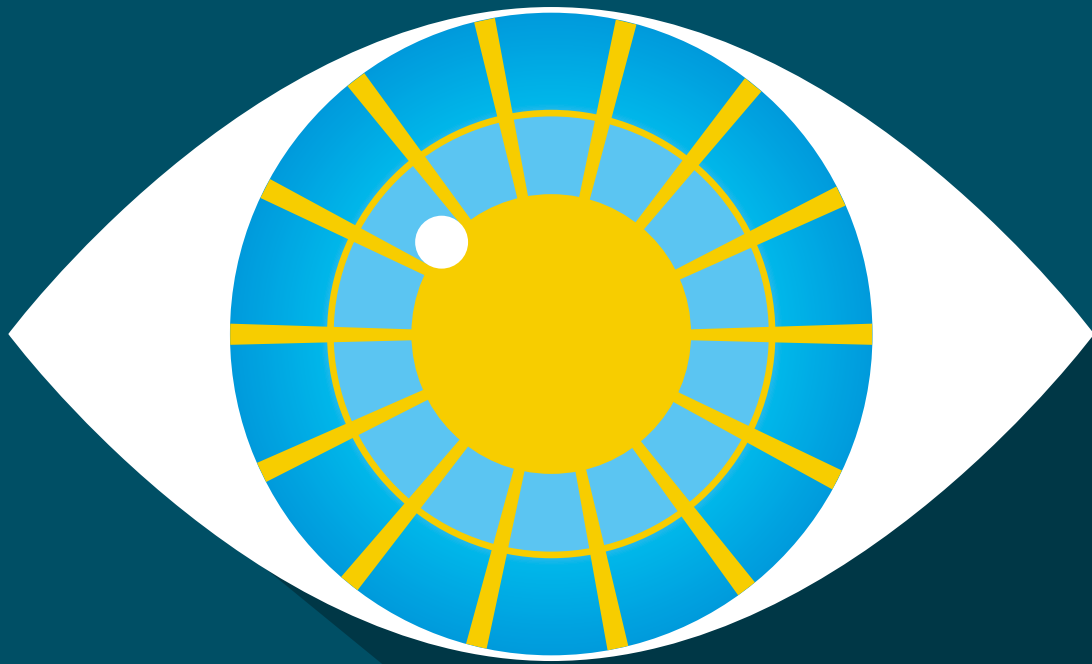


# femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 02/21



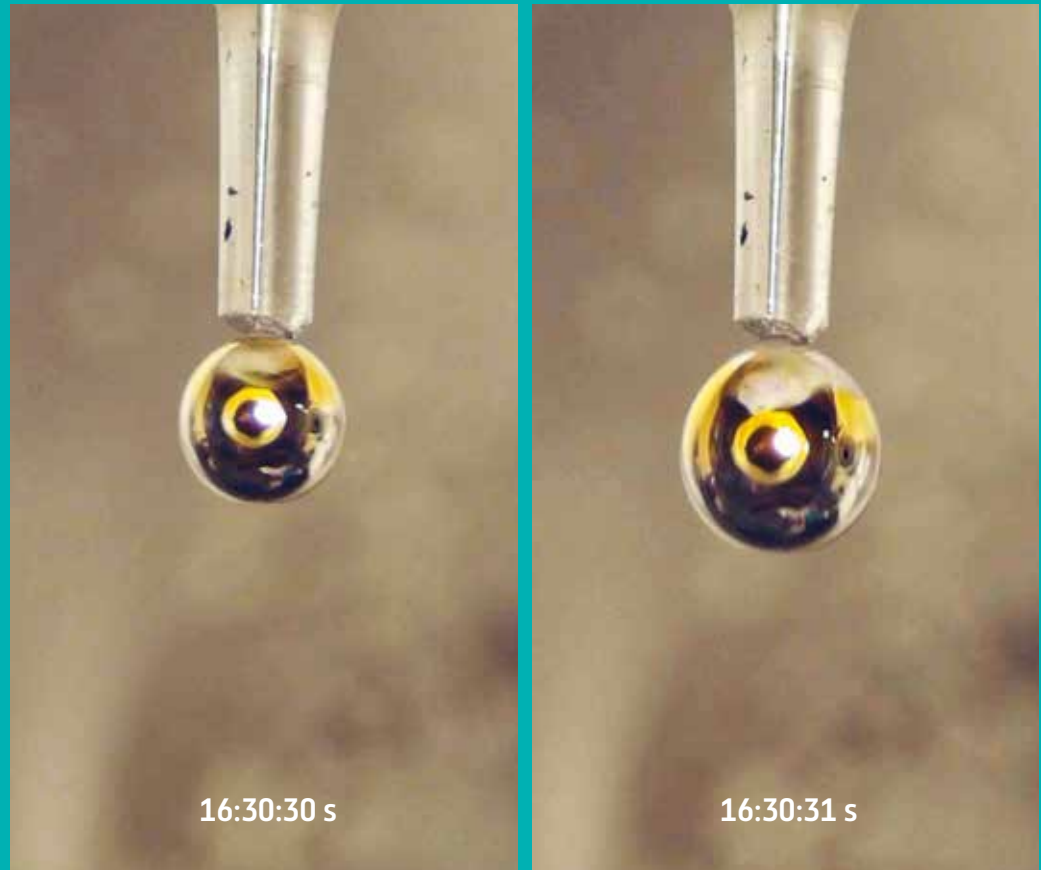
## Forschen für die **ENERGIEWENDE**

Neutrinojagd  
auf Grönland

Das Ei im  
Röntgenstrahl

Versickernde  
Ozeane





## Wasser als goldschimmerndes Metall

Mancher Alchemist würde bei diesem Experiment neidisch: In einem faszinierenden Versuch haben Forscherinnen und Forscher unter Leitung von Pavel Jungwirth von der Tschechischen Akademie der Wissenschaften (CAS) gewöhnliches Wasser in ein goldschimmerndes, flüssiges Metall verwandelt.

Reines Wasser ist normalerweise ein Isolator. Erst durch Verunreinigungen mit Salzen wird es elektrisch leitend. Auch reines Wasser kann jedoch metallische Eigenschaften entwickeln: Unter extremem Hochdruck, wie er etwa im Inneren großer Planeten herrscht, kann im Prinzip jedes Material metallisch werden. Allerdings sind die nötigen Drücke im Labor nahezu unerreichbar.

Mit einem völlig anderen Ansatz hat die internationale Kooperation von 15 Forscherinnen und Forschern aus 11 Instituten nun metallisches Wasser bei niedrigem Druck erzeugt: Das

Team ließ in einer Vakuumkammer Wasserdampf kontrolliert auf einem Tropfen einer Natrium-Kalium-Legierung kondensieren.

Der Dampf bildet an der Oberfläche des Tropfens eine extrem dünne Haut aus wenigen Lagen Wassermolekülen. Dabei wandern Elektronen und Metall-Ionen von der Legierung ins Wasser. „Die eingewanderten Elektronen können sich wie freie Elektronen im Leitungsband von Metallen bewegen“, erläutert Stephan Thürmer von der Universität Kyoto.

### Mit bloßem Auge erkennbar

„Dieser Übergang zum metallischen Wasser ist mit bloßem Auge erkennbar“, berichtet Ko-Autor Florian Trinter, der unter anderem bei DESY arbeitet. „Der silbrige Natrium-Kalium-Tropfen überzieht sich mit einem goldenen Schimmer, das ist sehr eindrucksvoll“, ergänzt



16:30:32 s



16:30:33 s



16:30:34 s

Robert Seidel vom Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB), wo ein Teil der Versuche stattgefunden hat. Die Lösung reagiert dann weiter und bildet graue Natrium- und Kaliumhydroxidsalzkristalle.

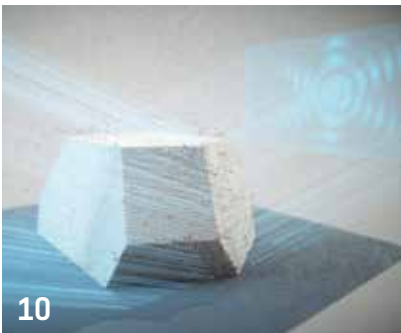
Mit zwei unterschiedlichen spektroskopischen Methoden konnten die Forscherinnen und Forscher um die CAS-Hauptautoren Philip Mason, Christian Schewe und Tillmann Buttersack an der HZB-Röntgenquelle BESSY II und am CAS-Institut für organische Chemie und Biochemie (IOCB) in Prag nachweisen, dass es sich tatsächlich um Wasser in einem metallischen Zustand handelt.

Solche überraschenden Phänomene werden künftig auch im Zentrum für molekulare Wasserforschung CMWS untersucht, das zurzeit als internationale Kooperation bei DESY entsteht.

.....  
Nature, DOI: 10.1038/s41586-021-03646-5

# Inhalt

- 02 femtoskop**  
Metallisches Wasser
- 06 Antennen im Eis**  
Pionierprojekt auf Grönland horcht nach kosmischen Neutrinos
- 09 Das Ei im Röntgenstrahl**  
Untersuchung zeigt Netzwerkbildung von Proteinen
- 10 Katalysator bei der Arbeit**  
Röntgenblick auf ein einzelnes Nanopartikel



10

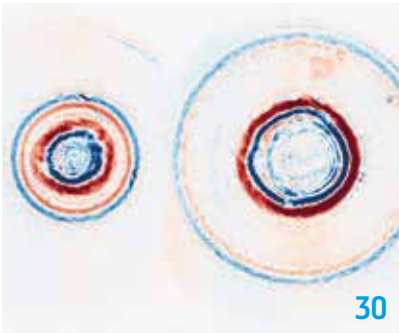
## ZOOM FORSCHEN FÜR DIE ENERGIEWENDE

- 12 Wundermittel Wasserstoff?**  
Das leichte Gas hat das Zeug zum Energieträger von morgen
- 19 Innovationen und Verhaltensänderungen**  
müssen nach Ansicht des Ökonomen Alexander Bassen Hand in Hand gehen
- 20 Die Sonne anzapfen**  
Solarenergie ist ein Eckpfeiler der Energiewende
- 24 Porenschwamm als Kraftwerk**  
Innovatives Konzept zur Stromgewinnung
- 26 Bessere Stromspeicher**  
Auf dem Weg zu effizienteren Batterien
- 28 Nachhaltiger Beschleuniger**  
Die nächste Generation von Forschungsmaschinen
- 30 Spektrum**  
Nachrichten aus der Forschung
- 35 femtomenal**  
777 Gramm Dunkle Materie
- 36 Gammablitz aus der kosmischen Nachbarschaft**  
Beobachtung stellt Theorie der stärksten Explosionen im Weltall infrage
- 39 Versickernde Ozeane**  
Meerwasser wandert tiefer in den Erdmantel als angenommen
- 41 femtopolis**  
Handlicher Hochdruck
- 42 Die Mischung macht's**  
Plasmasbeschleuniger laufen besser mit Stickstoff und künstlicher Intelligenz
- 44 femtofinale**  
Schwer fassbare Teilchen

12



36



30



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

Wie schaffen wir die Energiewende hin zu erneuerbaren Quellen? Diese Frage kann die Forschung nicht allein beantworten. Politik und wortwörtlich jede und jeder Einzelne müssen ihren Beitrag dazu leisten. Die Grundlagenforschung kann jedoch helfen, neue Wege zu eröffnen, um grüne Energie auf innovative Weisen zu gewinnen, effizienter zu speichern, besser zu verteilen und wirkungsvoller zu nutzen. Darum geht es in diesem Heft. Dabei gibt es zwei Schwerpunkte: Wasserstoff wird von vielen eine zentrale Rolle als Energieträger in einer nachhaltigen Energiewirtschaft zugeordnet. Allerdings ist das leichte Gas natürlich nur so grün wie die Energie, mit der es gewonnen wird. Unsere mit Abstand bedeutendste Energiequelle ist die Sonne. Sie liefert uns enorme Energiemengen frei Haus. Diese besser zu nutzen, erfordert bessere und neuartige Solarzellen – möglichst aus günstigen und nachhaltigen Materialien. Ein interessanter Ansatz basiert auf hauchdünnem Papier und Polymeren. Innovationen sind allerdings nur ein Teil der Antwort. Sie müssen mit Verhaltensänderungen Hand in Hand gehen, wie der Ökonom Alexander Bassen aus dem Wissenschaftlichen Beirat Globale Umweltveränderungen (WBGU) der Bundesregierung betont. Nicht zuletzt kann auch die Forschung selbst energieeffizienter werden. Wie sich etwa bei Teilchenbeschleunigern erheblich Strom sparen lässt, erforscht ein großes EU-Projekt.

Wir wünschen Ihnen Freude und erhellende Erkenntnisse bei der Lektüre und freuen uns über Kritik, Lob und Anregungen unter [femto@desy.de](mailto:femto@desy.de).

Till Mundzeck  
Redaktionsleiter



# Antennen im Eis

Ein Pionierprojekt horcht in Grönlands Gletscher nach kosmischen Neutrinos



Im grönländischen Eis lauscht künftig eine weltweit einzigartige Anlage auf extrem schwer fassbare Teilchen aus dem Weltall: Das Pionier-Projekt „Radio Neutrino Observatory Greenland“ (RNO-G) verwendet eine neue Messmethode, um sehr energiereiche kosmische Neutrinos mit Radioantennen nachzuweisen. Die Antennen werden dazu auf und im Eis installiert.

„Neutrinos sind ultraleichte und extrem scheue Elementarteilchen“, erläutert DESY-Physikerin Anna Nelles, die das Projekt mit initiiert hat. „Die Teilchen entstehen in rauen Mengen im All, vor allem bei energiereichen Prozessen wie kosmischen Teilchenbeschleunigern. Sie sind aber kaum nachweisbar,

weil sie so gut wie nie mit Materie reagieren. Allein von der Sonne durchqueren pro Sekunde rund 60 Milliarden Neutrinos unbemerkt jeden fingernagelgroßen Fleck auf der Erde.“

Die ultraleichten Elementarteilchen werden manchmal auch als Geisterteilchen bezeichnet, denn sie fliegen problemlos durch Wände, die Erde und ganze Sterne. „Diese Eigenschaft macht sie interessant für die Astrophysik, weil sich mit ihnen beispielsweise auch ins Innere explodierender Sonnen oder in verschmelzende Neutronensterne blicken lässt, woher kein Licht zu uns gelangen kann“, berichtet Nelles, die auch Professorin an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ist. „Zudem

lassen sich mit Neutrinos natürliche kosmische Teilchenbeschleuniger aufspüren.“ Dazu zählen zum Beispiel Supernova-Überreste und gigantische Schwarze Löcher im Herzen ferner Galaxien.

## Schneller als das Licht

Nur extrem selten wechselwirkt ein Neutrino jedoch mit der durchquerenden Materie, wenn es – zum Beispiel

„In der Neutrino-  
forschung braucht  
man Geduld“

Anna Nelles, DESY

Die erste Station des Radio-Neutrino-Observatoriums auf dem grönländischen Eis. Die roten Fahnen markieren unterirdische Antennen, die von Solarmodulen mit Strom versorgt werden.



im grönländischen Eisschild – zufällig auf ein Atom stößt. Bei einer solchen seltenen Kollision entsteht eine Lawine von Folgeteilchen, von denen viele im Gegensatz zum Neutrino elektrisch geladen sind. Diese Folgeteilchen sind so energiereich, dass sie sich schneller durch das Eis bewegen als das Licht es kann – allerdings nicht schneller als das Licht im Vakuum, die absolute Geschwindigkeitsbeschränkung laut Albert Einstein. Dadurch entsteht eine Art optisches Äquivalent zum Überschallknall: das sogenannte Tscherenkow-Licht. Es macht sich als bläulicher Schimmer bemerkbar.

Am anderen Ende der Welt, am Südpol, späht der Neutrino-detektor IceCube im antarktischen Eis nach diesem blauen Schimmer, um Neu-

trinos aus den Tiefen des Weltalls nachzuweisen. Ein internationales Konsortium, zu dem auch DESY gehört, hat dort rund 5000 empfindliche optische Messgeräte kilometer-tief ins Eis eingeschmolzen. Diese sogenannten Photovervielfacher sind über einen ganzen Kubikkilometer Eis verteilt, daher der Name der Anlage.

IceCube sind bereits spektakuläre Beobachtungen von Neutrinos gelungen, die beispielsweise aus dem Umfeld eines enormen Schwarzen Lochs oder von einem zerrissenen Stern stammten, und hat damit ein neues Fenster zum Kosmos geöffnet: Neben elektromagnetischer Strahlung wie Licht sowie Gravitationswellen sind Neutrinos eine dritte, unabhängige Methode, den Kosmos zu beobachten.

### Herausforderung Pandemie

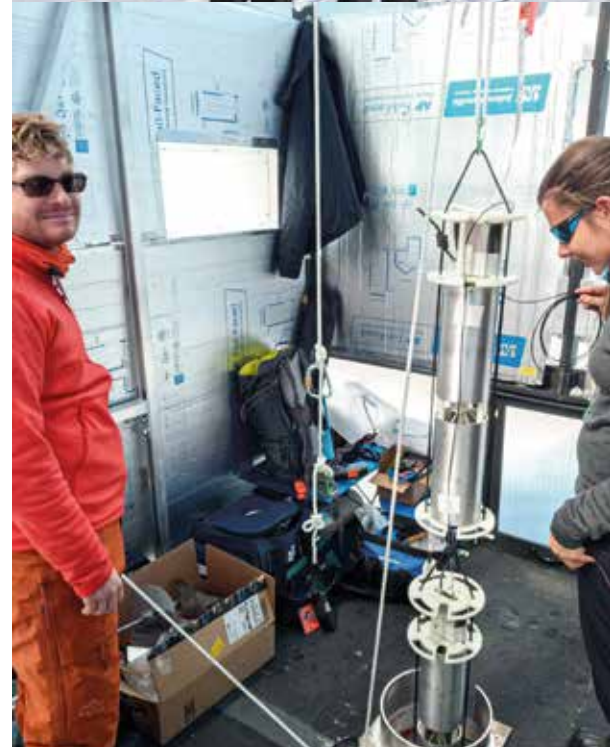
Doch die geladenen Folgeteilchen kosmischer Neutrinos erzeugen im Eis nicht nur Tscherenkow-Licht, sondern auch Radiowellen, die von Antennen aufgefangen werden können. Das ist das Ziel von RNO-G. „Der Vorteil von Radiowellen ist, dass Eis für sie ziemlich durchsichtig ist“, erläutert DESY-Physiker Christoph Welling, der mit dem Pionier-team die ersten Antennen auf Grönland aufgebaut hat. „Das heißt, wir können Radiosignale über Distanzen von einigen Kilometern detektieren.“

Je höher die Reichweite, desto größer das Volumen im Eis, das sich überwachen lässt, und desto größer die Chance, eine der seltenen Neutrino-kollisionen aufzuspüren. „RNO-G wird der erste Radio-Neutrino-detektor im großen Maßstab sein“, sagt Welling. Zuvor hatten kleinere Versuche bereits gezeigt, dass der Nachweis kosmischer Teilchen über Radiowellen grundsätzlich möglich ist.

RNO-G besteht aus insgesamt 35 Antennenstationen mit einem >>

### Installation im Gletscher

DESY-Physiker Christoph Welling (l.) mit einer Tiefenantenne und DESY-Physikerin Ilse Plaisier (r.) mit einer Oberflächenantenne. Die Tiefenantennen werden durch Bohrlöcher rund 100 Meter tief im Eispanzer versenkt. Die Stationen funktionieren autonom mit Solarzellen und sind per Mobilfunk untereinander vernetzt.







## „Ein vielversprechender Weg, um das neue Fenster zum Kosmos noch weiter zu öffnen“

Christian Stegmann, DESY-Direktor für Astroteilchenphysik

Abstand von je 1,25 Kilometern rund um das Forschungslabor Summit Station auf dem mächtigen grönländischen Eisschild. Die Stationen funktionieren autonom mit Solarzellen und sind per Mobilfunk untereinander vernetzt. Die Installationsarbeiten waren in Pandemiezeiten eine besondere logistische Herausforderung: Die Mitglieder der Teams stammen aus aller Welt – neben DESY sind an dem Pionierprojekt mehr als ein Dutzend Partner beteiligt, etwa die University of Chicago, die Vrije Universiteit Brussel, die Penn State University und die University of Wisconsin-Madison – und mussten vor der Anreise zur Summit Station an verschiedenen Orten mehrere Wochen in Quarantäne

verbringen, um ein Einschleppen des Coronavirus zu vermeiden.

### Energie eines Squashballs

RNO-G wird mindestens fünf Jahre auf dem grönländischen Eis stehen bleiben. Die Erfahrungen in der Arktis bieten neben neuen Erkenntnissen über den Kosmos auch interessante Perspektiven für den geplanten Ausbau des antarktischen Neutrinoobservatoriums zu IceCube Generation 2 (IceCube-Gen2), bei dem unter anderem 12 000 zusätzliche Detektorkugeln im Eis versenkt werden sollen. „Der Nachweis von Radiosignalen von hochenergetischen Neutrinos ist ein sehr vielversprechender Weg, den zugänglichen Energiebereich deutlich

zu vergrößern und damit das neue Fenster zum Kosmos noch weiter zu öffnen“, betont DESYs Direktor für Astroteilchenphysik, Christian Stegmann. „Wir gehen diesen Weg über erste Testaufbauten auf Grönland, um dann auch Radioantennen am Südpol als Teil von IceCube-Gen2 zu installieren.“

Denn die Leuchtsignale der unterirdischen Folgeteilchen lassen sich im Eis nicht so weit verfolgen wie die Radiowellen. Dafür schlagen die Photovervielfacher bereits bei niedrigeren Energien der kosmischen Neutrinos an. „Je höher die Energie, desto seltener werden die Neutrinos. Das heißt, man braucht größere Detektoren“, erläutert DESY-Forscherin Ilse Plaisier aus dem Installationsteam auf Grönland. „Die beiden Systeme ergänzen sich ideal: Das optische IceCube-Detektorgitter misst etwa bis zu einer Neutrinoenergie von einer Billion Elektronenvolt, das Radio-Antennenfeld wird ab rund zehn Billionen bis zu hundert Trillionen Elektronenvolt empfindlich sein.“ Das Elektronenvolt ist eine in der Teilchenphysik weit verbreitete Einheit der Energie. Hundert Trillionen Elektronenvolt entsprechen etwa der Energie eines kräftig geschlagenen Squashballs mit 130 Kilometern pro Stunde – aber im Fall eines Neutrinos konzentriert in einem einzelnen subatomaren Teilchen, das Trillionen Trillionen Mal leichter ist als ein Squashball.

Bis die Antennen auf Grönland anschlagen, kann es allerdings Monate oder sogar Jahre dauern. „In der Neutrinforschung braucht man Geduld“, sagt Nelles. „Hochenergetische Neutrinos lassen sich unheimlich selten auffangen. Aber wenn man eines erwischt, dann ist der Informationsgehalt unglaublich.“

RNO-G-Homepage:  
<https://radio.uchicago.edu>



Das Forschungslabor Summit Station liegt mitten auf dem grönländischen Eisschild.



Bei etwa 80 Grad Celsius bilden die Proteine eine undurchsichtige Netzstruktur.



# Das Ei im Röntgenstrahl

Innovative zeitaufgelöste Untersuchung zeigt Netzwerkbildung und Dynamik von Proteinen

**E**ier gehören zu den vielfältigsten Zutaten für Lebensmittel. Sie können Gel, Schaum oder vergleichsweise fest sein und dienen auch als Grundlage für Emulsionen. Bei etwa 80 Grad Celsius wird Eiweiß („Eiklar“) fest und auch optisch undurchsichtig. Das liegt daran, dass die Proteine im Eiweiß bei Erhitzen eine Netzstruktur ausbilden. Mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III hat ein Forschungsteam der Universitäten Tübingen und Siegen nun untersucht, wie dies genau abläuft.

Die Studie zeigt, wie sich die Proteine im Hühnereiweiß beim Erhitzen entfalten und vernetzen, um eine feste Struktur zu bilden. Die innovative Untersuchungsmethode ist sowohl für die Lebensmittelindustrie interessant als auch für das große Feld der Proteinanalysen, wie Forschungsleiter Frank Schreiber aus Tübingen betont.

## Handelsübliches Hühnerei

Zur genauen Analyse der molekularen Struktur von Eiweiß ist kurzwellige Strahlung wie Röntgenlicht nötig, die das undurchsichtige Eiweiß durchdringt und deren Wellenlänge nicht größer ist als die zu untersuchenden Strukturen. „Um die Strukturänderung im Detail zu verstehen, muss man das Phäno-

men auf der Mikrometerskala untersuchen“, erläutert Hauptautorin Nafisa Begam aus Schreibers Team.

Für ihre Versuche verwendeten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein handelsübliches Hühnerei und füllten das Eiweiß in ein Quarzröhrchen mit 1,5 Millimetern Durchmesser. „Darin wurde das Eiweiß kontrolliert erhitzt, während wir es mit Röntgenlicht analysiert haben“, berichtet Ko-Autor Fabian Westermeier von DESY. „Der Röntgenstrahl war dabei auf 0,1 mal 0,1 Millimeter aufgeweitet, so dass die Strahlungs-dosis die Proteinstrukturen nicht geschädigt hat.“

## Dynamik von Biomolekülen

Die Messung zeigt die Proteindynamik im Eiweiß über rund eine Viertelstunde. In den ersten knapp drei Minuten wuchs das Proteinnetzwerk demnach exponentiell und erreichte nach etwa fünf Minuten ein Plateau, auf dem sich nahezu keine weiteren Proteinverknüpfungen mehr formten. Die mittlere Maschengröße des Proteinnetzes lag nach dieser Zeit bei ungefähr 0,4 Mikrometern (tausendstel Millimetern).

In einer zweiten Studie untersuchte das Team die Selbstorganisation von Proteinlösungen in proteinreiche und proteinarme Domänen als Beispiel von Strukturbildung in

der Zellbiologie. Dabei ließ sich die temperaturabhängige Dynamik zeitabhängig verfolgen. „Bei hoher Proteinkonzentration sinkt die Mobilität, was die Entwicklung der Phasentrennung bremst. Das ist wichtig für die besondere Dynamik des Systems“, berichtet Hauptautorin Anita Girelli aus Schreibers Gruppe.

Die Kooperation der Gruppen von Schreiber aus Tübingen und Christian Gutt aus Siegen benutzte für ihre Untersuchungen die sogenannte Röntgenphotonen-Korrelationspektroskopie (XPCS) in einer bestimmten Geometrie, so dass sich damit Struktur und Dynamik der Proteine im Eiweiß zugleich bestimmen ließen. Diese Studien zeigen nicht nur neue Details zur Strukturänderung in Eiweiß, sondern belegen ebenso das Untersuchungskonzept, das auch bei anderen Proben Verwendung finden kann, wie Schreiber betont: „Die erfolgreiche Anwendung der Röntgenphotonen-Korrelationspektroskopie eröffnet einen neuen Weg zur Untersuchung der Dynamik von Biomolekülen, was unerlässlich ist, um sie wirklich zu verstehen.“

Physical Review Letters,  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.098001  
und 10.1103/PhysRevLett.126.138004

# Katalysator bei der Arbeit

## Röntgenuntersuchung liefert einzigartigen Blick auf ein einzelnes Nanopartikel

**K**atalysatoren sind aus der chemischen Industrie nicht mehr wegzudenken: Sie sparen Energie und machen viele Produktionsprozesse überhaupt erst möglich. Von der Düngemittelherstellung bis zur Plastikproduktion haben Katalysatoren immenses wirtschaftliches Gewicht. „Trotz ihres breiten Einsatzes und ihrer großen Bedeutung kennen wir viele wichtige Details der genauen Funktionsweise der verschiedenen Katalysatoren noch nicht“, erläutert DESY-Forscher Andreas Stierle, der das DESY-NanoLab leitet. „Es ist daher ein langgehegtes Ziel, reale Katalysatormaterialien im Betrieb zu untersuchen.“

Das ist nicht so einfach, denn um die aktive Oberfläche möglichst groß zu gestalten, werden Katalysatormaterialien meist als winzige Nanopartikel eingesetzt, und die Änderungen, die ihre Aktivität beeinflussen, spielen sich auf ihrer Oberfläche ab. Mit intensivem Röntgenlicht ist es einem von Stierle geführten Forschungsteam nun gelungen, ein einzelnes Katalysator-Nanopartikel bei der Arbeit zu beobachten. Die Untersuchung zeigt erstmals, wie ein individuelles Nanopartikel unter Reaktionsbedingungen die chemische Zusammensetzung seiner Oberfläche ändert, wodurch es aktiver wird. Die Untersuchung ist ein wichtiger Schritt zu einem besseren Verständnis realer Katalysatormaterialien.

Katalysatoren sind Materialien, die chemische Reaktionen begünstigen, ohne dabei selbst verbraucht zu werden. Ein sehr bekanntes Beispiel ist der Abgaskatalysator im Auto. Dabei handelt es sich um Edelmetalle wie Platin, Rhodium und Palladium, die eine Umwand-

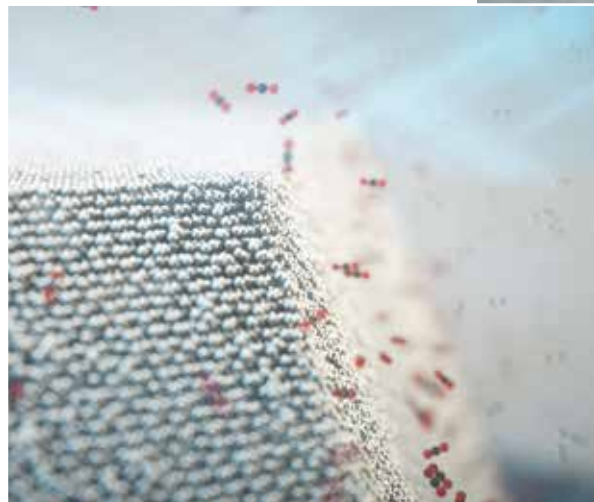
lung von sehr giftigem Kohlenmonoxid (CO) in Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) sowie eine Reduzierung schädlicher Stickoxide (NO<sub>x</sub>) ermöglichen. Das Team aus dem DESY-NanoLab hat eine Technik entwickelt, mit der sich einzelne Nanopartikel markieren und dadurch in der Probe identifizieren lassen.

### Detailliertes Abbild

„Für die Untersuchung haben wir im Labor Nanopartikel aus einer Platin-Rhodium-Mischung, einer sogenannten Legierung, auf einem Trägermaterial wachsen lassen und ein spezielles Partikel markiert“, berichtet Thomas Keller aus dem DESY-NanoLab. „Das markierte Partikel hat einen Durchmesser von rund 100 Nanometern und ähnelt Partikeln, wie sie im Autokatalysator zum Einsatz kommen.“ Ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter.

Mit dem Röntgenlicht der europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF im französischen Grenoble konnte das Team nicht nur ein detailliertes Abbild des Nanopartikels erstellen, sondern auch die mechanische Spannung in seiner Oberfläche vermessen. „Die Oberflächenspannung ist ein Maß für ihre chemische Zusammensetzung aus Platin- und Rhodiumatomen“, erläutert Philipp Pleßow vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seine Gruppe hat eine Theorie entwickelt, die den Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung und chemischer Zusammensetzung für die jeweiligen Facetten des Nanopartikels beschreibt. Wie bei geschliffenen Edelsteinen werden die verschiedenen Oberflächen eines Nanopartikels als Facetten bezeichnet.

Nach dem Wachstum des Nanopartikels befinden sich vor



An der Oberfläche des Nanopartikels oxidiert Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid.



allem Platinatome an der Oberfläche, weil dies energetisch günstiger ist. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchten Form und Oberflächenspannung des Partikels dann unter verschiedenen Bedingungen, darunter auch Betriebsbedingungen wie im Autokatalysator. Dazu heizten sie das Partikel auf rund 430 Grad Celsius auf und ließen Kohlenmonoxid- und Sauerstoffmoleküle an ihm vorbeiströmen. „Unter diesen Reaktionsbedingungen werden Rhodiumatome im Inneren des Partikels mobil und wandern an die Oberfläche, weil Rhodium stärker als Platin mit Sauerstoff wechselwirkt“, erläutert Pleßow. Auch das sagt die Theorie korrekt voraus.

### Rhodium wandert an die Oberfläche

„In der Folge ändern sich Oberflächenspannung und Form des Partikels“, berichtet Ivan Vartianants von DESY, dessen Team die Form- und Oberflächenspannungsmessungen in räumliche Bilder umgewandelt hat. „Es findet eine facettenabhängige Rhodiumanreicherung statt, und es bilden sich mehr Ecken und Kanten.“ Die chemische Zusammensetzung

der Oberfläche, die Form und die Größe der Partikel haben erheblichen Einfluss auf ihre Funktion und Effizienz. Wie dies genau zusammenhängt, und auf welche Weise sich die Struktur und Zusammensetzung der Nanopartikel beeinflussen lässt, beginnen Wissenschaftlerin-

von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereich wollen Forscherinnen und Forscher von KIT und DESY dies nun systematisch erkunden.

„Unsere Untersuchung ist ein wichtiger Schritt zur Analyse realer

## „Unsere Untersuchung ist ein wichtiger Schritt zur Analyse realer Katalysatormaterialien“

Andreas Stierle, DESY

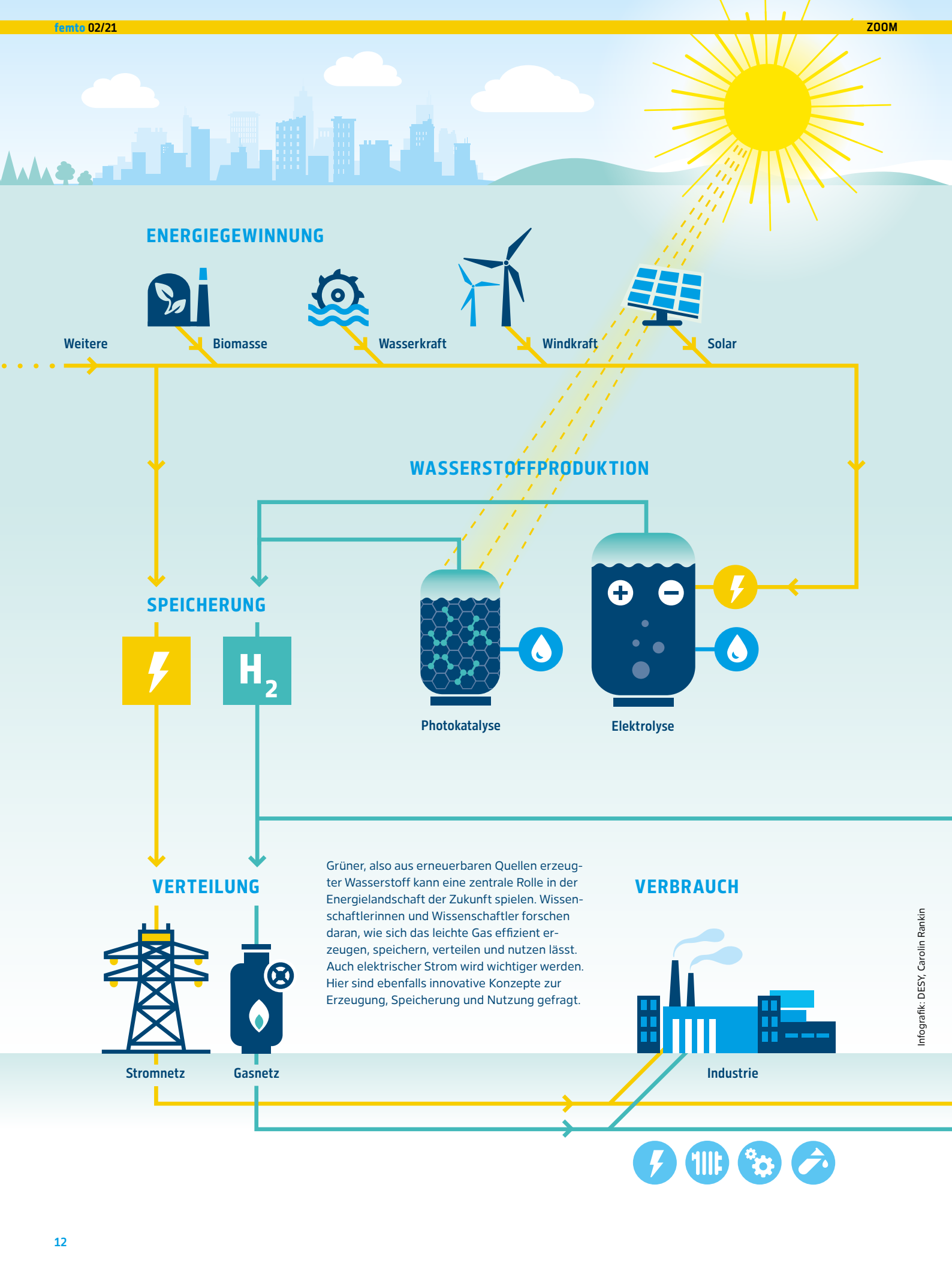
nen und Wissenschaftler allerdings erst zu verstehen. Im Röntgenlicht lassen sich noch Spannungsänderungen von 0,1 Promille erkennen, das entspricht in dieser Untersuchung einer Genauigkeit von etwa 0,0003 Nanometern (0,3 Pikometern).

„Wir können hier erstmals die Details der Strukturänderungen von solchen Katalysator-Nanopartikeln im Betrieb verfolgen“, sagt Stierle. „Das ist ein großer Fortschritt und hilft uns beim Verständnis einer ganzen Klasse von Reaktionen, bei denen Legierungnanopartikel eingesetzt werden.“ In einem neuen,

Katalysatormaterialien“, betont Stierle. Bislang züchten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für solche Untersuchungen Modellsysteme im Labor. „Wir sind bei dieser Untersuchung an die Grenze des Machbaren vorgestoßen. Mit dem bei DESY geplanten Röntgenmikroskop PETRA IV werden wir einzelne, zehnmal kleinere Partikel in realen Katalysatoren unter Reaktionsbedingungen anschauen können.“

Science Advances,  
DOI: 10.1126/sciadv.abh0757

Die Röntgenuntersuchung erzeugt ein charakteristisches Beugungsmuster (rechts oben), aus dem sich nicht nur ein komplettes Abbild eines einzelnen Katalysator-Nanopartikels erzeugen lässt, sondern das auch Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Partikeloberfläche während des Betriebs zeigt.



**ENERGIEGEWINNUNG**

Weitere

Biomasse

Wasserkraft

Windkraft

Solar

**WASSERSTOFFPRODUKTION**

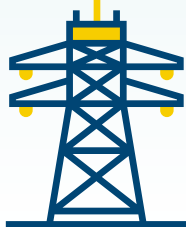
**SPEICHERUNG**



Photokatalyse

Elektrolyse

**VERTEILUNG**



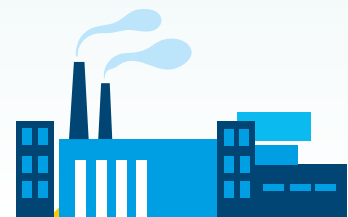
Stromnetz



Gasnetz

Grüner, also aus erneuerbaren Quellen erzeugter Wasserstoff kann eine zentrale Rolle in der Energielandschaft der Zukunft spielen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler forschen daran, wie sich das leichte Gas effizient erzeugen, speichern, verteilen und nutzen lässt. Auch elektrischer Strom wird wichtiger werden. Hier sind ebenfalls innovative Konzepte zur Erzeugung, Speicherung und Nutzung gefragt.

**VERBRAUCH**



Industrie

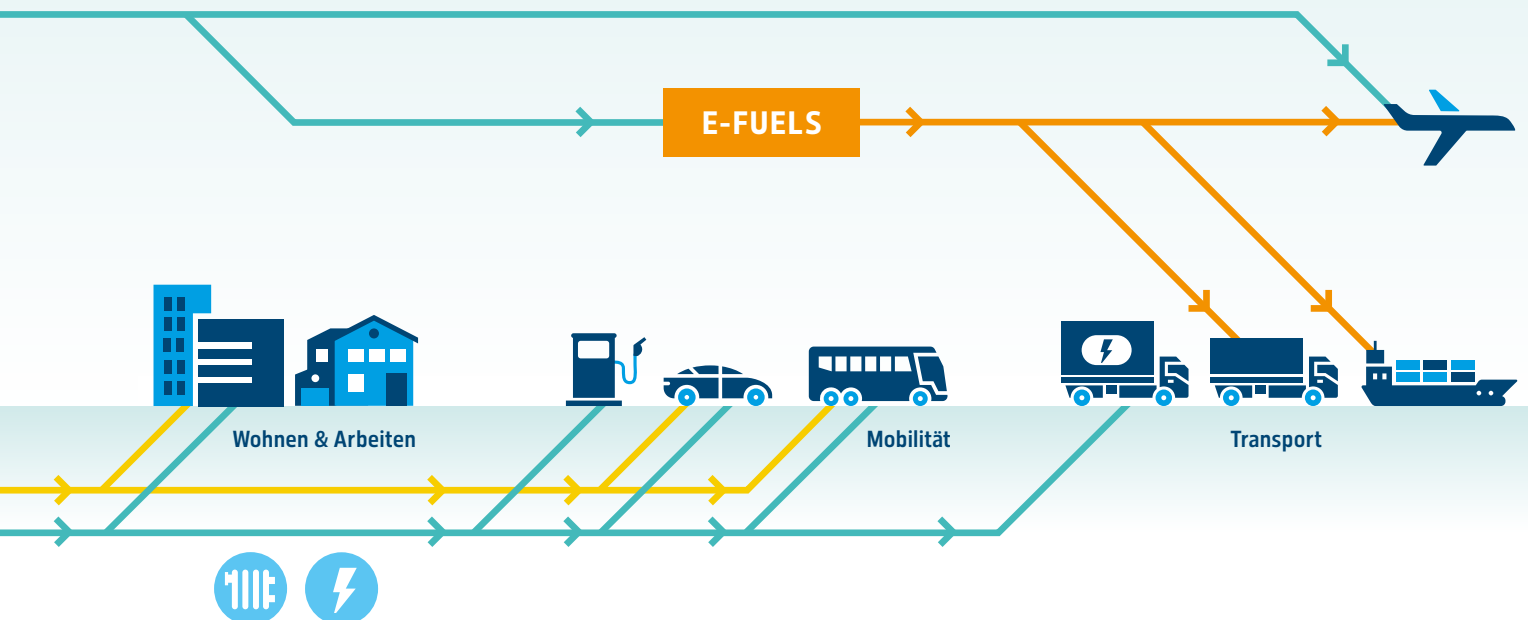


ZOOM

# Forschen für die ENERGIEWENDE

Wie Grundlagenforschung den Weg zu Innovationen für grüne Energie ebnet

Die Energiewende gehört zu den größten gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Ohne eine CO<sub>2</sub>-neutrale Energieversorgung wird der Klimawandel nicht zu stoppen sein. Nicht das Umlegen eines einzelnen großen Ruders bringt dabei allerdings die Wende. Stattdessen sind zahlreiche Entwicklungen und Maßnahmen an verschiedenen Stellen der Energielandschaft erforderlich, und Innovationen und Verhaltensänderungen müssen Hand in Hand gehen. Eine zentrale Rolle könnte künftig dem Wasserstoff zukommen. Doch dieser Energieträger ist nur so grün wie seine Erzeugung. Neue und ertragreichere Methoden für die Ernte erneuerbarer Energien sind daher ebenso gefragt wie Konzepte für die effiziente Speicherung verschiedener Energieformen. Auch das Einsparen von Energie birgt noch großes Potenzial, nicht zuletzt bei den großen Anlagen der Forschung selbst.



## ZOOM

Wundermittel Wasserstoff?	14
Innovationen und Verhaltensänderungen	19
Die Sonne anzapfen	20
Porenschwamm als Kraftwerk	24
Bessere Stromspeicher	26
Nachhaltiger Beschleuniger	28

# Wundermittel Wasserstoff?

Das leichte Gas hat das Zeug zum Energieträger von morgen – noch sind jedoch Forschungsfragen zu klären

**W**asserstoff gilt als ein zentrales Element der Energiewende: In Zukunft soll er klimafreundliche Flugzeuge, Schiffe und Lastwagen antreiben und die Herstellung von grünem Stahl und Zement möglich machen. Dafür aber muss er CO<sub>2</sub>-frei hergestellt werden, zum Beispiel indem Wasser durch den Strom aus Windrädern und Solarzellen gespalten wird. Weltweit arbeiten Forscherinnen und Forscher an den Grundlagen der künftigen Wasserstoffwirtschaft – von der effizienten Erzeugung des Gases über die Speicherung bis hin zu seiner Nutzung.

„Wir müssen in den nächsten Jahren unsere energie- oder ressourcenverbrauchende Wirtschaft radikal umbauen“, sagt DESY-Physikerin Simone Techert. „Dabei kristallisiert sich immer mehr heraus, dass Wasserstoff eine zentrale Rolle spielen wird, vor allem für die Industrie.“ Bislang befeuern Kohle, Öl und Erdgas die Werkhallen und sorgen für einen enormen CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Grüner Wasserstoff hat das Potenzial, diesen Bereich nachhaltig zu dekarbonisieren. Auch für den Verkehr dürfte er wichtig werden, insbesondere in Luft- und Schifffahrt – entweder in direkter Form oder als Basis für synthetische Treibstoffe, auch E-Fuels genannt.

Derzeit läuft die Herstellung von grünem Wasserstoff über sogenannte Elektrolyseure: In Containern voller Rohrleitungen und Ventile fließt gereinigtes Leitungswasser in Stapel aus Dutzenden von Spezialmembranen. Dort spaltet Strom das Wasser in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff. Der Strom kann zum Beispiel von einem Windpark oder einer Solarfarm stammen und kommt per Leitung zum Elektrolyseur. Damit die Spaltung klappt, braucht es ein chemisches Helferlein – einen Katalysator, der die Reaktion entscheidend beschleunigt. Stets sucht die Fachwelt dabei nach besseren Varianten, also

nach Katalysatoren, die haltbarer, effizienter und günstiger sind als die derzeit gebräuchlichen Stoffe.

### Sparsamerer Katalysator

Für bestimmte Elektrolyseure kommt heute Iridium zum Einsatz, eines der seltensten und wertvollsten Metalle der Welt, die Jahresproduktion liegt bei acht Tonnen. Für die Energiewende werden künftig immer mehr und immer größere Elektrolyseure benötigt – und damit auch mehr Iridium. „Deshalb versuchen wir, die Menge an Iridium im Katalysator drastisch zu senken“, erläutert Vedran Vonk, Physiker am DESY-NanoLab. „Unser Ansatz: Wir wollen das teure Metall mit einem anderen Material verbinden, mit Ruthenium.“

Auch das Metall Ruthenium ist ein passabler Katalysator und deutlich günstiger als Iridium, wenn auch weniger haltbar. Zusammen mit der Arbeitsgruppe von Herbert Over an der Justus-Liebig-Universität Gießen stellt Vonk nanometerkleine Blöcke aus Rutheniumoxid her. Die Ränder dieser Blöcke spickt das Team anschließend mit Iridiumoxid, was eine stabilisierende Wirkung auf das Rutheniumoxid hat. „Damit verbrauchen wir wenig Iridium, erhalten aber eine gute katalytische Wirkung“, erläutert Vonk. „In unseren letzten Experimenten konnten wir zeigen, dass unser Kombi-Katalysator wirklich



## „Statt mit Strom soll das Wasser durch Licht gespalten werden“

Heshmat Noei, DESY

stabil ist und sich auch bei hohen Strömen nicht zersetzt.“ Jetzt wollen die Fachleute das System weiter untersuchen und unter anderem die Effizienz steigern.

### Licht spaltet Wasser

Weiter in der Zukunft liegt eine andere Idee zur Wasserstoffherzeugung – die Photokatalyse. „Statt mit Strom soll das Wasser durch Licht gespalten werden“, erläutert NanoLab-Chemikerin Heshmat Noei. Funktioniert der Ansatz, ließe sich Wasserstoff ähnlich gewinnen wie Solarstrom – man würde die Aggregate einfach in die Sonne stellen. Auch hier spielt der Katalysator die entscheidende Rolle: Ohne seine Hilfe käme die Lichtspaltung des Wassermoleküls schlicht nicht ins Rollen. In der Tat gibt es bereits passable Photokatalysatoren, zum Beispiel Titanoxid. „Es ist günstig und gut verfügbar“, sagt Noei. „Sein Nachteil: Bislang funktioniert Titanoxid nur mit UV-Licht, normales Sonnenlicht genügt nicht.“

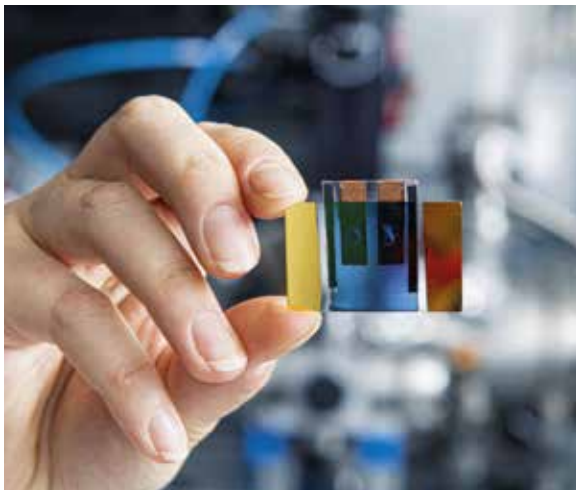
Um das zu ändern, wollen die Fachleute die Form der nanometer-

kleinen Titanoxidteilchen gezielt variieren. Dazu aber müssen sie besser verstehen, wie die Katalyse bei diesem Material abläuft. Entsprechende Infos liefern Experimente an Hochleistungs-UV-Lasern wie FLASH bei DESY. Sie können die extrem schnellen Vorgänge präzise auflösen: Was passiert genau auf der Skala von Femtosekunden (billiardstel Sekunden), wenn ein Wassermolekül an einem Titanoxidteilchen andockt, reagiert und gespalten wird? „Bei solchen Experimenten haben wir gesehen, dass bestimmte Formen von Titanoxidteilchen auch bei einer Wellenlänge von 770 Nanometern aktiv sein können, also im sichtbaren Bereich“, sagt Noei. „Als nächstes wollen wir Titanoxid mit etwas Gold verbinden und schauen, ob sich das als besserer Photokatalysator eignet.“

### Dünner als ein Haar

Ähnlich visionär mutet ein Projekt von Simone Techert an. Dahinter steckt eine originelle Idee: „Ähnlich wie das Blatt einer Pflanze, die Lichtenergie unmittelbar in chemische Energie umwandelt, wollen wir eine Solarzelle entwickeln, die direkt Wasserstoff erzeugt.“ Der grüne Strom müsste also nicht per Solarfarm erzeugt und über Leitungen zu einem Elektrolyseur transportiert werden, sondern würde gleich vor Ort generiert, quasi innerhalb des Elektrolyseurs.

Erste Prototypen konnte Techerts Arbeitsgruppe bereits bauen – winzige Zellen, dünner als ein menschliches Haar. Gleich einem Sandwich bestehen sie aus mehreren Schichten: Eine obere Lage fungiert als Solarzelle, >>



Grüner Strom für die Wasserstoffproduktion: Die nur 200 Nanometer (millionstel Millimeter) dünne organische Solarschicht wandelt Licht mit einer Effizienz von fast 30 Prozent in Strom um, der direkt zur Spaltung von Wasser eingesetzt werden kann.



DESY-Forscherin Simone Techert setzt nachgebaute Tiefseemineralien zur Produktion von Wasserstoff ein.



sammelt Licht auf und wandelt es in Strom um. Anders als die meisten Photovoltaikmodule auf den Hausdächern besteht sie nicht aus Silizium, sondern aus lichtempfindlichen Kunststoffmolekülen. Die hauchdünne Solarzelle liefert ihren Strom direkt in die darunterliegende Schicht. Diese agiert als Mikro-Elektrolyseur und spaltet mit Hilfe des Stroms und ein wenig Licht Wasser zu Wasserstoff.

Die winzige Elektrolyse-schicht besteht aus wasserspaltenden Oxiden. Das sind Mineralien-Analoga, wie sie unter anderem in der Tiefsee vorkommen – als Abbauprodukte von Bakterien, die an unterseeischen Minivulkanen gedeihen. „Diese Mineralien-Analoga lassen sich im Labor nachbauen und können Wasser hervorragend spalten“, beschreibt Techert. „Solar- und Mineraliensicht liegen direkt aufeinander und sind so aufgebaut, dass spezielle Wechselwirkungen zwischen ihnen für eine effiziente Umwandlung von Sonnenenergie in Wasserstoff sorgen.“ In Zahlen: Die

## „Wir müssen in den nächsten Jahren unsere energie- oder ressourcenverbrauchende Wirtschaft radikal umbauen“

Simone Techert, DESY

oberste, nur 200 Nanometer dicke Solarschicht wandelt Licht mit einer Effizienz von nahezu 30 Prozent in Strom um. Die untere, ebenso dünne Schicht besitzt einen Wirkungsgrad von 70 Prozent – eine Gesamteffizienz, die bereits vergleichbar ist mit kommerziellen Systemen.

### Ähnlich wie ein Baum

Noch aber sind grundlegende Fragen zu klären: Wenn Licht in die Zelle eindringt, schafft das auf der molekularen Ebene einiges an Unordnung. Diese Unordnung kann störend sein, etwa indem sie den Stromfluss in der Zelle behindert. Doch durch ein geschicktes Design der Materialien lässt sich die Unordnung so kanalisieren, dass

sie den Elektronenfluss sogar verstärkt und die Umwandlung von Sonnenlicht zu Wasserstoff begünstigt.

„Diese Prozesse müssen wir allerdings noch besser verstehen“, betont Techert. „Und mit den Röntgenquellen bei DESY können wir genauestens die Unordnung und deren Dynamik untersuchen und herausfinden, welche Materialien wir an welcher Stelle verwenden müssen, um ein möglichst effizientes System zu schaffen.“ So erlauben es Experimente am europäischen Röntgenlaser European XFEL, die ultraschnellen Molekülbewegungen in den Nanoschichten zu beobachten – ein wichtiger Input für das fundamentale Verständnis.



Neue Impulse dürften auch Versuche an der geplanten Röntgenquelle PETRA IV liefern: Diese soll das Röntgenlicht deutlich stärker bündeln können als die heutige Anlage und dadurch die Nanomaterialien viel genauer unter die Lupe nehmen können.

Doch auch wenn noch manche Antwort aussteht – gibt es bereits Ideen, wie eine grüne Wasserstofffabrik aus Nanozellen einmal ausschauen könnte? „Vielleicht so ähnlich wie ein Baum mit seinen Blättern, mit dreidimensional arrangierten Flächen“, mutmaßt Simone Techert. „Das ließe sich dann in die städtische Architektur integrieren, etwa in die Fassaden und auf die Dächer von Häusern.“ Eines zumindest scheint klar: Die Basismaterialien einer Nano-Wasserstoffzelle sind nicht besonders teuer. Von daher würde einer breiten Anwendung nichts im Wege stehen.

### Neue Wasserstoffspeicher

Die günstige Produktion von grünem Wasserstoff ist jedoch nur eine Forschungsfrage. „Eine andere lautet: Wie lässt sich das Gas möglichst effizient und sicher speichern?“, sagt NanoLab-Leiter Andreas Stierle. Heute gibt es zwei etablierte Methoden: Entweder in Drucktanks, dafür wird der Wasserstoff bis auf einen 700-fachen Atmosphärendruck komprimiert. Oder in Flüssigtanks, hierzu muss man das Gas bis auf minus 253 Grad Celsius abkühlen und verflüssigen. Nur: Beide Methoden sind aufwändig und kosten Energie – weshalb die Fachwelt an Alternativen bastelt.

Das Team von Stierle versucht es mit Palladium. Schon länger ist bekannt, dass das Edelmetall Wasserstoff ähnlich wie ein Schwamm aufsaugen kann. „Allerdings ist es bislang problematisch, den Wasserstoff wieder aus dem Material herauszubekommen“, erläutert Stierle. „Deshalb versuchen wir es mit Palladiumteilchen, die lediglich einen Nanometer groß sind.“

Herstellen lassen sich solche Winzlinge seit kurzem im Centre for X-Ray and Nano Science, kurz CXNS. Gerade erst ist Stierles Team in das nagelneue Gebäude eingezogen, in den Fluren stehen noch Umzugskartons herum, hier und da laufen letzte Bauarbeiten. Stierle öffnet die Tür zu einem der Labore und zeigt auf eine lange Röhre aus Edelstahl. Von der zweigen lauter kleinere Röhren ab und enden in diversen Vakuumkammern, manche dick eingepackt in Alufolie – ein wenig erinnert das Gebilde an das Modell einer künftigen Raumstation. „In einer dieser Kammer dampfen wir Edelmetalle auf spezielle Unterlagen auf“, erzählt der Physiker. „Ähnlich wie sich auf einer wasserabweisenden Oberfläche ein Wassertropfen formt, entstehen dabei die Nanopartikel von selbst.“

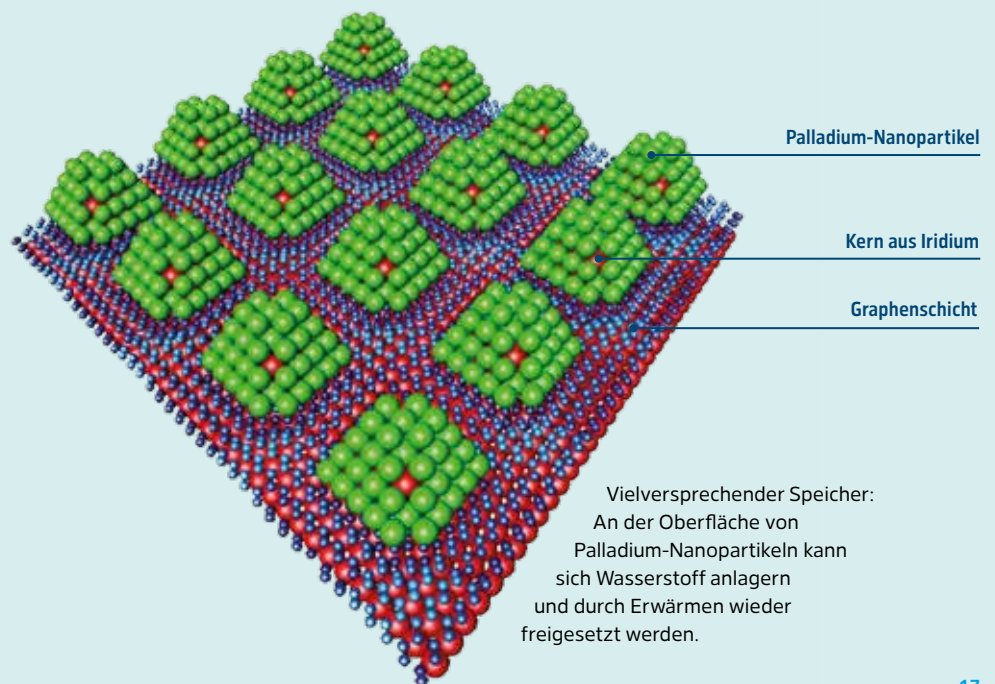
Um diese Partikel haargenau analysieren zu können, müssen sie mit einem komplexen System durch die luftleer gepumpten Röhren in die anderen Kammern manövriert werden: Per Spezialgreifer verfrachten die Fachleute ihre Proben auf einen kleinen Transportwagen. Diesen fährt ein Förderband zur nächsten Kammer, dort bringt ein anderer Greifer die Probe in Position. „Dazu

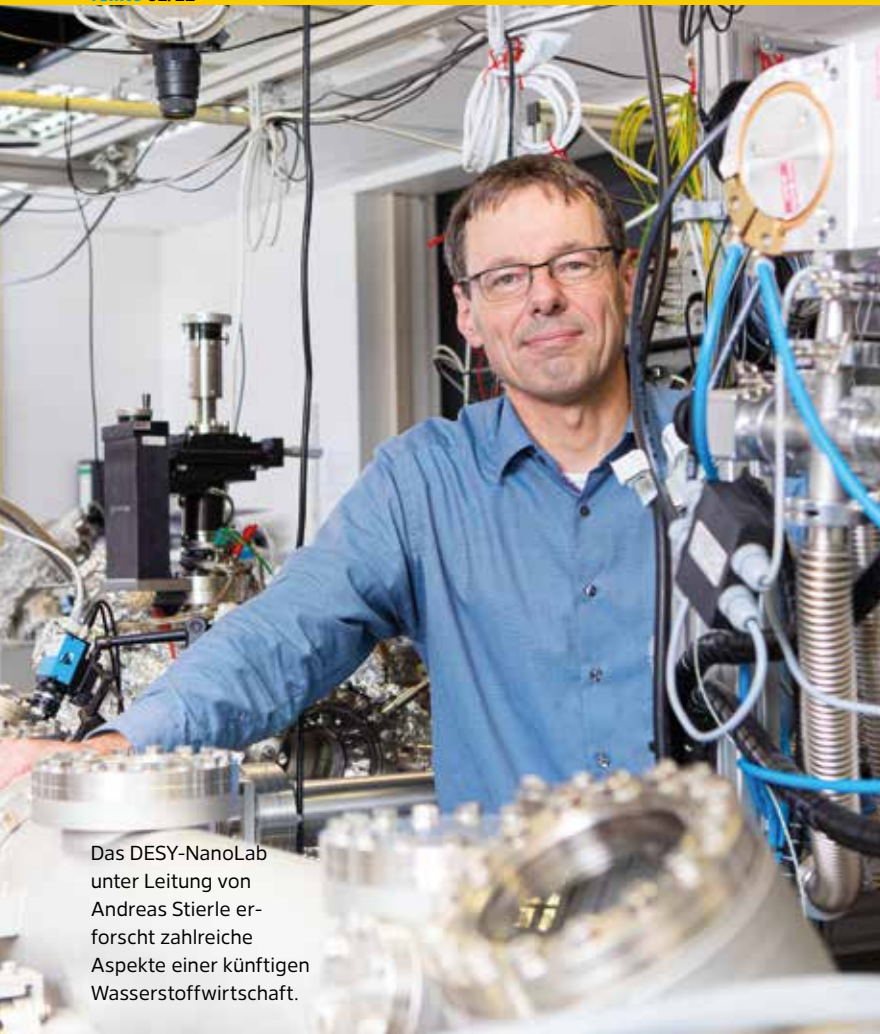
gehört viel Geschick“, erzählt Stierle. „Geht der Probenhalter irgendwo in der Vakuumröhre verloren, muss man sie aufmachen und alles belüften – ein ziemlicher Aufwand. Deshalb: lieber nicht fallen lassen!“

### Praline mit Iridium-Kern

Bei den Palladiumteilchen für die Wasserstoffspeicherung gibt es eine Besonderheit: Um sie zu stabilisieren, erhalten sie einen winzigen Kern aus Iridium. Anschließend werden sie auf einer Oberfläche aus Graphen fixiert, also einer zweidimensionalen, extrem dünnen Schicht aus Kohlenstoff. „Auf Graphen lassen sich die Palladiumteilchen in Abständen von nur zweieinhalb Nanometern verankern, das Resultat ist eine regelmäßige, periodische Struktur“, berichtet Stierle.

Mit Hilfe von raffinierten Röntgenverfahren konnte sein Team detailliert verfolgen, was geschieht, wenn die Palladiumklümpchen mit Wasserstoff in Kontakt kommen: Der Wasserstoff haftet sich fast ausschließlich an der Oberfläche der Teilchen an. Die nämlich sind schlicht zu winzig, als dass nennenswerte Mengen des Gases in ihr Inneres eindringen könnten. Die dabei entstehenden Gebilde >>





Das DESY-NanoLab unter Leitung von Andreas Stierle erforscht zahlreiche Aspekte einer künftigen Wasserstoffwirtschaft.

## „Wie lässt sich das Gas möglichst effizient und sicher speichern?“

Andreas Stierle, DESY

ähneln einer Praline: In der Mitte steckt eine Nuss aus Iridium, umhüllt vom Palladium als Marzipan, den Schokoladenüberzug übernimmt der Wasserstoff. Wollte man den Speicher dann wieder entladen, dürfte eine moderate Erwärmung genügen: Von der Oberfläche der Nanoteilchen sollte der Wasserstoff relativ rasch entweichen – schließlich muss er sich nicht mühsam den Weg aus dem Inneren bahnen, um nach außen zu gelangen.

„Jetzt wollen wir herausfinden, welche Speicherdichten sich mit diesem Verfahren erreichen lassen“, sagt Stierle. „Doch bevor wir an technische Anwendungen denken können, gibt es noch einige Probleme zu meistern.“ Wichtig ist

unter anderem ein praxistaugliches Trägermaterial. Möglich wären Kohlenstoffschwämme mit winzigen Poren, in denen sich die Palladiumzwerge in großen Mengen unterbringen ließen. „So etwas wird schon ausprobiert“, sagt Stierle. „Und ich denke, für die Zukunft ist das durchaus vielversprechend.“

### Bessere Brennstoffzellen

Doch sein Labor kümmert sich auch um eine andere Frage: Wie lässt sich Wasserstoff am wirkungsvollsten einsetzen? Für manche Anwendungen soll er wieder in Strom umgewandelt werden, etwa um Fahrzeuge anzutreiben oder Schwankungen im Stromnetz auszugleichen. Das geschieht in Brennstoffzellen: In ihnen

reagieren Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, wobei Elektronen in Bewegung geraten – es fließt ein Strom. Auch für diese Reaktion braucht es einen Katalysator, oft kommt das Edelmetall Platin zum Einsatz. Nur: Mit der Zeit zersetzt sich das Platin, was die Lebensdauer einer Brennstoffzelle merklich reduziert.

„Mit verschiedenen Analysemethoden schauen wir uns an, was genau in der Brennstoffzelle passiert“, erklärt NanoLab-Chemiker Leon Jacobse. „Probleme bereitet vor allem der Sauerstoff, der bei der Reaktion unweigerlich entsteht.“ Diese nämlich oxidiert die Oberflächen des Platins. Insbesondere bei hohen elektrischen Spannungen wird so viel Sauerstoff gebunden, dass es die Platinatome regelrecht aus dem Katalysator herausziehen kann. „Wir konnten beobachten, wie das Platin Schicht für Schicht abgetragen wird“, berichtet Jacobse.

Was mit diesem vagabundierenden Platin geschieht, ist größtenteils unklar. Ein Teil der Atome begibt sich offenbar wieder zurück in den Katalysator – eine Art Heilungsprozess. Wohin der Rest verschwindet und welche Art von Verbindungen er eingeht, wollen die NanoLab-Forscher nun herausfinden. „Dazu planen wir neue Experimente“, sagt Jacobse. „Und in den nächsten Jahren werden wir dieses Rätsel bei PETRA III hoffentlich lösen können.“ Die Erkenntnisse könnten perspektivisch auch für die Industrie nützlich sein: Sie könnten den Herstellern helfen, ihre Brennstoffzellen künftig so zu konstruieren, dass sie weniger Platin verlieren und damit länger halten.

## „Wir konnten beobachten, wie das Platin Schicht für Schicht abgetragen wird“

Leon Jacobse, DESY

## „Innovationen und Verhaltensänderungen müssen Hand in Hand gehen“

**Der Ökonom Alexander Bassen lehrt an der Universität Hamburg. Er ist Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats Globale Umweltveränderungen (WBGU) sowie des Rats für Nachhaltige Entwicklung (RNE) der Bundesregierung. Der Transfer von Forschung zu Innovationen braucht seiner Ansicht nach noch mehr Unterstützung.**

**femto:** Die Energiewende ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, die enorme Herausforderungen mit sich bringt. Welche Rolle kann dabei die Grundlagenforschung spielen?

**Alexander Bassen:** Einerseits braucht es eine Verhaltensänderung: Zwar ist uns bewusst, dass wir künftig mehr Windräder und Stromleitungen benötigen werden. Aber die Bereitschaft in der Gesellschaft, einen eigenen Beitrag dafür zu leisten, ist oft nicht so hoch, wie man sich das wünschen würde. Nicht selten herrscht die Einstellung: Erneuerbare ja, aber bitte nicht in meinem Hinterhof. Da ist sicher noch viel Überzeugungsarbeit nötig. Doch allein durch solche Verhaltensänderungen werden wir die Energiewende nicht hinbekommen. Ebenso benötigen wir technische Innovationen, davon bin ich fest überzeugt. Ansonsten wäre die Transformation mit einem klaren Verlust an Lebensqualität verbunden. Von daher brauchen wir den technischen Fortschritt – und auch neue Ideen aus der Grundlagenforschung. Alles in allem müssen bei der Energiewende Innovationen und Verhaltensänderungen Hand in Hand gehen.

**femto:** Nun schafft es die Grundlagenforschung ja durchaus, immer neue Ideen zutage zu fördern. So haben sich in den vergangenen

Jahren etliche Start-ups mit visionären Konzepten für Fusionsreaktoren gegründet. Doch längst nicht jede Idee schafft es in die Anwendung. Besteht da vielleicht die Gefahr, dass die Grundlagenforschung zu viel verspricht, was sie später nicht einhalten kann?

**Alexander Bassen:** Das würde ich so nicht sagen. Wenn ich mit Fachleuten aus der Grundlagenforschung diskutiere, welchen Beitrag ihre Arbeit eines Tages für die Gesellschaft leisten könnte, lautet die Antwort oft, dass sie das gar nicht wissen wollen. Ansonsten könnte es passieren, dass die Forschung zu früh in eine bestimmte Richtung gelenkt wird und ihr wahres Potenzial nicht entfalten kann. Für mich als Betriebswirt hat es ein bisschen gedauert, bis ich das verstanden und akzeptiert habe. Doch heute bin ich davon überzeugt, dass das der richtige Ansatz ist: In der Grundlagenforschung sollten wir uns zunächst mit der eigentlichen wissenschaftlichen Fragestellung auseinandersetzen und erst dann darüber nachdenken, für welche Anwendungsbereiche sie gut sein könnte. Diesen Freiraum braucht die Grundlagenforschung, um am Ende erfolgreich zu sein.

**femto:** Wie können dann aus Forschungsideen handfeste Innovationen werden, die bei der Energiewende helfen?

**Alexander Bassen:** Wenn die Forschung eine bestimmte Reifestufe erreicht hat, sollte man durchaus Impulse für Innovationen setzen und darüber nachdenken, in welche Richtung ein Projekt gehen könnte. Das muss zwar nicht zwangsläufig

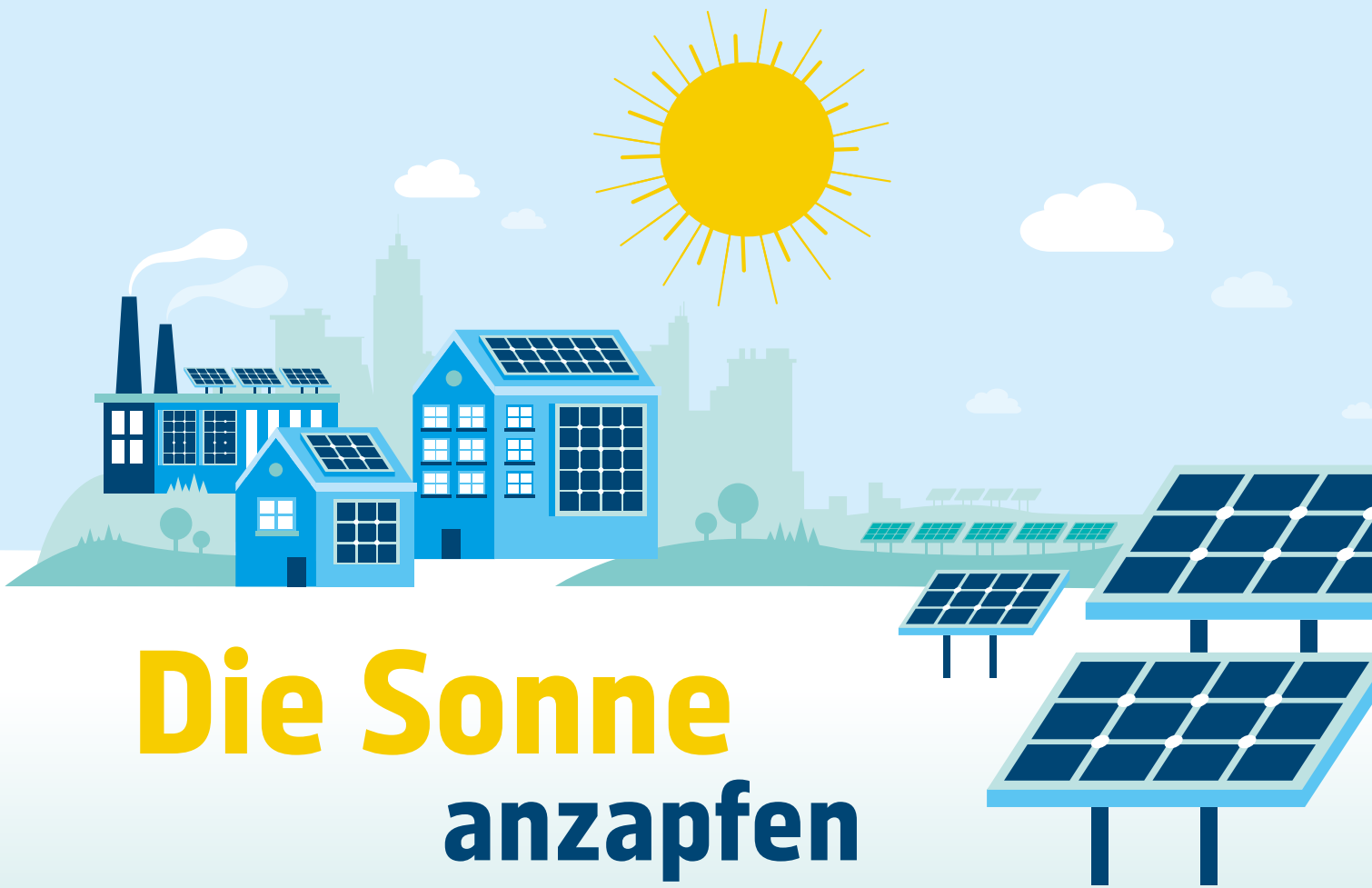


durch die Personen geschehen, die die Grundlagenforschung vorangetrieben haben. Aber vielleicht kann es auch für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler interessant sein, ihre Ideen zu einer Umsetzung weiterzuentwickeln, mit der sich konkrete Probleme lösen lassen. Wenn etablierte Persönlichkeiten ihr Wissen noch stärker als bislang in Produkte gießen würden, fände ich das sehr spannend.

**femto:** Allerdings heißt es immer wieder, Deutschland sei in der Grundlagenforschung zwar führend, doch dann hapere es mit der Umsetzung in Anwendungen und Produkte. Ist das auch in der Energieforschung ein Problem?

**Alexander Bassen:** Ja, das glaube ich schon. Zwar funktioniert der Transfer in manchen Bereichen, und einige Universitäten sind da richtig gut. Doch wir müssten diesen Transfer noch viel stärker unterstützen, etwa indem wir administrative Prozesse erleichtern und stärkere Anreize für Forscherinnen und Forscher schaffen, ihre Ideen zu einer Innovation weiterzuentwickeln. Das gilt insbesondere für diejenigen, die in dem relativ engen Gerüst eines Beamtenverhältnisses tätig sind. Hier sollten wir mehr Flexibilität und auch finanzielle Anreize ermöglichen, so dass diese Fachleute öfter auch unternehmerisch tätig sein können. Ich glaube, an dieser Schnittstelle gibt es noch viel Potenzial.





# Die Sonne anzapfen

Bessere und umweltfreundlichere Solarzellen sind ein Eckpfeiler der Energiewende

**S**olarzellen machen aus Sonnenlicht Strom. Dabei spielen sich in ihrem Inneren hochkomplexe Prozesse ab. Mit ausgefeilten Röntgenexperimenten beleuchten Forscherinnen und

können. Andere Forschungsprojekte wagen sich sogar noch weiter vor. Ihr Ziel: Solarzellen, die letztlich aus Naturmaterialien bestehen und dadurch nachhaltig sind.

DESY-Physiker Michael Stückelberger untersucht unter anderem Solarzellen aus Silizium – jene silbrig-bläulichen Sonnensammler, die heute den Markt dominieren. Seit Jahren versuchen die Hersteller, Effizienz und Haltbarkeit ihrer Module zu verbessern. Von Belang sind unter anderem die sogenannten Kristalldefekte: Zwar versucht die Industrie, möglichst perfekte Siliziumkristalle für ihre Solarzellen herzustellen. Dennoch besitzen diese Kristalle gewisse Mängel. Diese Defekte können dann als Einfallstore für Elemente wie Kupfer dienen – Störenfriede, die die vom Sonnenlicht getrennten elektrischen

Ladungen vorschnell wieder zusammenfinden lassen und damit die Leistung verringern. „Manche dieser Defekte sind weniger schädlich als andere“, erläutert Stückelberger. „Und da möchte man gern verstehen, wie sich diese Defekte entschärfen oder ausmerzen lassen könnten.“

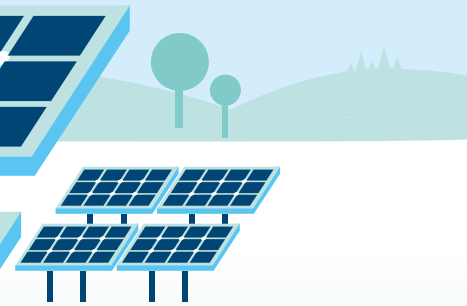
Mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III lässt sich zum Beispiel erfassen, wohin genau sich Kupfer in eine Solarzelle geschlichen hat. An denselben Stellen lässt sich dann gleichzeitig messen, wie leistungsfähig die Solarzelle dort ist. Das Resultat: Wo besonders viel Kupfer ist, arbeitet typischerweise auch die Solarzelle schlechter. „Bei diesen Projekten arbeiten wir direkt mit den Herstellern zusammen“, erzählt Stückelberger. „Das Interesse der Industrie an unsere Arbeit ist mit der Zeit stetig gewachsen.“ Zuwei-

„Das Interesse der Industrie an unserer Arbeit ist mit der Zeit stetig gewachsen“

Michael Stückelberger, DESY

Forscher die Geschehnisse bis ins feinste Detail und liefern den Herstellern Hinweise, wie sie ihre Zellen haltbarer und effizienter machen





len stoßen die Fachleute bei ihren Versuchen auf Probleme, die die Hersteller gar nicht auf dem Zettel hatten – schließlich waren derart genaue Messungen zuvor nicht machbar.

### Produktion per Drucker

Doch der Physiker befasst sich nicht nur mit den handelsüblichen Zellen, sondern auch mit einer vielversprechenden Materialklasse der Zukunft – den sogenannten Perowskiten. Das sind Mineralien mit einer bestimmten Kristallstruktur, die das Sonnenlicht ähnlich effizient in Strom umwandeln können wie Silizium, sich aber deutlich günstiger produzieren lassen sollten, zum Beispiel wie im Tintenstrahldrucker. „Perowskit-Solarzellen können sehr dünn und dennoch leistungsfähig sein“, erläutert

Stückelberger. „Und die Materialien, aus denen sie bestehen, sind letztlich unbeschränkt vorhanden.“

Noch aber gibt es manchen Makel: Feuchtigkeit, Hitze und UV-Licht setzen den Perowskiten bislang so stark zu, dass sie rasch altern und dadurch stark an Leistung verlieren. Außerdem lassen sich die Zellen kaum großflächig herstellen – zumindest nicht in guter Qualität: An manchen Stellen geraten die Zellen bei der Produktion etwas zu dick, an anderen ein wenig zu dünn.

### Hilfe für Hersteller

Mit seinen Messmethoden fahndet Stückelberger nach Ursachen und Auswirkungen: „Anfangs hatte man gar nicht gedacht, dass Perowskit-Zellen unsere Messungen mit hochintensiver Röntgenstrahlung überhaupt aushalten“, erzählt der Forscher. „Doch dann hat es funktioniert, und heute laufen solche Messungen routinemäßig.“

Für die Hersteller liefern solche Experimente Aufschlüsse darüber, wie sie ihre Materialien fertigen müssen: Was zum Beispiel geht im Einzelnen vor sich, wenn die feucht aufgetragenen Schichten trocknen und sich dabei die Perowskit-Kristalle

bilden? Mit dem geplanten Ausbau zu PETRA IV könnte Michael Stückelberger dieses Treiben sogar noch genauer ins Auge fassen: „Wir könnten die maßgeblichen Stellen in den Kristallen deutlich detaillierter analysieren“, sagt er. „Und wir könnten schneller messen und dadurch viel mehr Proben für die Solarindustrie unter die Lupe nehmen als bislang.“

### Kunststoffzellen

Neben Silizium- und Perowskit-Zellen gibt es aber auch noch andere Typen – zum Beispiel Solarzellen auf Polymerbasis, also aus Kunststoff. „Diese organischen Solarzellen haben den Vorteil, dass sie sehr leicht und von Haus aus flexibel sind“, sagt DESY-Physiker Stephan Roth. Dadurch könnten auch Rundungen und Krümmungen eines Gebäudes zur Energieernte genutzt werden – ein architektonischer Vorteil. Zwar sind organische Solarzellen bislang weniger effizient als die herkömmliche Siliziumtechnik. Dafür aber lassen sie sich einfach und günstig per Tintenstrahldrucker oder Sprühtechnik herstellen.

Bislang aber hat sich die Technik nur in Nischenanwendungen >>

Mit Röntgenlicht untersucht DESY-Forscher Michael Stückelberger die innere Struktur von Solarzellen.



durchgesetzt. Der Grund: Oft lässt die Haltbarkeit der Plastikzellen noch zu wünschen übrig, weil mit der Zeit UV-Strahlung die Materialien schädigt und Wasser in die Zellen eindringt. Außerdem werden sie im Wesentlichen noch aus Erdöl hergestellt, und bei der Produktion

aufbringen“, sagt er. „Das ist der integrative Ansatz, den wir verfolgen.“

### Einfacher Trick

Einer der Angriffspunkte ist das Lösemittel. Bei der Produktion einer organischen Solarzelle geht es darum, verschiedene Schichten aufeinander

dieses, bleiben die Polymere zurück und bilden eine feste Schicht. Bislang dienen chlorhaltige und damit potenziell schädliche Chemikalien als Lösemittel. Gemeinsam mit Fachleuten aus China und München konnte Roths Team vor einiger Zeit zeigen, dass sich auch andere, umweltfreundlichere Lösemittel verwenden lassen, indem man die Prozessparameter bei der Zellenerzeugung geschickt variiert.

„Basis ist ein einfacher Trick, auf den man aber erstmal kommen muss“, erzählt Roth. „Bislang wird stets nur die Unterlage geheizt, auf die die Polymerlösung aufgesprüht wird, dann kann sie schneller trocknen. Wir aber haben zusätzlich auch das Lösemittel aufgewärmt.“ Das Resultat zeigten Röntgenmessungen an PETRA III: Mit Hilfe des „vorgewärmten“ Lösemittels gerieten die mikroskopischen Strukturen der Solarzelle sogar besser als zuvor. Zudem stieg die Effizienz, und die Herstellungszeit verkürzte sich. „Das ist ein Riesenerfolg“, freut sich Roth. „Man nimmt grünes Lösemittel und erhält eine Solarzelle, die mindestens ebenso gut ist.“ Gemeinsam mit der Münchner Arbeitsgruppe hat er nun ein Team aufgestellt, das die Technik in Richtung Anwendungsreife entwickeln will.

### Papier statt Plastik

Ein weiteres Ziel: Die Fachleute möchten das Trägermaterial, auf das die lichtempfindlichen Polymere aufgebracht werden, durch einen nachhaltigen Werkstoff ersetzen. Bislang finden zum Beispiel Plastikfolien Verwendung, also Produkte der Erdölchemie. Roths Team setzt auf eine andere Alternative – sogenannte Nanozellulose: Hierbei werden aus Holz winzige Fäden extrahiert, sie sind mikrometerlang und lediglich fünf Nanometer dick. Aus diesen Zellulosefäden lässt sich ein spezielles Nanopapier fertigen. Dieses Papier nutzen die Fachleute als Trägermaterial für organische Solarzellen.

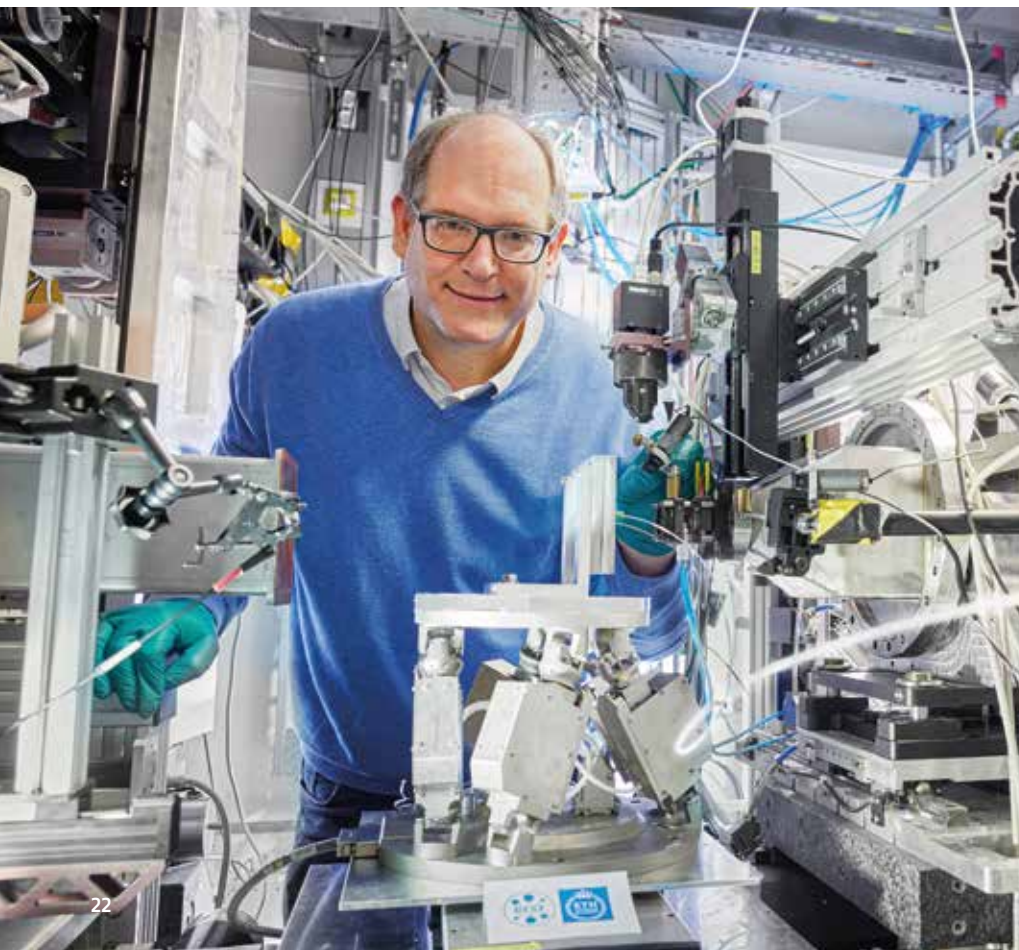
## „Wir wollen nicht nur Energie nachhaltig erzeugen, sondern auch die Materialien, die dafür eingesetzt werden“

Stephan Roth., DESY

kommen umweltschädliche Lösemittel zum Einsatz. Das möchte die Arbeitsgruppe von Stephan Roth ändern: „Wir wollen nicht nur Energie nachhaltig erzeugen, sondern auch die Materialien, die dafür eingesetzt werden, nachhaltig herstellen und

aufzubringen, um am Ende eine Folie zu erhalten, die aus Sonnenlicht Strom macht. Einige dieser Schichten bestehen aus Polymeren, darunter das solaraktive Material. Um es aufzutragen, sind die Polymere in einem Lösemittel gelöst. Verdampft

DESY-Forscher Stephan Roth arbeitet mit internationalen Kolleginnen und Kollegen an einer Solarzelle aus nachhaltigen Materialien.





„Wir können die Polymerlösungen einfach auf das Nanopapier mit Hilfe einer Düse aufsprühen“, erläutert Roth, der auch an der Königlich-Technischen Hochschule in Stockholm arbeitet. „Das hat gegenüber der üblichen Methode – dem Drucken – mehrere Vorteile.“ So geschieht das Sprühen außerordentlich schnell, und anders als beim Drucken lässt sich die Flüssigkeit nicht nur auf eine ebene Fläche aufbringen, sondern auch auf Objekte von beliebiger Form, etwa einen gewellten Dachziegel. In einer Versuchsanordnung an PETRA III klappt dieses Sprühverfahren schon recht zuverlässig. Sie führt automatisiert die verschiedenen Fertigungsschritte aus, gleichzeitig lässt sich per hochintensivem Röntgenstrahl im Detail beobachten, wie sich die Polymere im Zelluloseträger einlagern und ausrichten.

### Kompost statt Sondermüll

Nun gehen Roth und seine Leute den nächsten Schritt: Sie wollen nicht nur das Trägermaterial aus Nanozellulose fertigen, sondern auch andere Schichten, die für die Funktion der Solarzelle nötig sind, insbesondere die Elektroden. Diese



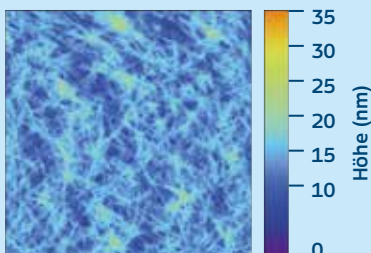
### „Sunny Cellulose“ – Fensterrollo produziert Strom

Wenn die Sonne scheint, werden in vielen Büros die Rollos heruntergezogen. Eine neuartige Papiersonnenblende soll dabei künftig gleich Strom produzieren. Grundlage ist ein innovatives Material aus Nanozellulosefasern, die sich zu einer großen Plane weben lassen. Darauf wird eine funktionalisierte Nanoschicht aus Polymersolarzellen aufgebracht. Wird dieses funktionale Rollo heruntergezogen, beginnt der Strom zu fließen. Das Produkt soll leicht recycelbar sein und Impulse für Bauwesen und Architektur setzen. Das Verbundprojekt „Sunny Cellulose“ der Königlich-Technischen Hochschule (KTH) Stockholm und von DESY wird vom Bundesbauministerium gefördert. Projektpartner ist der Bundesverband deutscher Gartenfreunde, in dessen Zentrale das neuartige Hightech-Rollo erstmals zum Einsatz kommen wird.

Elektroden müssen möglichst gut Strom leiten können – eine Eigenschaft, die der Nanozellulose von Haus aus abgeht. Ein raffinierter Trick soll das ändern: Die Forscherinnen und Forscher bauen winzige Metallpartikel, sogenannte Nanodrähte, in das Zellulosegeflecht ein – wodurch aus dem isolierenden

Nanopapier eine leitfähige Elektrode wird. „Das Prinzip funktioniert, das konnten wir bereits zeigen“, erzählt Roth. „Nun hoffen wir, dass wir 2022 einen ersten Prototyp einer Solarzelle haben, der weitgehend aus nachhaltigen Materialien besteht.“

Danach soll die Technik gemeinsam mit einem Unternehmen in ein Gebäude integriert und unter Praxisbedingungen getestet werden. Noch aber gibt es diverse Hürden. Zum Problem könnte etwa die Wasserbeständigkeit werden. Um die Feuchtigkeit fernzuhalten, ließen sich vielleicht Naturstoffe verwenden wie Wachse oder Baumharze – so die Idee. Auch muss erkundet werden, wie haltbar die Zellen sind und wie stabil die dünnen Zelluloseträger. In einem aber ist sich Stephan Roth sicher: „Wir glauben, dass sich diese Zellen günstig herstellen lassen“, sagt er. „Und prinzipiell sollte es möglich sein, sie nach Gebrauch recht einfach zu recyceln.“ Statt im Sondermüll könnten die Solarzellen aus Zellulose dann auf dem Komposthaufen oder im Altpapier landen.



Aus Nanozellulosefasern lässt sich eine Papierschicht fertigen, in die eine Polymersolarzelle hineingesprüht werden könnte.



Ein unbeschichteter (oben) und ein mit Nanopapier beschichteter Siliziumwafer. Die Nanozelluloseschicht ist nur 200 Nanometer dünn. Die Wafer sind je zwei Zentimeter breit und zehn Zentimeter lang.



# Porenschwamm als Kraftwerk

Ein EU-Projekt erforscht ein neues Konzept zur Stromgewinnung

**E**ine Kaimauer in einem Seehafen, ihre Oberfläche ist mit einem faszinierenden Material beschichtet: Bei Flut wird es feucht, und in seinem Inneren werden elektrische Ladungen voneinander getrennt. Läuft das Wasser dann mit der Ebbe ab, trocknet das Material, lädt sich dabei elektrisch auf und erzeugt grünen, CO<sub>2</sub>-freien Strom. Noch ist das nur eine Vision, noch gibt es dieses Wundermaterial nicht. Doch seit kurzem tüftelt ein internationales Forschungsteam an den Grundlagen dafür: Im EU-Projekt EHAWEDRY soll in einigen Jahren ein erster Prototyp der neuen Energietechnik entstehen.

Grundlage sind elektrisch leitfähige Materialien, die mit winzigen Poren gespickt sind.

„Wir verwenden Kohlenstoff oder Silizium, in die wir mit elektrochemischen Ätzprozessen nanometerkleine Poren einbringen“, sagt Patrick Huber, Leiter des Instituts für Material- und Röntgenphysik der Technischen Universität Hamburg und der Arbeitsgruppe „Hochauflösende Röntgenanalytik von Materialien“ bei DESY. Unter dem

Mikroskop ähnelt das Resultat einem Schwamm. Allerdings sind die Poren nicht millimetergroß, sondern rund eine Million Mal kleiner. Das Faszinierende dabei: Ein Kubikzentimeter eines solchen Materials enthält dermaßen viele Poren, dass sich – könnte man es komplett entfalten – eine fußballfeldgroße Fläche vor einem ausbreiten würde.

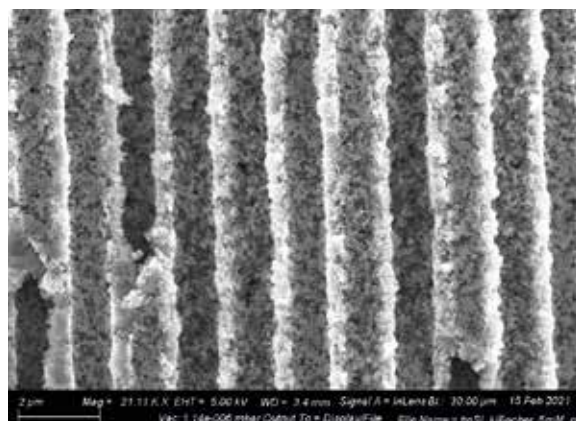
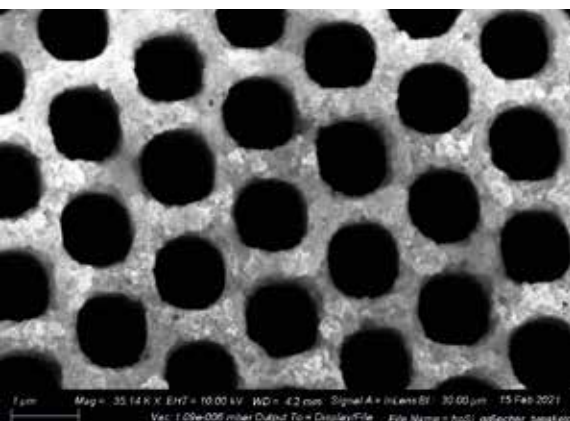
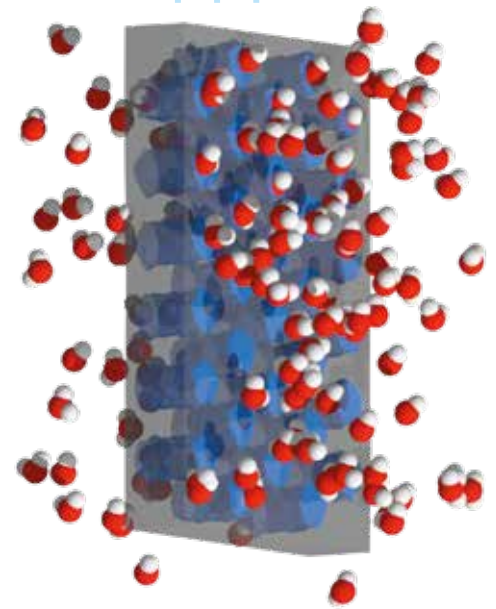
Wird dieser Nanoschwamm mit Wasser befeuchtet, in dem Kochsalz (Natriumchlorid) gelöst ist, werden die Poren mit Milliarden von Molekülen geflutet. Legt man dann eine kleine positive Spannung an den Schwamm an, wandern die negativ geladenen Chlorionen an die Porenwände und lagern sich dort an. „Im Wasser zurück bleiben die positiven Natriumionen“, erläutert Huber. „Damit erfolgt eine Ladungstrennung ähnlich wie bei einem Kondensator, der aufgeladen wird.“

## 100 Watt pro Quadratmeter

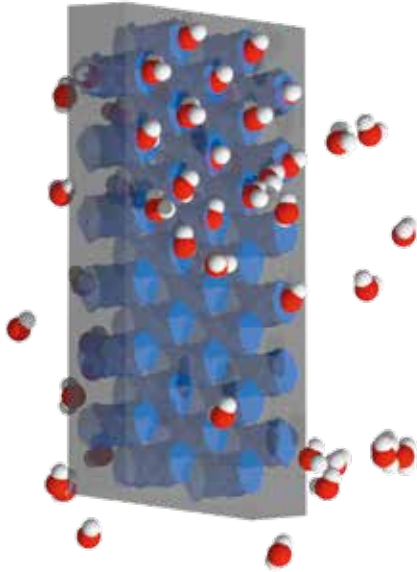
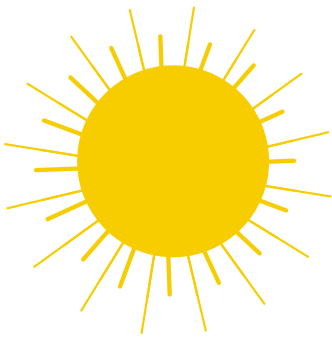
Lässt man das Gebilde anschließend trocknen, passiert der entscheidende Effekt: Die Ladungen in seinem Inneren müssen sich neu arrangieren und werden dabei

gewissermaßen verdichtet. Dadurch steigt die elektrische Spannung im Material, was sich zur Stromgewinnung nutzen lässt. Danach beginnt der Zyklus von vorne: Das Nanomaterial wird erneut befeuchtet, um dann wieder zu trocknen und Energie zu erzeugen.

Aufgrund der enormen Porenzahl und der daraus resultierenden riesigen inneren Oberfläche könnte das durchaus effektiv geschehen: Abschätzungen zufolge sollte ein



Aufsicht (links) und Querschnitt (rechts) durch den Porenschwamm aus dem Elektronenmikroskop. Die großen zylindrischen Poren haben einen Durchmesser von rund einem tausendstel Millimeter. Sie werden von nanoporösen Wänden getrennt, die von Poren mit einem Durchmesser von nur wenigen millionstel Millimetern durchzogen sind.



## „Zum Trocknen könnte bislang ungenutzte Abwärme aus Industrieanlagen oder Rechenzentren dienen“

**Patrick Huber, Technische Universität Hamburg und DESY**

Quadratmeter Oberfläche des Nanoschwamms etwa 100 Watt elektrische Leistung liefern – das liegt in der Größenordnung von Solarzellen. Allerdings lassen sich die Porenschwammschichten stapeln, so dass ein Kubikmeter auf eine Leistung von 10 Kilowatt kommen sollte.

Mit dem porösen Werkstoff eine Kaimauer zu beschichten, um die Gezeiten zu nutzen, wäre aber nur eine Anwendungsidee. „Noch effizienter könnte es sein, Aggregate

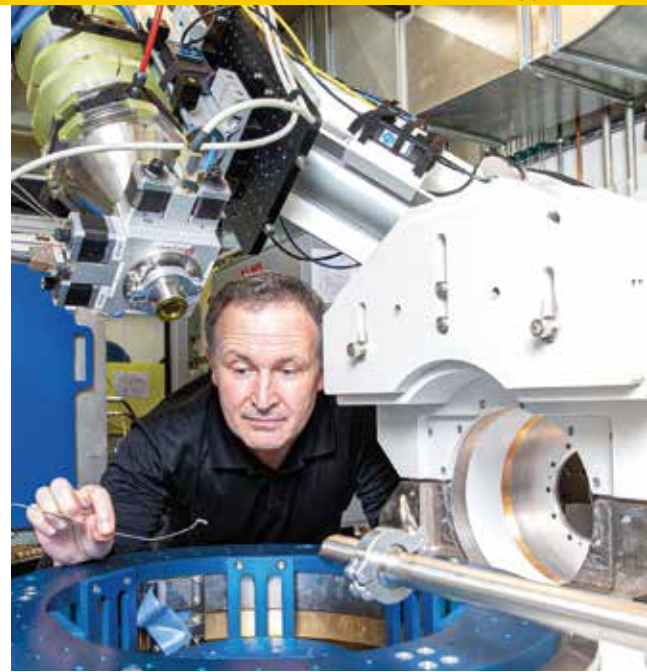
aus unserem Material zu bauen, durch die eine Flüssigkeit in einem geschlossenen Kreislauf strömt“, glaubt Huber. „Als Energiequelle für das Trocknen könnte dann die bislang ungenutzte Abwärme aus Industrieanlagen oder Rechenzentren dienen.“ Auch heiße Regionen würden sich eignen – die sengende Sonne könnte die in Fassaden integrierten, künstlich befeuchteten Nanoschwämme im Nu trocknen und für eine regelmäßige Stromernte sorgen.

### Phasenübergänge im Detail

Zuvor aber ist noch so manche Forschungsfrage zu klären. Zum Beispiel: „Beim Trocknen droht das Salz zu kristallisieren, so dass es unser Nanomaterial regelrecht aufsprengt“, erläutert Huber. Außerdem könnten sich durch sogenannte Kavitation winzige Bläschen bilden, sie würden den Prozess empfindlich stören. Um derlei Phänomene zu analysieren, will sie das Team bei DESY in Hamburg unter die Lupe nehmen, und zwar mit PETRA III, einer der stärksten Röntgenquellen der Welt.

Mit dem gebündelten, hochintensiven Röntgenstrahl aus dem Beschleuniger wird sich beobachten lassen, wie die Phasenübergänge im Nanoschwamm im Detail ablaufen: Wo genau lagern sich die Ionen beim Befeuchten an die Porenwände an? Wo trocknet der Nanoschwamm am schnellsten, und wo bleibt Flüssigkeit zurück? Und unter welchen Umständen bilden sich störende Luftbläschen? Fragen wie diese will das Team um Patrick Huber in den kommenden Jahren im Rahmen des Zentrums für Integrierte Multiskalige Materialsysteme CIMMS beantworten, das derzeit in der Metropolregion Hamburg als Zusammenarbeit zwischen der Technischen Universität Hamburg, der Universität Hamburg, dem Helmholtz-Zentrum Hereon und DESY entsteht.

Außerdem gibt es bezüglich des Verhaltens von wässrigen



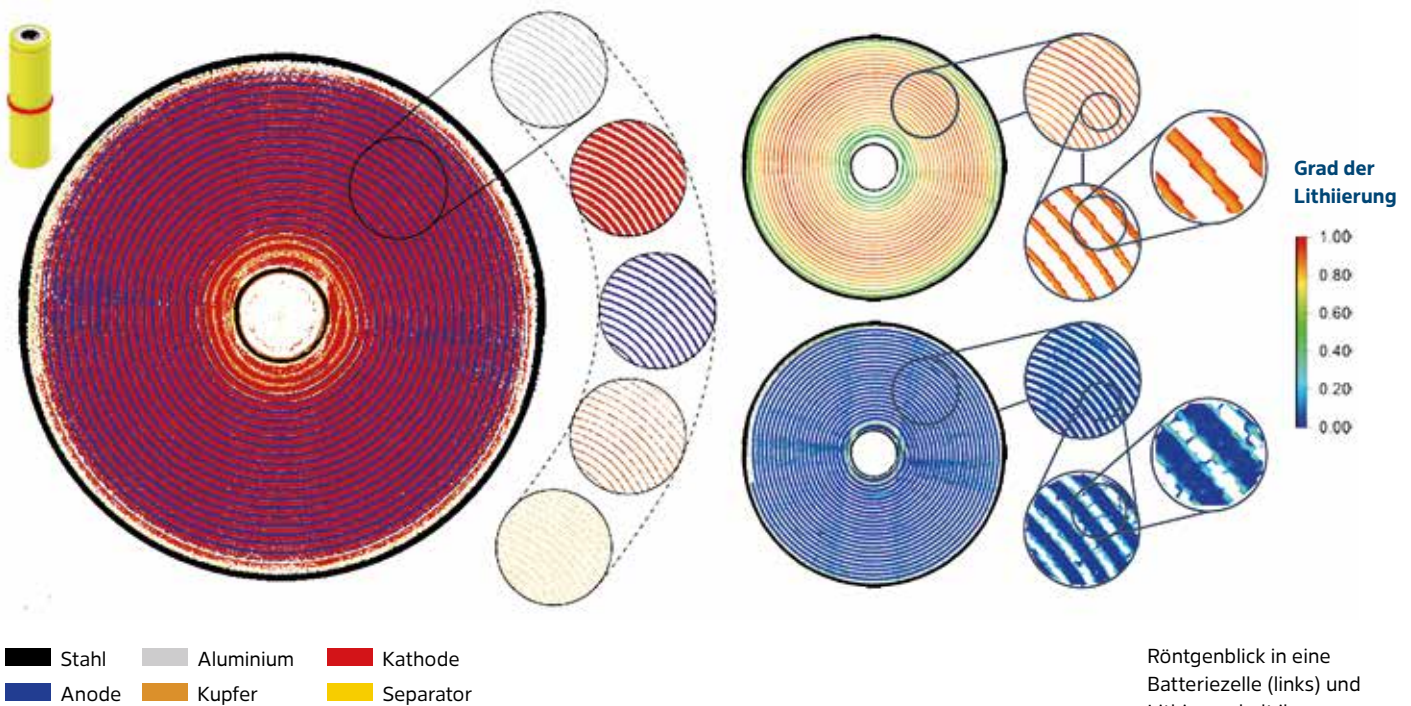
Lösungen in nanoporösen Materialien Anknüpfungspunkte an das Zentrum für molekulare Wasserforschung CMWS. Diese von DESY initiierte interdisziplinäre Einrichtung erforscht gemeinsam mit Partnern aus ganz Europa fundamentale Fragen zum Verhalten von molekularem Wasser. „Gegen Ende von EHAWEDRY möchte unser Team einen ersten Prototyp präsentieren“, umreißt der Physiker das Projektziel. „Dann hoffen wir, dass industrielle Partner gemeinsam mit uns die Sache weiterverfolgen.“

Patrick Huber forscht an maßgeschneiderten multiskaligen Materialien.

### INTERNATIONALE PARTNER

EHAWEDRY steht für „Energy harvesting via wetting/drying cycles with nanoporous electrodes“. Das Projekt, das von der EU mit drei Millionen Euro finanziert wird, startete im Juli 2021 und läuft bis Mitte 2025. Beteiligt sind die Universität Hamburg und die Technische Universität Hamburg sowie Partner aus Spanien, Frankreich, Italien und der Ukraine, darunter ein Industrieunternehmen. Eine indirekte Inspiration lieferte die Pflanzenwelt: Unter anderem nutzen manche Samen winzige Poren, um sich kraft eines Wechselspiels von Wasserkondensation und -verdampfung im Boden zu vergraben. Die Forschungsgruppe hingegen will das Prinzip nutzen, um statt solcher Bewegungsenergie direkt elektrischen Strom zu erzeugen.





Röntgenblick in eine Batteriezelle (links) und Lithiumgehalt ihrer Anode (oben rechts) sowie ihrer Kathode (unten rechts)

# Bessere Stromspeicher

Forscherinnen und Forscher arbeiten an effizienteren und nachhaltigen Batterien

**B**atterien zählen zu den Kerntechnologien einer nachhaltigen Stromversorgung: Ohne sie kommt kein Elektroauto aus, und sie speichern den Strom von Windrädern und Solarzellen und stabilisieren dadurch das Stromnetz. Doch bei den Stromspeichern besteht noch Verbesserungsbedarf: Sie müssen effizienter und nachhaltiger werden.

Eine Arbeitsgruppe um den DESY-Physiker Alexander Schökel untersucht einen Akkutyp, der unter anderem in Notebooks und Bohrmaschinen eingebaut ist, sich aber auch in manchen Elektroautos findet: Die „18650“-Zelle ähnelt einer gewöhnlichen Mignonbatterie, ist jedoch ein wenig dicker und länger. „Diese Batteriezelle ist im Prinzip recht einfach ausgebaut“, erläutert

Schökel. „Allerdings ist es nicht im Detail klar, wie sich die chemischen Elemente in ihr verteilen, wenn der Akku aufgeladen und danach entladen wird.“

Interessant ist vor allem das Verhalten des Lithiums: An welchen

*„An einigen Stellen lagert sich Lithium an, kann aber nicht mehr richtig abtransportiert werden“*

Alexander Schökel, DESY

Bereichen der Elektroden lagert sich viel davon an, wo eher wenig? Details wie diese können die Effizienz der Zelle maßgeblich beeinflussen, aber auch ihre Haltbarkeit. Um das Treiben des Lithiums möglichst genau zu erfassen, durchleuchtete Schökel die Akkus gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen aus München, Grenoble und Geesthacht mit einem Methodenmix. Dabei konnten die Fachleute bis auf 20 Mikrometer (tausendstel Millimeter) genau beobachten, wie sich der Lithiumgehalt in verschiedenen Bereichen der Batterie beim Be- und Entladen verändert.

## Isolierte Lithiuminseln

Als Resultat fand die Arbeitsgruppe unter anderem heraus, dass die Lithiumkonzentration besonders



um die Kontakte herum, die den Strom aus der Zelle herausführen, sehr ungleichmäßig ist. „Für Effizienz und Leistungsfähigkeit kann das unliebsame Folgen haben“, sagt Schökel. „An einigen Stellen lagert sich Lithium an, kann aber nicht mehr richtig abtransportiert werden.“ Das Ergebnis ist, dass dieses Lithium gar nicht mehr an der Energiespeicherung beteiligt ist – bildlich gesprochen sitzen die Ionen auf einer Insel fest und nehmen nicht mehr an der Reise zwischen geladenem und entladene Zustand teil.

„Das möchte man natürlich vermeiden“, erläutert Schökel. „Lithium ist ein teurer Rohstoff, und es ist wünschenswert, dass nach Möglichkeit das gesamte Lithium in der Zelle an den Reaktionen teilnimmt.“ Die Resultate der Experimente liefern den Herstellern Hinweise darauf, wie sie ihre Zellen optimieren können, etwa durch ein verändertes Design der Kontakte. „Da gibt es auf jeden Fall Potenzial für Verbesserungen“, meint Schökel.

Derzeit schauen sich die Fachleute die Haltbarkeit der 18650er-Zellen an: Was genau passiert in ihrem Inneren, wenn sie einige hundert Ladezyklen hinter sich haben? Außerdem wollen sie ihren Methodenmix künftig auch

## „Als Ausgangsmaterial verwenden wir Peptide, also kleine Proteinschnipsel“

Simone Techert, DESY

auf andere gebräuchliche Zelltypen anwenden. Das Problem: Diese Akkus sind zum Teil deutlich größer und dicker als die bisher untersuchten Typen – und sind deshalb schwieriger zu durchleuchten. „Das ist durchaus eine Herausforderung“, sagt Alexander Schökel. „Aber wir denken, dass wir unsere Methoden noch ein ganzes Stück weitertreiben können.“

### Bio-Akkus aus Getreide

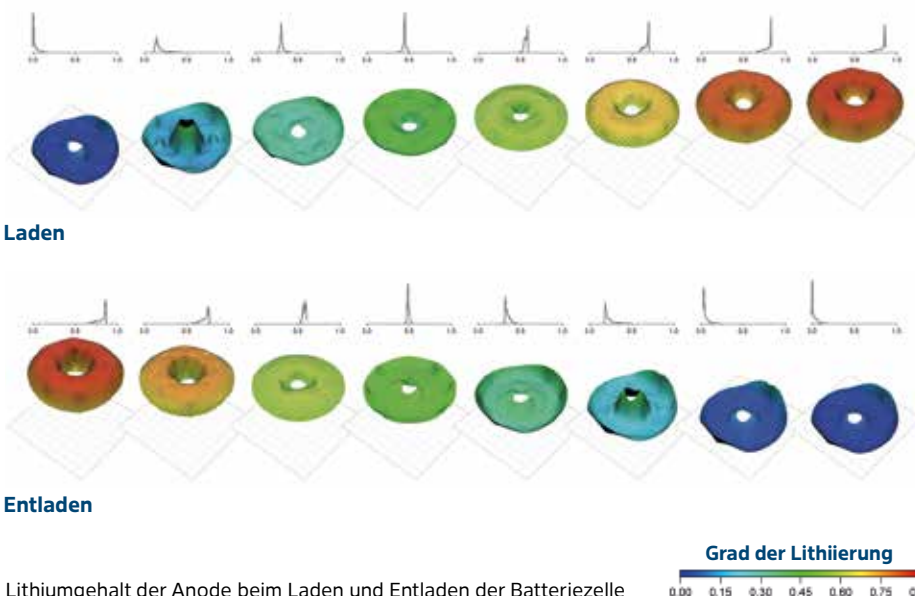
Die heutigen Akkus bestehen aus Stoffen, die speziell entsorgt werden müssen – Batterien gehören bekanntlich nicht in den Hausmüll. Das soll bei einer Entwicklung, an dem das Team von DESY-Physikerin Simone Techert arbeitet, ganz anders sein: Es tüftelt an einer Batterie aus nachwachsenden Naturstoffen, die sich nach Gebrauch im Prinzip auf den Komposthaufen werfen lässt. „Als Ausgangsmaterial verwenden wir Peptide, also kleine Proteinschnipsel“, erläutert Techert. „Sie lassen sich unter anderem aus Getreide gewinnen.“

Ihr Team nutzt aus, dass die Getreidepeptide elektrisch aktiv sind: Unter Stromzufuhr begeben sich Natrium- und Kaliumionen auf Wanderschaft, um sich an bestimmten Stellen in den Biomolekülen anzulagern und auf diese Weise Energie zu speichern. Beim Entladen wandern die Teilchen wieder zurück und lassen einen Strom aus Elektronen fließen – der Akku liefert Energie.

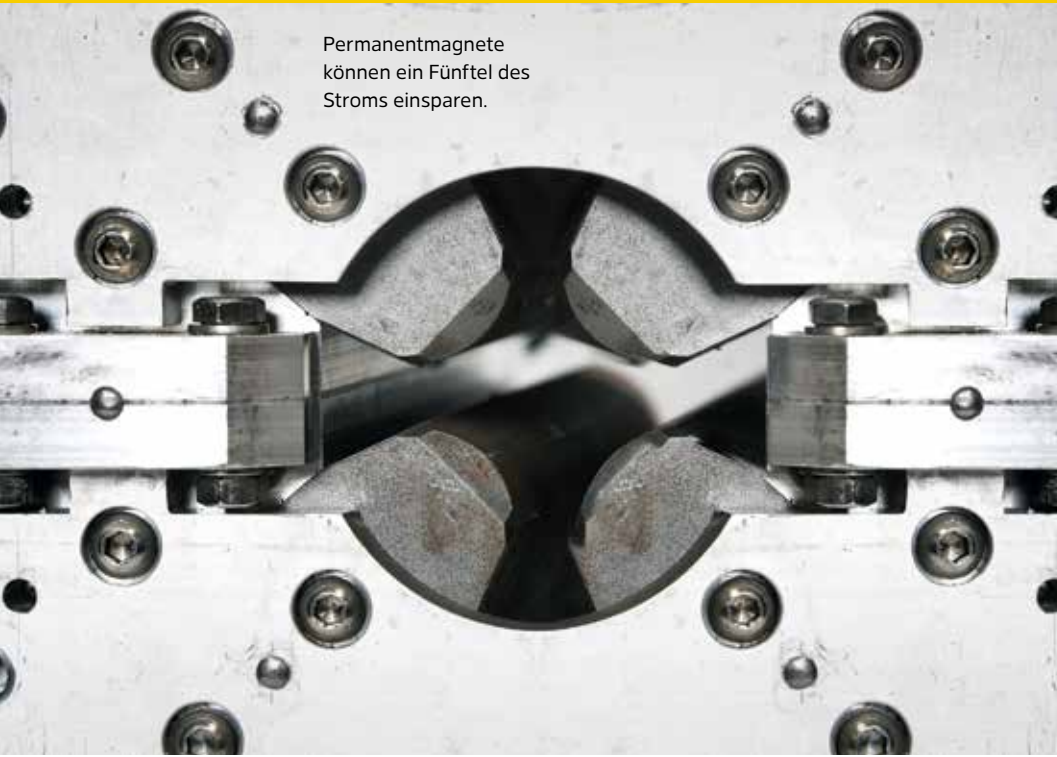
„Neben der Grundlagenforschung, die nötig ist und war, um sich zu überlegen, ob und wie man Peptide für die Stromgewinnung nutzen kann, haben wir schon erste funktionierende Prototypen gebaut“, sagt Techert. „Dennoch ist die Forschung noch ziemlich am Anfang, da wir uns auch überlegen, wie man Röntgenmethoden optimieren muss, um solche Systeme in Echtzeit möglichst genau zu untersuchen.“ So geht es nicht nur darum, die Batterien zu verbessern, sondern auch neue Messverfahren zu entwickeln, um die Stabilität und die Effizienz des Bio-Akkus zu analysieren.

### Einsatz am Menschen

Glückt die Forschung, verspricht die Peptidbatterie spannende Anwendungen: Sie wäre nicht nur nachhaltig, ungiftig und kompostierbar, sondern würde aus einer Art Gel bestehen und wäre damit weich und biegsam. Dadurch ließe sie sich in allen möglichen Formen und Gestalten fertigen. Damit wäre sie prädestiniert für den Einsatz im und am Menschen: Im Prinzip könnten Bio-Akkus in den Körper eingepflanzt werden, um Herzschrittmacher oder Hirnimplantate mit Strom zu versorgen. Oder sie könnten intelligente Pflaster antreiben, die – einfach auf die Haut geklebt – vitale Funktionen wie Körpertemperatur oder pH-Wert überwachen.



Permanentmagnete können ein Fünftel des Stroms einsparen.



# Nachhaltiger Beschleuniger

Die Forschungsmaschinen der nächsten Generation sollen mit weniger Strom laufen

**B**ei der Energiewende geht es nicht nur um Windräder, Wasserstoff und Elektroautos. Ebenso wichtig ist es, effizientere Technologien zu entwickeln und auf diese Weise weniger Energie zu verbrauchen.

Zentren im Rahmen des EU-Programms I.FAST an effizienteren Beschleunigertechnologien.

„I.FAST soll die Entwicklung von Beschleunigern der nächsten Generation voranbringen“, erläutert Mike Seidel vom Paul-Scherrer-In-

*„Das Thema Energieeffizienz wird für die Beschleunigerzentren immer wichtiger“*

Denise Völker, DESY

Forschungszentren bilden hierbei keine Ausnahme: Große Wissenschaftsmaschinen, zum Beispiel Teilchenbeschleuniger, benötigen beträchtliche Mengen an Strom. Um deren Energiehunger zu senken, arbeiten Europas führende

titut (PSI) in der Schweiz. „In einem der Arbeitspakete versuchen wir, die Anlagen sparsamer und nachhaltiger zu machen.“ Neben dem PSI sind fünf weitere Zentren an den Arbeiten beteiligt: das europäische Teilchenforschungszentrum CERN

in der Schweiz, die europäische Neutronenquelle ESS in Schweden, das britische Science and Technology Facilities Council (STFC), das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt sowie DESY.

## Permanent- statt Elektromagnete

Ein Schwerpunkt im I.FAST-Programm ist die Entwicklung effizienterer Beschleunigerkomponenten. Ein wichtiger Ansatzpunkt sind jene Magnete, die die Elektronenstrahlen in Ringbeschleunigern wie PETRA III bei DESY auf ihrer Kreisbahn halten und bündeln. Derzeit läuft der Hamburger Speicherring – eine der hellsten Röntgenquellen der Welt – mit Elektromagneten, und die funktionieren konstruktionsbedingt mit Strom. Ein Teil der Elektromagnete könnte sich jedoch mit Permanentmagneten ersetzen lassen. Die können ihr Magnetfeld auch ohne Stromzufuhr halten, brauchen also keine Energie.

Auch für die Qualität der Röntgenstrahlung hätte das unschätzbare Vorteile: Die kompakten Permanentmagnete ermöglichen neuartige Magnetanordnungen, um deutlich brillanteres Röntgenlicht zu erzeugen – hochinteressant für Experimente, die winzigste Proben oder Probenausschnitte so detailliert wie möglich untersuchen wollen. Deshalb plant DESY eine großangelegte Umrüstung: In einigen Jahren soll PETRA III zu PETRA IV umgebaut und mit Permanentmagneten bestückt werden. Andere Einrichtungen sind diesen Schritt bereits gegangen: Seit 2020 läuft die europäische Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble mit Permanentmagneten – und braucht seitdem rund 20 Prozent weniger Strom für den Beschleunigerbetrieb.

Ein weiterer I.FAST-Schwerpunkt ist die Entwicklung effizienterer Klystrons. So heißen die starken Sender, die jene Radiowellen erzeugen, durch die die Teilchen beschleunigt werden – ähnlich, wie ein Surfer auf der Ozeanwelle reitet. „Heute hat ein Klystron eine Effizienz von 50 bis

60 Prozent, mit neuer Technik sollte sich das auf über 70 Prozent steigern lassen“, erklärt Mike Seidel. „Wir arbeiten an einer konkreten Entwicklung, um die Klystrons des LHC-Beschleunigers am CERN mit einer effizienteren Variante zu ersetzen.“

### Elektronenbremse mit Rückspeisung

Neben der Entwicklung effizienter Technologien gibt es auch Überlegungen zu neuen, alternativen Beschleunigerkonzepten wie den Energierückgewinnenden Linearbeschleunigern (Energy Recovery Linacs, ERL). Die Teilchenphysik nutzt Beschleuniger, um Elektronen frontal auf ihre Antiteilchen zu feuern und dabei Hinweise auf bislang unbekannte Elementarteilchen aufzuspüren – Indizien für neue, fundamentale Naturgesetze. Im Gegensatz zu Speicherringen erzeugen Linearbeschleuniger keine Verluste durch Synchrotronstrahlung und können höhere Energien erreichen. Nur: Die meisten der rasenden Elektronen kollidieren gar nicht miteinander und prallen schon nach dem ersten Kollisionsversuch ungenutzt auf eine Art Prellbock.

Diese verpuffte Energie soll das ERL-Konzept rückgewinnen: Dabei bremsen sogenannte Resonatoren die nahezu lichtschnellen Elektronen ab und entziehen ihnen einen Großteil ihrer Energie, um damit die nächsten Elektronen auf Trab zu bringen. „So eine Anlage würde deutlich weniger Leistung aus dem Stromnetz benötigen“, erklärt Seidel. „Allerdings würde das Energy-Recovery-Prinzip teurer und komplexer werden als eine Anlage ohne Energierückgewinnung.“ Derzeit untersucht die Fachwelt, unter welchen Bedingungen sich die Zusatzinvestition lohnen würde.

### Nachhaltigkeitszertifikat für Seltene Erden

„Das Thema Energieeffizienz wird für die Beschleunigerzentren immer wichtiger“, betont DESY-Nachhal-

tigkeitsmanagerin Denise Völker. „Und auch andere Aspekte der Nachhaltigkeit finden zunehmend Beachtung, etwa Wasserverbrauch, Recycling und Rohstoffversorgung.“ Für die Permanentmagneten etwa, die in PETRA IV zum Einsatz kommen sollen, werden Metalle der Seltenen Erden benötigt, zum Beispiel Neodym und Dysprosium. „Diese Elemente werden in Ländern wie China abgebaut“, sagt Völker. „Doch es ist fraglich, inwieweit dieser Abbau umwelt- und sozialverträglich geschieht.“ Wünschenswert

wäre eine globale Zertifizierung, die garantiert, dass die Materialien aus ökologisch und sozial unbedenklichen Quellen kommen. „Im Rahmen von I.FAST tauschen wir uns mit unseren Industriepartnern aus und suchen nach Gemeinsamkeiten“, erklärt Völker. „Und auch andere Branchen wie Windradproduzenten oder Elektroautohersteller haben Interesse an einer Zertifizierung. Mit denen wollen wir uns stärker vernetzen.“

<https://ifast-project.eu>

## AUF DEM WEG ZUM GRÜNEN FORSCHUNGSCAMPUS

DESY forscht nicht nur zur Energiewende, sondern setzt auch für seine eigene Energieversorgung auf klimafreundliche Techniken. Die langfristige Vision: ein grüner Campus, der weitgehend ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen auskommt. Schon heute bezieht das Zentrum 60 Prozent seines Stroms aus regenerativen Quellen – ein Wert deutlich über dem aktuellen Strommix in Deutschland. Bis Anfang 2023 wird DESY auf 100 Prozent Erneuerbare umstellen. Dann wird sein Stromverbrauch, der einschließlich des europäischen Röntgenlasers European XFEL dem Bedarf von 150 000 Menschen entspricht, ausschließlich durch grüne Erzeuger gedeckt. Damit wird DESY für jährlich 55 000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen weniger verantwortlich sein.

Auch bei der Wärmeversorgung wird DESY nach und nach grüner. Bereits jetzt wird ein Drittel des Campus mit der Abwärme einer Heliumverflüssigungsanlage beheizt, die für den Betrieb des European XFEL nötig ist. Künftig will das Zentrum weitere Abwärmequellen anzapfen: Bislang verpufft die Abwärme von Beschleunigermagneten und Rechenzentrum ungenutzt in die Luft. In einigen Jahren soll sie ein campuseigenes Niedertemperatur-Nahwärmenetz speisen. Das Potenzial ist beträchtlich: Laut einer Analyse der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg würde die Abwärme genügen, den gesamten Campus gleich doppelt zu heizen. Derzeit laufen Überlegungen, mit der zusätzlichen Wärme die Nachbarschaft zu versorgen, insbesondere Teile der geplanten Science City Hamburg Bahrenfeld.

Flankiert werden die Maßnahmen durch eine bessere Wärmedämmung von Bestandsbauten, ein detailliertes Energiemonitoring sowie die Absicht, einen Teil der DESY-Gebäude großflächig mit Solarzellen zu bestücken. Und auch ein weiteres, ganz neues Nachhaltigkeitsprojekt dürfte beim Energiesparen helfen: Derzeit werden die Wände und das Dach einer DESY-Forschungshalle mit Pflanzen begrünt, in Summe sind es 4600 Quadratmeter. Vornehmlich soll das Projekt dem Regenwasserrückhalt dienen. Darüber hinaus dürfte das üppige Grün im Sommer die Halle kühlen und damit den Stromverbrauch der Lüftungs- und Klimaanlage mindern. Und im Winter sollten die Pflanzen als zusätzliche Wärmedämmung fungieren und den Heizbedarf reduzieren.

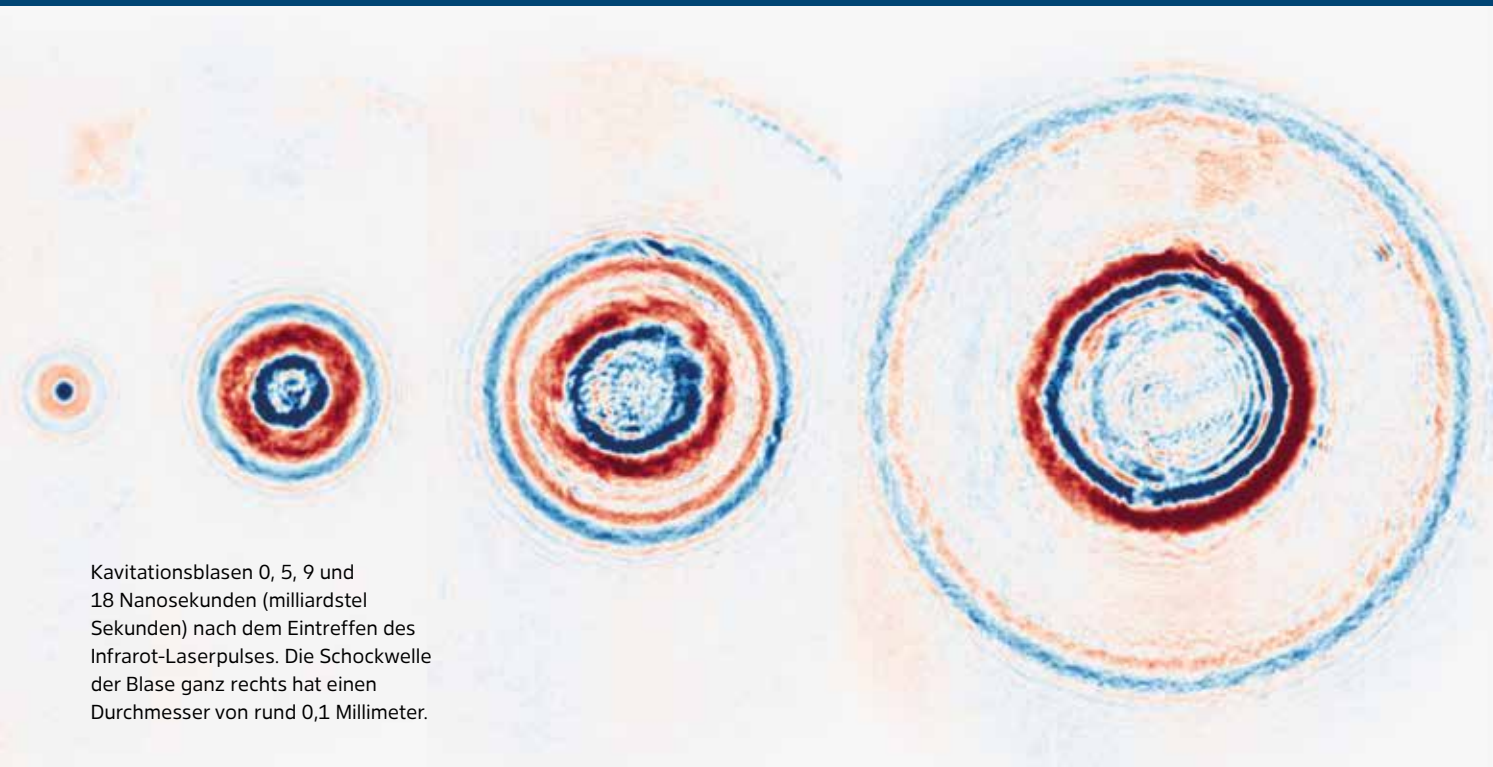


So soll DESYs Gebäude 36 in einigen Jahren aussehen.



# SPEKTRUM

Nachrichten aus der Forschung



Kavitationsblasen 0, 5, 9 und 18 Nanosekunden (milliardstel Sekunden) nach dem Eintreffen des Infrarot-Laserpulses. Die Schockwelle der Blase ganz rechts hat einen Durchmesser von rund 0,1 Millimeter.

## Röntgenlaser filmt Kavitationsblasen im Wasser

**D**as Aufsteigen kleiner Bläschen im Mineralwasserglas kennt jeder aus dem Alltag. In der Flüssigkeitsdynamik heißt dies weiche Gaskavitation. Eine Variante davon, die harte Kavitation, entsteht durch die schnelle Bewegung von Pumpen, Schiffsschrauben und Turbinen und bereitet Ingenieurinnen und Ingenieuren viel Kopfzerbrechen. Mit dem europäischen Röntgenlaser European XFEL hat ein Forschungsteam unter Leitung der Universität Göttingen die Ausbreitung solcher Kavitationsblasen nun gefilmt. Die Untersuchung bietet bislang unerreichbare Einblicke in das Phänomen.

Für die Studie erzeugte ein Infrarotlaser Kavitationsblasen in Wasser. Sie sind anfangs wenige tausendstel Millimeter groß, breiten sich dann aber mit Überschallgeschwindigkeit explosionsartig aus, getrieben durch einen Überdruck, der den

Normaldruck etwa um das Hunderttausendfache übersteigt. „Im Gegensatz zu sichtbarem Licht, mit dem wir aufgrund starker Wechselwirkung durch Brechung und Streuung nicht ins Innere der Blase hineinschauen können, lässt sich mit Röntgenstrahlung nicht nur die Form, sondern das gesamte Dichteprofil von Blase und Stoßfront auflösen“, erklärt Malte Vassholz, Hauptautor von der Universität Göttingen.

Durch kontrollierte Verzögerung zwischen dem Infrarotlaser und dem Röntgenlaserstrahl, mit dem die Blasen abgebildet wurden, erhielt das Team eine Art Film des gesamten Prozesses. „Insgesamt haben wir rund 20 000 Messungen gemacht und mehr als 3000 Blasen analysiert“, berichtet DESY-Hauptautor Johannes Hagemann.

Die Forschung liefert nicht nur neue Einblicke in das Phänomen, sie eröffnet auch interessante Perspekti-

ven auf Anwendungen. „Kavitation ist zwar in vielen technischen Anwendungen der Fluidodynamik, wie etwa in Pumpen oder bei Schiffsschrauben, höchst unerwünscht, wird aber umgekehrt technisch auch ausgenutzt, zum Beispiel bei der Materialbearbeitung mit Lasern oder um bestimmte chemische Reaktionen zu ermöglichen“, erklärt der Göttinger Ko-Autor Robert Mettin. „In der Laserchirurgie kommt die Erzeugung von Kavitationsblasen durch fokussierte Kurzpuls laser ebenfalls zum Einsatz,“ ergänzt Forschungsleiter Tim Salditt von der Universität Göttingen. „In Zukunft kann man solche Prozesse dann durch die von uns entwickelte Bildgebungsmethode direkt ‚filmen‘.“

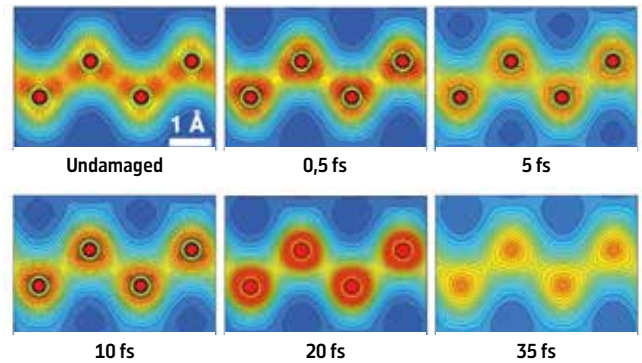
*Nature Communications,*

DOI: 10.1038/s41467-021-23664-1

# Ungewöhnliches Schmelzen von Diamant

**E**in internationales Forschungsteam hat einen unkonventionellen Schmelzprozess in Diamant beobachtet, nachdem der Edelstein mit einem Röntgenlaser beschossen worden war. Während beim herkömmlichen Schmelzen die Atome einer Probe durch Erhitzen immer stärker in Bewegung geraten, bis ihre Bindungen schließlich reißen, hat der extrem intensive Röntgenlaser die Bindungen direkt auseinandergerissen, und erst danach begannen die Atome, sich durch die Erwärmung zu bewegen, wie das Team um Ichiro Inoue vom RIKEN SPring-8 Center in Japan, Eiji Nishibori von der Universität Tsukuba in Japan und DESY-Wissenschaftlerin Beata Ziaja berichtet.

Die Untersuchung zeigt, dass die Elektronenverteilung um jedes Atom herum innerhalb von nur etwa fünf Femtosekunden nach dem ersten Puls nahezu einheitlich in alle Richtungen (isotrop) wird. Danach erst setzt die atomare Bewegung ein, die zum Schmelzen führt. „Dieser Femtosekunden-Strukturwandel wird nicht-thermisch genannt, da er



nicht durch eine viel länger dauernde, thermische Erwärmung der Atome im Kristallgitter ausgelöst wird“, erklärt Ziaja.

„Das röntgeninduzierte nicht-thermische Schmelzen dürfte bei vielen Experimenten mit hochintensiven Röntgenlaserpulsen vorkommen“, ergänzt Nishibori. „Insbesondere kann unsere Erkenntnis großen Einfluss auf Methoden zur Strukturbestimmung mit hochintensiven Röntgenlaserpulsen haben, da in diesem Intensitätsregime die während der Bestrahlung auftretenden röntgeninduzierten Schäden nicht vernachlässigt werden können.“

*Physical Review Letters,*  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.117403

Nur fünf milliardstel Sekunden (Femtosekunden) nach dem Röntgenblitz wird die Verteilung der Elektronen um jedes Atom herum gleichförmig.



Die Start-up Labs Bahrenfeld, das gemeinsame Innovationszentrum von DESY, der Stadt Hamburg und der Universität Hamburg

## Unternehmergeist und Innovationen: Start-up Labs Bahrenfeld eröffnet

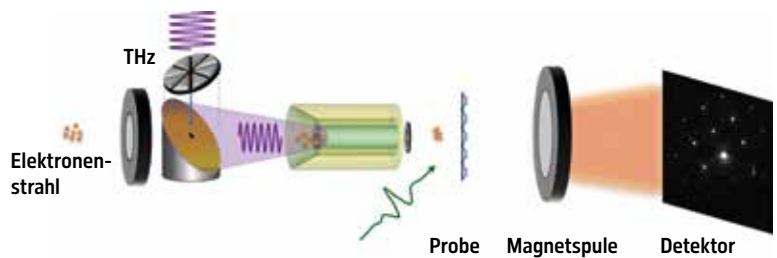
**J**unge Unternehmen und Existenzgründer aus dem physikalischen und biophysikalischen Bereich haben im Hamburger Westen ein neues Zuhause: Auf dem Forschungscampus bei DESY sind die Start-up Labs Bahrenfeld eröffnet worden, ein Gemeinschaftsprojekt von DESY, der Universität Hamburg und der Stadt Hamburg. Das Innovationszentrum für Deeptech-Start-ups wird auch das Profil der geplanten Science City Hamburg Bahrenfeld mit prägen.

„Die zukünftige Science City Hamburg Bahrenfeld bietet beste Standortbedingungen für wissenschaftliche Institute, Start-ups und innovative Unternehmen“, sagte Hamburgs Erster Bürgermeister Peter Tschentscher bei der offiziellen Eröff-

nung. „Mit den Start-up Labs Bahrenfeld schaffen wir in der Nachbarschaft zu DESY einen Ort, an dem aus Grundlagenforschung und klugen Ideen innovative Produkte und Anwendungen entstehen.“

Auf 2700 Quadratmetern sind Labore und Werkstätten, Büros und Meetingräume entstanden. Bedarf und Nachfrage sind hoch – ein Großteil der Räumlichkeiten der Start-up Labs war bereits bei der Eröffnung vermietet. Die thematische Diversität der jungen Unternehmen ist groß und reicht von Synchronisationssystemen bis zu individualisierten Tests zur Krebsdiagnostik. Auch die Altersspanne der Unternehmen reicht von absoluten Neugründungen bis hin zu Unternehmen, die sich bereits am Markt etabliert haben.

# Kompakte Elektronen- „Kamera“ zeigt ultra- schnelle Dynamik in Materie



Eine kompakte Elektronenkamera erlaubt die Beobachtung der schnellen inneren Dynamik von Materie. Das System schießt kurze Elektronenpakete auf eine Probe und zeichnet damit Schnappschüsse ihrer inneren Struktur auf. Es ist das erste derartige Elektronendiffraktometer, das Terahertz-Strahlung zur Komprimierung der Elektronenpakete nutzt. Die kurze Wellenlänge der Terahertz-Strahlung ermöglicht eine kompakte Bauweise.

Das Entwicklungsteam um die DESY-Forscher Dongfang Zhang und Franz Kärtner vom Center for Free-Electron Laser

Science CFEL hat das System erfolgreich mit einer Siliziumprobe getestet. Dafür schossen die Forscherinnen und Forscher mit ihrer Anlage Pakete von je rund 10 000 Elektronen auf einen dünnen Siliziumkristall, der durch einen kurzen Laserblitz aufgeheizt wurde. Die Elektronenpakete waren rund 180 Femtosekunden (billiardstel Sekunden) lang und zeigten deutlich, wie sich das Kristallgitter der Siliziumprobe innerhalb rund einer Pikosekunde (billionstel Sekunde) nach dem Laserbeschuss ausdehnte.

Abgesehen von den kompakten Abmessungen hat das Terahertz-Elektronendiffraktometer einen weiteren Vorteil, der für manche Untersuchungen noch bedeutender sein könnte: Das System ist perfekt synchronisiert, denn es benutzt denselben Laser für alle Schritte: Erzeugen, Manipulieren, Messen und Komprimieren der Elektronenpakete ebenso wie Erzeugen der Terahertz-Strahlung und Aufheizen der Probe.

*Ultrafast Science, DOI: 10.34133/2021/9848526*



Das System passt auf einen Labortisch und wird mit Hilfe eines optischen Lasers justiert.

## Messtation für Extrembedingungen eröffnet

Am europäischen Röntgenlaser European XFEL ist die Helmholtz International Beamline for Extreme Fields (HIBEF) offiziell in Betrieb gegangen. HIBEF kombiniert die Röntgenstrahlung des European XFEL mit zwei Superlasern, einer leistungsstarken Magnetspule und einer Plattform für die Forschung mit Diamantstempelzellen. Unter Federführung des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf (HZDR) in Kooperation mit DESY bündelt das Projekt Geräte und Fachwissen verschiedener Forschungseinrichtungen, um diese der internationalen Wissenschaftscommunity zur Verfügung zu stellen.

Die Beamline ist Teil der High-Energy-Density-Experimentierstation HED am European XFEL und ermöglicht tiefe Einblicke in die Struktur von Materialien und in sehr schnelle natürliche Prozesse der Plasmaphysik. Forschende können dadurch beispielsweise Modelle der Planetenentstehung verbessern sowie Vorgänge in Plasmen simulieren und so Innovationen in der Material- und Beschleunigerforschung vorantreiben.

HIBEF wurde 2013 von DESY und HZDR gegründet. Beteiligt am HIBEF-Nutzerkonsortium sind mehr als 350 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an 60 Forschungseinrichtungen in 16 Ländern. Die Gesamtinvestition einschließlich der Betriebskosten für zehn Jahre beträgt knapp 120 Millionen Euro.

Der Hochintensitätslaser ReLaX des HIBEF-Nutzerkonsortiums kann Drücke von Milliarden bar erzeugen.







## Hamburger Preis für Theoretische Physik an Quantenforscher Demler

**D**er russisch-amerikanische Forscher Eugene Demler ist mit dem Hamburger Preis für Theoretische Physik 2021 ausgezeichnet worden. Demler, der im Herbst 2021 von der Harvard-Universität in den USA an die ETH Zürich gewechselt ist, arbeitet an einem besseren Verständnis sogenannter stark korrelierter Quantensysteme. Seine Forschung hat tiefgreifende Auswirkungen auf Bereiche wie Magnetismus, Supraleitung und nichtlineare Quantenoptik. Der Preis wird von der Joachim Herz Stiftung verliehen, gemeinsam mit DESY sowie dem Wolfgang Pauli Centre von DESY und der Universität Hamburg und den beiden Exzellenzclustern „CUI: Advanced Imaging of Matter“ und „Quantum Universe“ an der Universität Hamburg.

„Mit Eugene Demler zeichnen wir in diesem Jahr einen Forscher aus, der sich in ganz besonderer Weise um die Anwendung seiner theoretischen Arbeiten in der experimentellen Physik verdient gemacht hat“, betonte der Vorstandsvorsitzende der Joachim Herz Stiftung, Henneke Lütgerath. „Seine Überlegungen haben viele wichtige Impulse für die Entwicklung neuer Werkstoffe zum Beispiel für die Energieübertragung oder für die Datenverarbeitung gegeben.“

Demler ist ein weltweit renommierter Experte in der theoretischen Quantenphysik. Sie beschreibt, wie sich Elektronen, Atome und andere winzige Objekte verhalten. Demlers Arbeit war unter anderem maßgeblich für die Entwicklung von Quantensimulatoren auf der Grundlage ultrakalter Atome.

Um komplexe Materialien zu verstehen, nutzen Theoretikerinnen und Theoretiker oft vereinfachte mathematische Modelle, analysieren diese und vergleichen die Resultate mit den experimentell gemessenen Materialeigenschaften. Das Problem dabei: Selbst einfache mathematische Modelle zur Beschreibung korrelierter Quantensysteme lassen sich nicht präzise berechnen, wenn starke Wechselwirkungen zwischen Teilchen eine Rolle spielen. Wenn sich theoretische Vorhersagen und experimentelle Befunde widersprechen, ist deshalb oft unklar, ob das daran liegt, dass die mathematischen Gleichungen nur näherungsweise gelöst werden können, oder dass das Modell wichtige Aspekte vernachlässigt hat.

Quantensimulatoren lösen dieses Problem mit experimentellen Systemen, die fundamentale Modelle der Physik der kondensierten Materie nachbilden – zum Beispiel indem ultrakalte Atome mit Hilfe von Laser-

strahlen zu periodischen Strukturen angeordnet werden, die künstliche Kristalle bilden. Experimente mit solchen künstlichen Kristallen erlauben es, die Eigenschaften grundlegender theoretischer Modelle im Detail zu untersuchen und herauszufinden, was noch fehlt, um Systeme kondensierter Materie (einfacher: komplexe Materialien) präzise zu beschreiben.

Quantensimulationen mit kalten Atomen haben zu neuen Erkenntnissen über Materialien geführt, deren Eigenschaften durch die komplexe Wechselwirkung tausender Teilchen entstehen, die den Gesetzen der Quantenmechanik gehorchen. Zu diesen Materialien zählen sowohl Quantenmagnete als auch topologische Isolatoren und Supraleiter, die Elektrizität verlustfrei transportieren können.

Der Hamburger Preis für Theoretische Physik ist mit 137 036 Euro dotiert, die Preissumme ist eine Anspielung auf die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante, die in der theoretischen Physik eine wichtige Rolle spielt. Der Preis wird seit 2010 an international renommierte Forscherinnen und Forscher vergeben und ist mit einem Forschungsaufenthalt in Hamburg verbunden. Er ist einer der höchstdotierten Preise für Physik in Deutschland.

## KAI Kooperation für Anwendung und Innovation der HAW Hamburg und DESY

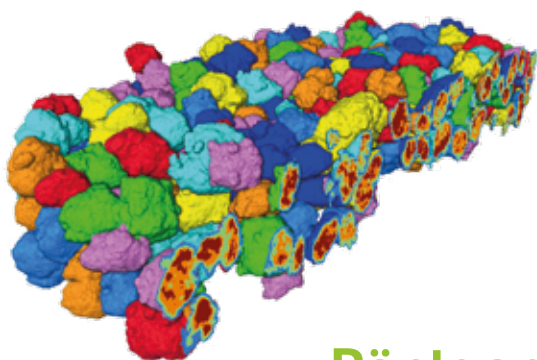
**G**emeinsam ausbilden, forschen, entwickeln – und neue Perspektiven schaffen: DESY und die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) haben eine neue strategische Kooperation für Anwendung und Innovation (KAI) vereinbart. Im Zentrum der Zusammenarbeit stehen Duales Studium und Lehre, Forschung und Entwicklung sowie Innovation, Technologie- und Wissenstransfer. KAI stärkt die gemeinsame Ausbildung dringend benötigter hochqualifizierter Ingenieurinnen und Wissenschaftler. Durch angewandte Forschung und Entwicklung nachhaltiger und digitaler Technologien gestaltet KAI den Strukturwandel Hamburgs zur Wissenschafts- und Innovationsmetropole im Norden mit. Die Stadt Hamburg unterstützt die Zusammenarbeit mit einer Anschubfinanzierung von 120 000 Euro.

Die Liste der konkreten Kooperationsthemen reicht von Echtzeit-Regelungstechnik hochkomplexer Beschleunigeranlagen, visueller Simulation und Robotik, effizienten Energiesystemen, Scientific Computing, intelligenten Sensorsystemen, Spektro-



skopie und Messdatenaufbereitung, Embedded Electronics und Electronics Development bis hin zu Wissenschaftsillustration. Eine Ausweitung der Themen ist vorgesehen. Ebenso ist ein gemeinsamer Standort für die Kooperation in der gerade im Aufbau befindlichen Science City Hamburg Bahrenfeld geplant, um die gemeinsamen Aktivitäten in der transferorientierten Forschung und im Bereich von Gründungen auszubauen und weiterzuentwickeln.

Hamburgs Wissenschaftssenatorin Katharina Fegebank mit DESY-Direktor Helmut Dosch (l) und HAW-Präsident Micha Teuscher (r) beim Auftakt zur Kooperation KAI



An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III ließ sich ein Ensemble von 434 Katalysatorpartikeln gleichzeitig mit einer Auflösung von 74 Nanometern abbilden und einzeln hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften und ihres Fragmentierungsverhaltens identifizieren und charakterisieren. Das Bild zeigt einen virtuellen Schnitt durch den tomographischen Datensatz, wobei jedes identifizierte Partikel zur besseren Visualisierung künstlich eingefärbt ist. Die meisten Partikel haben einen Durchmesser von etwa fünf bis sechs Mikrometern. An den virtuellen Schnittflächen sind Bereiche ähnlicher Elektronendichte farblich kodiert, um die Polymer- von den Katalysatorfragmenten innerhalb jedes Partikels zu trennen: Von Blau über Grün und Orange bis Rot sinkt der Plastikanteil in dem jeweils betrachteten Partikel. Diese Fragmentierung fällt, von Partikel zu Partikel, unterschiedlicher aus als erwartet.

## Röntgenblick in die Plastikproduktion

**E**ine Röntgenstudie bei DESY weist den Weg zu einem besseren Verständnis der Kunststoffproduktion. Ein Team unter der Leitung der Universität Utrecht hat dazu an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III sogenannte Ziegler-Katalysatoren untersucht, die Arbeitspferde der weltweiten Polyethylen- und Polypropylenproduktion.

Polyolefine wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) spielen eine wichtige Rolle im täglichen Leben. Die Anwendungen reichen von Lebensmittelverpackungen zur Verlängerung der Haltbarkeit über die sterile Verpackung medizinischer Geräte bis hin zur Isolierung elektrischer Kabel. Zur Herstellung für diese Aufgaben maßgeschneiderter Polyolefine kommt eine vielseitige Klasse von Katalysatormaterialien zum Einsatz, darunter die Ziegler-Katalysatoren, die verschiedene Metalle wie Titan enthalten.

Wie die Forscherinnen und Forscher um Bert Weckhuysen und Florian Meier jetzt beobachtet haben, zerfallen die Katalysatormikropartikel bei der Polymerherstellung in eine unerwartete Vielfalt kleinerer Bruchstücke. „Diese Heterogenität deutet auf Unterschiede in der Zugänglichkeit der katalytisch aktiven Stellen für Ethylen hin und zeigt, wie wichtig es ist, die Reaktionsbedingungen zu optimieren“, erklärt Weckhuysen.

Die Analyse ermöglicht ein besseres Verständnis des gesamten industriellen Prozesses und kann helfen, gewünschte Polyeigenschaften gezielt zu erzeugen und die Effizienz in der Produktion noch weiter zu erhöhen.

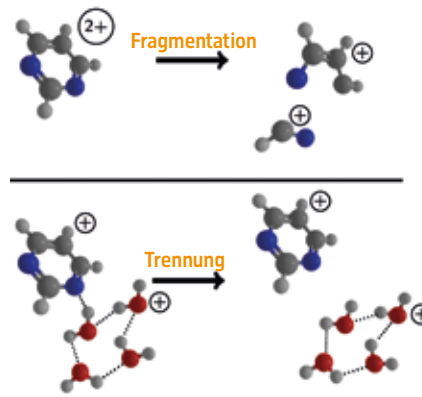
JACS Au, DOI: 10.1021/jacsau.1c00130

# Wasser schützt empfindliche Moleküle vor Strahlenschäden

**W**asser kann kleine organische Moleküle vor Schäden durch Röntgenstrahlung schützen.

Das zeigt eine Untersuchung unter Leitung der Universität Kassel an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III. Statt durch die elektrische Ladung zu zerfallen, die von der Röntgenstrahlung hervorgerufen wird, können die Moleküle einen Teil der Ladung an das Wasser abgeben und intakt bleiben.

Die Forscherinnen und Forscher um Andreas Hans hatten das organische Molekül Pyrimidin ( $C_4H_4N_2$ ) untersucht, das als Modellsystem für viele grundlegende biochemische Analysen dient. Sie bestrahlten in Wasser gelöstes Pyrimidin mit Röntgenlicht und beobachteten, welche Molekülfrag-



Während eine durch Strahlung induzierte doppel positive Ladung Pyrimidin schnell zerbrechen lässt (oben), kann das Molekül in wässriger Umgebung (unten) eine positive Ladung ans Wasser abgeben und bleibt damit intakt.

mente sich bildeten. Ohne Wasser zerfällt das Pyrimidin, weil durch das Röntgenlicht eine doppelte elektrische Ladung entsteht. Der resultierenden inneren elektrischen Abstoßung kann das Molekül nicht standhalten.

Im Wasser dagegen bleibt ein merklicher Teil der Pyrimidin-Moleküle nach der Strahlung intakt, wie die Experimente belegen. Ursache ist eine schwache Bindung zu kleinen Clustern aus wenigen Wassermolekülen, wie die theoretische Analyse der Messdaten durch die Gruppe von Nikolai

Kryzhevoi an der Universität Heidelberg zeigt. Dadurch kann je eine Ladung im Molekül und im Wassercluster entstehen. „In der Folge sind Pyrimidin und der Wassercluster jeweils einfach elektrisch positiv geladen. Dadurch trennen sie sich zwar voneinander, die Ladung ist aber nicht stark genug, um das Pyrimidin-Molekül zu zerreißen“, sagt Ko-Autor Florian Trinter von DESY und dem Berliner Fritz-Haber-Institut.

*The Journal of Physical Chemistry Letters*, DOI: 10.1021/acs.jpcllett.1c01879

## 777 GRAMM DUNKLE MATERIE



In der Erde gibt es Dunkle Materie mit der Masse von zwei Eichhörnchen. Das zeigen Modelle zur Verteilung des rätselhaften Stoffs in unserer Heimatgalaxie. Zwar ist die Dunkle Materie im Universum im Schnitt über fünfmal häufiger\* als die gewöhnliche, uns vertraute. In unserem Sonnensystem dominiert dennoch die gewohnte Materie, weil diese sich hier stark zusammengeballt hat: in Form der Sonne, ihrer Planeten und sonstiger Trabanten. „Modellrechnungen ergeben eine lokale Dichte der Dunklen Materie von etwa 720 Pikogramm pro Kubikkilometer“, erläutert DESY-Physiker Torben Ferber. Ein Pikogramm ist ein billionstel Gramm. „Bei einem Volumen der Erde von rund 1,1 Billionen Kubikkilometern ergibt das 777 Gramm Dunkle Materie in der Erde – genug für zwei Eichhörnchen\*\*“, rechnet Ferber vor, der heute Professor am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist.

femtomenal

\* Wir können die Dunkle Materie nicht sehen, weil sie nur sehr schwach mit uns wechselwirkt. Sie macht sich aber beispielsweise über ihre Schwerkraft bemerkbar, mit der sie unter anderem schnell drehende Galaxien zusammenhält, die sonst durch die Fliehkraft auseinandergerissen würden. Nach Daten des Satelliten „Planck“ stellt die Dunkle Materie knapp 27 Prozent des Inhalts des Universums, die uns vertraute Materie nur knapp 5 Prozent. Der Rest ist die ebenso rätselhafte Dunkle Energie.

\*\*Ein Eichhörnchen bringt nach Zahlen der Deutschen Wildtierstiftung rund 300 bis 400 Gramm auf die Waage.



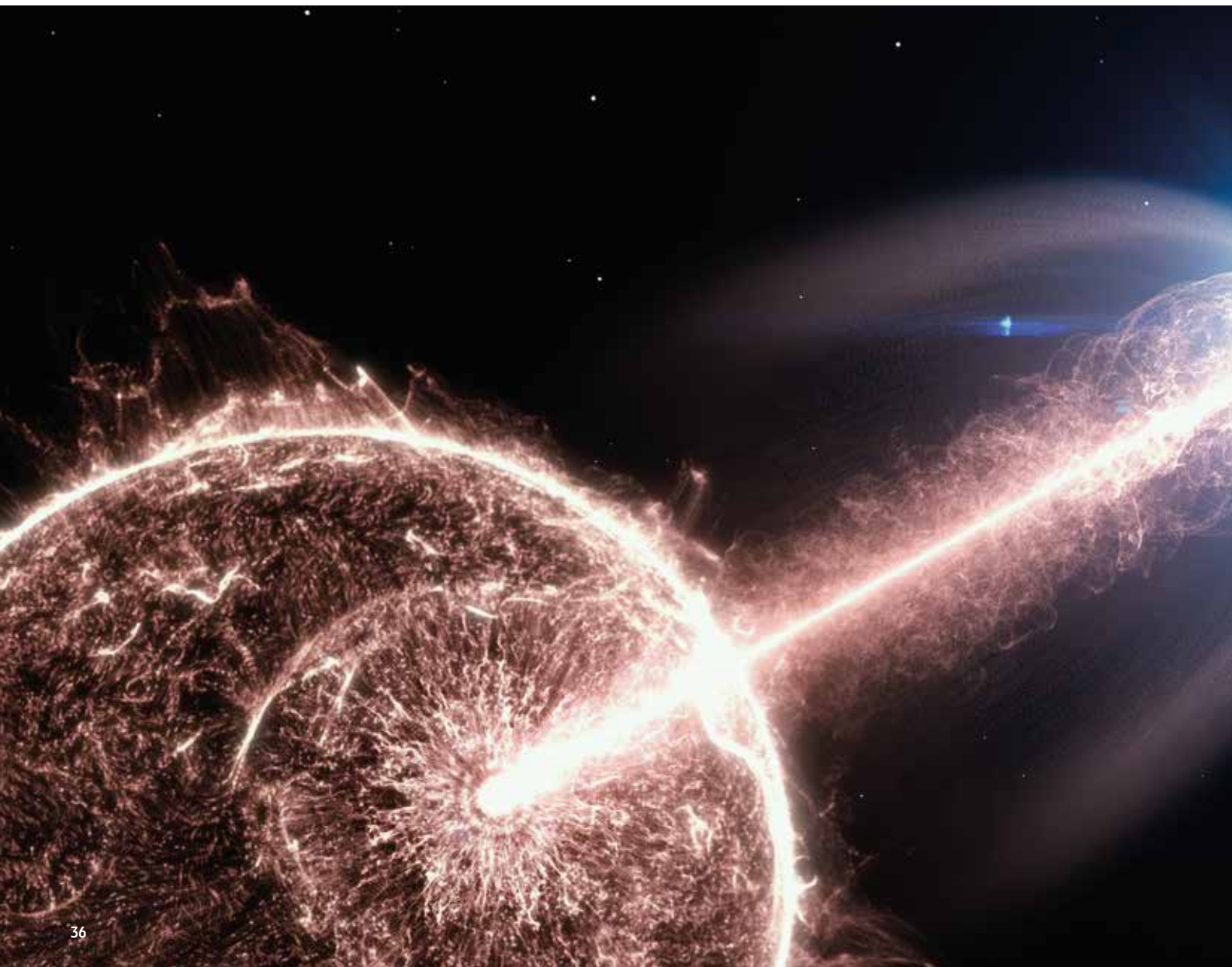
# Gammablitz aus der kosmischen Nachbarschaft

Detaillierte Beobachtung stellt Theorie der stärksten Explosionen im Universum infrage

**U**nsichtbar für das menschliche Auge flackern am Firmament regelmäßig Blitze kosmischer Gammastrahlung. Diese Gammablitze, die Ende der 1960er Jahre zufällig durch Atomtest-Überwachungssatelliten entdeckt wurden, stammen von gewaltigen kosmischen Katastrophen in fernen Galaxien, wie bestimmten

Supernova-Explosionen, wie man heute weiß. Auch nach jahrzehntelanger Erforschung gibt es noch immer zahlreiche offene Fragen zur Natur der kolossalen Gammastrahlenausbrüche. Die Beobachtung eines verhältnismäßig nahen Gammablitzes liefert nun einzigartige neue Einblicke in diese stärksten Explosionen im Universum.

Gammastrahlenausbrüche (Gamma Ray Bursts, GRB) sind demnach möglicherweise noch stärkere Teilchenbeschleuniger als gedacht: Das zeigt die außergewöhnlich detaillierte Beobachtung eines solchen Gammastrahlenblitzes am Südhimmel. Mit den Spezialteleskopen des H.E.S.S.-Observatoriums in Namibia hat ein internationales Forschungs-



team die bislang energiereichste Strahlung von einem Gammablitz registriert und das bisher längste Nachleuchten so einer Explosion im Bereich der Gammastrahlung verfolgt. Die Auswertung der Daten legt nun nahe, dass Röntgen- und Gammastrahlung dieser gewaltigen Sternexplosionen dieselbe Ursache haben und nicht wie bislang angenommen durch getrennte Prozesse entstehen.

„Gammablitz sind helle Ausbrüche von Röntgen- und Gammastrahlung am Himmel, die von Quellen außerhalb unserer eigenen Galaxie stammen“, erläutert DESY-Forscherin Sylvia Zhu, eine der Autorinnen der Studie. „Sie sind die größten Explosionen im Universum und stehen im Zusammenhang mit

dem Kollaps eines schnell rotierenden, massereichen Sterns zu einem Schwarzen Loch.“ Ein Teil der dabei freigesetzten Gravitationsenergie treibt eine extrem schnelle, ultra-relativistische Schockwelle durch das umgebende Gas. Darin werden subatomare Teilchen beschleunigt, wie beispielsweise Elektronen, die

„Wir haben diesen Gammablitz wirklich aus der ersten Reihe gesehen“

Andrew Taylor, DESY

wiederum Gammastrahlung erzeugen können. Gammablitz teilen sich in zwei Phasen: eine kurze und chaotische Ausbruchphase, die einige Dutzend Sekunden dauert, und ein langes, langsam verblappendes Nachglühen.

### Beispiellose Energie

Am 29. August 2019 registrierten die beiden Satelliten „Fermi“ und „Swift“ der US-Raumfahrtbehörde NASA einen Gammablitz im südlichen Sternbild Eridanus. Das Ereignis wurde nach dem Datum als GRB 190829A katalogisiert. Mit einer Entfernung von rund einer Milliarde Lichtjahren stellte es sich als einer der nächsten Gammablitz heraus, die bislang beobachtet worden sind. Zum Vergleich: Der typische Gammablitz ist rund 20 Milliarden Lichtjahre entfernt. „Wir haben diesen Gammablitz wirklich aus der ersten Reihe gesehen“, sagt DESY-Forscher Andrew Taylor, Ko-Autor der Studie. Das Team registrierte das Nachleuchten, sobald es in das Gesichtsfeld der H.E.S.S.-Teleskope kam. „Wir konnten das Nachglühen für mehrere Tage und bei bislang beispiellosen Energien verfolgen“, berichtet Taylor.

Die vergleichsweise geringe Distanz des Gammablitzes ermöglichte detaillierte Messungen des Hochenergiespektrums seines Nachglühens, also der „Farb-“ beziehungsweise Energieverteilung der Röntgen- und Gammaphotonen. „Wir konnten das Spektrum von GRB 190829A bis zu einer Energie von 3,3 Tera-Elektronenvolt vermessen, das ist rund eine Billion Mal energiereicher als sichtbares Licht“, sagt Ko-Autorin Edna Ruiz-Velasco vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. „Das macht diesen Gammablitz so außergewöhnlich – er hat sich in unserer direkten kosmischen Nachbarschaft ereignet, so dass seine sehr energiereichen Photonen nicht durch Kollisionen mit Hintergrundlicht absorbiert worden sind, wie es über längere Distanzen im Kosmos geschieht.“ Bei sehr hohen Energien wird das Universum durch diesen >>



Künstlerische Darstellung des relativistischen Materiejets eines Gammablitzes (GRB), der aus dem kollabierenden Stern herausgeschleudert wird und energiereiche Gammastrahlung erzeugt

Das von einer internationalen Kooperation in Namibia betriebene Observatorium „High Energy Stereoscopic System“ (H.E.S.S.) späht mit insgesamt fünf Spezialteleskopen nach dem bläulichen Schimmer energiereicher Teilchenschauer, die kosmische Gamma-Photonen in der Erdatmosphäre auslösen (künstlerische Darstellung).



Prozess über große Entfernungen zunehmend undurchsichtig.

### Jenseits der Burn-off-Grenze?

H.E.S.S. verfolgte das Nachglühen des Gammablitzes bis zum dritten Tag nach der ursprünglichen Explosion. „Unsere Beobachtungen enthüllen eine verblüffende Ähnlichkeit der Röntgenkomponente und der sehr energiereichen Gammastrahlung im Nachleuchten“, berichtet Zhu. Das ist überraschend, denn die allgemein akzeptierte Theorie geht davon aus, dass diese beiden Strahlungskomponenten durch unterschiedliche Mechanismen produziert werden müssen: Die Röntgenstrahlung stammt demnach von hochbeschleunigten Elektronen, die von den starken Magnetfeldern im Umfeld der Explosion abgelenkt werden. Über diesen „Synchrotronprozess“ produzieren auch irdische Teilchenbeschleuniger intensive Röntgenstrahlung für wissenschaftliche Untersuchungen.

Für die Produktion sehr energiereicher Gammastrahlung kommt der Synchrotronprozess nach gängigen Theorien jedoch zunächst nicht infrage. Schuld ist eine sogenannte Burn-off-Grenze, die durch das Verhältnis von Beschleunigung und Abkühlung der Teilchen in einem Beschleuniger bestimmt wird. Für die Produktion von Gammastrahlung sind Elektronen mit Energien deutlich oberhalb der Burn-Off-

Grenze erforderlich, die selbst die stärksten Explosionen im Weltall eigentlich nicht produzieren können. Stattdessen geht die Theorie davon aus, dass die schnellen Elektronen mit bereits produzierten energiereichen Synchrotronphotonen zusammenstoßen und diese dabei auf Gamma-Energien anheben. Dieser komplizierte Prozess heißt Synchrotron Self-Compton (SSC).

### Vielversprechende Aussichten

Die Beobachtungen des Nachleuchtens von GRB 190829A zeigen jedoch, dass beide Komponenten – also Röntgen- und Gammastrahlung – synchron verblasst sind. Außerdem passt das Gammastrahlenspektrum gut zu einer Verlängerung des Röntgenspektrums. Zusammengefasst sind diese Eigenschaften ein starkes Indiz dafür, dass beide Strahlungskomponenten vom selben Prozess erzeugt worden sind. „So bemerkenswert ähnliche spektrale und zeitliche Eigenschaften der Röntgen- und der sehr energiereichen Gammastrahlung zu beobachten, würden wir bei getrennten Ursprüngen dieser Strahlungskomponenten nicht erwarten“, erläutert Ko-Autor Dmitry Khangulyan von der Rikkyo-Universität in Tokio. Dies stellt den SSC-Prozess als Ursprung der Gammastrahlung infrage.

Ob die Theorie der Gammablitze geändert werden muss, lässt

sich nur durch weitere Beobachtungen der sehr energiereichen Komponente ihres Nachglühens klären. GRB 190829A ist allerdings erst der vierte Gammablitze, der sich bei diesen hohen Energien nachweisen ließ. Die zuvor entdeckten Gammablitze stammten aus sehr viel größerer Entfernung, und ihr Nachglühen ließ sich jeweils nur für wenige Stunden und nicht bei Energien oberhalb von einem Tera-Elektronenvolt beobachten. „Die Instrumente der nächsten Generation wie das Cherenkov Telescope Array, das derzeit in den chilenischen Anden und auf der Kanareninsel La Palma aufgebaut wird, haben jedoch vielversprechende Aussichten, solche Gammablitze regelmäßig zu verfolgen“, sagt H.E.S.S.-Sprecher Stefan Wagner von der Landessternwarte Heidelberg. „Angesichts der allgemeinen Häufigkeit von Gammablitzen im Kosmos dürften uns solche regelmäßigen Nachweise im sehr energiereichen Band sehr helfen, die Physik dieser kolossalen kosmischen Explosionen besser zu verstehen.“

Science, DOI: 10.1126/science.abe8560



Zu der Beobachtung des außergewöhnlichen Gammablitzes haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von DESY gemeinsam mit den Animationskünstlern des preisgekrönten Science Communication Lab ein Video erstellt, das vom international gefeierten Musiker Alva Noto vertont worden ist.



# Versickernde Ozeane

Wasser wandert tiefer und in größerem Umfang in den Erdmantel als angenommen

**D**er globale Wasserkreislauf macht nicht an der Erdkruste halt: Jedes Jahr verschwinden rund drei Kubikkilometer Ozeanwasser in den sogenannten Subduktionszonen der Erde, wo die Erdplatten ins Innere unseres Planeten abtauchen. Das summiert sich in 10 000 Jahren immerhin zum Volumen der Ostsee. Der Großteil dieses Wassers wird bei Vulkanausbrüchen wieder ausgespuckt. Ein Teil wandert allerdings so tief in den Erdmantel, dass sein Schicksal ungewiss ist. Mehrere Hochdruckexperimente liefern nun neue Einblicke in das Verhalten von Wasser im Inneren der Erde und anderer Planeten.

Die Weltmeere sickern demnach tiefer und in größerem Umfang in den Erdmantel als bislang angenommen. Das zeigt die Untersuchung des wasserhaltigen Minerals Glaukophan, das in der ozeanischen Kruste weit verbreitet ist. Hochdruckexperimenten an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III zufolge ist Glaukophan überraschend stabil und kann Wasser bis in Tiefen von bis zu 240 Kilometer befördern.

Ursache für die unerwartete Stabilität des Minerals ist die allmäh-

liche Abkühlung des Erdinneren, die sich über geologische Zeiträume vollzieht. Durch die gesunkenen Temperaturen können Glaukophan und vermutlich auch andere wasserhaltige Minerale demnach höheren Drücken in größeren Tiefen widerstehen, wie das internationale Forschungsteam unter der Leitung von Yongjae Lee von der Yonsei-Universität in Südkorea erläutert. Die Forscherinnen und Forscher schätzen, dass dadurch in rund 200 Millionen Jahren zusätzlich etwa das Volumen des Arktischen Ozeans in diese Tiefen des Erdmantels sickert.

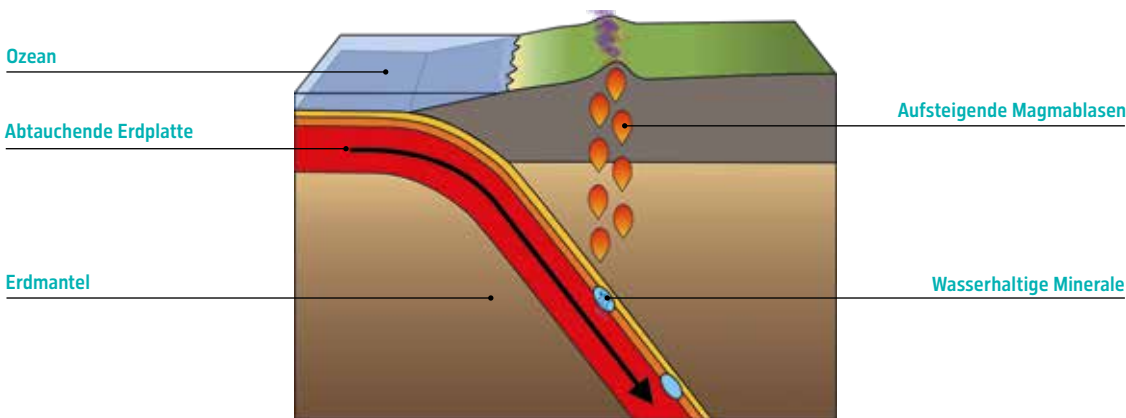
## Abkühlender Erdmantel

„Unter dem Ozean existieren sogenannte Subduktionszonen mit einer Gesamtlänge von rund 55 000 Kilometern, also deutlich länger als der Erdumfang, wo Platten der Erdkruste und des oberen Mantels in das Innere unseres Planeten abtauchen“, erläutert Lee. Diese Platten befördern das Ozeanwasser vor allem in Form wasserhaltiger Minerale wie Amphibole in die Tiefe. „Allerdings können diese Minerale normalerweise Temperatur und Druck nicht bis zu größeren Tiefen als etwa 100 Kilometer widerstehen“, sagt Lee. Wenn

Amphibole wie Glaukophan zerbrechen, wird ihr Wasser freigesetzt und treibt Erdbeben in den Subduktionsplatten und Vulkanismus im darüberliegenden Erdmantel an. Dadurch gelangt das Wasser über kurz oder lang wieder an die Oberfläche.

Das Erdinnere kühlt sich gegenwärtig jedoch um etwa 50 bis 100 Grad Celsius pro einer Milliarde Jahre ab, und diese Abkühlung beschleunigt sich. Dadurch haben sich in der jüngeren Erdgeschichte vielerorts „kalte“ Subduktionszonen gebildet, in denen es zwar immer noch glühend heiß ist, aber merklich kühler als in den üblichen „heißen“ Subduktionszonen und auch kühler als in der erdgeschichtlichen Vergangenheit. „Mit Hochdruck- und Hochtemperatur-Ausrüstung haben wir die heutigen Bedingungen in den kalten Subduktionszonen im Labor simuliert und das Verhalten von Glaukophan dabei untersucht“, erläutert Ko-Autor Hanns-Peter Liermann, Leiter der Messstation für Extrembedingungen an PETRA III. „Zu unserer Überraschung bleibt Glaukophan in kalten Subduktionszonen bei Bedingungen stabil, die einer deutlich größeren Tiefe von bis zu 240 Kilometern entsprechen.“ >>





### Plattentektonik

In den Subduktionszonen tauchen Erdplatten in den Mantel ab und können über Minerale wesentliche Mengen Wasser mit sich tragen.

### Unterirdischer Wasserspeicher

Frühere Schätzungen nahmen an, dass rund ein Drittel des Wassers in Subduktionsplatten in diese Tiefen im Erdmantel befördert wird. Dabei ist nicht klar, ob und wie es von dort wieder an die Oberfläche gelangen kann. „Wenn wir annehmen, dass alle Subduktionszonen früher oder später zu ‚kühlen‘ werden, könnte in 200 Millionen Jahren das Volumen des Arktischen Ozeans zusätzlich im Erdmantel gespeichert werden“, rechnet Yoonah Bang von der Yonsei-Universität vor, Hauptautorin der Studie, die zum „Early Science“-

Forscherinnen und Forscher der Nationaluniversität Seoul in Südkorea, vom Lawrence-Livermore-Labor, dem Argonne-Labor und der Universität Chicago in den USA, vom Zentrum für Hochdruckforschung und -technologie in China und der Ehime-Universität in Japan beteiligt waren, hat weitere Implikationen für die Entwicklung der Erde: Da unterirdisches Wasser in geringeren Tiefen ein wesentlicher Treiber für Vulkanismus und Erdbeben ist, werden diese Phänomene auf geologischen Zeitskalen immer seltener, wie Lee betont: „Da sich die Erde im-

Drücken und Temperaturen, wie sie für solche Planeten typisch sind, spült das Wasser Magnesium aus den Mineralen.

„Die Wechselwirkung von Wasser und Gestein auf der Erdoberfläche werden seit Jahrzehnten erforscht“, betont Lee. „Unbekannt ist dagegen, wie das heiße, dichte Wasser der unterirdischen Ozeane mancher Eisplaneten mit der darunterliegenden Gesteinskruste reagiert.“ Das Team hat dazu eine Reihe von Hochdruck- und Hochtemperaturexperimenten an DESYs Röntgenquelle PETRA III sowie an der Advanced Photon Source (APS) in den USA durchgeführt, an denen auch Forscherinnen und Forscher der Universität Chicago, der Universität von Illinois, dem Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) und der Arizona State University beteiligt waren.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler schufen Bedingungen, wie sie am Boden tiefer Ozeane in der Klasse der Sub-Neptun-Wasserplaneten herrschen. Bei Drücken zwischen 20 und 40 Gigapascal, das entspricht dem 200 000- bis 400 000-fachen Atmosphärendruck, und Temperaturen oberhalb von 1230 Grad Celsius wäscht das Wasser demnach erhebliche Mengen Magnesiumoxid (MgO) aus den typischen Gesteinsmineralen Ferropiklase (Mg,Fe)O und Olivin (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> aus.

### Löslich wie Salz

„Für die Versuche wurden winzige Ferropiklase- oder Olivin-Kügelchen mit Wasser in kleine Probenkammern von weniger als einem

## „Unbekannt ist, wie das heiße, dichte Wasser der unterirdischen Ozeane mancher Eisplaneten mit der darunterliegenden Gesteinskruste reagiert“

Yongjae Lee, Yonsei-Universität

Programm am Zentrum für Molekulare Wasserforschung CMWS zählt, das zurzeit bei DESY aufgebaut wird. „Es würde allerdings fünf Milliarden Jahre dauern, bis die Ozeane auf diese Weise komplett ausgetrocknet wären.“

Da unsere Sonne in Zukunft langsam immer heißer werden wird, werden die Ozeane Schätzungen zufolge bereits in rund einer Milliarde Jahre verdampfen. „Es scheint, dass die Erde einen Teil ihres Oberflächenwassers in ihrem Inneren speichern und damit vor dem Verlust ins Weltall bewahren könnte“, ergänzt Lee. Die Untersuchung, an der auch

mer weiter abkühlt, ist zu erwarten, dass sich der Wassertransport ins Erdinnere auf größere Tiefen ausdehnt und dadurch Erdbeben und Vulkanismus unterdrückt werden.“

### Extraterrestrische Ozeane

Doch nicht nur in unseren eigenen Planeten lässt sich mit Hochdruckexperimenten schauen. Lees Team hat auf diese Weise auch die Bedingungen in extraterrestrischen Ozeanen ferner Wasserplaneten simuliert. Die Analyse zeigt, dass die unterirdischen Ozeane großer Wasserplaneten Minerale der Gesteinskruste auflösen. Bei hohen

Millimeter Größe eingeschlossen und zwischen zwei hochfesten Stempeln einer sogenannten Diamantstempelzelle zusammengepresst“, berichtet Taehyun Kim von der Yonsei-Universität, Hauptautor der Studie, die ebenfalls zum CMWS-„Early Science“-Programm zählt. „Geheizt wurden diese Proben mit einem Infrarotlaser durch die Diamantstempel hindurch.“

Mit Hilfe der Röntgenstrahlung ließ sich beobachten, wann ein Mineral durch die Wechselwirkung mit dem Wasser zu zerfallen begann. Das Kristallgitter jedes Minerals erzeugt ein charakteristisches Streubild im Röntgenlicht. Ein plötzlicher Rückgang dieses charakteristischen Musters kündigt den Zerfall eines Minerals an. Gleichzeitig lässt sich so die Entstehung neuer Verbindungen beobachten, in diesem Fall etwa von Brucit (Magnesiumhydroxid).

Diese Beobachtung zeigt den Beginn chemischer Reaktionen, mit denen sich die Magnesiumoxid-Komponente aus den beiden untersuchten Mineralen löst. Die Auflösung ist am stärksten im Druckbereich von 20 bis 40 Gigapascal und bei Temperaturen zwischen 1000 und 1750 Grad Celsius. Die Details des Reaktionsprozesses und der folgenden Abscheidung von Magnesiumoxid ließen sich durch genaue Messungen mit einem Elektronenrastermikroskop sowie per Röntgenspektroskopie der benutzten Proben bestätigen. Wie sich zeigt, erreicht die Löslichkeit von Magnesiumoxid bei diesen extremen Drücken und Temperaturen in etwa jene von Salz in irdischen Ozeanen. Astronomen haben inzwischen bei zahlreichen Planeten und Monden in unserem und anderen Sonnensystemen Hinweise auf unterirdische Ozeane entdeckt. Manche gelten als vielversprechend für extraterrestrisches Leben.

*Nature Communications*, DOI: 10.1038/s41467-021-21746-8 (Bang et al.)  
*Nature Astronomy*, DOI: 10.1038/s41550-021-01368-2 (Kim et al.)

## HANDLICHER HOCHDRUCK

Es wirkt wie eine unscheinbare flache Metalldose, aber in dem handteller-großen Gerät stecken Welten: Mit der sogenannten Diamantstempelzelle unternehmen Forscherinnen und Forscher Expeditionen tief ins Innere unserer Erde und ferner Planeten. Mit ihrer Hilfe können sie Hochdruck erzeugen, wie er hunderte bis tausende Kilometer unter der Oberfläche herrscht.

Dazu dient ein brillanter Trick: Wie der Name nahelegt, befinden sich im Inneren der Zelle zwei Stempel aus ultrahartem Diamant. Zwischen diesen beiden Diamantstempeln wird die Probe eingespannt und unter Druck gesetzt – etwa ein Stück künstliches Erdmantelgestein. Das Hochdruckgeheimnis ist dabei die winzige Fläche der Stempel. Sie haben typischerweise Durchmesser von nur einem Zehntel bis einem Viertel Millimeter. Entsprechend mikroskopisch muss die Probe sein, trotzdem lässt sie sich mit dem feinen Röntgenstrahl von Anlagen wie PETRA III bei DESY detailliert durchleuchten.

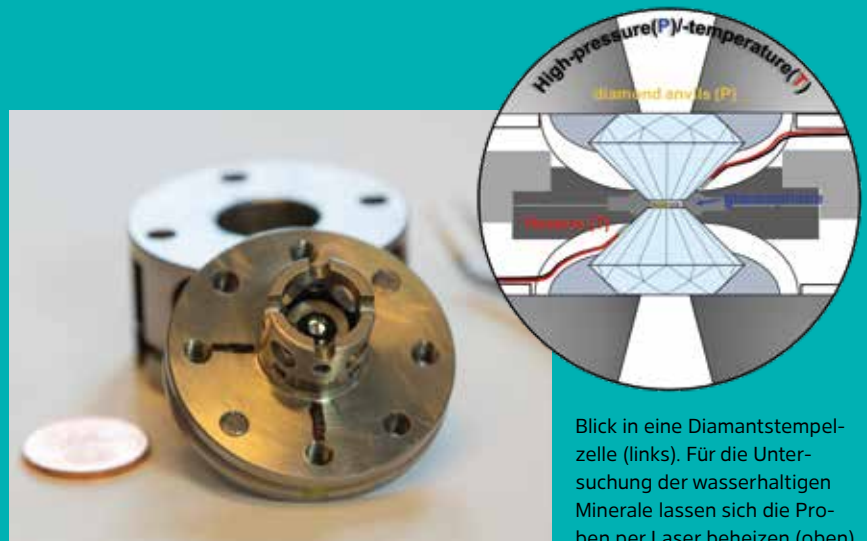
Druck ist das Verhältnis von Kraft zu Fläche. Je kleiner die Fläche, desto weniger Kraft ist also für einen hohen Druck nötig. Diamantstempelzellen lassen sich oft sogar über Schrauben per Hand einstellen. „Die Kunst dabei ist nicht, eine hohe Kraft auszuüben“, erläutert Hochdruckexperte Hanns-Peter Liermann von

femtopolis

DESY. „Die Kunst ist, die Diamantstempel so zu designen, dass sie dem Druck standhalten – dreht man zu fest zu, splittert der Diamant.“

Die Diamantstempel besitzen Spezialschliffe, die sie besonders widerstandsfähig machen. Trotzdem kommt es im Forschungsalltag immer wieder vor, dass Stempel sich zu Diamantsplintern verwandeln. „Der Verlust liegt dabei nur zu rund zwei Drittel im Materialwert des Diamanten, etwa ein Drittel des Werts macht dessen Spezialbearbeitung aus“, erläutert Liermann.

Die unangefochtenen Weltmeister dieser Art von Hochdruck-erzeugung sind Natalia Dubrovinskaia und Leonid Dubrovinsky von der Universität Bayreuth. Mit Spezialstempeln aus nanokristallinem Diamant, die nur noch 0,01 bis 0,02 Millimeter Durchmesser haben, ist ihnen unter anderem bei Experimenten an Liermanns Messstation für Extrembedingungen ein Druck gelungen, der rund doppelt so hoch ist wie im Erdkern: 770 Gigapascal, das ist rund 7,6 Millionen Mal so hoch wie der Luftdruck auf Meereshöhe. Inzwischen haben sie sogar einen Druck von 1000 Gigapascal erreicht.



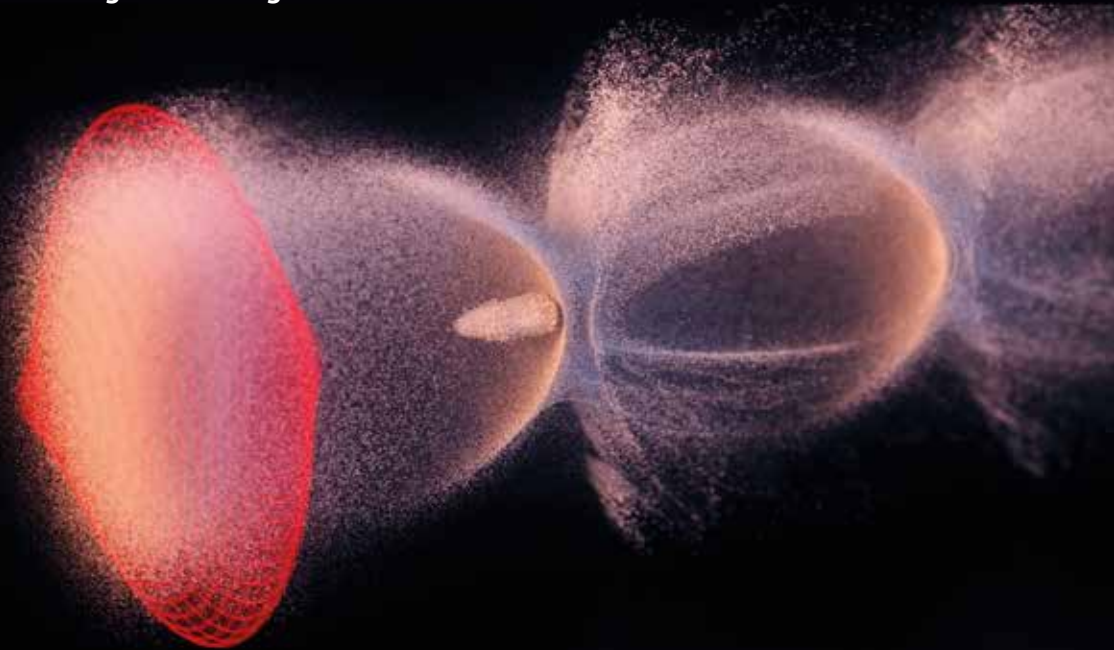
Blick in eine Diamantstempelzelle (links). Für die Untersuchung der wasserhaltigen Minerale lassen sich die Proben per Laser beheizen (oben).



# Die Mischung macht's

Eine Prise Stickstoff und künstliche Intelligenz bringen die Laser-Plasmabeschleunigung einen großen Schritt näher in Richtung Anwendung

Bei der Laser-Plasmabeschleunigung treibt ein intensiver Laserpuls (rot) in einem ionisierten Gas eine aus Elektronen (weiß) bestehende blasenförmige Plasmawelle. Ein Elektronenpaket (Mitte), das auf dieser Welle ähnlich wie ein Surfer reitet, wird so über kürzeste Distanzen zu hohen Energien beschleunigt. Die Visualisierung basiert auf echten Simulationsdaten des LUX-Experiments.



**D**ie Plasmabeschleunigung ist eine innovative Technologie für eine neue Generation von Teilchenbeschleunigern, die nicht nur besonders kompakt, sondern auch extrem vielseitig einsetzbar sind. Ziel ist es, die beschleunigten Elektronen für verschiedene Anwendungsfelder in Industrie, Wissenschaft und Medizin zu erschließen.

Gleich zwei Meilensteine in der Entwicklung innovativer Plasmabeschleuniger haben nun Forscherinnen und Forscher der Universität

Hamburg und von DESY im gemeinsamen Projekt LUX erreicht. Sie erprobten an ihrem Beschleuniger eine Technik, mit der die Energieverteilung der erzeugten Elektronenstrahlen besonders klein gehalten werden kann, was die Qualität der Teilchenstrahlen verbessert. Zudem brachten sie den Beschleuniger mit Hilfe künstlicher Intelligenz dazu, seinen Betrieb selbst zu optimieren.

Die Beschleunigung geschieht in einem winzigen, nur wenige Millimeter langen Kanal, der mit einem Plasma gefüllt ist. Ein Plasma ist ein Gas, dessen Molekülen die Elektronen entrissen worden sind und sich frei bewegen. Ein intensiver Laserpuls regt darin eine Welle an. Elektronen aus dem Plasma können von dieser Welle eingefangen und beschleunigt werden. „Ähnlich wie ein Surfer werden die Elektronen von der Plasmawelle mitgenommen und so zu hohen Energien beschleunigt,“

erklärt Manuel Kirchen, Hauptautor einer der Studien. „Plasmabeschleuniger können auf diese Weise eine bis zu tausendfach höhere Beschleunigung erreichen als die stärksten Maschinen, die heute im Einsatz sind,“ ergänzt Sören J alas, der die zweite Studie verfasst hat.

## Doppelzelle verbessert Qualität

Die Kompaktheit ist allerdings Fluch und Segen zugleich: Da die Beschleunigungsvorgänge auf einem im Vergleich zu den herkömmlichen Großgeräten winzigen, bis zu 1000-fach kleineren Raum konzentriert sind, findet die Beschleunigung unter wahrlich extremen Bedingungen statt. Daher gilt es, noch einige Herausforderungen zu meistern, bis die neue Technologie Serienreife erlangt.

Das Forschungsteam um DESY-Beschleunigerphysiker Andreas Maier hat nun ein Rezept gefunden, um die Energieverteilung

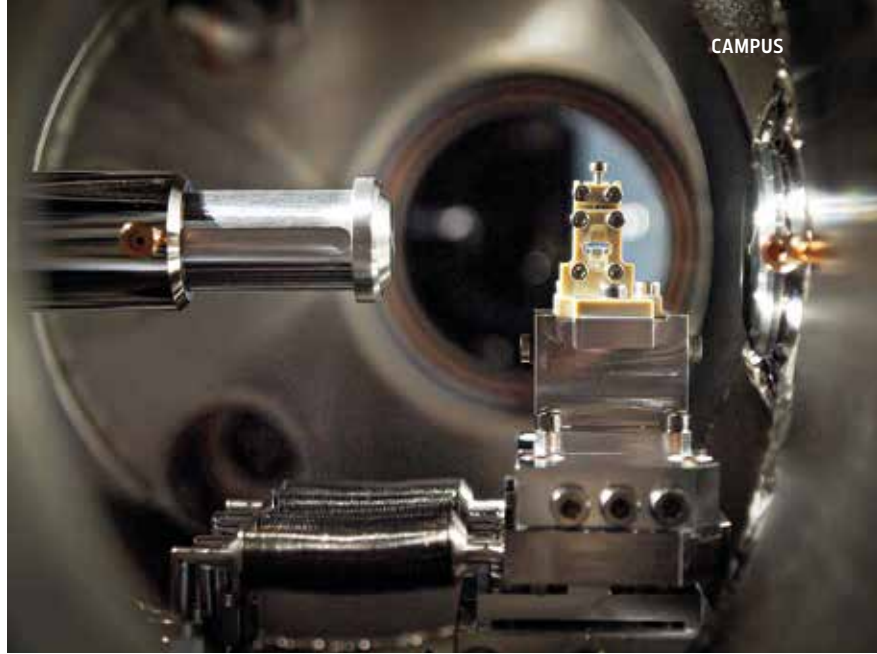
*„Ähnlich wie ein Surfer werden die Elektronen von der Plasmawelle mitgenommen“*

Manuel Kirchen, Universität Hamburg

der beschleunigten Elektronenpakete deutlich zu reduzieren – eine wesentliche Voraussetzung für viele potenzielle Anwendungen. Ihre Experimente führte die Gruppe mit einer eigens entwickelten neuen Plasmazelle durch, deren Plasmakanal in zwei Bereiche getrennt war. Im vorderen Teil der rund einen Zentimeter langen Zelle wurde das Plasma aus einem Gemisch aus Wasserstoff und Stickstoff erzeugt, während der hintere Teil mit reinem Wasserstoff gefüllt war. So schafften es die Forscherinnen und Forscher, zunächst aus dem vorderen Teil der Plasmazelle Elektronen für ihr Teilchenpaket zu gewinnen, die dann über den gesamten hinteren Teil der Zelle beschleunigt wurden.

„Die stärker gebundenen Stickstoff-Elektronen werden etwas später freigesetzt und dadurch optimal von der Plasmawelle beschleunigt“, erklärt Kirchen. Das Teilchenpaket

Die Plasmazelle von LUX (rechts in der Mitte) ist nur wenige Millimeter lang.



und Kollegen konnten das komplexe System des Plasmabeschleunigers mit Hilfe künstlicher Intelligenz (KI) von einem Algorithmus steuern und optimieren lassen. Hierfür gaben die Forscherinnen und Forscher dem Algorithmus ein Funktionsmodell des Plasmabeschleunigers und einen Satz von einstellbaren Parametern vor, die der Algorithmus dann selbstständig optimierte.

„Bei diesem Balanceakt im fünfdimensionalen Raum lernt der Algorithmus stets dazu“

Sören Jalas, Universität Hamburg

im Beschleunigerbetrieb zu finden; wir Menschen bräuchten dafür nach unseren Schätzungen über eine Woche.“ Ein weiterer Vorteil: Alle Parameter und Messgrößen trainieren das KI-Modell des Beschleunigers weiter und machen seine Optimierung schneller, systematischer und zielführender.

„Es ist phantastisch, zu sehen, mit welcher Geschwindigkeit die neue Technologie der Plasmabeschleunigung mehr und mehr die Reife für eine Vielzahl von Anwendungen erlangt“, kommentiert DESYs Beschleuniger-Direktor Wim Leemans. „Mit den jüngsten Fortschritten an LUX sind wir auf einem guten Weg, testweise erste Anwendungen auszuprobieren“, ist Maier sicher. „Letztendlich wollen wir mit plasmabeschleunigten Elektronenpaketen auch einen Freielektronen-Laser betreiben können.“

*Physical Review Letters*, DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.174801 (Kirchen et al.)  
*Physical Review Letters*, DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.104801 (Jalas et al.)

„Es ist phantastisch, zu sehen, mit welcher Geschwindigkeit die Plasmabeschleunigung die Reife für eine Vielzahl von Anwendungen erlangt“

Wim Leemans, DESY

absorbiert zudem Energie von der Plasmawelle und verändert dadurch deren Form. „Diesen Effekt konnten wir uns zunutze machen und die Form der Welle so anpassen, dass die Elektronen unabhängig von ihrer Position in der Welle die gleiche Energie erreichen“, sagt der Physiker.

### Autopilot übernimmt Kontrolle

Basierend auf diesem Rezept zum Erreichen hoher Elektronenstrahlqualität gelang dem Team dann gleich ein zweiter Forschungserfolg: Sören Jalas und seine Kolleginnen

Im Wesentlichen justierte das System fünf Hauptparameter, beispielsweise Konzentration und Dichte der Gase sowie Energie und Fokus des Lasers, und suchte mit den zugehörigen Messergebnissen nach einem Optimum in der Qualität des Elektronenstrahls. „Bei diesem Balanceakt im fünfdimensionalen Raum lernt der Algorithmus stets dazu und verfeinert das Modell des Beschleunigers sehr schnell immer weiter“, berichtet Jalas. „Zum Vergleich: Die KI braucht etwa eine Stunde, um ein stabiles Optimum



femtofinale

Und was machen  
SIE so?



Ich forsche über  
schwer fassbare  
Teilchen.



DAS kenn ich!

Mein Mann  
ist mir auch  
ein Rätsel.



mahler



# Impressum

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

## Redaktionsanschrift

Notkestraße 85, 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

Till Mundzeck (v.i.S.d.P.)

## An dieser Ausgabe haben mitgewirkt

Frank Grotelüschen, Carolin Rankin

## Schlussredaktion

Ilka Flegel

## Layout

Ulrike Darwisch

## Artdirektion und Produktion

Diana von Ilseemann

## Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

## Redaktionsschluss

November 2021

# femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie  
femto kostenlos!

[www.desy.de/femto](http://www.desy.de/femto)





### Das Forschungszentrum DESY

DESY zählt zu den weltweit führenden Teilchenbeschleuniger-Zentren und erforscht die Struktur und Funktion von Materie – vom Wechselspiel kleinster Elementarteilchen, dem Verhalten neuartiger Nanowerkstoffe und lebenswichtiger Biomoleküle bis hin zu den großen Rätseln des Universums. Die Teilchenbeschleuniger 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 neue Fenster ins Universum.

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