt gelten. Der heiße Tropfen ist allerdings nur zehn billionstel Milliliter klein. Um eine Tasse Wasser (150 Milliliter) von 20 auf 80 Grad zu erwärmen, würde man daher rund neun Milliarden Tropfen benötigen. Der verwendete Röntgenlaser LCLS am US-Forschungszentrum SLAC blitzt 120 Mal pro Sekunde, er würde für eine Tasse Tee also 75 Millionen Sekunden benötigen, das sind mehr als zwei Jahre – da ist der heimische Wasserkocher dann doch schneller.

Ziel der Forscher um Carl Caleman von der Universität Uppsala und dem Center for Free-Electron Laser Science bei DESY war allerdings kein Heißgetränk. Sie überprüften mit den Versuchen ein Modell zum Verhalten von Wasser, wenn es plötzlich in ein sogenanntes Plasma übergeht.

*Proceedings of the National Academy of Science, 2018;
DOI: 10.1073/pnas.1711220115*

Mehr Wirksamkeit durch Ecken und Kanten

Abgaskatalysatoren arbeiten wirksamer mit Nanopartikeln einer kantigeren Form. Das zeigt eine Untersuchung an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III. Forscher des DESY NanoLabs haben dafür die Umwandlung von giftigem Kohlenmonoxid (CO) in ungiftiges Kohlendioxid (CO₂) an Edelmetall-Nanopartikeln, die auch in einem Autokatalysator enthalten sind, live beobachtet. Möglichst viele Kanten zwischen den mit einem Nano-Oxid bedeckten Partikelseiten (Facetten) steigern demnach die Effizienz der Katalyse-Reaktion.

„Hier können wir die Reaktion wirklich auf atomarer Skala verfolgen“

Uta Hejral, Universität Lund

In Katalysatoren werden für gewöhnlich Nanopartikel verwendet, also Teilchen mit Abmessungen von millionstel Millimetern. Diese bieten bei gleicher Stoffmenge eine erheblich größere Oberfläche, an der die katalytische Reaktion ablaufen kann. Im DESY NanoLab züchteten die Forscher Platin-Rhodium-Nanopartikel so auf einem Substrat, dass nahezu alle Partikel dieselbe Ausrichtung und Form abgeschnittener Oktaeder (Doppelpyramiden) hatten. Die katalytischen Eigenschaften dieser Probe

untersuchten die Wissenschaftler unter den typischen Arbeitsbedingungen eines Autokatalysators und bei verschiedenen Gaszusammensetzungen in einer Reaktionskammer im hellen Röntgenlicht von PETRA III.

Abgastest an Nanopartikeln

Die Effizienz von Katalysatormaterialien lässt sich mit einem sogenannten Massenspektrometer messen, das den Anteil bestimmter Moleküle im Abgas anzeigt, also in diesem Fall das Verhältnis von Kohlenmonoxid, Sauerstoff und Kohlendioxid. „Wir machen quasi einen Abgastest an den Nanopartikeln“, sagt die Hauptautorin der Studie, Uta Hejral, die inzwischen an der Universität Lund in Schweden arbeitet. Dank der parallelen Ausrichtung der Nanopartikel konnten die Forscher in dieser Untersuchung auch sehen, an welcher Stelle auf der Oberfläche der Nanopartikel die Reaktion besonders effizient ablief. „Hier können wir die Reaktion wirklich auf atomarer Skala verfolgen“, betont Hejral.

Normalerweise sitzen die Edelmetall-Nanopartikel in einem Autokatalysator auf winzigen Substratkrümeln, die zusammenkleben und komplexe Strukturen bilden. „Das ist schwer im Röntgenlicht zu untersuchen, da die Edelmetalle nur wenige Gewichtsprozent ausmachen und vor allem die Nanopartikel ganz unterschiedlich orientiert sind“, erläutert Andreas Stierle, Leiten-

der Wissenschaftler bei DESY und Professor für Nanowissenschaften an der Universität Hamburg. „Im Röntgenlicht erzeugt jedes Partikel ein Streubild, und diese Streubilder überlappen sich in unüberschaubaren Mustern. Durch die parallele Ausrichtung sind jedoch auch die Streubilder aller Nanopartikel gleich ausgerichtet und verstärken sich. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Facetten der Nanopartikel, also ihre unterschiedlichen Oberflächen, identifizieren und gezielt beobachten.“

Reaktion mit Sauerstoff

Die Untersuchung zeigt, dass die Reaktivität der Nanopartikel bei einem bestimmten Wert der Sauerstoffkonzentration stark ansteigt. „Das geschieht, wenn gerade genug Sauerstoff verfügbar ist, um jedes Kohlenmonoxidmolekül zu Kohlendioxid zu oxidieren“, sagt Stierle. Oberhalb dieser Konzentration sinkt die Reaktivität langsam wieder, weil sich auf den Oberflächen der Partikel durch den Sauerstoff immer größere Oxidinseln bilden und die Reaktion behindern. Die Röntgenuntersuchung zeigt die atomare Oberflächenstruktur der Nanopartikel mit bisher unerreichter Auflösung unter Reaktionsbedingungen. Dabei ist zu sehen, dass sich die verschiedenen Kristallflächen der Nanopartikel ab einer bestimmten Sauerstoffkonzentration mit einem Sauerstoff-Rhodium-Sauer-

„Es ist zu erwarten, dass der Katalysator umso effizienter wird, je mehr Kanten die Nanopartikel im Verhältnis zu ihrer Oberfläche haben“

Andreas Stierle, DESY

stoff-Sandwich bedecken, bis zum Schluss die Metalloberfläche quasi ganz unter diesem Nano-Oxid verschwunden ist.

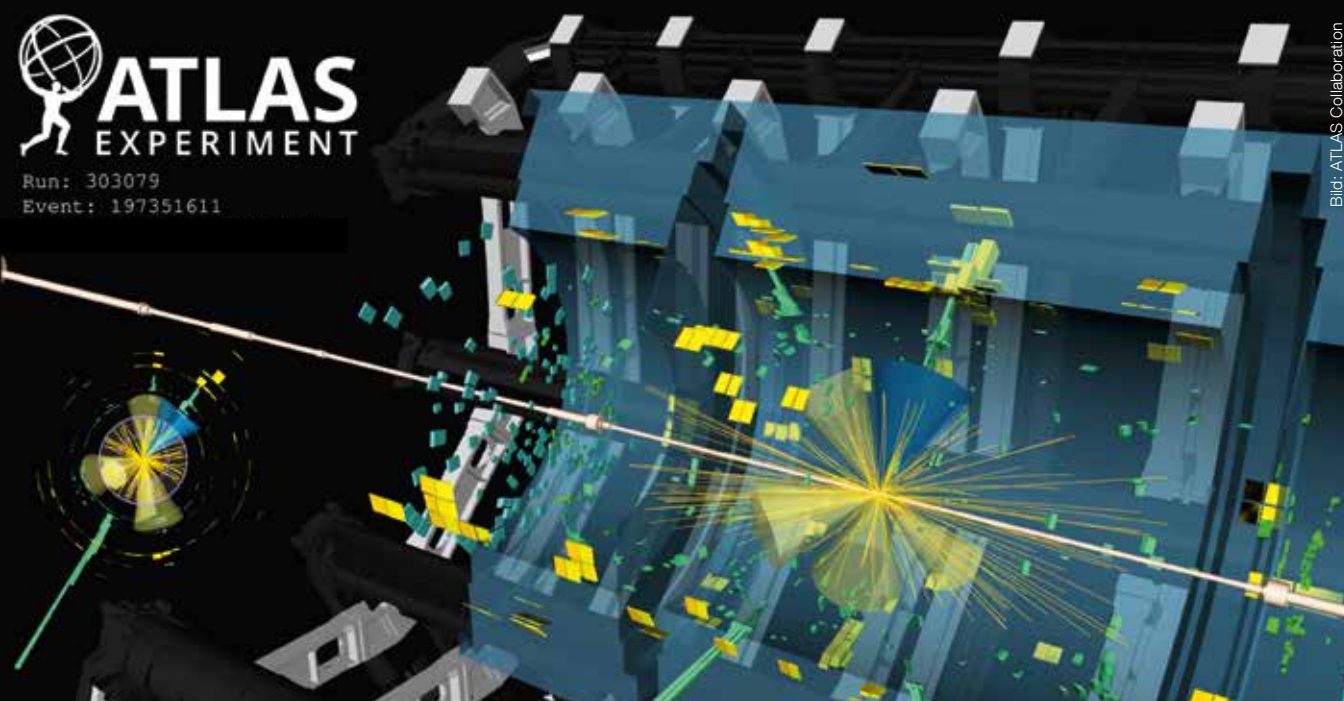
„Das Oberflächenoxid bildet schließlich eine geschlossene Schicht auf den Nanopartikeln“, berichtet Hejral. „Das ist zunächst ungünstig für die gewünschte Reaktion, weil sich dann nur noch schwer Kohlenmonoxidmoleküle anlagern

können. An den Kanten zwischen den Facetten der Nanopartikel kann der Sauerstoff aber keine geschlossene Schicht bilden, was zu einer erhöhten Reaktivität der Kanten führt.“ Diese Erkenntnis liefert einen direkten Weg zu wirksameren Katalysatoren: „Es ist zu erwarten, dass der Katalysator umso effizienter wird, je mehr Kanten die Nanopartikel im Verhältnis zu ihrer Oberfläche ha-

ben“, sagt Stierle. Diese Erkenntnis lasse sich voraussichtlich auch auf viele andere katalytische Reaktionen übertragen. Wie stark sich dadurch die Effizienz steigern lässt, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

.....
Physical Review Letters, 2018;
DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.126101

Bei steigender Konzentration von Sauerstoff (rot) wachsen auf den Oberflächen der metallischen Nanopartikel Oxidschichten aus einem Sauerstoff-Rhodium-Sandwich, welche die Reaktion von Kohlenmonoxid (rot-schwarz) zu Kohlendioxid (rot-schwarz-rot) mehr und mehr behindern. An den Kanten zwischen den Flächen reißt die Oxidschicht allerdings ab, hier bleiben aktive Bereiche frei. Je mehr Kanten die verwendeten Nanopartikel besitzen, desto effizienter kann der Katalysator arbeiten.



Top-Resultat vom LHC

Teilchenphysiker beobachten Wechselwirkung des schwersten Quarks mit dem Higgs-Teilchen

Wissenschaftlern der ATLAS- und CMS-Forschungsgruppen am Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf ist es erstmals gelungen, die gleichzeitige Erzeugung eines Top-Quarks, des schwersten Elementarteilchens, und eines Higgs-Teilchens unmittelbar zu beobachten. Diese Beobachtung bedeutet einen wichtigen Schritt zu einem besseren Verständnis des Mechanismus, der den Elementarteilchen ihre Masse verleiht: des Higgs-Mechanismus.

Das Higgs-Teilchen wurde 2012 am LHC entdeckt. Der Nachweis selbst war aber lediglich der Startschuss zur genauen Erkundung des neu entdeckten Teilchens. Wissenschaftler wollen nun herausfinden, wie es mit anderen Teilchen interagiert, um das Rätsel zu lösen, wie genau es ihnen Masse verleiht.

Das ist beim Top-Quark, dem massereichsten Elementarteilchen, das bislang beobachtet wurde, besonders interessant, aber auch besonders schwierig, da es nur selten zusammen mit einem Higgs-Teilchen entsteht – hundert Mal seltener als andere Teilchen. Außerdem lässt sich seine Wechselwirkung mit dem Higgs-Teilchen nur indirekt anhand von anderen Teilchen beobachten und nachweisen, die bei seinem Zerfall entstehen.

Da das Top-Quark zu schwer ist, kann das Higgs-Teilchen nicht direkt in ein Top-Anti-Top-Paar zerfallen. Stattdessen suchen die Forscher nach Ereignissen, in denen ein Top-Quark-Paar zusammen mit einem Higgs-Teilchen erzeugt wird, die alle weiter in andere Teilchen zerfallen.

Der Zerfall des Higgs-Teilchens in ein Bottom-Quark und ein Anti-Bottom-Quark kommt am

Visualisierung einer Teilchenkollision im ATLAS-Detektor, bei der Top-Quarks und ein Higgs-Teilchen entstehen

häufigsten vor, lässt sich aber auch nur schwer von den vielen anderen Teilchen unterscheiden, die während einer Kollision im Detektor in Erscheinung treten.

Gemeinsam mit Forschern von anderen Instituten haben die beiden DESY-Wissenschaftlerinnen Maria Aldaya (CMS) und Judith Katzy (ATLAS) sich mit ihren jeweiligen Gruppen darauf konzentriert, Ereignisse aufzuspüren, bei denen in der letzten Stufe zwei Bottom-Quarks entstehen. „Die Beobachtung des Top-Quarks zusammen mit dem Higgs-Teilchen bestätigt diesen Entstehungspfad des neuen Bosons und gestattet es uns, die direkte Wechselwirkung zwischen dem Higgs-Teilchen und dem massereichsten Quark zu untersuchen. Sie ist ein wichtiger Meilenstein in der Verifizierung des Standardmodells der Teilchenphysik“, erläutert Maria Aldaya, die auch die Top-Quark-Gruppe bei CMS koordiniert.

.....
 CMS: *Physical Review Letters*, 2018;
 DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.231801
 ATLAS: *Physics Letters B* (eingereicht);
 Preprint: <https://arxiv.org/abs/1806.00425>

3D-Röntgenbilder von intakten biologischen Zellen

Einzelne biologische Zellen sind in der Regel klein. So klein, dass sich ihr Innenleben nur mit speziellen Methoden erforschen lässt. Um die Strukturen biologischer Zellen auf der Ebene von Nanometern (millionstel Millimetern) abzubilden, ist Röntgenstrahlung erforderlich. Deren kurze Wellenlängen sind in der Lage, auch feinste Details räumlich aufzulösen. Allerdings überträgt Röntgenstrahlung auch Energie, die biologische Proben sehr schnell zerstört. In der Praxis sind Strahlungsschäden daher der begrenzende Faktor für Auflösung und Empfindlichkeit abbildender Röntgenverfahren. Die DESY-Forscher Pablo Villanueva-Perez, Saša Bajt und Henry Chapman vom Hamburger Center for Free-Electron Laser Science haben nun ein Konzept für ein neuartiges Röntgenmikroskop entwickelt, das die Möglichkeit eröffnet, dreidimensionale Bilder von biologischen Zellen mit tausendmal weniger schädlicher Strahlung aufzunehmen als es bislang möglich ist. Dieses Mikroskop könnte ganze Zellen in ihrer natürlichen Umgebung mit nanometergenauer Auflösung aufnehmen, ohne dass sie tiefgefroren, zerschnitten oder gefärbt werden müssen.

Menschliche Blutzellen
unter dem Raster-
elektronenmikroskop

Gestreute Photonen

Röntgenaufnahmen lassen sich auf verschiedene Weise gewinnen. Die vertrauten medizinischen Röntgenbilder von Zähnen oder Knochen beruhen auf der Röntgenabsorption – die dichten Knochen schlucken mehr Röntgenphotonen als das umliegende Gewebe und hinterlassen einen Schatten. Ein Röntgenmikroskop zur Abbildung von Zellen nutzt dagegen die sogenannte elastische Streuung von Röntgenphotonen in der Probe, um Bilder mit deutlich höherer Auflösung aufzunehmen. Das funktioniert ähnlich wie in einem optischen Mikroskop. Obwohl die elastische Streuung keine Energie auf die Probe überträgt, ist sie in allen bislang konstruierten Röntgenmikroskopen viel seltener als die Absorption. „In der Realität findet Streuung nicht statt, ohne dass ein Teil der Photonenenergie in der Probe deponiert wird und zu Strahlungsschäden führt“, betont Villanueva-Perez.

Hochenergetische Röntgenstrahlung galt bislang nicht als brauchbar für hochauflösende Röntgenmikroskopie. Denn bei hohen Energien nimmt auch die elastische Röntgenstreuung ab, und die inelastische Röntgenstreuung gewinnt die Oberhand. Bei der inelastischen Streuung, die auch Compton-Streuung genannt wird, verliert das Röntgenphoton einen Teil seiner Energie an die untersuchte Probe, wenn es von einem Atom der Probe abprallt. Dabei verändert es auch seine Wellenlänge. Normalerweise führt dieser Prozess zu einem unerwünschten, strukturlosen Strahlungshintergrund und schädigt die Qualität von Probe und Bild.

„Niemand hat daran gedacht, biologische Mikroskopie bei solch hohen Energien zu versuchen“

Henry Chapman, DESY

Das Forscherteam erkannte jedoch, dass bei sehr hohen Röntgenenergien von 64 Kiloelektronenvolt (keV) bei derselben übertragenen Energie sehr viel mehr Compton-Streuung stattfindet als elastische Streuung bei den üblicherweise benutzten niedrigeren Photonenergien. Ein detailliertes Bild lässt sich daraus gewinnen, indem die Zelle mit einem scharf fokussierten Röntgenstrahl abgerastert und die Röntgenstreuung an jedem Punkt kartiert wird. Überraschenderweise zeigte

die Analyse, dass sich auf diese Weise die Dosis bei derselben Auflösung um den Faktor 1000 reduzieren lässt. „Niemand hat daran gedacht, biologische Mikroskopie bei solch hohen Energien zu versuchen“, erläutert Chapman. „Ausreichend helle Röntgenquellen gab es nicht, es war nicht möglich, den Röntgenstrahl zu fokussieren, und es gab keine Detektoren dafür.“

„Wir haben den weltweit kleinsten Röntgenfokus mit hocheffizienten Linsen erzeugt“

Saša Bajt, DESY

Rekordauflösung durch neue Speziallinsen

Das Team hat für diese Herausforderungen Lösungen gefunden. So hat Bajts Gruppe erst kürzlich eine innovative Röntgenlinse aus einem künstlichen Mehrschicht-Metamaterial entwickelt, die den bislang kleinsten Röntgenfokus erzeugen kann. „Die Effizienz unserer Mehrschichtlinsen nimmt mit steigender Energie stark zu, und sie erzeugen sogar einen kleineren Brennpunkt“, sagt Bajt. „Daher eignen sie sich ideal für so ein Mikroskop.“

Um die erforderliche Präzision und die besonderen Linseneigenschaften zu erreichen, hatte Bajts Team eine spezielle Technik entwickelt und die Eigenschaften des Linsenmaterials, die sich oft mit der Linsendicke ändern, genau untersucht. Mit einer neuen Materialkombination aus Wolframkarbid und Siliziumkarbid erzeugten die Forscher mit Hilfe ihres Produktionsverfahrens Linsen mit mehr als 10 000 abwechselnden Schichten. „Die Wahl des richtigen Materialpaars war entscheidend für den Erfolg“, erläutert Bajt. „Das schließt andere Materialkombinationen zwar nicht aus, aber diese ist definitiv die beste, die wir kennen.“

Röntgenstrahlung ist sehr durchdringend und würde normalerweise durch die Linsenmaterialien nahezu ungehindert hindurchlaufen. Eine Herausforderung lautete daher, solche Linsenstrukturen herzustellen, die eine möglichst starke Wechselwirkung mit der Röntgenstrahlung erzeugen und möglichst viel der Strahlung in den Brennpunkt dirigieren. Die neuen Linsen erreichen eine Effizienz von mehr als 80 Prozent. „Wir haben den weltweit kleinsten Röntgenfokus mit hocheffizienten Linsen erzeugt“, betont Bajt.

Röntgenhologramm einer Schale der Kieselalge *Actinoptychus senarius* mit einem Durchmesser von nur 0,1 Millimetern. Die 5000-fache Vergrößerung zeigt feinste Details der Struktur. Die Röntgenlinse hat dazu den Röntgen-

strahl auf einen Brennpunkt mit nur etwa acht Nanometern Durchmesser fokussiert – das ist kleiner als manches Virus –, bevor der Röntgenstrahl sich wieder weitete, die Kieselalge beleuchtete und das Hologramm erzeugte.

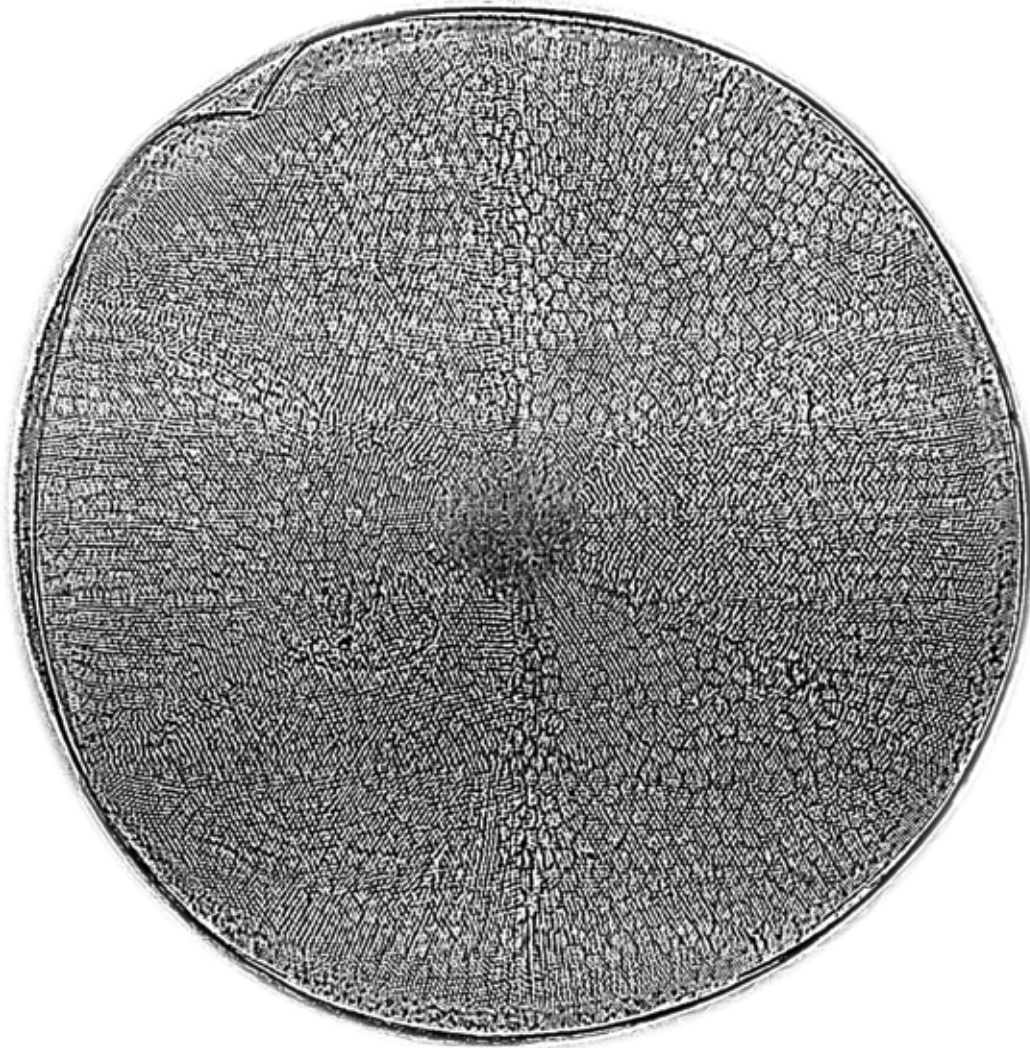


Bild: DESY/AVI, Andrew Morgan/Saša Bajt/Henry Chapman/Christian Hamm

Brillante Perspektiven

Das Konzept, das Pablo Villanueva-Perez, Saša Bajt und Henry Chapman für ein neuartiges Röntgenmikroskop entwickelt haben, liefert auch eine brillante Perspektive für den geplanten Ausbau von DESYs Speicherring PETRA III zu einer Röntgenquelle der nächsten Generation unter dem Namen PETRA IV. Diese wird deutlich hellere Röntgenstrahlen bei den hier nötigen hohen Photonenenergien liefern, als es heute möglich ist. Bleibt noch der Detektor. „Der ideale Detektor sollte die Probe vollständig umschließen, um alle in sämtliche Richtungen gestreuten Photonen aufzufangen“, sagt Villanueva-Perez. So ein Detektor existiert zwar noch nicht, lässt sich

aber mit der bestehenden Technologie bauen. Wenn alle Komponenten zur Verfügung stehen, werden sie Forschern ermöglichen, ganze Zellen und Organellen mit einer Auflösung von wenigen Nanometern in allen drei Raumdimensionen und in ihrer natürlichen Umgebung zu untersuchen und damit einen weit verbreiteten Wunsch von Biologen zu erfüllen. Zuvor planen die Forscher, ihr neuartiges Konzept mit biologischen Proben an den heute besten Röntgenquellen der Welt wie PETRA III mit konventionellen Detektoren zu testen.

.....
Optica, 2018; DOI: 10.1364/OPTICA.5.000450. *Light: Science and Applications*, 2017; DOI: 10.1038/10.1038/lsa.2017.162



Kreative Kollisionen: Kunst zu Dunkler Materie

Art meets Science: 15 Künstlerinnen und Künstler aus ganz Deutschland stellten ihre Werke zum Thema „Dunkle Materie“ im Herbst 2017 auf dem DESY-Forschungsgelände, in Testhallen, Kontrollräumen und in einem Teilchenbeschleuniger in Hamburg aus. Die Arbeiten sind das Ergebnis eines intensiven Austauschs zwischen Wissenschaft und Kunst. Die Werke umfassen Malerei, Grafik, Fotografie und Film, Skulptur, Installation, Intervention sowie Sound und Multimedia. Es ist das erste Kunst-trifft-Wissenschaft-Projekt bei DESY.

„Kunst und Wissenschaft sind zwei wichtige Säulen unserer Gesellschaft“, betont Helmut Dosch, Vorsitzender des DESY-Direktoriums. „DESY will mit dem ‚Dark Matter‘-Projekt den Zusammenhang zwischen diesen beiden Bereichen herstellen und sichtbar machen. Bei DESY streben wir ja stets danach, Wissensgrenzen zu versetzen und Horizonte zu erwei-

tern, allerdings tun wir das auf unsere naturwissenschaftlich-analytische Weise. Die künstlerische Sichtweise auf das Forschungsthema Dunkle Materie macht nicht nur enorm viel Spaß, sie liefert auch Inspiration für unsere Forschung.“

<https://artmeetsscience.desy.de>



dark
matter



Impressum

femto wird herausgegeben vom
Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY,
einem Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Redaktionsanschrift

Notkestraße 85, D-22607 Hamburg
Tel. +49 40 8998-3613, Fax +49 40 8998-4307
E-Mail: femto@desy.de
Internet: www.desy.de/femto
ISSN 2199-5184

Redaktion

Ute Wilhelmsen (v.i.S.d.P.), Till Mundzeck

An dieser Ausgabe haben mitgewirkt

Frank Grotelüschen, Barbara Warmbein

Gestaltung und Produktion

gutentag Hamburg

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

Juni 2018

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie
femto kostenlos!

www.desy.de/femto oder 040 8998-3613



Titelbild

Mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III haben Forscher um Chrystèle Sanloup von der Universität Edinburgh einen Blick ins Innere von geschmolzenem Magma unter den Bedingungen des tiefen Erdmantels geworfen. Die Untersuchung stützt die Vorstellung, dass der Mantel der jungen Erde einst zwei unterirdische Magma-Ozeane beherbergt hat, die von einer festen Schicht getrennt wurden. Heute sind diese urzeitlichen Magma-Ozeane kristallisiert, Reste existieren unter Umständen noch in lokalen Taschen und möglicherweise in dünnen Schichten im Mantel. Das Bild zeigt eine Basaltprobe in einer sogenannten Diamantstempelzelle nach der Untersuchung.

Das Forschungszentrum DESY

DESY zählt zu den weltweit führenden Beschleunigerzentren. Mit den DESY-Großgeräten erkunden Forscher den Mikrokosmos in seiner ganzen Vielfalt – vom Wechselspiel kleinster Elementarteilchen über das Verhalten neuartiger Nanowerkstoffe bis hin zu jenen lebenswichtigen Prozessen, die zwischen Biomolekülen ablaufen. Die Beschleuniger und die Nachweisinstrumente, die DESY an seinen Standorten in Hamburg und Zeuthen entwickelt und baut, sind einzigartige Werkzeuge für die Forschung: Sie erzeugen das stärkste Röntgenlicht der Welt, bringen Teilchen auf Rekordenergien und öffnen völlig neue Fenster ins Universum.

HELMHOLTZ
SPITZENFORSCHUNG FÜR
GROSSE HERAUSFORDERUNGEN



DESY ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft,
der größten Wissenschaftsorganisation Deutschlands.