

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 01/23

LASER

LEGENDÄRER
LICHTVERSTÄRKER

Asteroideneinschlag
in Zeitlupe

Wandfarbe gegen
Coronaviren

Seltener Auftritt:
Four Tops am LHC



Roboter am Ball

Wer sind diese kleinen Gestalten, die hier auf dem DESY-Gelände herumstrolchen? Die Antwort mag überraschen: Es handelt sich um Spieler eines internationalen Fußballturniers! Und offensichtlich sind es auch Roboter.

Im Frühjahr fand im Center for Free-Electron Laser Science CFEL bei DESY in Hamburg der Wettbewerb GORE 2023 statt. GORE (German Open Replacement Event) ist Teil des RoboCup-Wettbewerbs, bei dem (menschliche) Teams entweder Roboter fürs autonome Fußballspielen programmieren, oder die Roboter gleich von Grund auf selbst bauen (humanoide Liga). Regeln und Ziele des Roboterfußballs entsprechen dabei praktisch denen des traditionellen Fußballs mit Menschen, nur dass weniger Spieler zum Einsatz kommen.

Die Roboter, die hier vor den Spielen den Hamburger DESY-Campus besichtigten, stammen von der Technischen Universität Hamburg. Die HULKs, ein Team aus standardisierten Robotern, und die Bit-Bots, humanoide Roboter, sind zwei der elf Teams, die

im CFEL antraten und teilweise sogar aus Kanada und Australien angereist waren. „Das Turnier war so organisiert, dass einige Teams, die nicht vor Ort sein konnten, trotzdem aus der Ferne antreten konnten“, berichtet Jonathan Hellwig von den HULKs, der an der Organisation beteiligt war.

Die HULKs gewannen in ihrer Heimatstadt mehrere Spiele und erreichten das Viertelfinale. Den Sieg beim GORE 2023 trugen die neunfachen Weltmeister B-Humans aus Bremen nach Hause – und befeuerten damit die alte Fußballrivalität zwischen den beiden Hansestädten.



<https://gore-event.github.io>



femtoskop



Inhalt

02 femtoskop

Roboter am Ball



06

06 Asteroideneinschlag in Zeitlupe

Eine Hochdruckstudie löst ein 60 Jahre altes Rätsel

08 Organische Halbleiter lieben es schummrig

Mit buntem Licht lässt sich der Aufbau neuartiger Elektronik steuern



09

09 Wandfarbe gegen Coronaviren

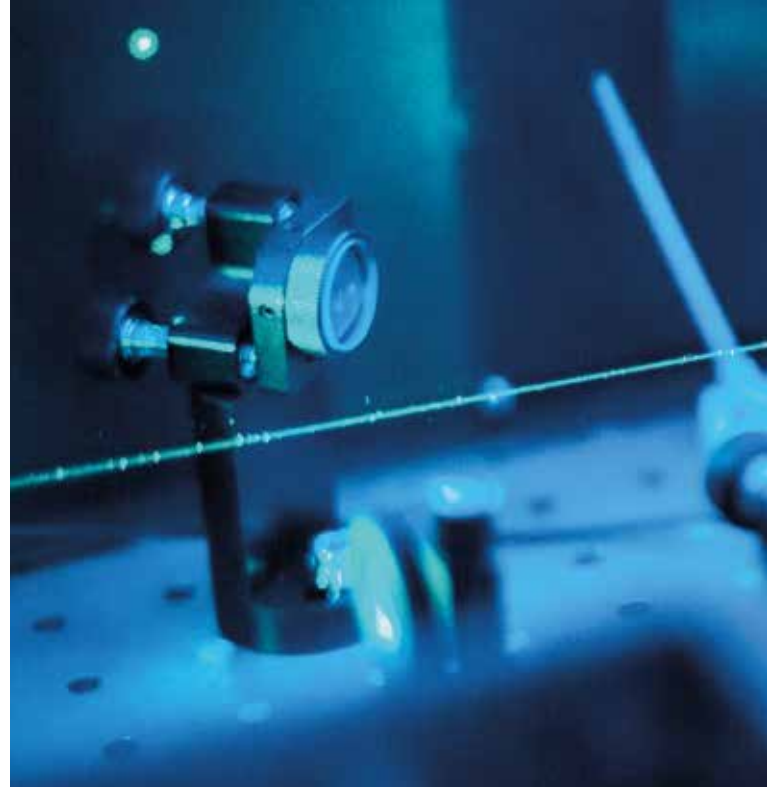
Studie zeigt vielversprechende Möglichkeiten zur Desinfektion von Oberflächen und Luft

10 femtopolis

Wie klingt die Weltformel?

11 Smarte Geschenke packen sich bald selbst aus

Zellulosebasierte Aktuatoren können programmiert werden und reparieren sich selbst



12 ZOOM: LASER

Von der Kuriosität zum Innovationstreiber

14 Legendärer Lichtverstärker

Die beispiellose Erfolgsgeschichte des Lasers

17 „Wir wollen unsere Sichtbarkeit als Laserlabor erhöhen“

DESYs Beschleunigerdirektor Wim Leemans

18 Ungleich schneller als ein Wimpernschlag

Ultrakurze Laserpulse verfolgen das Treiben der Moleküle

20 Erfolgreiche Lichtblitzschmiede

Das Start-up Class 5 Photonics baut innovative Kurzpuls-laser für die Forschung

21 Laser als Teilchenturbo

Wie KALDERA der Plasmabeschleunigung zum Durchbruch verhelfen soll

24 Licht durch die Wand

Die Anlage ALPS II fahndet per Laser nach der Dunklen Materie

25 Materie aus dem Nichts

Lassen sich mit dem Laser Teilchen im Vakuum erzeugen?

26 Per Laser ins Planeteninnere

Experimente am European XFEL untersuchen Extrembedingungen

28 Im Terahertz-Takt

Speziallaser als Startgeber für Molekülexperimente

29 Perfekt synchronisiert

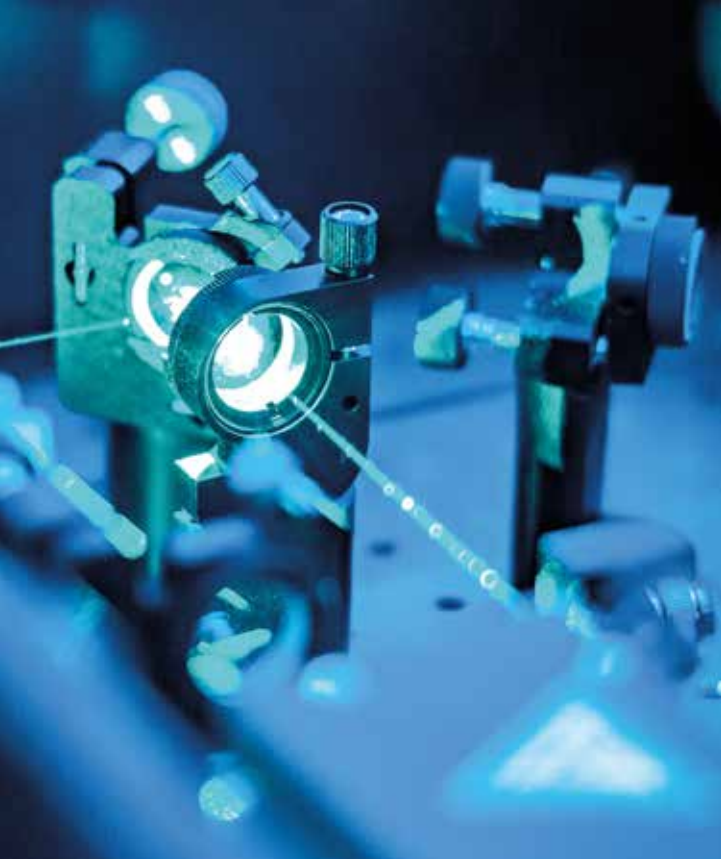
Wie ein Start-up dafür sorgt, dass verschiedene Laser im Gleichtakt funktionieren

30 „Wichtige Schnittstelle zur akademischen Welt“

Warum der Laserhersteller TRUMPF mit der Forschung kooperiert

31 Röntgenblick ins Laserschweißen

Wie PETRA III hilft, Schweißprozesse für Elektroautos zu optimieren



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

auch mehr als 60 Jahre nach ihrer Entdeckung haftet Lasern immer noch ein Hauch von Science Fiction an: Raumschiffschlachten, Laserschwerter, holographische Welten. Dabei haben die Universalwerkzeuge unseren Alltag längst auf viel praktischere Weise durchdrungen – von der Supermarktkasse bis zum Zahnarztbohrer. Sie können ja mal zählen, wie viele Laser Sie bei sich zuhause entdecken (DVD-Spieler, Laserdrucker, Werkzeug, usw.).

Die Laser, von denen wir in diesem Heft berichten, sind allerdings alles andere als alltäglich. Sie beobachten ultraschnelle Vorgänge in Biomolekülen, ermöglichen neue kompakte Teilchenbeschleuniger und fahnden nach der mysteriösen Dunklen Materie. Manche sind winzig, manche sind gigantisch – bis zu mehrere Kilometer lang. Eines haben sie alle gemeinsam: Es gibt sie nicht von der Stange zu kaufen, denn sie sind für den jeweiligen Zweck maßgeschneidert.

Die Anforderungen der Spitzenforschung, die Neues entdecken will, sind extrem. Und so müssen Forscherinnen und Forscher oft ihre eigenen Laser entwickeln, bevor sie experimentieren können. Manche liefern damit auch Lösungen für andere Anwendungsfelder, an die noch gar keiner gedacht hat. Nicht selten lässt sich das Ergebnis vermarkten. Diese Entwicklungsexpertise ist auch interessant für die Industrie, die sich deswegen gern mit der Forschung vernetzt.

In dieser Ausgabe berichten wir über einige der spektakulären Laser aus der Forschung und über die fundamentalen großen Fragen, die sie zu beantworten helfen sollen. Wir wünschen Ihnen Freude und erhellende Erkenntnisse bei der Lektüre und freuen uns über Kritik, Lob und Anregungen unter femto@desy.de.

Till Mundzeck
Redaktionsleiter

32 **Spektrum**

Nachrichten aus der Forschung

35 **femtomenal**

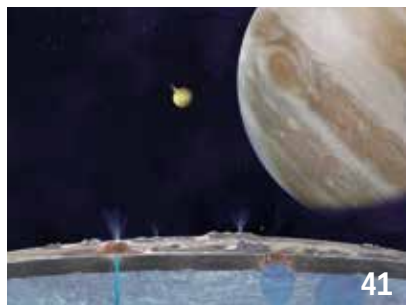
Eine Billion Photonen

36 **Seltener Auftritt der Four Tops am LHC**

Hinweise auf eine neue Art der Erzeugung des Top-Quarks

38 **Erwünschter Lochfraß**

Silber-Nanopartikel graben Tunnelsysteme in Silizium



41 **Salzige Eismonde**

Neu entdecktes Kochsalzhydrat könnte Suche nach außerirdischem Leben den Weg weisen

44 **femtofinale**

Laser-OP

Asteroideneinschlag in Zeitlupe

Eine Hochdruckstudie löst ein 60 Jahre altes Rätsel

Zum ersten Mal haben Forschende live verfolgt, was bei einem Asteroideneinschlag in dem getroffenen Material genau vor sich geht. Das Team von Falko Langenhorst von der Universität Jena und Hanns-Peter Liermann von DESY hat dazu einen Asteroideneinschlag mit Quarz im Labor nachgestellt und quasi in Zeitlupe in einer Hochdruckzelle ablaufen lassen. Dabei verfolgte das Team das Ereignis mit Hilfe von Röntgenlicht. Die Beobachtung enthüllt einen Zwischenzustand in dem untersuchten Quarz und löst damit ein Jahrzehnte altes Rätsel über die Entstehung charakteristischer Strukturen in dem Material.

Indikatormineral

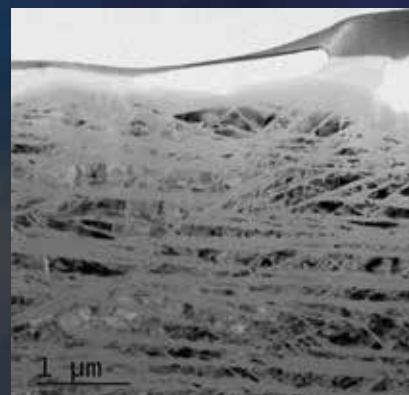
Asteroideneinschläge sind katastrophale Ereignisse, bei denen riesige Krater entstehen und manchmal Teile des Erdgesteins aufgeschmolzen werden. „Dennoch sind Krater erdgeschichtlich oft schwer nachzuweisen, denn durch Erosion, Verwitterung und Plattentektonik verschwinden sie im Laufe von Jahrmillionen“, erläutert Langenhorst. Daher dienen als Nachweis für einen Einschlag häufig Minerale, die durch die Wucht des Einschlags charakteristische Veränderungen erfahren. So wandelt sich der auf der Erdoberfläche allgegenwärtige Quarzsand (Siliziumdioxid, SiO_2) durch so einen Einschlag schrittweise in Glas um, wobei die Quarzkörner dann von mikroskopischen Lamellen durchzogen werden. Diese Struktur lässt sich erst unter dem

Elektronenmikroskop detailliert erkunden und ist beispielsweise in Material aus dem relativ jungen Barringer-Krater in Arizona (USA) zu finden.

„Seit mehr als 60 Jahren dient dieses lamellenartige Glas als Indikator für einen Asteroideneinschlag, aber niemand wusste bisher, wie es überhaupt zu dieser Struktur kommt“, sagt Liermann. „Dieses Jahrzehnte alte Rätsel haben wir nun gelöst.“ Die Forschenden hatten dazu jahrelang Techniken weiterentwickelt, mit denen sich Materialien unter Hochdruck im Labor untersuchen lassen. Dazu wird die Probe in der Regel in einer sogenannten Stempelzelle zwischen zwei kleinen Diamanten zusammengepresst. So lassen sich kontrolliert extreme Drücke wie im Erdinneren – oder wie bei einem Asteroideneinschlag – erzeugen.

Charakteristische Lamellen

Für seine Versuche verwendete das Team eine dynamische Diamantstempelzelle, in der sich der Druck während der Messung sehr schnell verändern lässt. Darin pressten die Forschenden kleine Siliziumdioxidkristalle mit sehr regelmäßigem Kristallgitter immer stärker zusammen und durchleuchteten sie währenddessen mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III, um die innere Struktur zu erkunden. „Die Kunst ist, den simulierten Asteroideneinschlag langsam genug ablaufen zu lassen, um ihn im Röntgenlicht verfolgen zu können, aber nicht zu langsam, so dass die für einen



Durch den simulierten Asteroideneinschlag entstehen in den untersuchten Quarzkristallen winzige, nur einige Dutzend Nanometer breite Glaslamellen, die erst im Elektronenmikroskop sichtbar werden.



Der Barringer-Krater in Arizona entstand vor etwa 50 000 Jahren durch den Einschlag eines rund 50 Meter großen Eisenmeteoriten.

Asteroideneinschlag typischen Effekte noch entstehen können“, sagt Liermann. Als richtige Zeitdauer erwiesen sich dabei Experimente im Sekundenmaßstab.

„Wir konnten beobachten, dass sich die Quarzstruktur bei einem Druck von ungefähr 180 000 Atmosphären plötzlich in eine enger gepackte Übergangsstruktur umwandelt, die wir Rosiait-artig nennen“, berichtet Christoph Otzen aus dem Team. „In dieser Kristallstruktur schrumpft der Quarz um ein Drittel seines Volumens. Die charakteristischen Lamellen formen sich genau dort, wo der Quarz diese sogenannte metastabile Phase bildet, die vor uns noch niemand in Quarz hat identifizieren können.“ Rosiait ist ein oxidisches Mineral, nach dem die auch bei anderen Materialien bekannte Kristallstruktur benannt worden ist. Es besteht nicht aus Siliziumdioxid, sondern ist ein Bleiantimonat (eine Verbindung aus Blei, Antimon und Sauerstoff).

Kollaps in ungeordnete Struktur

„Je höher der Druck steigt, desto größer wird der Anteil mit Rosiait-artiger Struktur im Quarz“, erläutert Otzen. „Lässt der Druck wieder nach, wandeln sich die Rosiait-artigen Lamellen aber nicht in die ursprüngliche Struktur von Quarz zurück,

ten technisch möglichen Drücke verwendet. „Im Bereich der höchsten Drücke entsteht so viel Hitze, dass das Material schmilzt oder verdampft“, erläutert Langenhorst. „Aufgeschmolzenes Material, das wieder zu Gestein erstarrt, gibt uns erst mal keine nützliche Auskunft. Wichtig ist jedoch genau der Druckbereich, in dem Minerale charakteristische Veränderungen im festen Zustand durchlaufen, und genau das haben wir in diesem Fall untersucht.“

Bedeutung für andere Materialien

Die Ergebnisse könnten über die Erforschung von Asteroideneinschlägen hinaus Bedeutung haben. „Was wir beobachtet haben, könnte eine Modellstudie für die Glasbildung auch ganz anderer Materialien wie beispielsweise Eis sein“, betont Langenhorst. „Eventuell ist es ein typischer Weg, dass eine Kristallstruktur sich bei schneller Kompression in einem Zwischenschritt in eine metastabile Phase umwandelt, die dann in die ungeordnete Glasstruktur übergeht. Auch das wollen wir weiter untersuchen, denn das wäre von großer Bedeutung für die Materialforschung.“

Mit dem bei DESY geplanten Ausbau von PETRA III zum weltbesten Röntgenmikroskop PETRA IV

„Niemand wusste bisher, wie es überhaupt zu dieser Struktur kommt“

Hanns-Peter Liermann, DESY

sondern sie kollabieren zu Glaslamellen mit ungeordneter Struktur. Diese Lamellen sehen wir auch in Quarzkörnern aus Ablagerungen von Asteroideneinschlägen.“ Menge und Orientierung der Lamellen lassen dabei Rückschlüsse auf den Druck beim Einschlag zu. „Aber erst jetzt können wir ihre Entstehung genau erklären und verstehen“, betont Langenhorst.

Für die Untersuchung haben die Forschenden nicht die größ-

werden solche Untersuchungen in Zukunft noch realistischer möglich sein. „Die hundertfach höhere Intensität der Röntgenstrahlung wird uns erlauben, diese Experimente hundertfach schneller ablaufen zu lassen, so dass wir einen Asteroideneinschlag noch realistischer simulieren können“, sagt Liermann.

Nature Communications,

DOI: 10.1038/s41467-023-36320-7

Organische Halbleiter lieben es schummrig

Mit buntem Licht lässt sich der Aufbau neuartiger Elektronik steuern

Das Umgebungslicht kann gravierenden Einfluss auf die Herstellung organischer Halbleiter haben. Eine Gruppe um Jens Wenzel Andreasen von der Technischen Universität von Dänemark hat beobachtet, dass sich die Halbleiter beim Beschichtungsprozess unter Rotlicht oder in Dunkelheit deutlich anders verhalten als unter grünem oder blauem Licht. Die Experimente zeigen eine Möglichkeit, die Morphologie organischer Halbleiterbauteile zu steuern.

Organische Halbleiter haben das Potenzial, ihre Siliziumvorgänger bei vielen Anwendungen abzulösen. Bereits heute werden organische Leuchtdioden (OLED) serienmäßig in Monitoren verbaut, und organische Solarzellen haben bereits ähnliche Wirkungsgrade wie ihre konventionellen Geschwister.

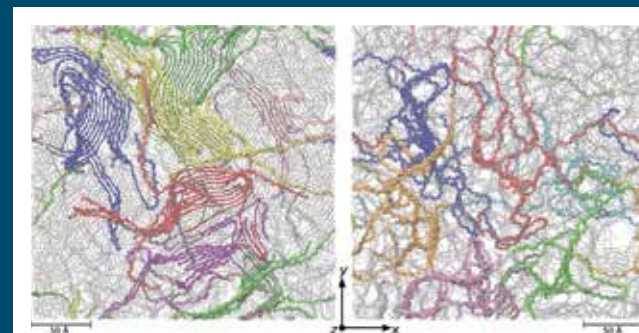
Elektronenfluss gebremst

Das dänisch-deutsche Forschungsteam hat den Herstellungsprozess eines typischen organischen Halbleiters (Poly(3-Hexylthiophen) oder P3HT) genauer untersucht, der beispielsweise für flexible Solarzellen und organische Elektronik verwendet wird. Bei der Produktion der aktiven Schicht beleuchteten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das Halbleiterpolymer mit Licht verschiedener Wellenlängen.

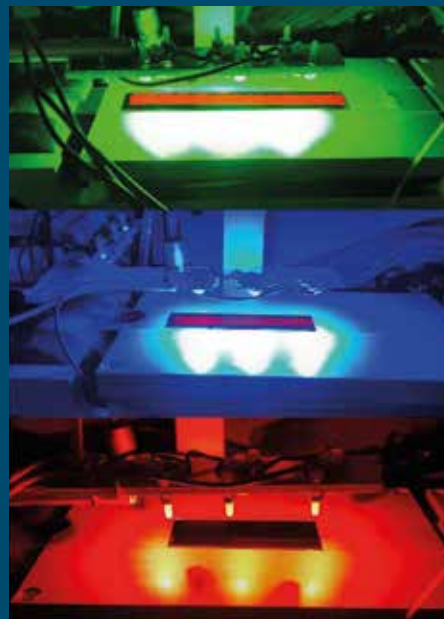
Während sich ohne Beleuchtung oder unter rotem Licht eine höhere Ordnung der Polymerketten einstellte, war die Struktur bei Beleuchtung unter grünem oder blauem Licht sehr viel weniger geordnet. Letzteres behindert einen hohen Elektronenfluss und erzeugt damit – je nach Anwendung – ein eher schlechtes Halbleitermaterial.

Polymerketten versteifen

Mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III konnte das Team beobachten, wie die Polymerketten in einer Lösung sehr schnell beginnen, sich zu „sortieren“ und geordnete Domänen zu bilden, wenn sie im Dunkeln sind oder mit rotem Licht beleuchtet werden. Unter grünem oder blauem Licht versteiften sich die Polymerketten hingegen. Dies behindert eine Entstehung von Domänen oder bricht bestehende Ordnungen sogar auf. Die Forscherinnen und Forscher erklären das damit, dass grünes



Computersimulationen zeigen, wie sich die Polymerketten unter rotem Licht oder in Dunkelheit zueinander anordnen und Domänen bilden können (links), während dies bei den Ketten, die durch blaues oder grünes Licht angeregt sind, nicht geschieht (rechts).



In den Experimenten beleuchtete das Forschungsteam die Nassfilme aus P3HT-Lösung, die auf Siliziumwafer aufgetragen wurden, während ihrer Trocknung mit grünem (oben), blauem (Mitte) oder rotem LED-Licht.

oder noch kurzwelligeres Licht das Polymer derart anregt, dass es bei der Herstellung anders mit dem Lösungsmittel wechselwirkt und sich daher während des Trocknungsprozesses nicht so frei bewegen und zu Domänen anordnen kann.

„Wir können zeigen, dass durch sichtbares Licht organische Halbleiter in einem angeregten Zustand andere Anordnungen der Moleküle bevorzugen und somit die Morphologie manipulierbar wird“, berichtet DESY-Forscher Matthias Schwartzkopf aus dem Team. „Das könnte in Zukunft bei der Prozessierung von Solarzellen und organischer Elektronik eine Rolle spielen. Beispielsweise könnte eine Prozessierung unter Verwendung von rotem Licht ähnlich wie in der traditionellen Fotoentwicklung – je nach Verhalten des verwendeten Materials – vorteilhaft sein.“

.....
Advanced Functional Materials,
DOI: 10.1002/adfm.202212835

„Wir können zeigen, dass durch sichtbares Licht organische Halbleiter in einem angeregten Zustand andere Anordnungen der Moleküle bevorzugen“

Matthias Schwartzkopf, DESY

Wandfarbe gegen Coronaviren

Studie zeigt vielversprechende Möglichkeiten zur Desinfektion von Oberflächen und Luft

Technisch optimierte Wandfarbe könnte möglicherweise das Coronavirus und viele andere Krankheitserreger abtöten. Das zeigt eine Studie über die virusabtötende Wirkung von Titandioxid (TiO₂), einem weit verbreiteten weißen Pigment, das unter anderem für Farben, Kunststoffprodukte und Sonnenschutzmittel genutzt wird. Auch im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit und der erneuerbaren Energien hat TiO₂ wichtige Aufgaben.

„Titandioxid wird häufig als Pigment verwendet, um eine breite Palette von Produkten aufzuhellen“, erläutert die Forscherin Heshmat Noei aus dem DESY-NanoLab, die die Untersuchung geleitet hat. „Aber es ist auch ein leistungsfähiger Katalysator in vielen Anwendungen, wie beispielsweise in der Luft- und Wasserreinigung und bei selbstreinigenden Materialien. Daher hielten wir Titandioxid für einen vielversprechenden Kandidaten für eine virusinaktivierende Beschichtung.“

Spike-Protein knüpft Kontakt

In Zusammenarbeit mit der Gruppe der Virologen Ulrike Protzer und Greg Ebert vom Forschungszentrum Helmholtz Munich und der Technischen Universität München überprüften die Forscherinnen und Forscher die Wirkung von Titandioxid gegen das Coronavirus. „Wir waren die ersten, die Coronaviren auf eine Titandioxid-Oberfläche aufgebracht und dann untersucht haben, was geschieht“, sagt Noei.

Das internationale Forschungsteam untersuchte den Kontaktprozess mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III. Das Team konnte dabei aufklären, dass sich die Aminosäuren des Spike-Proteins am Coronavirus an die Titandioxid-Oberfläche anlagern. So wird das Virus eingefangen und daran gehindert, sich an menschliche Zellen zu binden.

Denaturierung durch Austrocknung

„Wir haben herausgefunden, dass das Virus an der Titandioxid-Oberfläche adsorbiert und sich nicht wieder



Das Spike-Protein ist der molekulare Enterhaken, mit dem das Virus die Zelle kapert.

„Wir konnten beobachten, dass Titandioxid als Katalysator bei der Inaktivierung des Virus durch Licht wirkt“

Mona Kohantorabi, DESY-NanoLab

ablösen kann. Schließlich wird es durch Dehydrierung inaktiviert und denaturiert“, berichtet Mona Kohantorabi aus dem DESY-NanoLab.

„Zusätzlich konnten wir beobachten, dass Titandioxid als Katalysator bei der Inaktivierung des Virus durch Licht wirkt. Für unsere Studie haben wir ultraviolettes Licht verwendet, das das Virus innerhalb von 30 Minuten inaktiviert hat. Wir nehmen an, dass sich der Katalysator weiter optimieren lässt, um die Inaktivierung zu beschleunigen und – noch wichtiger – mit normaler Innenraumbeleuchtung zu ermöglichen. >>



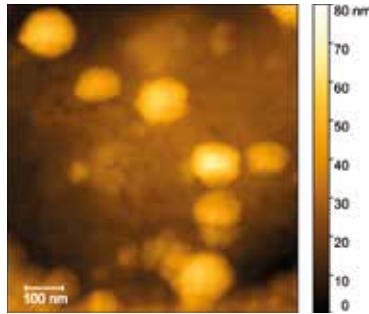
Das Spike-Protein lagert sich an Titandioxid an und wird so eingefangen.

Dann ließe er sich nach unserer Ansicht als antivirale Beschichtung für Wände, Fenster und andere Oberflächen beispielsweise in Krankenhäusern, Schulen, Flughäfen, Altenheimen und Kindergärten einsetzen.“

Aerosole statt Lösungen

Theoretische Berechnungen der Arbeitsgruppe von Cristina Di Valentin an der Università degli Studi di Milano-Bicocca konnten bestätigen, dass die Aminosäuren des Spike-Proteins mit der TiO₂-Oberfläche wechselwirken. Da diese Aminosäuren auch in den Oberflächenproteinen vieler anderer Viren vorkommen, gehen die DESY-Forscherinnen und -Forscher davon aus, dass der Katalysator auch gegen viele andere Viren wirksam ist; das muss allerdings noch getestet werden.

Die meisten bisherigen Untersuchungen zum Coronavirus beziehen sich auf flüssige Lösungen. „Da sich Coronaviren und viele andere Viren aber über die



Das Rasterkraftmikroskop zeigt: Die Viruspartikel (hell) adsorbieren an der Titandioxid-Oberfläche. Dort werden sie inaktiviert.

Luft verbreiten, ist es wichtig, auch Aerosole zu untersuchen“, sagt Noei. „Wenn man eine antivirale Beschichtung entwickelt, muss man sie dort anbringen, wo Menschen sich aufhalten. Vielleicht könnte man sogar einen Ventilator beschichten, um die Luftreinigung zu unterstützen.“

Optimierungspotenzial

Das Team arbeitet nun daran, die antivirale Beschichtung zu optimieren. „Wir haben zum Beispiel

herausgefunden, dass das Vorhandensein von Palladium-Nanopartikeln die Adsorption des Virus an der Oberfläche verstärkt“, erklärt Kohantorabi. „Außerdem sollte man vermeiden, dass die Titandioxid-Oberfläche zu nass wird, denn wenn sie zu sehr mit Wasser bedeckt ist, können nur noch wenige Viruspartikel adsorbiert werden.“

Eine optimale Beschichtung sollte in der Lage sein, sich vollständig zu regenerieren und selbst zu reinigen, um die Langlebigkeit und Nachhaltigkeit der Virusinaktivierung zu verbessern. Eine vollständige Oxidation des Virus auf der Oberfläche wäre eine Voraussetzung für ein effizientes selbstreinigendes Material. Das Team will die optimierte antivirale Beschichtung so bald wie möglich unter realitätsnahen Bedingungen testen, angelehnt etwa an die Situation in Krankenhäusern.

ACS Applied Materials & Interfaces,
DOI: 10.1021/acsami.2c22078

Bild: DESY-NanoLab, Mona Kohantorabi

femtopolis

WIE KLINGT DIE WELTFORMEL?

Am Anfang ist musikalisches Gewusel. Pauken, Streicher, Holzbläser und Stimmen klingen wild durcheinander. Aus dem Gewirr zeichnet sich langsam ein Sprechgesang ab, der wie eine Beschwörung wirkt: „L uguale meno un quarto F mi ni ...“ – „L ist gleich minus ein Viertel F My Ny ...“: eine physikalische Formel! Der Chor trägt mehrere Zeilen der Formelbeschwörung vor, und langsam kehrt in der Musik wieder mehr Ordnung, Harmonie und Zusammenspiel ein. Die aus Hamburg stammende Komponistin und Sopranistin Gloria Bruni hat in ihrer Oper „Schöpfung“ eine zentrale Formel der Teilchenphysik vertont und für die deutsche Erstaufführung in der Hamburger Hauptkirche St. Katharinen Ende April gleich einen Freiwilligenchor aus DESY-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeitern engagiert, um das Werk gemeinsam mit den Symphonikern Hamburg und der Internationalen Chorakademie Lübeck vorzutragen.

Die Oper „Schöpfung“ setzt sich mit dem Ur-Beginn von Mensch und Universum auseinander. Aber sie tut dies eben nicht

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{\partial}\psi + h.c. + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Die Lagrange-Funktion ist die mathematische Beschreibung des erfolgreichen Standardmodells der Teilchenphysik.

nur aus religiöser Perspektive, sondern auch aus naturwissenschaftlicher und ästhetischer. „Wir erleben, wie das Universum entstanden sein kann“, erklärt die Komponistin in einem Interview mit dem NDR. „Vom kleinen Nichts in das große Ganze bis hin zum unendlichen Universum!“

Auf die Formel, die Lagrange-Funktion, die das Verhalten der fundamentalen Naturkräfte beschreibt, ist Bruni in Gesprächen mit DESY-Physikerin Isabell Melzer-Pellmann gestoßen. Die beiden verbindet schon länger eine Freundschaft, in der es immer wieder um die Gemeinsamkeiten und Gegensätze von Musik, Physik, Symmetrie und Spiritualität geht. „Wir haben oft über die Sicht der Physik auf den Urknall, wie sich das Universum entwickelt, und Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen gesprochen. Irgendwann kamen wir dann auf die Lagrange-Funktion, die drei der vier Kräfte zwischen den Teilchen beschreibt“, erzählt Melzer-Pellmann. Bruni hat diese als ordnendes Element in dem Stück „Formula del tutto“ („Weltformel“) in ihre Oper eingearbeitet.

Bildquelle: CERN



Unter dem Einfluss von Feuchtigkeit führt das Spezialpapier programmierbare Bewegungen aus.

Smarte Geschenke packen sich bald selbst aus

Zellulose-basierte Materialien können programmiert werden und reparieren sich selbst

Eine schwedisch-deutsche Forschungsgruppe hat eine Art Spezialpapier entwickelt, das durch Feuchtigkeit zu gezielten Bewegungen animiert werden kann. Das Zellulose-Polymer-Gemisch ist damit ein idealer Grundstoff für programmierbare Aktuatoren. Dazu ist das Kompositmaterial auch noch sehr dehnungsresistent und in der Lage, sich selbst zu reparieren.

In der Natur haben sich faszinierende Funktionen und Mechanismen über Jahrmillionen der Evolution durchgesetzt. Die Bionik-

rum für Schwerionenforschung GSI und von DESY hat in Anlehnung an biologisches Gewebe einen dünnen Film aus Zellulose-Nanofasern mit zwei Arten von Polymeren hergestellt. Dafür mischten sie Polyvinylalkohol (PVA) und Polystyrolsulfonat (PSS) mit den Zellulose-Fibrillen und schütteten die Lösung auf eine Glasplatte. Bei der Austrocknung entstand ein kreisrunder Film, in dem sich ein enges Netzwerk aus chemischen und physikalischen Bindungen bildete.

„Gerade das Polystyrolsulfonat sorgt dabei für eine extreme Dehnbarkeit und Zähigkeit des Films“, sagt DESY-Wissenschaftlerin Qing Chen. „Dieser Bestandteil der Lösung kann durch die Beimischung von Lebensmittelfarben erweitert werden und den Film dadurch bunt und divers machen.“

Anwendungspotenzial

Aus diesem Film lassen sich bis zu mehrere Zentimeter große Stücke herauschneiden, die sich durch den Einfluss von Feuchtigkeit verbiegen. „Im Prinzip können wir daraus ein aktives Geschenkpapier machen“, sagt Stephan Roth (DESY und KTH). „Wenn man etwas Feuchtigkeit draufsprüht, packt es sich selbst aus.“

Doch Geschenkpapier oder sich bei Regen aufrollende Sonnenmarkisen sind das eine; der neuartige Zellulose-Polymer-Film hat

deutlich größeres Anwendungspotenzial, beispielsweise als Feuchtigkeitssensor oder -schalter. In gewisser Weise sind die Filme programmierbar: Biegerichtung, Biegeschwindigkeit und Krümmung der Folien können durch Beeinflussung der Geometrie der Proben vor dem Schneiden angepasst werden.

Röntgenkontrolle

Mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III erlangte das Team insbesondere Erkenntnisse über die Reißfestigkeit und die Selbstreparatur des Materials. Dazu wurden die Proben an der KTH über die sogenannte Streckgrenze hinaus gedehnt und die innere Struktur der resultierenden Verformung wurde mit Röntgenlicht untersucht.

Die Experimente zur Selbstreparatur des Materials wurden direkt an PETRA III mit Hilfe einer Probenkammer durchgeführt, in der sich die Luftfeuchtigkeit einstellen lässt. Wurde die Umgebung der beschädigten Proben gesättigt, konnte das Team beobachten, wie sich im Material wieder chemische Bindungen ausbildeten und so die beschädigte Fläche der Proben verringerten. „Die Mechanismen der Selbstreparatur machen dieses Material wirklich einzigartig“, betont Chen.

Advanced Functional Materials,
DOI: 10.1002/adfm.202208074

„Im Prinzip können wir daraus ein aktives Geschenkpapier machen“

Stephan Roth, DESY und KTH Stockholm

forschung versucht, der Natur diese effizienten Methoden abzugucken und sie nachzubauen. Beispielsweise in Sensoren oder sogenannten bionischen Aktuatoren, also aktiven Elementen, die – mit einem Signal angesteuert – etwas schalten oder bewegen können. Moderne Aktuatoren sollten dabei programmierbar, stimulierbar und sehr robust sein und mit einer Vielzahl von Arbeitsbedingungen zurechtkommen.

Das Forschungsteam der Königlich-Technischen Hochschule KTH Stockholm, des Helmholtzzent-

LASER

VON DER KURIOSITÄT ZUM INNOVATIONSTREIBER

1962

Der erste Halbleiterlaser leuchtet. Er ist der Vorfahr jener Laserdioden, die heute in Laserpointern, Supermarktkassen und Glasfasernetzen zum Einsatz kommen.

1967

In England durchtrennt ein CO₂-Laser ein millimeterdickes Stahlblech – der Auftakt für den Lasereinsatz in den Werkhallen der Industrie.

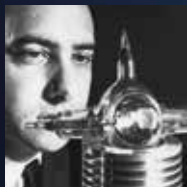
1980

Die ersten kommerziellen Glasfaserleitungen werden installiert. In ihnen können Laserpulse enorme Datenmengen transportieren – heute das Rückgrat des Internets.



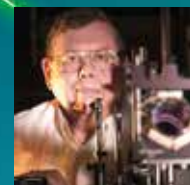
1960

Der US-Physiker Theodore Maiman präsentiert den ersten funktionsfähigen Laser der Welt – der Beginn einer technischen Revolution.



1965

Ein US-Team erzeugt die ersten kurzen Laserblitze. Sie dauern weniger als eine milliardstel Sekunde.



1977

An der Stanford-Universität in Kalifornien baut das Team von John Madey den ersten Prototyp eines Freielektronen-Lasers – Urahn von DESYs großen Röntgenlasern.

Als der erste Laser 1960 im Labor von Theodore Maiman in Kalifornien in Betrieb ging, galt er als Kuriosität – wissenschaftlich interessant, aber niemand wusste so recht etwas damit anzufangen. Das hat sich gewaltig geändert: Heute sind Laser allgegenwärtig, vom Laser-scanner in der Supermarktkasse über Laserpointer bis hin zu Laserbohrern beim Zahnarzt. In Forschung und Industrie hat sich das kuriose Licht zum Allroundwerkzeug entwickelt. Es schneidet Stahl, analysiert die Atmosphäre und kann sogar Atomkerne verschmelzen. Aber nicht nur das. Die Forschung stellt oft extreme Anforderungen an die Laser. Die Lasertechnik ist daher auch ein starker Innovationstreiber, der neuen Anwendungen und Techniken den Weg ebnet, die vor wenigen Jahren noch als undenkbar galten.

ZOOM

1987

Ahmed Zewail erfindet das „Pump-Probe“-Verfahren: Ein Laserblitz startet eine chemische Reaktion, ein zweiter misst, was passiert. 1999 erhält er den Nobelpreis für Chemie.



1993

Das Team von Wim Leemans, heute DESY-Beschleunigerdirektor, realisiert den ersten Laser-Plasmabeschleuniger. Das Konzept verspricht deutlich kompaktere Anlagen.



2001

An der TU Wien erzeugt das Team von Ferenc Krausz erstmals Laserpulse im Bereich von Attosekunden, kürzer als eine milliardstel Sekunde. Damit lassen sich ultraschnelle Prozesse verfolgen.



- 14 **Legendärer Lichtverstärker**
- 17 **Vier Fragen an Wim Leemans**
- 18 **Ungleich schneller als ein Wimpernschlag**
- 20 **Lichtblitzschmiede**
- 21 **Laser als Teilchenturbo**
- 24 **Licht durch die Wand**
- 25 **Materie aus dem Nichts**
- 26 **Per Laser ins Planeteninnere**
- 28 **Im Terahertz-Takt**
- 29 **Perfekt synchronisiert**
- 30 **Wichtige Schnittstelle von Industrie und Forschung**
- 31 **Röntgenblick ins Laserschweißen**



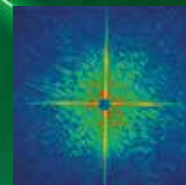
1985

Donna Strickland und Gérard Mourou entwickeln eine Methode, mit der sich ultrastarke Laserpulse erzeugen lassen. 2018 erhalten sie dafür den Nobelpreis für Physik.



1988

Im US-Bundesstaat Louisiana findet die erste Augenoperation per Laser statt. Sieben Jahre später wird der erste kommerzielle Augenlaser zugelassen.



2000

Bei DESY schafft ein Freie-Elektronen-Laser einen Weltrekord: FLASH liefert hochintensive Laserblitze im VUV-Bereich.



2017

In Hamburg geht der European XFEL in Betrieb. Er ist der größte und stärkste Röntgenlaser der Welt.

LEGENDÄRER LICHTVERSTÄRKER

Die beispiellose Erfolgsgeschichte des Lasers

Ob in der Informationstechnologie, der Medizin oder in Forschungslaboren – Laser finden sich heute überall. Dabei hatte die Fachwelt lange darüber gestritten, ob es eine solche Wunderlampe überhaupt geben kann. Zwar mutmaßte schon das Physikgenie Albert Einstein, es müsse im Prinzip möglich sein, Licht auf erstaunliche Weise zu bündeln. Und 1953 war es US-Forschenden gelungen, Mikrowellen zu feinen Strahlen zu formen. Doch ob dieser Trick auch mit sichtbarem Licht funktioniert, war bis in die späten 1950er Jahre hinein eher unklar.

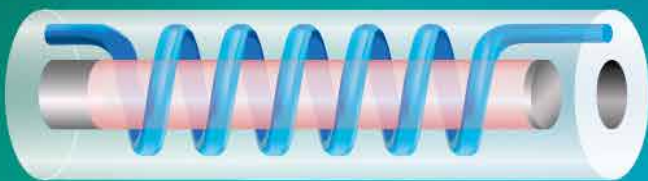
„Manche meinten, es sei grundsätzlich unmöglich, einen Laser zu bauen“, berichtete Theodore Maiman, Physiker an den Hughes-Forschungslaboren in Kalifornien einmal. Er glaubte damals fest an das Konzept und lieferte sich mit anderen Optimisten einen regelrechten Wettlauf. „Jeden Tag kamen mir Gerüchte zu Ohren, jemand hätte bereits einen Laser gebaut oder sei ganz dicht davor“, erinnerte sich Maiman.

Ein bleistiftgroßer Rubin

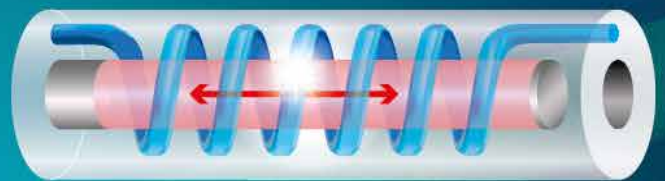
Der Tüftler versuchte es mit einem Material, das viele für aussichtslos

hielten: dem Edelstein Rubin. Er nahm einen bleistiftgroßen Rubinstab und versah dessen Enden mit winzigen Spiegeln. Dann bestrahlte er die Anordnung mit einer schraubenförmigen Blitzlampe, ähnlich der eines Fotoapparats. Das Blitzlicht pumpte Energie in den Rubinkristall und versetzte dadurch bestimmte Atome in einen angeregten Zustand. Doch erst als ausreichend viele Atome angeregt waren, trat der entscheidende Effekt auf: Manche Atome fielen spontan in ihren Grundzustand zurück und strahlten dadurch rote Photonen ab. Diese wurden von den Spiegeln hin

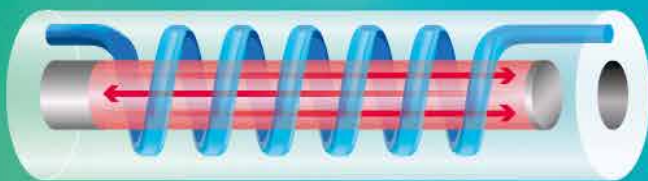
Wie funktioniert ein Laser?



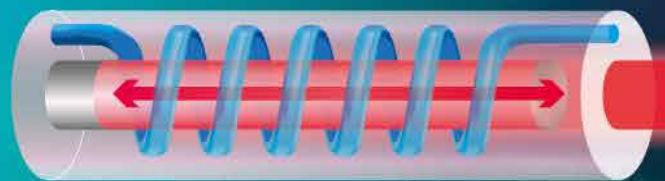
- 1 Ein einfacher Laser, wie dieser rote Rubinlaser, besteht aus einem stabförmigen Rubinkristall mit einem Spiegel an jedem Ende und einer schraubenförmigen Blitzröhre.



- 2 Ein Lichtblitz aus der um den Rubin gewickelten Blitzröhre fügt dem Stab Energie zu und regt Chrom-Ionen im Rubin an. Manche Chrom-Ionen geben ihre Energie spontan in Form von Lichtquanten (Photonen) wieder ab.



- 3 Die spontan ausgesandten Photonen werden von den Spiegeln viele Male hin und her reflektiert und treffen dabei auf andere angeregte Chrom-Ionen im Rubin, die sie zum Aussenden weiterer Photonen stimulieren.



- 4 Diese neuen Photonen stimulieren ihrerseits wiederum Ionen zur Aussendung von Photonen. Dieser Prozess schaukelt sich lawinenartig auf. Einer der Spiegel ist ein kleines bisschen durchlässig, durch ihn kann das Licht den Laser verlassen.

und her reflektiert, rissen andere angeregte Atome mit – ein Lawineneffekt setzte ein. Die Spiegel bündelten diese Photonenlawine in die gewünschte Richtung, wodurch ein ungemein scharfer, heller Strahl entstand.

Im Juli 1960 präsentierte der damals 32-jährige Maiman seine Erfindung der Öffentlichkeit. Der Laser war geboren, ein Kürzel für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, auf deutsch: Lichtverstärkung durch stimulierte Aussendung von Strahlung. „Ich habe die Rubinstäbe für meine Experimente einfach im Katalog bestellt, genau wie die Blitzlampe“, sagte Maiman. „Der Rest war reines Handwerk.“

Licht im Gleichschritt

Doch ganz so einfach war es nicht. Der Physiker hatte es als erster geschafft, zwei Hürden zu nehmen: Zum einen war es ihm gelungen, per Blitzlampe genügend Energie in das Lasermaterial zu pumpen, so dass ein Übergewicht an angeregten Atomen entstand. Zum anderen konnten die beiden Spiegel seines Prototyps das Licht so gut hin und her reflektieren, dass es sich zu einer Lichtlawine aufschaukelte.

Der helle, gebündelte Lichtstrahl ist nicht das einzige Kennzeichen des Lasers. Gleichzeitig ist sein Licht in der Regel einfarbig, es leuchtet zum Beispiel in einem reinen Grün oder einem reinen Rot. Ferner ist das Licht „kohärent“: Die Photonen in einem Laserstrahl marschieren quasi im Gleichschritt – im Gegensatz zum Licht einer Leuchtdiode, die ihre Photonen regellos in alle Richtungen verstreut. Diese Kohärenz ist die Voraussetzung für bestimmte Lichttechniken, etwa für die Erstellung eines Hologramms.

Die Öffentlichkeit zeigte sich 1960 von Maimans Errungenschaft durchaus beeindruckt, die Fachwelt hingegen reagierte verhalten. So wurde ein eilig verfasster Artikel, den der Physiker beim Fachmagazin „Physical Review Letters“ einreichte,



„Manche meinten, es sei grundsätzlich unmöglich, einen Laser zu bauen“

Laserpionier Theodore Maiman
von den Hughes-Forschungslaboren

schlicht abgelehnt. Maiman witterte ein Komplott des wissenschaftlichen Establishments. Schließlich war ihm praktisch im Alleingang gelungen, woran sich renommierte Köpfe seit über zwei Jahren die Zähne ausgebissen hatten. Auch die Industrie wusste zunächst nicht, was sie mit der neuen Lichtquelle anfangen sollte – der Laser galt gemeinhin als Lösung auf der Suche nach einem Problem. Und tatsächlich waren die ersten Geräte wenig praxistauglich: Ihre Leistung war eher bescheiden, zudem hielten sie nicht lange, die Bauteile quitierten allzu rasch ihren Dienst.

Heute Standardwerkzeug

Doch mit der Zeit ließen sich die Kinderkrankheiten nach und nach ausmerzen. Zudem wurden immer mehr Laservarianten erfunden, darunter Halbleiter- und Gaslaser, jede von ihnen mit bestimmten Stärken. Heute ist der Laser nicht mehr wegzudenken: In den Werkhallen der Industrie schweißt und schneidet er Maschinenteile. Er schickt enorme Datenmengen durch Glasfasernetze – die Voraussetzung fürs Internet. In der Medizin werden Augen operiert und verdächtige Hautstellen entfernt. Und in der Forschung zählt der Laser zu den Standardwerkzeugen – in zahlreichen Laboren würde ohne ihn nicht viel laufen.

„Auch bei DESY kommen Laser zum Einsatz, und zwar an unterschiedlichsten Stellen“, sagt Ingmar Hartl, Leiter der Abteilung Laserforschung und -entwicklung.

Das Forschungszentrum betreibt mehrere Großbeschleuniger wie den European XFEL, er bringt kurze Elektronenpakete nahezu auf Lichtgeschwindigkeit. Erzeugt werden die Teilchen, indem ein Laser 27 000 Mal pro Sekunde einen Lichtblitz auf eine Metallplatte feuert. Jedes Mal werden Elektronen aus dem Metall geschleudert – ein maßgeschneiderter Pulk von einer Milliarde Teilchen.

Röntgenblitze

Diese werden dann in einer schnurgeraden, zwei Kilometer langen Rennstrecke auf Touren gebracht, um schließlich in einen Undulator – eine Art Magnetparcours – gelenkt zu werden. Dort erzeugen sie ungemein starke Röntgenblitze, mit denen Forschungsteams aus aller Welt die unterschiedlichsten Stoffe detailliert durchleuchten können, darunter Nanomaterialien, Kunststoffe und Proteine. >>



Die Komponenten des ersten Rubinlasers von Theodore Maiman

„Bei vielen dieser Versuche finden Laser ebenfalls Verwendung“, erzählt Hartl. „Ihre Lichtblitze starten zum Beispiel eine chemische Reaktion, die dann mit den Röntgenpulsen des European XFEL beobachtet wird.“ Dabei braucht es für unterschiedliche Versuche verschiedene Lasertypen: Manche geben Infrarotpulse von sich, andere strahlen ultraviolett. Wichtig ist auch die Synchronisation zwischen dem Start- und dem Beobachtungsblick. Nur wenn die Zeitdifferenz zwischen beiden exakt kontrolliert werden kann, lässt sich der Ablauf einer Reaktion verfolgen und ein regelrechter Film aufnehmen.

„Für diese hochpräzise Synchronisierung sorgt erneut ein Laser“, betont Hartl. Nicht zuletzt besitzen auch die Röntgenpulse des European XFEL bis zu einem gewissen Grad Lasereigenschaften – weshalb er auch als Röntgenlaser bezeichnet wird. Ähnliches gilt für die Anlage FLASH auf dem DESY-Campus, die Pionieranlage für alle derartigen Röntgenlaser.

Hologramme von Molekülen

Da viele der Laser, die bei DESY zum Einsatz kommen, speziellen



„Das ist am Rande des technisch Möglichen“

Ingmar Hartl, Leiter der Laserentwicklung bei DESY

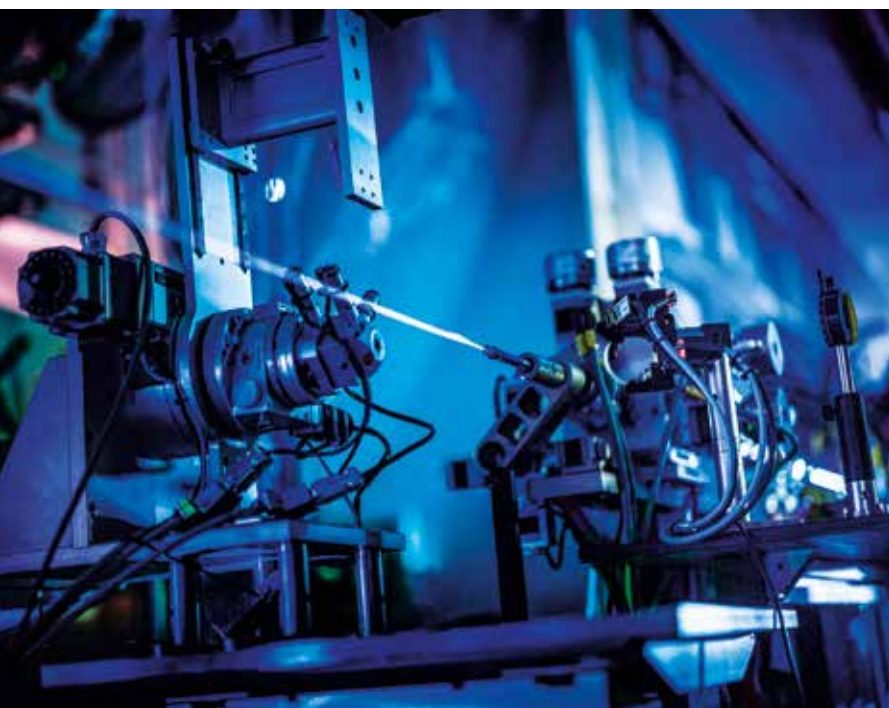
Zwecke dienen, lassen sie sich nicht per Katalog bestellen. Stattdessen muss das Forschungszentrum vieles selbst entwickeln. „Dabei gehen wir oft an die Grenze des technisch Machbaren“, betont Ingmar Hartl. Das zeigen zwei Zukunftsprojekte, an denen seine Abteilung arbeitet. So ist bei FLASH geplant, die durch den Undulator fliegenden Elektronen künftig mit Pulsen aus einem UV-Laser zu manipulieren. Dadurch ließen sich die Röntgenpulse von FLASH so optimieren, dass sich

beispielsweise Hologramme von Molekülen aufnehmen ließen – was derzeit noch nicht möglich ist. „Der Laser, den wir dafür benötigen, muss viel Power haben und zugleich durchstimmbare sein, also gewissermaßen seine Farbe ändern können“, erklärt Hartl. „Wir sind dabei, einen solchen Laser zu entwickeln, und hoffen, ihn ab 2025 einsetzen zu können.“

Noch ehrgeiziger ist ein Projekt, das eines Tages den European XFEL leistungsfähiger machen soll: Bislang erzeugt er Röntgenpulse, die kürzer als 100 Femtosekunden sind, deutlich weniger als eine billionstel Sekunde. Für gewisse Versuche wäre es allerdings spannend, wenn sich diese Pulse bis zu tausendmal kürzer machen ließen – die Fachwelt spricht vom Attosekunden-Bereich. Auch hierfür sollen Laserpulse in einen Undulator geschickt werden, durch den die schnellen Elektronenpakete hindurchschießen. „Vereinfacht gesagt sollen diese Laserblitze die Elektronenpäckchen so manipulieren, dass sie nur an einer bestimmten Stelle leuchten und dadurch extrem kurze Röntgenpulse erzeugen“, beschreibt Hartl. Die Herausforderungen an den Laser sind enorm: 200 000 Mal pro Sekunde soll er starke und extrem stabile, nur fünf Femtosekunden kurze Pulse ausspucken können. „So etwas gibt es noch nicht, das ist am Rande des technisch Möglichen“, sagt Ingmar Hartl. „Aber wir denken, dass wir die Bausteine für einen solchen Laser beieinanderhaben.“

Solche Projekte hätten wohl auch Laserpionier Theodore Maiman beeindruckt. Er starb 2007 als wohlhabender Mann, auf Basis seiner Erfindung hatte er Firmen gegründet und damit aus seinem Patent Kapital geschlagen. Auch gesundheitlich hatte Maiman von seiner Erfindung profitiert: Im Jahr 2000 unterzog er sich im Uniklinikum München erfolgreich einer Prostata-OP – natürlich mit Hilfe des Lasers.

Der Röntgenlaserstrahl des European XFEL wird erzeugt, indem schnelle Teilchen (Elektronen) durch eine magnetische Slalomstrecke geschickt werden, wo sie im Gleichtakt Licht abgeben.



„WIR WOLLEN UNSERE SICHTBARKEIT ALS LASERLABOR ERHÖHEN“

Laser sind eine Zukunftstechnologie in Industrie und Forschung, deren Bedeutung nach Erwartung von DESYs Beschleunigerdirektor Wim Leemans noch weiter zunehmen wird. Dabei wird es auch darum gehen, Synergien optimal zu nutzen.

femto: 2019 wurden Sie Direktor des Beschleunigerbereichs bei DESY, zuvor hatten Sie lange in Kalifornien geforscht. Mit welchen Erwartungen kamen Sie nach Hamburg?

Leemans: Ich muss zugeben, dass ich DESY früher vor allem als führendes Beschleunigerzentrum wahrgenommen hatte. Als Laserlabor war es eher nicht auf meinem Radar. Doch in Hamburg wurde mir rasch klar: Hier gibt es zahlreiche Spitzenlaser, die auch hier entwickelt werden. Manche erzeugen ultrakurze Lichtpulse im Bereich von Attosekunden. Andere liefern sehr starke Laserblitze oder laufen sehr zuverlässig im Dauerbetrieb. Auch die beiden Großbeschleuniger FLASH und European XFEL lassen sich als Laser auffassen. Ihre Röntgenpulse sind ungleich stärker als das, was andere Lasertypen zustande bringen. Außerdem hat DESY mehrere spannende Spin-off-Firmen gegründet, die innovative Lasertechniken entwickeln. Deshalb hat sich für mich, als ich nach Hamburg kam, eine neue Welt eröffnet. Und ich denke, dass Laser in Zukunft für DESY sogar noch wichtiger werden.

femto: Inwiefern, was ist der Plan?

Leemans: Mit KALDERA entwickeln wir einen Laser, der pro Sekunde tausend hochintensive Lichtpulse erzeugen soll. Damit wollen wir dann einen leistungsfähigen



Laser-Plasmabeschleuniger bauen. Das ist ein Beschleunigertyp, der Elektronen auf sehr hohe Energien bringt, aber viel kompakter ist als konventionelle Beschleuniger. Eines Tages könnte das platzsparende Röntgenquellen ermöglichen, wovon die verschiedensten Fachdisziplinen profitieren dürften. Für die Forschung wäre das ein großer Gewinn.

femto: DESY ist seit einiger Zeit Mitglied des Laserlab-Europe AISBL, einem Verbund von 46 Laserforschungseinrichtungen in Europa. Was erhoffen Sie sich von dieser Mitgliedschaft?

Leemans: Damit wollen wir unsere internationale Sichtbarkeit als Laserlabor erhöhen. Wir möchten auf die vielen Eigenentwicklungen und leistungsfähigen Lasersysteme aufmerksam machen, die DESY heute zu bieten hat. Als Mitglied bei Laserlab-Europe werden wir dieses Netzwerk nutzen, um Fachleute aus anderen Mitgliedsinstituten einzuladen, damit sie uns näher kennenlernen. Das könnte dann auch helfen, neue Top-Talente für DESY zu gewinnen.

femto: Welche Rolle spielt die Kooperation mit der Laserindustrie, inwiefern arbeitet DESY mit ihr zusammen?

Leemans: Es gibt in Deutschland sehr starke Laserhersteller und Optikunternehmen, zum Beispiel TRUMPF oder ZEISS. Diese Industriepartner sind dabei, Laser für die Forschung in Serie zu produzieren – Geräte, die nach Industriestandards gefertigt werden, die deshalb kostengünstig sind und zuverlässig funktionieren. Umgekehrt kann auch die Wirtschaft von der Wissenschaft profitieren. Ein Beispiel: Ultrakurzpuls laser, die ursprünglich für die Forschung entwickelt worden waren, können heute Materialien deutlich präziser bearbeiten als noch vor zehn Jahren. Diese Synergien wollen wir durch die neue Innovationsplattform HI-ACTS stärken. Sie bringt mehrere Helmholtz-Zentren mit Unternehmen zusammen, etwa um die Entwicklung der Laser-Plasmabeschleunigung voranzutreiben.

UNGLEICH SCHNELLER ALS EIN WIMPERNSCHLAG

Ultrakurze Laserpulse verfolgen das Treiben der Moleküle

Im Vorraum zu ihrem Labor greift Francesca Calegari zu Kittel und Überschuhen und setzt sich eine klobige Schutzbrille auf. „Wir müssen das anziehen, damit kein Staub an unsere Laser kommt“, erklärt die Physikerin. „Und die Brille schützt unsere Augen vor den intensiven Strahlen.“ Dann zeigt sie auf den Fußboden – eine mächtige Betonplatte, sie bildet das Fundament der Experimentierhalle, in der Calegaris Apparaturen stehen. „Der massive Beton dämmt nahezu alle Erschütterungen“, sagt sie. „Das ist für unsere Versuche sehr wichtig.“

Denn die Experimente von Calegaris Team bedürfen äußerster Präzision: Die Fachleute entwickeln Speziallaser, die unvorstellbar kurze Lichtblitze erzeugen – Pulse im Bereich von Femto- und sogar Attosekunden, also in der Region von einer milliardstel Sekunde. „Das ist die Zeitskala, in der sich die Elektronen in Atomen und Molekülen bewegen“, erläutert die Italienerin, die seit 2017 als leitenden Wissenschaftlerin bei DESY arbeitet und auch Physikprofessorin an der Universität Hamburg ist. „Mit unseren ultrakurzen Lasern können wir diese Bewegungen verfolgen und dadurch besser verstehen, wie chemische Bindungen etwa in Biomolekülen entstehen und aufbrechen.“

Molekulare Diashow

Unter anderem ist das für Naturprozesse relevant, die sich mit enormer Rasanzen abspielen, etwa wenn DNA-Bausteine unter Lichtbeschuss zerfallen. „Um solche Prozesse zu beobachten, brauchen wir den Laser“,

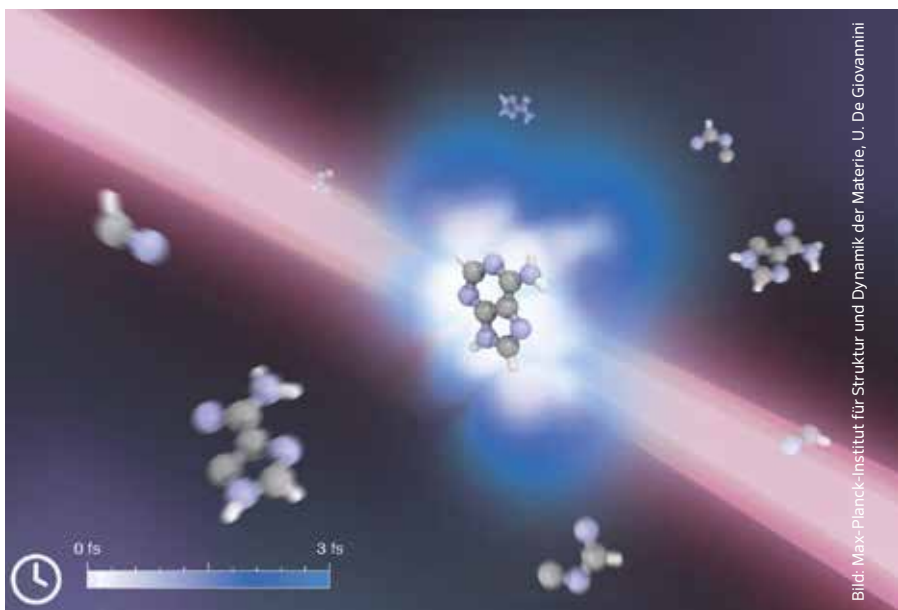


„Wir haben UV-Pulse erzeugt, die nur knapp zwei Femtosekunden lang waren“

Francesca Calegari, DESY

sagt Calegari. „Mit einem Laserpuls regen wir eine Reaktion an, mit einem zweiten, unmittelbar folgenden sehen wir nach, wie diese Reaktion abläuft.“ Dann wird der Abstand zwischen dem ersten und dem zweiten Blitz systematisch verändert. Mit solchen „Pump-Probe“-Versuchen lässt sich der Ablauf der Reaktion präzise nachzeichnen – eine Art molekulare Diashow.

Allerdings braucht es für die Experimente spezielle Laseranlagen – Gerätschaften, die es nicht von der Stange zu kaufen gibt. Also muss Calegaris Team seine Versuchsaufbauten selbst bauen und dafür neue Technologien entwickeln. So haben die Fachleute eine Apparatur konstruiert, die ultrakurze UV-Pulse



Künstlerische Darstellung der ultraschnellen Stabilisierung von Adenin gegen Zerfall. Wird das Molekül durch VUV-Strahlung ionisiert, kommt es zur Aufspaltung. Durch richtiges Timing eines zweiten Infrarot-Laserpulses und Ausnutzung eines Mechanismus der Ladungswanderung ist es jedoch möglich, das Molekül durch eine zweite Ionisation zu stabilisieren.

Eine der einzigartigen Attosekunden-Strahlführungen der CFEL-ATTO-Gruppe erzeugt sowohl UV-Pulse von weniger als zwei Femtosekunden Dauer als auch isolierte Attosekunden-Pulse im extremen UV-Bereich, die für die Untersuchung der ultraschnellen Elektronendynamik in Materie genutzt werden können.



erzeugt. „Das ist zum Beispiel relevant, weil uns ständig UV-Licht von der Sonne erreicht, was eine ganze Reihe von biologischen Prozessen in Gang bringt“, sagt Calegari. „Unter anderem kann es die Entstehung von Hautkrebs fördern.“

Um UV-Blitze per Laser zu erzeugen, greift die Arbeitsgruppe zu einer bewährten Methode: Intensive Infrarotblitze schießen in eine mit hochdichtem Edelgas gefüllte Zelle, und durch schnelles Hin- und Herschütteln der Elektronen in den Atomen wird die UV-Strahlung emittiert. Der knifflige Teil besteht darin, wirklich ultrakurze UV-Pulse zu erhalten. Dazu nutzt Calegaris Team den Umstand, dass sich Infrarotlicht während seiner Ausbreitung in einer Gaszelle umformt, wodurch sich die UV-Emission deutlich verkürzt. „Auf diese Weise konnten wir 2019 einen neuen Weltrekord aufstellen“, sagt Francesca Calegari. „Wir haben UV-Pulse erzeugt, die nur knapp zwei Femtosekunden lang waren.“

Blitzlichtlupe

Ebenfalls auf der Grundlage ultrakurzer Infrarotblitze kann das Team sogar noch kürzere Laserpulse erzeugen – Attosekunden-Pulse im Bereich

von extremer UV-Strahlung (XUV) beziehungsweise weicher Röntgenstrahlung. Im Labor zeigt Calegaris Kollegin Gaia Giovannetti auf einen kommerziell erhältlichen Laser, er erzeugt Infrarotblitze. „Diese Pulse bilden den Ausgangspunkt für unsere Methode“, beschreibt sie und geht ins Nachbarlabor, in das die Infrarotblitze geleitet werden und wo die eigentliche Apparatur steht.

„Unsere Experimente können helfen, Strahlenschäden besser zu verstehen“

Francesca Calegari, DESY

Sie öffnet den Deckel einer Box, in der Dutzende von Spiegel scheinbar regellos hingestellt sind. „Dieser Aufbau vergrößert die Wellenlänge der Pulse, und gleichzeitig verstärkt er ihre Intensität um ein Vielfaches“, erläutert Giovannetti. „Diese neuen Pulse schicken wir dann in eine winzige Glaszelle, sie ist weniger als einen Millimeter lang und unter Hoch-

druck gefüllt mit Edelgas.“ Dringt der Infrarotblitz in die Zelle, schlägt er Elektronen aus den Gasatomen heraus. Diese Elektronen werden im Laserfeld beschleunigt, um dann wieder auf die Gas-Ionen zurückzuprallen – wobei sie ultrakurze weiche Röntgenblitze aussenden.

Als die Fachleute mit dieser Methode den DNA-Baustein Adenin unter ihre Blitzlichtlupe nahmen, erlebten sie eine Überraschung: „Beschießt man Adenin mit XUV-Blitzen, zerplatzt es regelrecht“, beschreibt Calegari. „Doch als wir gleich darauf einen Infrarotpuls hinterherschickten, konnte dieser das Molekül so stabilisieren, dass es nicht auseinanderbrach.“ Eine Erkenntnis, die für die Gesundheitsforschung relevant sein könnte: Bei der Strahlentherapie gegen Krebs werden im Gewebe Elektronen aus den Molekülen herausgeschlagen, die anschließend DNA-Bausteine wie das Adenin schädigen können. „Unsere XUV-Pulse erzeugen einen ähnlichen Effekt“, sagt Calegari. „Damit können unsere Experimente helfen, Strahlenschäden besser zu verstehen und vielleicht sogar neue Schutzmechanismen für das Gewebe zu entwickeln.“

ERFOLGREICHE LICHTBLITZSCHMIEDE

Das Start-up Class 5 Photonics baut innovative Kurzpuls laser für die Forschung

In seinem Labor öffnet Robert Riedel die Klappe einer flachen, edel wirkenden Aluminiumkiste, kaum größer als ein Paketkarton. Darin sind auf engstem Raum Linsen, Spiegel und Elektronik arrangiert – Komponenten, die es braucht, um ultrakurze Laserpulse zu erzeugen. „In einem typischen Forschungslabor sind diese Elemente auf einem großen Tisch verteilt“, erläutert der Physiker. „Wir haben das alles zu einem kompakten, softwaregesteuerten System zusammengefasst, das auch Leute bedienen können, die keine ausgewiesenen Laserspezialisten sind.“

Riedels Spin-off heißt Class 5 Photonics und befindet sich in den Start-up Labs Bahrenfeld, einem noch jungen Innovationszentrum am Rande des DESY-Campus in Hamburg. „Ausgangspunkt für unsere Firma war eine Helmholtz-Nachwuchsgruppe bei DESY“, erzählt er. „Wir hatten die Mission, einen Laser zu entwickeln, der in schneller Folge kurze und starke Laserpulse abfeuert.“ Dieser Laser sollte zum Beispiel chemische Reaktionen in Gang brin-

gen, deren Verlauf DESYs Großgeräte dann quasi filmen können, etwa der Röntgenlaser FLASH.

Helmholtz-Gründerprogramm

Das Team entwickelte einen Prototyp. Der funktionierte so gut, dass auch Fachleute außerhalb von DESY auf die Technik aufmerksam wurden. Das brachte Riedel und seine Leute auf die Idee, eine Firma zu gründen, die den offenbar bestehenden Bedarf an Kurzpuls lasern deckt. Starthilfe gab's vom DESY-Bereich Innovation & Technologietransfer sowie einem Helmholtz-Gründerprogramm. Es ermöglichte dem Team, den Markt zu analysieren und erste Produkte zu entwickeln.

2014 wurde das Start-up ins Leben gerufen, der Firmenname spielt auf eine in der Fachwelt geläufige Einteilung an: Sie sortiert Laser in vier Leistungsklassen. Class 5 symbolisiert eine neue, noch stärkere Kategorie. Die ersten Produkte lieferten kurze Infrarotblitze, doch nach und nach erweiterte das Start-up sein Angebot. „Unsere Kunden hatten uns gefragt, ob wir

nicht auch Laser bauen können, die andere Wellenlängen erzeugen“, erzählt Riedel. „Wir nahmen die Herausforderung an, und heute haben wir ein ganzes Portfolio an Lasertechnologien zur Verfügung.“

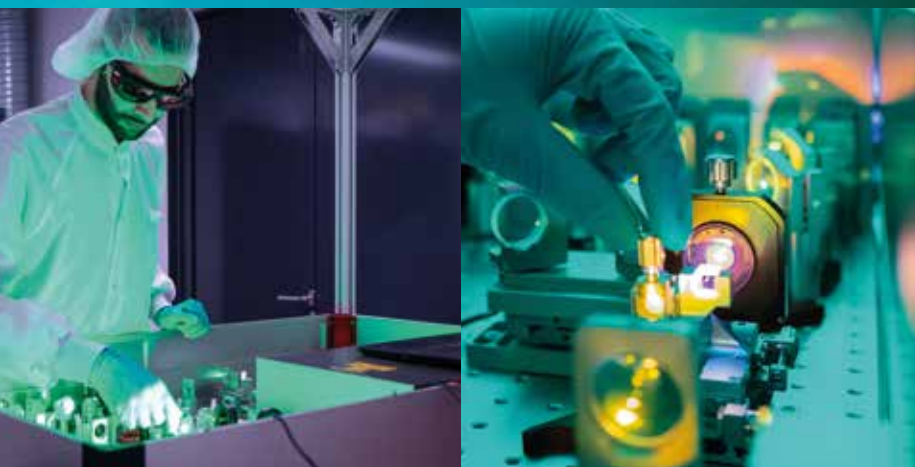
„Unser wachsendes Team nach vorne zu bringen, ist eine unglaublich schöne Herausforderung“

Firmengründer und CEO Robert Riedel

Enge Verbindung

Mittlerweile reicht das Spektrum von Terahertz-Pulsen über sichtbare Lichtblitze bis nahezu in den Röntgenbereich – allesamt Laser, die als Forschungswerkzeuge für Physik-, Chemie- und Biologiela-bore dienen. Pro Jahr verkauft das Start-up etwa zehn Systeme – von relativ kleinen Lasern für biologische Anwendungen bis hin zu großen Multimillionen-Projekten für renommierte Institutionen wie die Unis Stanford und Harvard, das Berkeley Lab und das Massachusetts Institute of Technology MIT.

Angefangen hat Class 5 Photonics zu zweit, mittlerweile hat die Firma rund 20 Angestellte, viele mit Dokortitel. „Unser wachsendes Team nach vorne zu bringen, ist eine unglaublich schöne Herausforderung“, sagt Riedel. Die Verbindung zu DESY ist nach wie vor eng. Es gibt gemeinsame Forschungsprojekte für die Entwicklung neuer Technologien. Sie sind zum Teil von Class 5 Photonics finanziert, die Ergebnisse können anschließend in das Produktportfolio des Start-ups einfließen.



Die Hochleistungslaser von Class 5 Photonics haben wiederholt Innovationspreise gewonnen, etwa den PRISM AWARD auf der Fachkonferenz Photonics West und den Laser Focus World Innovators Award.



Per Laser lassen sich kompakte Teilchenbeschleuniger realisieren.

LASER ALS TEILCHENTURBO

Wie KALDERA der Plasmabeschleunigung zum Durchbruch verhelfen soll

Teilchenbeschleuniger sind wichtige Forschungswerkzeuge: Großgeräte wie der LHC in Genf helfen, die kleinsten Bausteine der Materie zu erforschen. Und Anlagen wie der European XFEL in Hamburg erzeugen ungemein starke Röntgenblitze, mit denen sich verschiedenste Materialien durchleuchten lassen. Eine neue Technologie soll den Anwendungsbereich von Teilchenbeschleunigern deutlich erweitern: Die sogenannte Plasmabeschleunigung verspricht deutlich kompaktere und damit kostengünstigere Anlagen.

Damit ließen sich Beschleuniger künftig auch für Bereiche erschließen, für die sie bislang zu aufwendig und teuer sind – etwa für

Anwendungen in Medizin und Industrie. Es gibt unterschiedliche Konzepte für Plasmabeschleuniger. Im Zentrum eines Konzepts steht eine noch junge Generation von Kurzpulslasern. Mit dem Zukunftsprojekt KALDERA will DESY in neue Dimensionen vorstoßen und einen der weltweit leistungsfähigsten Laser für die Plasmabeschleunigung bauen.

Elektronen surfen die Welle

Bei der aktuellen Beschleunigertechnik werden Radiowellen in spezielle Metallröhren eingespeist, sogenannte Resonatoren. Von diesen Radiowellen werden die Teilchen, meist Elektronen, vorangetrieben – bildlich gesprochen reiten sie wie Surfer auf einer Ozeanwelle. Nur:

Die Maximalbeschleunigung eines einzelnen Resonators ist bauartbedingt begrenzt. Das bedeutet: Um Elektronen auf hohe Energien zu bringen, müssen viele Resonatoren hintereinandergeschaltet werden. Dadurch werden die Anlagen lang und teuer.

Um einiges platzsparender kann ein noch junges Verfahren sein, die Laser-Plasmabeschleunigung. Das Prinzip: Kurze, aber starke Laserblitze feuern in eine kleine Zelle, in der ein elektrisch aufgeladenes Gas steckt, Plasma genannt. Ähnlich wie ein Boot eine Kielwelle hinter sich herschleppt, erzeugt der Laserpuls in diesem Plasma eine ihm nachfolgende Kielwelle. Diese Plasmawelle ist so stark elektrisch geladen, >>

dass sie Elektronen enorm beschleunigen kann – und zwar auf einer Distanz von nur wenigen Millimetern. Dadurch könnten Beschleuniger stark schrumpfen: Eine Anlage, die heute hundert Meter misst, ließe sich durch eine Apparatur ersetzen, die in einen Laborkeller passt.

Laserartige Röntgenpulse

Eine spannende Anwendung dürfte darin liegen, mit Hilfe der plasmabeschleunigten Elektronenpakete laserartige Röntgenblitze zu erzeugen. Solche Freie-Elektronen-Laser (FEL) gibt es bislang nur auf der Basis von konventionellen Beschleunigern. Da diese aufwendig und teuer sind, gibt es bislang nur wenige FELs auf der Welt. Mit der Plasmatechnologie dagegen sind platzsparende und kostengünstigere Anlagen denkbar. Dadurch ließen sich insgesamt mehr FELs bauen, was ihre Einsatzmöglichkeiten erheblich erweitern würde.

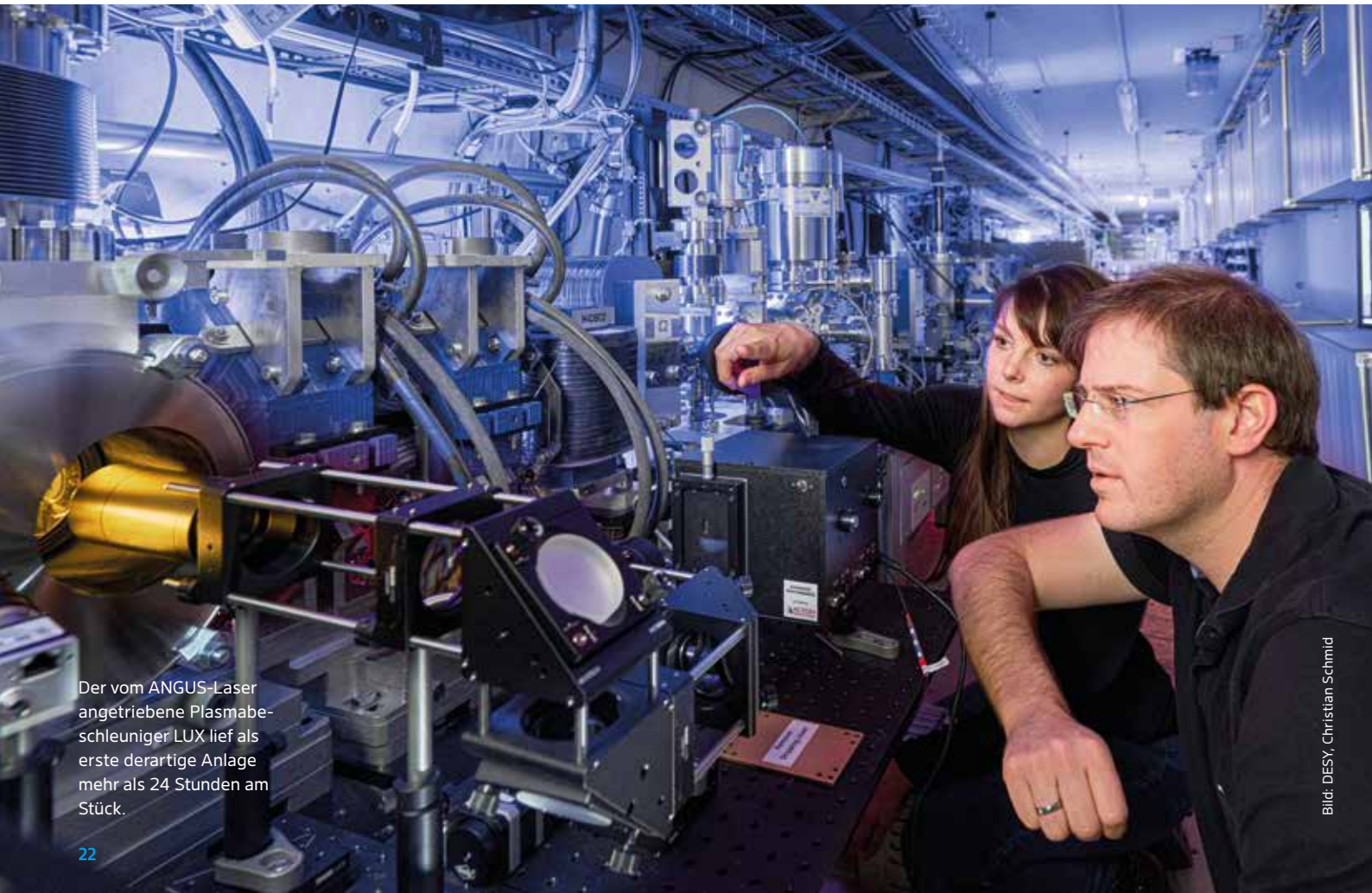
Mehrere Prototypen auf der Welt haben bereits gezeigt, dass die Plasmabeschleunigung funktioniert. „Mit unserem ANGUS-Laser ist es uns weltweit erstmals gelungen, einen Laser-Plasmabeschleuniger mehr als einen Tag lang laufen lassen, und zwar in einer Art Regelbetrieb“, berichtet Andreas Maier, leitender Wissenschaftler bei DESY. „Dabei hat er einmal pro Sekunde Elektronen beschleunigt.“ Von der Anwendungsreife sind Prototypen wie ANGUS jedoch noch ein Stück entfernt. Der Grund: Ein Laserschuss pro Sekunde wäre schlicht zu wenig etwa für eine Anwendung in einem FEL – dazu bräuchte es einige hundert bis tausend Laserschüsse pro Sekunde.

Nobelpreisgekrönte Technologie

Nur: Es gibt schlicht noch keinen Laser dafür. ANGUS liefert einmal pro Sekunde einen Lichtblitz, der mit 30 Femtosekunden (billiardstel

Sekunden) extrem kurz ist, aber mit 100 Terawatt eine enorme Leistung besitzt. Einen Laser, der pro Sekunde tausend dieser Blitze ausspuckt, hat bisher noch niemand gebaut. „Genau das versuchen wir mit KALDERA“, erläutert Maier. „KALDERA soll pro Sekunde bis zu tausend Elektronenpakete beschleunigen, was die Technologie dann konkurrenzfähig machen würde.“

Doch die Herausforderungen für das von DESY-Beschleunigerdirektor Wim Leemans initiierte Projekt sind groß. Um überhaupt kurze und starke Lichtblitze erzeugen zu können, bedarf es einer nobelpreisgekrönten Technologie – der „Chirped Pulse Amplification“. Das Prinzip: Ein erster Laser erzeugt einen kurzen, allerdings noch schwachen Lichtblitz. Um diesem mehr Power zu verleihen, wird er in spezielle Lichtverstärker geleitet. Das sind Kristalle, die kurz zuvor von sogenannten PumpLasern mit



Der vom ANGUS-Laser angetriebene Plasmabeschleuniger LUX lief als erste derartige Anlage mehr als 24 Stunden am Stück.

Energie aufgeladen wurden und diese Energie dann auf den durchfliegenden Lichtblitz übertragen. Um die angepeilte Leistung zu schaffen, sind mehrere dieser Lichtverstärker hintereinandergeschaltet.

Gedehnte Blitze

Allerdings werden die Lichtpulse im Laufe dieser Kaskade so stark, dass sie die Lichtverstärker zerstören würden. Deshalb greifen die Fachleute zu einem Trick. Bevor sie einen Lichtpuls weiter verstärken, ziehen sie ihn per Spezialoptik auseinander,

„KALDERA soll pro Sekunde bis zu tausend Elektronenpakete beschleunigen“

Andreas Maier, DESY

auf das Hunderttausendfache seiner Länge. Dadurch sinkt seine Leistung, so dass der gedehnte Blitz gefahrlos weiter verstärkt werden kann. Nach der letzten Verstärkung staucht ihn ein sogenannter Kompressor dann wieder ordentlich zusammen. Am Ende hat er ungleich viel mehr Power als zuvor.

Möchte man allerdings sehr viele Pulse pro Sekunde durch die Verstärkerkaskade jagen, ergeben sich diverse Herausforderungen. Da wären zum einen die Pumplaser, die die Verstärkerkristalle mit Energie versorgen. „Diese Laser werden sehr warm, wenn sie so oft schießen müssen“, sagt Maier. „Da könnte eine Durchschnittsleistung von fünf Kilowatt entstehen, mit solchen Leistungen werden in der Industrie Autos geschweißt!“ Um das Problem zu lösen, entwickeln die Fachleute gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Forschung neuartige Pumplaser, die effizienter sind und deshalb weniger Abwärme erzeugen.

Dennoch werden sich auch diese Laser erhitzen, so dass das Team zusätzlich effektive Kühltechniken installieren muss.

Kristalle scheinweise

Die zweite Herausforderung bilden die Verstärkerkristalle – auch sie würden durch tausend Schüsse pro Sekunde ziemlich warm. „Dadurch könnten sie sich verformen und die Ausbreitung der Laserpulse stören“, erläutert Maier. „Ab einem gewissen Punkt könnte es den Kristall sogar zerreißen.“ Daher gilt es, während des Betriebs möglichst viel Wärme aus dem Kristall abzuführen. Um das zu schaffen, gibt es mehrere mögliche Konzepte, die die Fachleute derzeit evaluieren. Eine Möglichkeit ist, den Kristall in mehrere Scheibchen zu schneiden, die dann hintereinander positioniert werden. Damit nämlich stünde mehr Oberfläche zur Verfügung, über die sich das Material kühlen und die Wärme abgreifen ließe.

Eine weitere Hürde stellt der Kompressor dar – jene Einheit, die den auseinandergedehnten Lichtpuls am Ende wieder zusammenstaucht. Bislang werden dafür mit Gold beschichtete Materialien verwendet, in die Tausende von feinen Linien eingeritzt sind. Bei KALDERA würde das Gold zu viel Wärme aufnehmen. Deshalb arbeiten die Fachleute an alternativen Beschichtungen.

Korrektursignal

„Als weitere Verbesserung versuchen wir bei KALDERA, die Lichtpulse gezielter maßzuschneidern und dadurch ihre Eigenschaften zu optimieren“, erzählt Andreas Maier. Um das zu schaffen, muss das Team die empfindlichen Gerätschaften möglichst gut gegen störende Umwelteinflüsse abschirmen. Um zum Beispiel Bodenvibrationen auszugleichen, will das Team den Laser mit zahlreichen Sensoren bestücken – zum Beispiel mit Kameras, die den Lichtstrahl beobachten und



iF Design Award für KALDERA-Web-Applikation

Für ihre herausragende Darstellung der Laser-Plasmabeschleunigung ist die interaktive Web-Applikation kaldera.desy.de mit dem renommierten iF Design Award 2023 ausgezeichnet worden. Das vom Kieler Science Communication Lab gemeinsam mit KALDERA-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftlern für DESY konzipierte und gestaltete Informationsangebot erlaubt es, den komplizierten Prozess der Plasmabeschleunigung interaktiv zu erkunden.

Der iF Design Award ist eine weltweit renommierte Auszeichnung für herausragendes Design, die seit 1954 jährlich vom iF International Forum Design in Hannover verliehen wird.



<https://kaldera.desy.de>

vermessen. Zeigen deren Bildern eine Abweichung, hervorgerufen durch eine Erschütterung, errechnet eine Software ein Korrektursignal. Dieses Signal steuert dann einen motorisierten Spiegel so, dass der Laserstrahl trotz der Vibrationen weiterhin in die gewünschte Richtung fliegt.

Das Labor für KALDERA steht bereits, nun bauen Maier und sein Team die ersten Komponenten auf. Läuft alles nach Plan, soll die Anlage 2026 komplett sein – und dann erstmals bis zu tausend Elektronenpakete pro Sekunde auf Touren bringen.

LICHT DURCH DIE WAND

Die Anlage ALPS II fahndet per Laser nach der Dunklen Materie

Die Teilchenphysik fahndet nach den Grundbausteinen der Welt: Woraus besteht Materie in ihrem Innersten, was hält sie zusammen? Um diese fundamentalen Fragen zu klären, nutzt die Fachwelt meistens Teilchenbeschleuniger, etwa den riesigen LHC-Ring bei CERN in Genf. Doch bei manchen Projekten spielen Laser eine zentrale Rolle.

Die Anlage namens ALPS II ist eingebaut in den unterirdischen Tunnel von HERA, einem stillgelegten DESY-Beschleuniger. Der 250 Meter lange Versuchsaufbau fahndet nach einem neuen, bislang hypothetischen Teilchen – dem Axion, einem überaus leichten und flüchtigen Exoten. Sollte es existieren, könnte es hinter der geheimnisvollen Dunklen Materie stecken. Die macht sich zwar überall im Kosmos durch ihre Schwerkraft bemerkbar, woraus sie jedoch besteht, ist bis heute unklar. Zu den Kandidaten zählen die Axionen – wenn es sie denn gibt.

Laser im Magnetfeld

Um die schwer fassbaren Teilchen dingfest zu machen, hat ein internationales Team ein spezielles Experiment entworfen. Das Prinzip: Laut Theorie sollten Axionen mit Licht wechselwirken, wenn auch nur schwach. Deshalb wollen die Fachleute Laserlicht in ein Magnetfeld schicken, in der Hoffnung, dass sich ein wenig davon in Axionen umwandelt. Diese Axionen würden dann wie Geister durch eine Wand fliegen, hinter der sie sich in einem weiteren starken Magnetfeld wieder in Licht zurückverwandeln könnten – sozusagen ein „Licht-durch-die-Wand“-Experiment.

ALPS II besteht aus zwei luftleer gepumpten Magnetstrecken, jeweils 120 Meter lang, getrennt durch eine lichtdichte Wand. „In die eine Strecke schießen wir mit dem Laser hinein und hoffen, dass sich ein Teil des Lichts in Axionen ver-

wandelt“, erläutert DESY-Physiker Aaron Spector. „In der anderen ist es komplett dunkel. Würden wir dort ein schwaches Leuchten registrieren, müsste es von einem Axion stammen, das sich in Licht zurückverwandelt hat.“

Ein Photon pro Tag

Dafür allerdings braucht es besondere Lasertypen. Der Laser, der die Axionen erzeugen soll, liefert einen starken, kontinuierlichen Infrarotstrahl. Er muss perfekt zu einem Spiegelsystem passen, in dem das Licht hin- und herläuft. Dafür ist es nötig, das 120 Meter lange System bis auf milliardstel Millimeter genau kontrollieren zu können. Außerdem muss der Laser seine Frequenz extrem genau halten können. „Dabei profitieren wir von der Technologieentwicklung, die für Gravitationswellendetektoren wie LIGO in den USA gemacht wurde“, erzählt Spector. „Unser System ist dem Laser dort sehr ähnlich.“

Auch auf der anderen Seite der lichtdichten Wand agiert ein frequenzstabilisierter Laser. Er dient zur Kontrolle des Spiegelsystems hinter der Wand und gleichzeitig zum Nachweis der Axionen: Würde sich eines der Geisterteilchen in ein Photon zurückverwandeln, sollte es sich mit dem Strahl des Lasers überlagern. Dabei müssten charakteristische Lichtmuster entstehen, empfindliche Sensoren würden sie registrieren. Allerdings dürften die Lichtsignale überaus schwach sein – pro Tag rechnen die Fachleute allenfalls mit einem einzigen Infrarotphoton in ihrer Apparatur. „Deshalb müssen wir alles dafür tun, dass kein Licht von der anderen Seite der Wand hindurchdringt“, erläutert Spector. „Andernfalls werden wir das Signal, das wir messen wollen, vor lauter Hintergrund nicht erkennen.“



femtoweb

Per Speed-Drohne durch den Tunnel

Speed-Drohnenpilotin Christina Krywka, hauptamtlich Physikerin an der Außenstelle des Helmholtz-Zentrums Hereon bei DESY, hat unter Tage einen rasanten Einblick in das ungewöhnliche Experiment ALPS II eingefangen. In spannenden sechs Minuten zeigt ihr Video die gesamte Anlage und erläutert das Messprinzip. Anders als die gesuchten hypothetischen Axionen war ihre Speed-Drohne dabei nicht in der Lage, eine massive Wand zu durchdringen ...



<https://www.youtube.com/watch?v=qwbGDRTQG48>



MATERIE AUS DEM NICHTS

Lassen sich mit dem Laser Teilchen im Vakuum erzeugen?

Beate Heinemann treibt eine ungewöhnlich klingende Frage um: Lässt sich aus dem Vakuum, gewissermaßen aus dem Nichts, Materie erzeugen, und zwar mit Hilfe von Licht? „Für gewöhnlich stellt man sich das Vakuum als einen komplett leeren Raum vor“, erläutert DESYs Direktorin für Teilchenphysik. „Aber in der Quantenphysik stimmt das nicht, da ist das Vakuum voll von virtuellen Teilchen.“ Diese Teilchen poppen paarweise unvermittelt aus dem Nichts auf, um gleich darauf wieder zu verschwinden – deshalb virtuell. Indirekt sind sie schon lange nachweisbar, etwa indem sie elektrische Ladungen geringfügig abschwächen.

Die Theorie, die solche Prozesse beschreibt, heißt Quantenelektrodynamik. Sie wartet mit einer spektakulären Vorhersage auf: Würde man das Vakuum mit ausreichend viel Energie regelrecht zum Kochen bringen, könnten sich virtuelle Teilchenpaare manifestie-

ren und zu echten, realen Teilchen werden. Im Weltall dürfte das in extremen Umgebungen passieren: So vermutete der Physiker Stephen Hawking einst, dass die Gravitation in unmittelbarer Nähe eines Schwarzen Lochs stark genug sein sollte, um aus unsteten Vakuumfluktuationen reale Teilchen zu gebären.

Einen vergleichbaren Prozess will Heinemann mit einem internationalen Team nun initiieren und

„Das Vakuum ist voll von virtuellen Teilchen“

Beate Heinemann, DESY

beobachten – mit einem Experiment namens LUXE. Der Plan: Die Fachleute wollen den hochenergetischen Elektronenstrahl aus einem Beschleuniger mit den Lichtblitzen eines starken Lasers kollidieren lassen. „Dadurch sollten sich extrem intensive elektromagnetische Felder

erzeugen lassen“, erläutert Heinemann. „Diese Felder sollten stark genug sein, um die virtuellen Teilchen aus dem Vakuum in reale Teilchen umzuwandeln.“

Energierreiche Elektronenpakete

Konkret will das Team dazu den Beschleuniger des European XFEL in Hamburg nutzen – eine gut drei Kilometer lange Anlage, seit 2017 der stärkste Röntgenlaser der Welt. In einer seiner Hallen soll der Laser eingebaut werden. Er wird Pulse liefern, die nur 25 Femtosekunden (billiardstel Sekunden) kurz sind, dabei aber eine Leistung von 300 Terawatt haben. „Diese Pulse wollen wir auf einen winzigen, drei Mikrometer großen Fleck bündeln“, beschreibt Heinemann. „Nur so lassen sich die Feldstärken erreichen, die wir benötigen.“ In diesen Brennpunkt sollen dann die hochenergetischen Elektronenpakete aus dem Beschleuniger fliegen – oder aber hochintensive Gammaquanten, die zuvor von den schnellen Elektronen erzeugt wurden.

Das Kalkül: Bei diesen Kollisionen könnten sich Paare aus Elektronen und ihren Antiteilchen, den Positronen, materialisieren – was sich mit Detektoren nachweisen ließe. Die Baupläne sind fertig, die Anträge zur Bewilligung des ca. 15 Millionen Euro teuren Experiments sind geschrieben. „Wir hoffen, dass wir 2025 mit dem Bau beginnen und zwei Jahre später das Experiment starten können“, sagt Beate Heinemann. Sollte das Team dann tatsächlich mit der vorhergesagten Rate Materie aus Licht erzeugen können, dann wäre die Theorie eindrucksvoll erstmals bei diesen enorm hohen Feldstärken bestätigt. Noch spannender aber wäre es, sollten sich Abweichungen zur Theorie zeigen. Das nämlich könnte ein Fingerzeig sein auf neue, bislang unbekannte Physikgesetze.

An der HED-Messstation kann das Team von Ulf Zastrau Proben unter Extrembedingungen untersuchen.



PER LASER INS PLANETENINNERE

Experimente am europäischen Röntgenlaser European XFEL untersuchen Extrembedingungen

Konzentriert sitzen die beiden Wissenschaftler im Kontrollraum, ihre Blicke sind auf einen der unzähligen Monitore geheftet. Zu sehen ist ein Kamerabild: Es zeigt die vergrößerte Aufnahme einer hauchdünnen Kupferfolie, die in der Experimentierhütte nebenan steckt, abgeschirmt durch dicke Betonwände. Jetzt beginnt einer der Forscher per Mausklick, die Folie sorgsam auszurichten: Position, Neigungswinkel, Abstand – alles muss stimmen.

Die Prozedur spielt sich in Schenefeld in der unterirdischen Halle des European XFEL ab, des

stärksten Röntgenlasers der Welt. Sie bereitet einen spektakulären Versuch vor, der in einigen Stunden stattfinden soll: Ein Hochleistungslaser wird einen ultrakurzen Lichtblitz auf die Kupferfolie feuern und ein kleines Loch in sie hineinbrennen. Einen Sekundenbruchteil, nachdem der Laser die Folie getroffen hat, soll ein starker Röntgenpuls aus dem European XFEL folgen. Er kann das Geschehen durchleuchten und verraten, wie sich der Laserblitz im Detail durch die Folie brennt. „Diesen Versuch wiederholen wir Dutzende oder Hunderte Mal“, erläutert Ulf Zastrau, leitender Wissenschaftler

am European XFEL. „Dabei verändern wir den zeitlichen Abstand zwischen Laserblitz und Röntgenpuls, und am Ende können wir den gesamten Prozess überblicken.“

Präziser Schnitt

Das Experiment ist deshalb interessant, weil der Laser die Löcher nicht einfach ins Metall hineinschmilzt. Stattdessen sind die Blitze so kurz und intensiv, dass sie das Material an der Stelle des Einschlags schlagartig ionisieren: Sie entreißen den Kupferatomen einen Großteil ihrer Elektronen. Dadurch lädt sich die Stelle so stark elektrisch auf, dass

alles blitzartig auseinanderfliegt. Doch anders als beim Schmelzen ist das Phänomen auf einen winzigen Fleck beschränkt – das umliegende Material bleibt weitgehend verschont.

Deshalb arbeitet die Industrie vermehrt mit Kurzpulslasern, um ihre Materialien möglichst zielgerichtet zu bearbeiten: Damit lassen sich Siliziumwafer oder Smartphone-Displays deutlich präziser schneiden als mit früheren Lasern. „Mit unseren Versuchen können wir genau beobachten, wie sich die Interaktion zwischen Laserblitz und Material abspielt“, erläutert Zastrau. „Wie im Detail entsteht ein Loch, wie breitet es sich aus?“ Die Ergebnisse liefern wichtiges Grundlagenwissen für Hersteller, die ihre Industrielaser verbessern und für bestimmte Anwendungen maßschneidern wollen.

Exotische Zustände

Doch der Aufwand für solche Versuche ist beträchtlich. Zum einen braucht es die Röntgenblitze aus dem European XFEL, einer 3,4 Kilometer langen Großanlage, basierend auf einem supraleitenden Teilchenbeschleuniger. Zum anderen müssen die Laserblitze, mit denen die Kupferfolie traktiert wird, extrem kurz und intensiv sein: Sie messen lediglich 25 Femtosekunden (billiardstel Sekunden), haben aber eine Leistung von 300 Terawatt. Diese Blitze können extreme Energiedichten erzeugen und Materie in exotische Zustände versetzen. Deshalb trägt die Messstation, an der Zastrau und seine Leute arbeiten, einen bezeichnenden Namen – „High Energy Density Science“, kurz HED.

Der Superlaser befindet sich direkt über dem Kontrollraum und der Experimentierhütte. Ulf Zastrau streift sich einen Kittel über, schließt die Tür auf und zeigt das Innere des klimatisierten Labors von der Größe eines Klassenraums: Wuchtige Boxen mit Hilfslasern stehen unmittelbar neben Edelstahl-Vakuumkammern und Tischen vol-

ler Blenden und Spiegel. Die Gänge dazwischen sind so eng, dass man sich nur schwer hindurchzwängen kann. „Das ist wirklich auf Kante genäht“, sagt Zastrau. „Wir mussten sehr sorgfältig planen, um hier sämtliche Komponenten unterbringen zu können.“

„Eine Raumsonde könnte niemals so tief in einen Gasriesen hineinfliegen“

Ulf Zastrau, European XFEL

Schockwelle

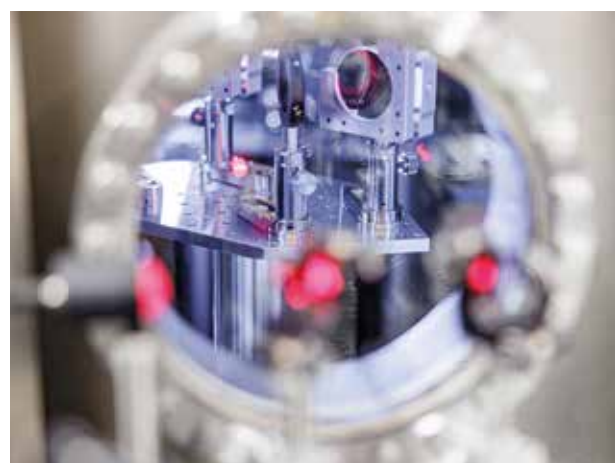
Dann zeigt er auf die Anlage in der anderen Raumhälfte – ein zweiter Superlaser. Seine Pulse sind mit einer Länge von zehn Nanosekunden deutlich länger als bei dem anderen Laser, enthalten aber viel mehr Energie, bis zu 100 Joule. Beide Laser zählen zu den stärksten ihrer Art in Deutschland und können pro Sekunde bis zu zehn Blitze abfeuern. Finanziert und betrieben werden sie vom internationalen Nutzerkonsortium HIBEF (Helmholtz International Beamline for Extreme Fields), koordiniert vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.

Auch der Hochenergielaser, der in diesem Jahr seinen Betrieb aufnehmen soll, wird spektakuläre Experimente erlauben: „Treffen seine Blitze auf eine Materialprobe, können sie darin eine regelrechte Schockwelle erzeugen“, erläutert Zastrau. „Diese Schockwelle ist mit enorm hohen Temperaturen und Drücken verbunden.“ In Zahlen: Die Laserblitze können Temperaturen von bis zu einer Million Grad hervorrufen und Drücke bis zu zehn Millionen Bar, also zehnmillionenfacher Atmosphärendruck. Allerdings währt das Ganze nur für eine milliardstel Sekunde – danach ist die Probe pulverisiert. Um das schnelllebige Geschehen dennoch

analysieren zu können, braucht es die kurzen Röntgenpulse des European XFEL.

Das Faszinierende: Die per Laser erzeugten Extrembedingungen ähneln denen, die in der Erde oder in Riesenplaneten wie Jupiter und Saturn herrschen – das Innenleben der Himmelskörper lässt sich damit simulieren. Dadurch lässt sich manch spannende Forschungsfrage angehen: Welche Phänomene bestimmen das Geschehen im Erdkern, der teils aus festem, teils aus flüssigem Eisen besteht? Und wie im Detail sehen die inneren Schichten des Saturn aus – vermutlich ein honigartiges Gemisch aus Wasserstoff und Helium? „Eine Raumsonde könnte niemals so tief in einen Gasriesen hineinfliegen, das würde sie nicht überstehen“, betont Zastrau. „Doch mit unseren Lasereperimenten können wir das Geschehen simulieren – wenn auch nur für einen winzigen Augenblick.“

Die Messstation besitzt zwei Probenkammern, in denen sich mit Hochleistungslasern Bedingungen erzeugen lassen, wie sie etwa im Inneren von Planeten herrschen.



IM TERAHERTZ-TAKT

Speziallaser als Startgeber für Molekülexperimente

Manchmal braucht ein großer Laser einen kleineren – und zwar um gewisse Experimente möglich zu machen. Der große Laser ist in diesem Fall der European XFEL in Hamburg. Mit seiner Länge von gut drei Kilometern gilt er als der stärkste Röntgenlaser der Welt. Seine Röntgenblitze sind derart kurz und intensiv, dass sich damit zum Beispiel ultraschnelle Prozesse im molekularen Maßstab sehr präzise verfolgen lassen. Um solche Prozesse in Gang zu setzen, braucht es einen kleineren, spezialisierten Laser, der kurze Startpulse erzeugt, zum Beispiel im Terahertz-Bereich. Ein Forschungsteam am DESY-Standort Zeuthen entwickelt eine solche Lichtquelle.

Im elektromagnetischen Spektrum liegt die Terahertz-Strahlung zwischen Mikrowellen und Infrarotlicht. Dieses Licht hat die Eigenschaft, Materie und einzelne Moleküle in neue, sonst unzugängliche Zustände zu verwandeln. Diese Zustände werden dann mit den Röntgenpulsen des European XFEL untersucht, um zu zeigen, wie

sie sich im Laufe der Zeit verändern. Allerdings ist es alles andere als leicht, kurze und intensive Terahertz-Pulse zu erzeugen, die sich für die Versuche optimal eignen.

Am Photoinjektor-Teststand PITZ in Zeuthen wird derzeit eine hochbrillante Elektronenquelle für den Beschleuniger des European XFEL entwickelt. Da lag die Idee nahe, einen Prototyp dieses Injektors für einen Laser zu verwenden, der kurze Terahertz-Pulse liefert. Die Anlage erzeugt kurze Elektronenpakete, die durch elektrische Felder sowie einen kleinen Beschleuniger auf nahezu Lichtgeschwindigkeit gebracht und anschließend in einen Undulator gelenkt werden. So heißt eine komplexe Magnetanordnung, die die Elektronenpakete auf einen Slalomkurs zwingt, wodurch sie die erwünschten Terahertz-Laserblitze aussenden.

Perfekt abgestimmt

„Mit unserer Technologie können wir eine extrem große Anzahl von Elektronen in ein Paket stecken“, sagt DESY-Physiker Mikhail Krasilnikov. „Damit lassen sich dann ziemlich

starke Terahertz-Blitze erzeugen.“ Wichtig ist auch die Zahl der Pulse, die der neue Laser zustande bringen soll. „Er soll genauso viele Terahertz-Blitze erzeugen wie der European XFEL Röntgenpulse“, erklärt Krasilnikov. „Weil jeder Röntgenblitz seinen eigenen Terahertz-Puls bekommt, wären beide perfekt aufeinander abgestimmt, und das würde sehr kontrastreiche Aufnahmen erlauben.“ Ferner wird die Apparatur durchstimmbare sein und verschiedene Terahertz-Frequenzen erzeugen – wichtig, um unterschiedliche Prozesse auslösen zu können.

„Mit unserer Technologie können wir eine extrem große Anzahl von Elektronen in ein Paket stecken“

Mikhail Krasilnikov, DESY

Ein erster Machbarkeitstest glückte 2022 am Versuchsstand PITZ – das Prinzip funktioniert. Nun geht es darum, die Technik bis zur Anwendungsreife zu entwickeln. „Uns schwebt vor, eine kompakte Terahertz-Quelle auf der Basis unseres Photoinjektors nahe einer Messstation des European XFEL aufzubauen“, erläutert der Physiker. „Dann müsste man die Terahertz-Blitze nicht sehr weit transportieren und hätte wenig Verluste.“ Damit würde sogenannte „Pump-Probe“-Experimente möglich, die für eine Vielzahl von Anwendungen geeignet sind. Unter anderem ließen sich Materialien für schnellere und kleinere Datenspeicher, effizientere Solarzellen und neuartige Katalysatoren erforschen.



Blick in die PITZ-Erweiterung mit dem Terahertz-Laser. Der Undulator zur Erzeugung der Laserstrahlung ist auf dem gelben Gestell montiert, der Elektronenstrahl fliegt von rechts in die Strahlführung.



SYNCHRONISIERT

Wie ein Start-up dafür sorgt, dass verschiedene Laser im Gleichtakt funktionieren

Laser können extrem kurze und gleichmäßige Lichtblitze erzeugen und dadurch ultraschnelle Prozesse im Mikrokosmos vermessen, zum Beispiel chemische Reaktionen. Oft müssen dazu mehrere Lasersysteme Hand in Hand arbeiten und genauestens aufeinander abgestimmt werden. Das bedarf einer extrem präzisen Synchronisierung. Die Technologie dafür entwickelt Cycle, ein Start-up von DESY.

Die Versuche, mit denen sich sogenannte Molekülfilme drehen lassen, heißen „Pump-Probe“-Experimente: Ein erster Laser initiiert mit seinen Lichtblitzen eine Reaktion, ein zweiter feuert ein winziges bisschen später und analysiert, wie sich die Reaktion abspielt. Dann wiederholt sich das Spiel: Die Reaktion wird immer wieder neu gestartet und zu verschiedenen Zeiten abgetastet. Als Resultat entsteht eine Serie von Standbildern, die sich zu einer Art Daumenkino kombinieren lässt, einem „Molecular Movie“.

Femtosekundengenau

Nötig ist dafür eine präzise Synchronisation der beiden Laser: Damit die Messung funktioniert, muss der zeitliche Abstand zwischen ihren Pulsen bis auf einige Femtosekunden genau

definiert sein – eine Femtosekunde ist eine milliardstel Sekunde. Stehen beide Laser in einem Labor dicht nebeneinander, stellt diese Synchronisation kein allzu großes Problem dar. Anders bei Riesenanlagen wie dem European XFEL in Hamburg, dem stärksten Röntgenlaser der Welt.

Hier steht der „Pump“-Laser, der die Reaktion in Gang bringt, in einer Experimentierhalle im schleswig-holsteinischen Schenefeld. Der beschleunigerbasierte „Probe“-Laser dagegen nimmt seinen Anfang in gut drei Kilometern Entfernung auf dem DESY-Campus in Hamburg-Bahrenfeld. Dort schlägt ein Laser aus einem Metallstück die Elektronenpakete, die später die Röntgenlaserblitze erzeugen.

Lasermetronom

„Um die beiden Laser in Schenefeld und auf dem DESY-Gelände zu synchronisieren, sind sie per Glasfaser miteinander verbunden“, erklärt Franz Kärtner, leitender DESY-Wissenschaftler und Gründer von Cycle. „Durch diese Faser können sie hochstabile Lichtsignale austauschen und dadurch in einem exakten Gleichtakt arbeiten.“

Doch es gibt eine Hürde: Die Glasfaser reagiert auf ihre Umwelt – auf Erschütterungen und Tempe-

raturschwankungen. Ist es nachts deutlich kälter als tagsüber, kann sich die Faser um bis zu 20 Zentimeter zusammenziehen. Damit aber verändert sich auch die Laufzeit des Synchronisationssignals – und die Präzision des Gleichtakts. Um die Schwankungen auszugleichen, ließ sich Kärtners Team eine trickreiche Vorrichtung einfallen: Die Fachleute lassen hochstabile Laserpulse in einem Resonator – einer meterlangen Spiegelstrecke – hin- und herlaufen. Damit schaffen sie ein ultrapräzises Lasermetronom.

Weltraumkommunikation

Das Entscheidende: Dessen Signale lassen sich genauestens mit jenen Pulsen korrelieren, die in der kilometerlangen Faser zwischen Bahrenfeld und Schenefeld hin- und herflitzen. Verändert nun eine Temperaturschwankung die Glasfaserverlänge und damit die Laufzeit dieser Pulse, lässt sich das durch den Abgleich mit dem Lasermetronom bis auf weniger als eine Femtosekunde genau feststellen. „Darauf können wir dann reagieren und mit einem mechanischen Stellglied die Flugstrecke verlängern oder verkürzen“, erläutert Kärtner, der auch Professor an der Universität Hamburg ist. „Das gleicht die Schwankungen aus, und die Laser sind wieder präzise synchronisiert.“ Beim European XFEL wurde dies durch die DESY-Gruppe für Maschinen-Strahlkontrollen implementiert.

Mittlerweile bietet Kärtners Firma solche Techniken auch für andere wissenschaftliche Anwendungen an, etwa für die Radarstationen von ESTRACK, einem Antennennetzwerk der Europäischen Weltraumagentur ESA. Diese Radaranlagen kommunizieren mit Weltraumsonden wie „Gaia“ oder „BepiColombo“, die in den Tiefen unseres Sonnensystems unterwegs sind. Und Cycles Lasertechnik sorgt dafür, die Kontrollräume zuverlässig mit den entfernt stehenden Radarantennen zu synchronisieren.

„WICHTIGE SCHNITTSTELLE ZUR AKADEMISCHEN WELT“

Der Physiker Max Kahmann leitet beim baden-württembergischen Hightechunternehmen TRUMPF die Voraufwicklung Laseranwendungen. TRUMPF, ein weltweit führender Laserhersteller, kooperiert schon länger mit DESY. Diese Zusammenarbeit soll nun intensiviert werden.

femto: Wie kam es zur Zusammenarbeit mit der Forschung?

Kahmann: Eine Keimzelle ist unsere Tochtergesellschaft in München. Das ist eine Ausgründung, mit der wir gezielt den Wissenschaftsmarkt bedienen, darunter Forschungszentren wie DESY. Die Laser, die diese Tochter herstellt, enthalten neue, innovative Komponenten, die sich in einem Laborumfeld sehr gut einsetzen lassen. Dadurch gewinnen wir wertvolle Einblicke, wie sich solche Komponenten am besten nutzen lassen und wie wir sie für den Einsatz in der Industrie weiterentwickeln können. Außerdem stellt die Zusammenarbeit eine Schnittstelle zur akademischen Forschung dar. Die läuft der Entwicklung oft vorweg, und so haben wir frühzeitig auf dem Radar, was an neuen Technologien zu erwarten ist.

femto: Können Sie ein Beispiel nennen? Bei welcher Lasertechnologie haben Sie konkret von der Koopera-

tion mit der Grundlagenforschung profitiert?

Kahmann: In der Forschung gelingt es bereits seit Jahrzehnten, ultrakurze Laserpulse zu erzeugen. TRUMPF zählt zu den ersten Herstellern, die diese Technologie vor gut zehn Jahren in die Industrie überführen konnten. Für die Materialbearbeitung brachte das einige Vorteile. Im Wesentlichen sind es diese: eine Unempfindlichkeit bezüglich der Materialeigenschaften – so können beispielsweise Stoffe bearbeitet werden, die ansonsten für Licht transparent sind. Ferner lässt sich Material ablatieren, also abtragen, ohne es zu erhitzen. Damit kann man unter anderem Schmelzaufwürfe vermeiden.

femto: Welche Trends beschäftigen Sie im Moment, welche Technologien könnten in Zukunft den Sprung von den Laboren in die Wirtschaft schaffen?

Kahmann: Da wäre zum Beispiel die Erzeugung von sogenanntem Sekundärlicht. Die Idee ist, dass man Laserpulse nutzt, um andere Arten von Strahlung zu generieren. DESY arbeitet daran, mit hochintensiven Laserblitzen ein Plasma zu erzeugen, ionisierte Materie. In diesem Plasma kann man dann beispielsweise mit dem Laser auf



kleinstem Raum Elektronen beschleunigen, und da sehen wir ein Riesenpotenzial, etwa für die Medizin. Genau deshalb machen wir bei HI-ACTS mit, einer neuen Innovationsplattform, die von DESY koordiniert wird und die die Industrie mit der Forschung zusammenbringt. Wir hoffen, Komponenten, die noch ein Stück von der Einsatzreife entfernt sind, gemeinsam für einen Einsatz in der Praxis weiterentwickeln zu können.

femto: Mit Anlagen wie PETRA III verfügt DESY über leistungsfähige Röntgenquellen, mit denen sich Materialien genauestens analysieren lassen. Inwieweit sind solche Forschungsmöglichkeiten für TRUMPF von Interesse?

Kahmann: Da gibt es regelmäßige Projekte. So können wir bei DESY bestimmte Details für den 3D-Laserdruck untersuchen, eine vielversprechenden Technologie zur Herstellung von Metallbauteilen. Und gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT hat TRUMPF untersucht, wie ein Laser Kupfer auf ein Keramik-Metall-Substrat verschweißst. Das ist ein wichtiger Schritt bei der Herstellung von Elektroautos. Mit dem Röntgenlicht von PETRA III konnten wir so tief in die inneren Prozesse der Laserbearbeitung blicken wie nie zuvor. Dadurch konnten wir lernen, wie sich der Schweißvorgang durch eine Veränderung der Laserparameter gezielt optimieren lässt.



RÖNTGENBLICK INS LASERSCHWEISSEN

TRUMPF und das Fraunhofer ILT haben an DESYs Röntgenquelle PETRA III das Laserschweißen von Kupferverbindungen der Hochleistungselektronik von Elektroautos untersucht.

Hochleistungselektronik steckt in jedem Elektroauto und sorgt als Schlüsseltechnologie für die beste Leistung von Batterie und Motor. Eine interdisziplinäre Kooperation aus Forschung und Industrie hat nun an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III Laserschweißprozesse untersucht, die bei der Herstellung von Elektroautos zum Einsatz kommen. Das Ergebnis: Beim Einsatz eines Lasers mit grüner Wellenlänge entsteht weitaus weniger Ausschuss als bei anderen Laserschweißverfahren. Autohersteller sparen Rohstoffe und tragen damit zu nachhaltigerer Fertigung bei.

Die Elektromobilität stellt die Lasertechnik vor große Herausforderungen. Kupfer ist das wichtigste Material für die Fertigung von Kernkomponenten für die E-Mobilität. Dieses Buntmetall absorbiert nur etwa 5 Prozent der Laserstrahlung im nahen Infrarotbereich (NIR) und leitet die Wärme sehr gut ab. Beides führt zu erheblichen Problemen beim Schweißen. Die Prozesse stehen deshalb auf dem Prüfstand.

Das baden-württembergische Laser-Hochtechnologieunternehmen TRUMPF und das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT nutzten die Messstation des Helmholtz-Zentrums Hereon an

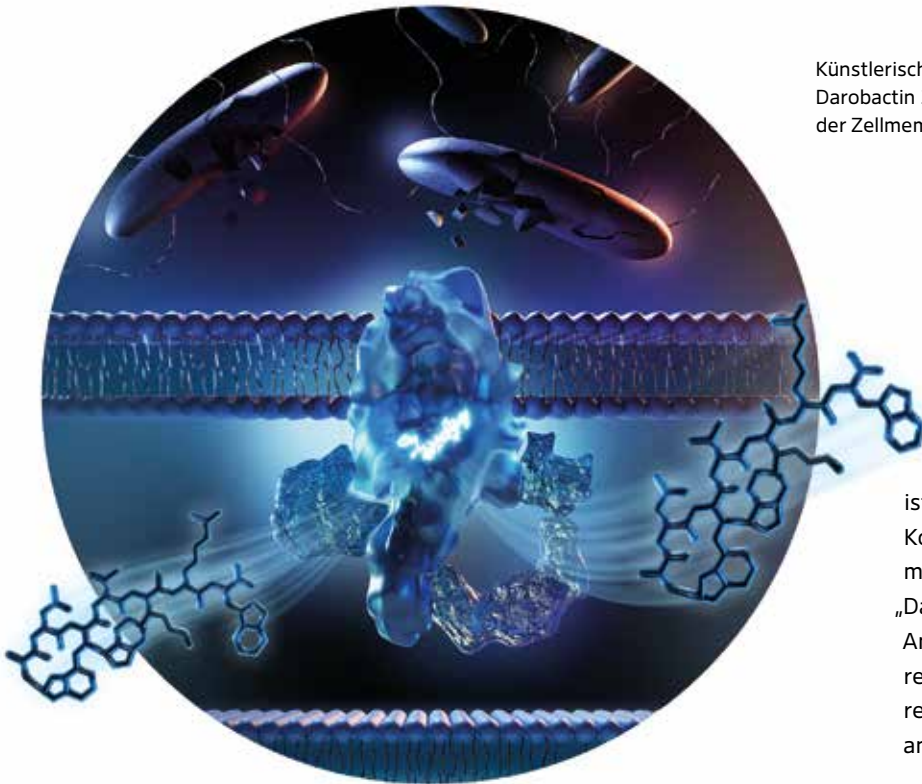
PETRA III für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit mehreren tausend bis zehntausend Bildern pro Sekunde. „Wir wollten genau wissen, was beim Kupferschweißen den Unterschied macht“, sagt Marc Hummel, Wissenschaftler am Fraunhofer ILT. „Ein stabiler Schweißprozess ist wichtig, da die Hersteller von Elektrofahrzeugen mehrere Milliarden Verbindungen in höchster Qualität schweißen müssen.“

Das Team untersuchte Laserschweißprozesse mit zwei verschiedenen Lasersystemen: einem NIR-Laser und einem grünen Laser. „Für uns ist das eine großartige Chance, um die Schweißprozesse an Industrieteilen zu untersuchen. Wie entstehen zum Beispiel Spritzer und Poren, wie wirkt sich die Wärme aus dem Schweißprozess auf empfindliche Komponenten wie Elektronikbauteile aus“, sagt Mauritz Möller, Branchenmanager Automotive bei TRUMPF.

Kupfer absorbiert die grüne Wellenlänge deutlich besser als die infrarote. Weil der Werkstoff somit seine Schmelztemperatur schneller erreicht, startet auch der Schweißprozess schneller und es ist weniger Laserleistung notwendig. „Stabilere Prozesse beim Schweißen bedeuten weniger Ausschuss und damit auch mehr Nachhaltigkeit, was bei der Elektromobilität ein großes Thema ist“, sagt Möller.

SPEKTRUM

Nachrichten aus der Forschung



Künstlerische Darstellung des Moleküls Darobactin 22, seiner Andockstelle in der Zellmembran und der Zielbakterien.

Vielversprechendes Antibiotikum aus dem Labor

Im ständigen Wettrennen mit Bakterien haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Zentrums für Strukturelle Systembiologie CSSB gemeinsam mit dem Helmholtz-Institut für Pharmazeutische Forschung Saarland HIPS ein neues, vielversprechendes Antibiotikum im Labor hergestellt. Das Molekül namens Darobactin 22 hat das Potenzial, auch schwierig zu behandelnde Infektionen zu bekämpfen. Bislang ist es nur im Labor getestet.

Darobactin ist ein natürliches Antibiotikum, das aus dem Bakterium *Photorhabdus khanii* gewonnen wird,

das in Symbiose mit Fadenwürmern lebt. In gramnegativen Bakterien bindet Darobactin an das äußere Membranprotein BamA, das für die Funktion des Bakteriums eine zentrale Bedeutung hat. Wenn Darobactin an BamA bindet, kann das Bakterium nicht mehr überleben. Um die sehr starke Wirkung von Darobactin zu verstehen, haben die Forscherinnen und Forscher die Struktur dieses Bindungsmechanismus genauer untersucht.

„Die Aufklärung der detaillierten molekularen Struktur der Darobactin-BamA-Bindungsstelle hilft uns zu verstehen, warum die Bindung so stark

ist“, erläutert Biao Yuan, der den Komplex mit den Kryo-Elektronenmikroskopen am CSSB analysiert hat. „Damit haben wir einen gerichteten Ansatz entwickelt, um individuelle Bereiche des Darobactins zu modifizieren und so eine noch stärkere Variante zu erschaffen.“

Mit Hilfe dieser Strukturinformationen ließen sich dann zielgerichtet 20 neue biosynthetische Darobactin-Derivate herstellen, um die Bindung möglichst zu optimieren. Von diesen stellte sich Darobactin 22 (D22) als das stärkste heraus. „D22 übertrifft die antibakterielle Aktivität aller identifizierten nativen Darobactine“, betont Carsten Seyfert vom HIPS, der die Varianten synthetisiert hat. „Wir haben gezeigt, dass die Modifizierung der Bindungsstellen von Antibiotika zu einer stärkeren, wirksameren antibiotischen Aktivität führen kann“, ergänzt DESY-Gruppenleiter Thomas Marlovits, der auch Professor am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf UKE ist. Zukünftige Studien sollen testen, wie sich die Bindung von D22 noch weiter verbessern lässt, und nach einem effizienten Weg zur Massenproduktion von D22 für die pharmazeutische Verwendung suchen.

.....
Angewandte Chemie, 2023;
 DOI: 10.1002/anie.202214094

Überraschendes Verhalten von Quantenmaterial

Ein Forschungsteam hat an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III ein überraschendes Verhalten des Quantenmaterials Vanadiumdioxid (VO_2) aufgedeckt. Es ist ein vielversprechender Kandidat für IT-Anwendungen der Zukunft, etwa in maßgeschneiderten funktionalen Geräten. Denn es kann sich von einem Isolator zu einem leitfähigen Metall wandeln, und zwar bei einer vergleichsweise alltags-tauglichen Temperatur von rund 70 Grad Celsius. So wurde VO_2 beispielsweise schon in neuartigen Transistoren eingesetzt, die das Verhalten des menschlichen Gehirns nachahmen. Das Material könnte beispielsweise auch als transparente Fensterabdeckung dienen, die sich bei hohen Temperaturen in einen dunklen Film verwandelt und das Sonnenlicht blockiert.

Das Team um DESY-Forscher Jan Schunck untersuchte nun mithilfe der Röntgenmikrospektroskopie die Strukturen dünner Vanadiumdioxid-Schichten



Auf diesem Halter sind die Proben mit den winzigen Vanadiumdioxid-Quadraten montiert.

im Detail. Dabei zeigte sich, dass die Übergangstemperatur in den 30 mal 30 Mikrometer großen Quadraten nicht überall gleich war: Die Ränder wurden bereits bei einer 1,2 Grad niedrigeren Temperatur leitend als die Zentren. „Will man diese Materialien in mikroelektronischen Geräten in nur winzigen Mengen einsetzen, muss man mit einem unterschiedlichen Verhalten bei verschiedenen Volumengrößen und Geometrien rechnen“, erläutert Schunck. „Daher brauchen wir sorgfältige Untersuchungen solcher Größeneffekte.“

Scientific Reports, DOI: 10.1038/s41598-022-13872-0

Bild: DESY, Jan Schunck

Gläser tempern ohne Erhitzen

Seit Tausenden von Jahren experimentieren Menschen mit verschiedenen Eigenschaften von Glas. Dabei kommt es in der Regel darauf an, wie das Glas geschmolzen und dann wieder abgekühlt wird. Ein Team unter der Leitung der Universität Padua hat nun an DESYs Röntgenquelle PETRA III einen Weg

gefunden, um mit Röntgenstrahlung einen ähnlichen Effekt zu erzielen wie bei diesem sogenannten Tempern von Glas. Dazu setzten sie dünne Scheiben aus Siliziumdioxid (SiO_2), dem „Rohmaterial“ von Glas, der Röntgenstrahlung aus und verfolgten die Bewegungen der Atome innerhalb der Probe.

Wie die Untersuchung zeigt, unterscheidet sich die Wirkung der Röntgenstrahlung fundamental vom Erhitzen und Schmelzen des Glases: Statt gleichmäßig schneller

umeinander herumzuziehen, machten einige der Atome in der bestrahlten Probe vergleichsweise große Sprünge innerhalb des Materials. Dabei änderte sich die Temperatur des Glases durch die Bestrahlung nicht.

Der beobachtete Effekt könnte neue und bisher unbekannte Eigenschaften von Gläsern ermöglichen. „Je nach Anwendung müssen Gläser schnell gekühlt oder abgeschreckt werden“, erläutert DESY-Forscher Francesco Dallari, einer der Hauptautoren der Untersuchung. „Die Verwendung von Röntgenstrahlung wirkt wie ein superschnelles Abschrecken.“ Welche Eigenschaften dadurch genau entstehen können, muss noch erforscht werden.

Proceedings of the National Academy of Sciences, DOI: 10.1073/pnas.2213182120

Für das Experiment wurden dünne Scheiben aus Siliziumdioxidglas als Proben verwendet. Das Team nutzte Röntgenstrahlung, um das Glas zu schmelzen, ohne es zu erhitzen, und konnte die ungewöhnliche stochastische Beschleunigung der Atome im Inneren des Glases beobachten.



Bild: Universität Padua

Norddeutscher Wissenschaftspreis für Materialforschung

Das Verbundprojekt CIMMS zur Materialforschung ist mit dem Norddeutschen Wissenschaftspreis ausgezeichnet worden. Das Zentrum für Integrierte Multiskalige Materialsysteme CIMMS vernetzt in einem bundesweit einzigartigen Forschungsansatz Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Technischen Universität Hamburg, der Universität Hamburg, des Helmholtz-Zentrums Hereon und von DESY.

Ziel von CIMMS ist die Herstellung einer neuartigen Materialbasis mittels 3D-Druck, um kostengünstigere und langlebigere Produkte mit neuartigen Funktionen zu entwickeln. Das Projekt wird von der Hamburger

Wissenschaftsbehörde (BWFGB) in den Jahren 2020 bis 2024 mit insgesamt vier Millionen Euro gefördert.

Der Norddeutsche Wissenschaftspreis wird alle zwei Jahre von der Norddeutschen Wissenschaftsmi­nisterkonferenz (NWMK) vergeben. CIMMS bekam den mit 150 000 Euro dotierten ersten Preis. Der zweite Preis über 100 000 Euro ging an das Verbundprojekt Homeo-Hirn der Technischen Universität Braunschweig.

„Beide Preisträgerprojekte zeigen eindrucksvoll, wie sehr wissenschaftliches Arbeiten davon profitieren kann, wenn sich die klügsten Köpfe zusammentun – und das über die Grenzen von Fachbereich und

Im Verbundprojekt CIMMS untersuchen Forscherinnen und Forscher, wie Prinzipien der Natur genutzt werden können, um Materialien mit integrierten Funktionalitäten herzustellen.

Institution hinweg“, sagte Hamburgs Wissenschaftssenatorin Katharina Fegebank anlässlich der Preisverleihung. „Jetzt gilt es, genau diese innovativen Kooperationsmodelle im Norddeutschen Raum noch weiter zu stärken und auszubauen.“

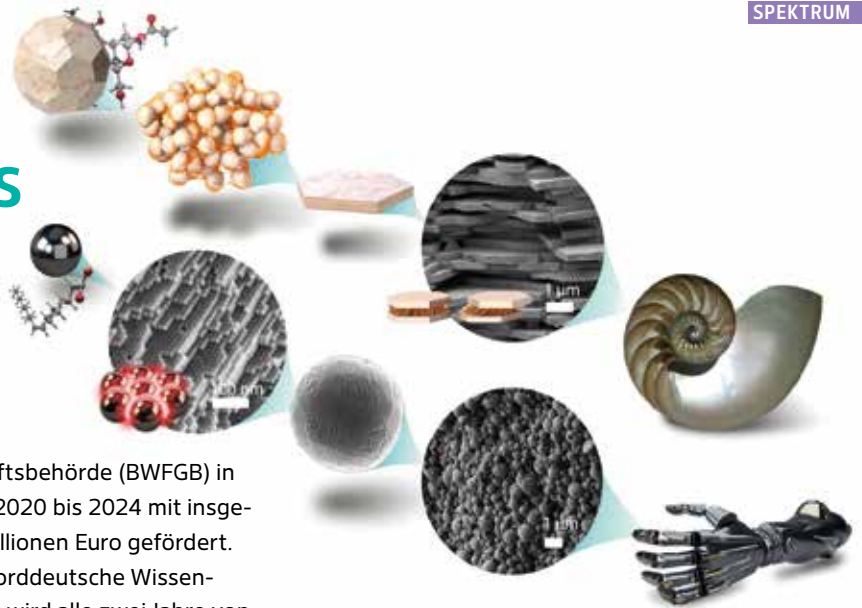


Bild: CIMMS

Sparpotenzial bei Plastikfolien-Produktion



Folienverpackungen für Medikamente (Blister) sind häufig aus PET-Kunststoff.

Gewöhnliche Plastikverpackungen für Brot, Fruchtgummi oder andere Lebensmittel sind nicht so simpel, wie sie erscheinen: Solche Folien werden in der Regel aus mehreren Schichten zusammengesetzt. Jede einzelne Schicht muss dazu chemisch behandelt werden, damit sie an der jeweils nächsten gut haftet. Mit DESYs Freie-Elektronen-Laser FLASH hat ein Forschungsteam von DESY und dem Greifswalder Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie die Oberflächen einzelner Schichten aus PET (Polyethylenterephthalat) im Detail untersucht.

Die Hersteller behandeln die einzelnen dünnen Kunststoffschichten üblicherweise mit elektrischen Plasmaentladungen,

um die chemische Zusammensetzung der Kunststoffoberfläche so zu verändern, dass ein Verkleben oder Bedrucken möglich wird. Das Team um DESY-Forscherin Elke Plönjes verglich die Oberflächenstrukturen von Folien, die mit zwei unterschiedlichen Plasmaverfahren behandelt worden waren. Eine Probe hatte das in der Industrie am weitesten verbreiteten Verfahren durchlaufen, die sogenannte Corona-Behandlung; die andere ein neu entwickeltes Verfahren, das die Folien mit fast hundertmal intensiverem Plasma behandelt, aber dafür kürzer.

Die Analyse zeigte in Kombination mit weiteren Labortests in Greifswald, dass eine Anpassung des Behandlungsverfahren bei gleichem Energieaufwand sogar zu mehr der erwünschten Oberflächenveränderungen führt, was die Klebeeigenschaften der Folienschicht verbessern kann. Das eröffnet wiederum das Potenzial, heute oft noch nötige chemische Zusatzbehandlungen der Foliensoberfläche einzusparen. „Zusammengenommen ergibt sich die Chance, bessere Folien mit weniger Aufwand herzustellen“, erläutert Plönjes. „Das kann für die Industrie von großem Interesse sein.“

Polymers, DOI: 10.3390/polym14132528

Bild: Pixabay



Der FASER-Detektor befindet sich tief unter der Erde in einem Seitentunnel am LHC in der Nähe des ATLAS-Detektors.

Erstmals Neutrinos aus einem Teilchencollider nachgewiesen

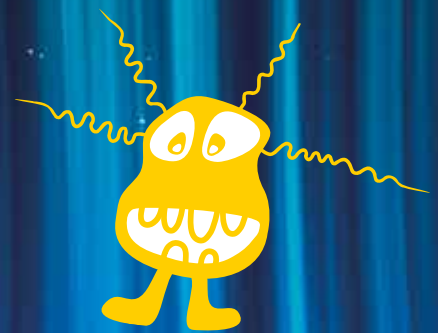
Ein internationales Forschungsteam hat mit dem FASER-Experiment am Large Hadron Collider LHC in Genf zum ersten Mal Neutrinos nachgewiesen, die von einem Teilchencollider erzeugt wurden, also einem Beschleuniger, an dem Teilchen zur Kollision gebracht werden. Neutrinos sind die häufigsten Teilchen im Kosmos und spielen unter anderem eine Schlüsselrolle bei dem Prozess, der Sterne brennen lässt. Die jetzt von FASER registrierten Neutrinos sind die energiereichsten, die jemals in einem Labor erzeugt wurden.

„Neutrinos sind schon seit mehreren Jahrzehnten bekannt und waren für die Erstellung des Standardmodells der Teilchenphysik sehr wichtig“, sagt DESY-Theoretiker Felix Kling, einer der vier Wissenschaftler, die das FASER-Experiment 2018 vorgeschlagen hatten, und der auch die Simulationen durchgeführt hat, wie viele Neutrinos man von dem Experiment erwarten kann. „Aber bisher konnte kein Experiment auch nur ein einziges Neutrino nachweisen, das an einem Collider erzeugt wurde, und auch die größeren Experimente am LHC sind bis heute nicht in der Lage, Neutrinos direkt nachzuweisen.“

Das Experiment FASER (Forward Search Experiment) ist ein neuartiger Teilchendetektor, der von einer internationalen Gruppe von Physikerinnen und Physikern entwickelt und gebaut wurde. Im Vergleich zu anderen LHC-Detektoren wie ATLAS oder CMS – mehrere Stockwerke hoch und Tausende Tonnen schwer – wiegt FASER nur etwa eine Tonne und passt genau in einen kleinen Seitentunnel. Entwicklung und Bau von FASER haben nur wenige Jahre gedauert, wobei Ersatzteile aus anderen Experimenten verwendet wurden.

Zusammen mit Astroteilchenobservatorien wie IceCube, die Neutrinos aus den Tiefen des Weltraums messen, wird FASER dazu beitragen, die Rolle dieser mysteriösen Teilchen besser zu verstehen.

femtomenal



1 000 000 000 000
Lichtteilchen (Photonen)

befinden sich im Schnitt in jedem Blitz des Röntgenlasers European XFEL. Eine Billion, das ist eine schwer vorstellbare Zahl. Zur Veranschaulichung ein Vergleich mit Sand: Ein Sandkorn wiegt rund 0,0002 Gramm. Eine Billion Sandkörner sind also 200 Tonnen Sand – etwa 15 LKW-Ladungen oder ein kleiner Privatstrand, wie Harald Sinn vorrechnet, Leiter der Abteilung Instrumentierung bei European XFEL. Pro Sekunde kann der European XFEL 27 000 solcher Blitze erzeugen. Damit ist er der hellste Röntgenlaser der Welt.

Übrigens: Strahlung niedrigerer Energien wie beispielsweise sichtbares Licht hat bei derselben Leistung noch viel mehr Photonen. Die energiereichen Röntgenphotonen sind jedoch viel aufwendiger zu produzieren.

Aufzeichnungen
einer Vier-Top-
Quark-Produktion
im ATLAS-Detektor

Seltener Auftritt der Four Tops am LHC

Hinweise auf eine neue Art der Erzeugung des Top-Quarks

Die Beobachtung eines sehr seltenen Prozesses am weltgrößten Teilchenbeschleuniger LHC lässt die Fachgemeinde aufhorchen: Die großen Detektoren ATLAS und CMS am Large Hadron Collider haben erstmals handfeste Nachweise für die Erzeugung von vier sogenannten Top-Quarks auf einen Schlag geliefert. Der rare Auftritt der „Four Tops“ am Forschungszentrum CERN bei Genf bietet nicht nur die Chance, mehr über das Top-Quark selbst zu lernen, sondern möglicherweise auch über das Higgs-Boson und eventuell über neue Physik jenseits des bekannten Standardmodells der Teilchenphysik.

Quarks sind unter anderem die Grundbausteine der Atomkerne.

Das Top-Quark ist das schwerste aller bekannten Elementarteilchen, es wiegt alleine bereits etwa so viel wie ein komplettes Goldatom. Es ist jedoch nicht stabil und zerfällt in unvorstellbar kurzen Sekundenbruchteilen. Deshalb lässt es sich nur beobachten, wenn es extra erzeugt wird. Und dafür ist wegen der hohen Masse des Teilchens sehr viel Energie nötig. Daher entstehen Top-Quarks nur an den stärksten Teilchenbeschleunigern sowie durch die energiereiche Kosmische Strahlung, wo sie jedoch wegen ihrer kurzen Lebensdauer kaum beobachtbar sind.

70 000 Mal seltener

Der LHC, der Wasserstoffatomkerne mit hoher Energie aufeinander

schießt, produziert Top-Quarks etwa einmal pro 100 Millionen dieser Kollisionen. Fast immer treten sie dabei als Paar auf, ein Top-Quark und sein Antiteilchen, das Anti-Top-Quark. Rund 70 000 Mal seltener als die Top-Quark-Paare erwarten die Teilchenphysikerinnen und -physiker die simultane Entstehung von vier Top-Quarks, in Form zweier Paare. Bisher gab es zwar Hinweise darauf, dass dieser Prozess tatsächlich stattfindet, ein belastbarer Nachweis fehlte aber noch. Den haben die beiden Detektoren nun erbracht.

„Die Suche nach Ereignissen mit vier Top-Quarks ist eine echte Herausforderung, aber sie lohnt sich“, sagt Freya Blekman, leitende Wissenschaftlerin bei DESY und Professorin an der Universität

Hamburg. Blekman untersucht die Entstehung von vier Top-Quarks seit der Inbetriebnahme des LHC im Jahr 2010. Jedes Top-Quark zerfällt in ein W-Boson und ein Bottom-Quark, und jedes Quark erzeugt einen charakteristischen Teilchenstrahl, einen sogenannten Quark-Jet. Das W-Boson wiederum kann entweder ein geladenes Lepton und ein Neutrino oder zwei Quark-Jets erzeugen. Leptonen sind eine Klasse von Teilchen, zu denen das Elektron gehört. Für die Forscherinnen und Forscher bedeutet dies, dass eine Vielzahl von Messungen auf den Zerfall von vier Top-Quarks hinweisen kann – Ereignissen mit null bis vier geladenen Leptonen und mit bis zu zwölf Jets. Vier-Top-Quark-Ereignisse zu finden, ist also sehr kompliziert.

Methoden des maschinellen Lernens

Deshalb verwenden alle ATLAS- und CMS-Analysen, die nach vier Top-Quarks suchen, Algorithmen der künstlichen Intelligenz, um die Vier-Top-Quark-Ereignisse von dem uninteressanten „Untergrund“ der anderen Top-Quark-Ereignisse zu unterscheiden. Blekman und ihr Team arbeiteten dabei an den schwierigsten Endzuständen mit null, einem oder zwei Leptonen. „Es ist uns gelungen, eine der technisch anspruchsvollsten Signaturen, die am LHC untersucht werden, mit einer Sicherheit von 3,9 Standardabweichungen nachzuweisen, das heißt mit einer Chance von nur eins zu 10 000, dass es sich um eine statistische Fluktuation handelt. Dies wäre ohne den Einsatz der Expertinnen und Experten für maschinelles Lernen nicht möglich gewesen.“

Durch seine hohe Masse ist das Top-Quark das Elementarteilchen mit der stärksten Beziehung zum Higgs-Boson, dem Teilchen, das allen anderen ihre Masse verleiht. Wie Blekman erläutert, könnten Abweichungen der Vier-Top-Quark-Häufigkeit von der theoretischen



„Die Suche nach Ereignissen mit vier Top-Quarks ist eine echte Herausforderung, aber sie lohnt sich“

Freya Blekman, DESY und Universität Hamburg

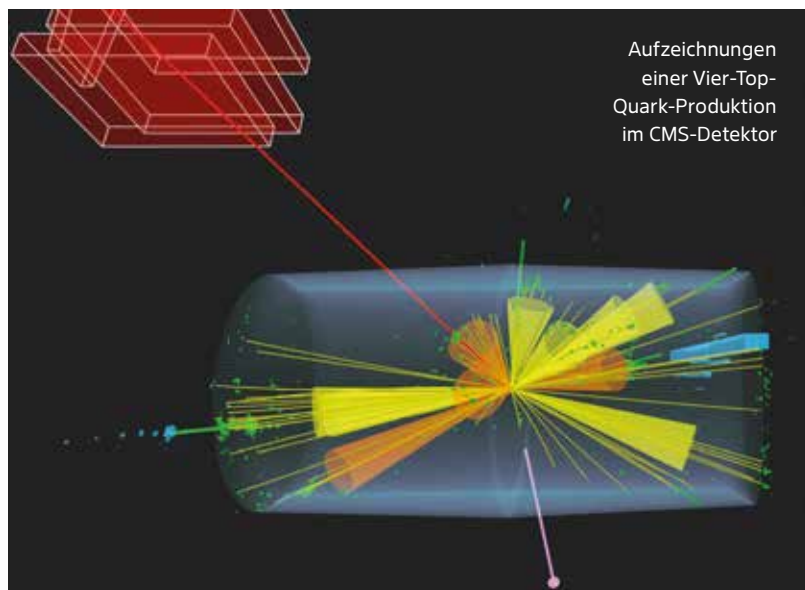
Vorhersage auf neue, unentdeckte Teilchen oder eine etwas andere Wechselwirkung zwischen dem Top-Quark und dem Higgs-Boson hinweisen. Daraus könnten sich auch Hinweise auf physikalische Kräfte und Teilchen jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik ergeben.

Suche nach neuer Physik

Das Standardmodell ist ein extrem erfolgreiches Theoriegebäude, das die uns vertraute Welt sehr gut beschreibt. Heute wissen wir jedoch, dass die uns bekannten Teilchen und Kräfte nur etwa fünf Prozent des Universums ausmachen. Die Teilchenphysik ist daher intensiv auf der Suche nach einem Tor zu den übrigen 95 Prozent, die sich in eine rätselhafte Dunkle Materie und eine mysteriöse Dunkle Energie aufteilen.

Interessanterweise übersteigt die Anzahl der Kollisionen, in denen vier Top-Quarks produziert werden, sowohl in den Messungen mit ATLAS, als auch in jenen mit CMS die Vorhersage des Standardmodells. Im Rahmen der noch großen Messunsicherheiten sind die Werte allerdings immer noch vollständig mit dem Modell vereinbar. Die Genauigkeit der Analyse soll sich deutlich verbessern, wenn mehr Daten hinzukommen. Daher bleibt die Produktion von vier Top-Quarks eines der spannenden Themen während der dritten Messzeit des LHC, die 2022 begonnen hat, und besonders in der sogenannten „High-Luminosity“-Phase des LHC, die Ende der 2020er-Jahre beginnen wird und in der der Teilchenbeschleuniger rund 20 Mal so viele Daten liefern soll wie heute.

arXiv: <https://arxiv.org/abs/2303.03864>



Aufzeichnungen einer Vier-Top-Quark-Produktion im CMS-Detektor

Erwünschter Lochfraß

Silber-Nanopartikel graben Tunnelsysteme in Silizium

Silber-Nanopartikel können Nanokanäle in makroporöses Silizium bohren und damit Silizium mit einem hierarchischen Porennetzwerk versehen. Die Visualisierung zeigt das reale poröse Material in Kombination mit einer Illustration der chemischen Ätzung und damit der Porenbildung entlang der Wege der Silberpartikel unter der Entwicklung von Wasserstoffbläschen in wässriger Lösung.

Im Autoverkehr ist das Verfahren gang und gäbe: Große Autobahnen sorgen für schnelle Verbindungen im Fernverkehr, über kleine Sträßchen und Wege erreicht man dagegen so ziemlich jeden Winkel des Landes – wenn auch deutlich langsamer. Die Forschung nennt das ein hierarchisches Netzwerk. Die Natur macht es vielfach vor, zum Beispiel in der Lunge oder in Pflanzen: Bronchien oder Netzwerke aus großen Kapillaren in Blättern ermöglichen einen schnellen Transport von Luft oder Wasser durch Gewebe, im Anschluss verzweigen sich die Kanäle immer weiter und enger bis hin zu den kleinen Lungenbläschen oder Poren, wo lokal wichtige Funktionen wie die Sauerstoffversorgung des Bluts oder die Photosynthese ablaufen. „Hierarchisch poröse Systeme“ heißen diese hocheffizienten Strukturen, die – in große wie kleine Einheiten aufgeteilt – großräumig verteilen oder lokal Funktionen ausüben können.

Ein Hamburger Forschungsteam hat nun ein Verfahren entwickelt, um Silizium und Glas mit einem Netz aus Poren unterschiedlicher Größe zu durchziehen. An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um Stella Gries und Patrick Huber von der Technischen Universität Hamburg und DESY die Porosität des Siliziums mit Hilfe der Röntgentomographie

analysieren. Das innovative Produktionsverfahren zur Herstellung von Mikro- und Nanokanälen ist gut steuerbar, sehr variabel und funktioniert auch für große Materialvolumina. Damit bringt es beste Voraussetzungen für den direkten Einsatz in der Industrie mit.

Verblüffender Antrieb

Das Forschungsteam um Gries beschichtete Siliziumwafer, die bereits mit geraden durchgehenden Kanälen von einem Mikrometer (tausendstel Millimeter) Durchmesser durchzogen waren, mit Silber-Nanopartikeln. Die 20 bis 60 Nanometer (millionstel Millimeter) großen Partikel werden auf der Oberfläche des Wafers abgeschieden. Als die Forscherinnen und Forscher

„Durch das Ätzen durchziehen wir den gesamten Kristall systematisch mit Nanoporen“

Stella Gries, TU Hamburg und DESY

die Wafer dann mit einer ätzenden Lösung aus Flusssäure und Wasserstoffperoxid in Verbindung brachten, startete ein faszinierender Prozess: Die Nanopartikel fraßen sich in das Silizium hinein und lösten den Siliziumkristall jeweils an den Kontaktflächen zwischen Silizium und Silberpartikeln auf.

Auf diese Weise graben sich die Silberpartikel immer weiter in den Festkörper und hinterlassen auf ihren Wegen feine Tunnelsysteme. Die kinetische Energie für den gerichteten Vortrieb der Partikel wird dabei von einer chemischen Zersetzungreaktion geliefert, also von der Umwandlung des Wasserstoffperoxids in Wasser und Wasserstoff und dem „Auffressen“ des Siliziums.

Die Silberpartikel fungieren hierbei wie kleine, autonome Agenten. Das resultierende Tunnelsystem organisiert sich automatisch zu der begehrten dreidimensionalen hierarchischen Porenstruktur.

Die Forschenden haben die Porosität des Siliziums mit Hilfe verschiedener Methoden untersucht. Mit röntgentomographischen Aufnahmen an PETRA III konnten sie dabei die innere Struktur nanometergenau auflösen. „Wir sehen, dass wir durch das Ätzen den gesamten Kristall systematisch mit Nanoporen durchziehen, die kleiner als 100 Nanometer sind“, sagt Gries, die dieses Verfahren in der Gruppe von Patrick Huber während ihrer Masterarbeit entwickelt hat und nun im Rahmen ihrer Promotion weiter erforscht.

Nanometergenau

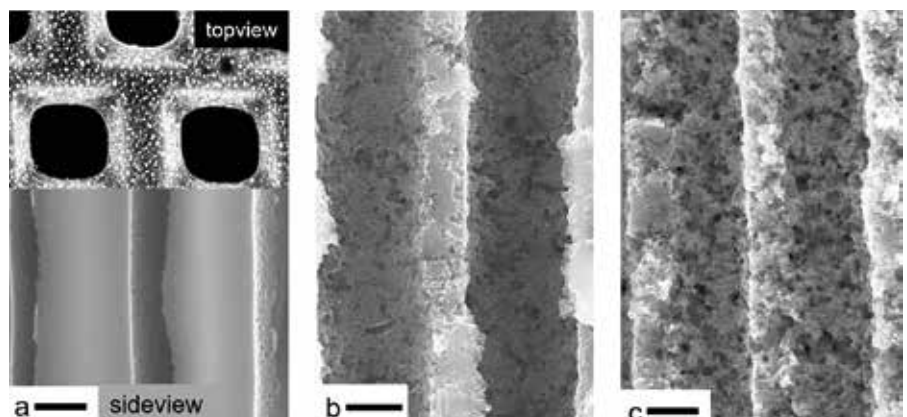
„Durch die Größe der Nanopartikel und die Dauer der Anwendung können wir genau steuern, wie tief das hierarchisch poröse System ausgehöhlt wird“, ergänzt Ko-Autor Manuel Brinker aus der Arbeitsgruppe. Bei langer Exposition durchdringen die Poren die parallel liegenden Hauptkanäle im Siliziumwafer und verbinden diese miteinander. Dabei sind die genauen Mechanismen, die zu der Bewegung der Partikel und damit zur Bildung der Kanalnetzwerke führen, bisher nur teilweise verstanden.

Manchmal bewegen sich die Teilchen beispielsweise auf Spiralbahnen, was zu spiralförmigen Nanokanälen im Silizium führen kann, manchmal ändern sie auch sprunghaft die Richtung, was eine Eigenrotation der Partikel vermuten lässt. Das so synthetisierte Porennetzwerk hat eine schwammartige Struktur und damit keine Vorzugsorientierung, im Gegensatz zu den großen Hauptkanälen. „Wir vermuten, dass die geometrische Form der Silber-Nanopartikel großen Einfluss auf die Art hat, wie sich die Teilchen ins Silizium fressen“, sagt Gries.

In einem weiteren Schritt erhitze das Forschungsteam das durchlöchernte Silizium in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre auf mehr als 800 Grad Celsius. Die Wände zwischen den Tunneln sind so dünn, dass das Silizium dabei vollständig zu Siliziumdioxid oxidiert – umgangssprachlich zu Glas. Zur großen Überraschung des Teams wurde die Kanalstruktur trotz der erheblichen atomaren Umordnungen und des Schwellens der Wände beim Einbau des Sauerstoffs nicht zerstört.

Schaltbares Glas

Die offenporige Struktur ermöglicht also die Umwandlung der Wafer zu hierarchisch porösem Glas. Dieses durch die Porenstruktur milchige, weiß reflektierende >>



Elektronenmikroskopische Aufnahme der einen Mikrometer großen Makroporen vor dem Ätzen sowie nach 20 und 45 Minuten Ätzeit

Material konnte das Team durch das Infiltrieren von Wasser durchsichtig machen. Man kann also sehr einfach die Lichtabsorption in dem Glas durch Befeuchten und Trocknen steuern, was beispielsweise für einfache, über Luftfeuchtigkeit schaltbare Fensterfunktionen genutzt werden könnte. Dabei wären solche smarten Gläser vergleichsweise schnell schaltbar, weil ein Befeuchten und Trocknen wegen der multiskaligen Transportwege schnell im ganzen Volumen erfolgen kann.

Insgesamt erwartet das Team vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, unter anderem in der Energietechnik. „Silizium hat nach wie vor das höchste Potenzial, um als Elektrodenmaterial für Lithium-Ionen-Akkus zu dienen“, erläutert Huber. „Unsere neue Ätzmethode bildet vielleicht die Grundlage für eine

„Unsere neue Ätzmethode bildet vielleicht die Grundlage für eine neue Generation von Akkuzellen“

Patrick Huber, DESY und TU Hamburg

neue Generation von Akkuzellen mit hoher Ladungsdichte und hoher Ladezyklenzahl, wenn sich herausstellt, dass nicht nur die Verglasung, also der Einbau von Sauerstoff, sondern auch der Einbau von Lithium durch die hierarchische Porosität der Siliziumkristalle strukturerhaltend erfolgt. In unporösem Silizium führt

diese Lithiierung meist zur Zerstörung des Materials.“

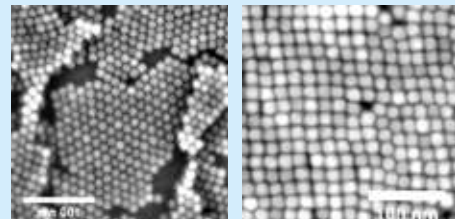
Die Entwicklung des Verfahrens, das inzwischen zum Patent angemeldet ist, fand im Rahmen des Zentrums für Integrierte Multiskalige Materialsysteme CIMMS und des Sonderforschungsbereichs 986 „Maßgeschneiderte multiskalige Materialsysteme“ statt, der an der Technischen Universität Hamburg angesiedelt ist. Im nächsten Schritt wollen die Forscherinnen und Forscher erkunden, wie die Parameter der Herstellung die Porosität beeinflussen und was genau die Silberpartikel beim Durchlöchern des Materials antreibt. Auch das Lithieren des hierarchisch porösen Siliziums soll dabei mit Kooperationspartnern untersucht werden.

Small, DOI: 10.1002/sml1202206842

LÖSUNGSMITTEL STEuert STRUKTUR VON NANOSCHICHTEN

Mit der Wahl des Lösungsmittels lässt sich die Struktur von Beschichtungen aus Nanopartikeln gezielt beeinflussen. Das zeigt eine Untersuchung unter Leitung des DESY-NanoLabs. Die Forscherinnen und Forscher hatten untersucht, wie sich Nanowürfel aus Magnetit (Fe_3O_4) während der sogenannten Rotationsbeschichtung („spin coating“) anordnen. Mit diesem unter anderem in der Halbleiterindustrie verwendeten Verfahren lassen sich sehr gleichmäßige Schichten auf einen Untergrund auftragen, indem eine Flüssigkeit zur Beschichtung auf den rotierenden Untergrund gesprüht wird.

Nanopartikel müssen für dieses Verfahren in einem Lösungsmittel aufgesprüht werden, das im Prozess der Beschichtung dann verdampft. Dabei bleiben je nach Lösungsmittel unterschiedliche Strukturen zurück, wie die Analyse mit dem Elektronenmikroskop zeigt. **„Mit dem Lösungsmittel Toluol ordnen sich die Nanowürfel beispielsweise in einem hexagonalen Muster an, bei Chloroform entsteht hingegen ein kubisches Muster“**, erläutert NanoLab-Leiter Andreas Stierle. Die Struktur hat direkte Folgen für die Eigenschaften der Beschichtung. So ist die dichter gepackte hexagonale Struktur in der Regel härter als die kubische.



Das Lösungsmittel steuert die Struktur und damit die Eigenschaften der Beschichtung: links eine hexagonale Anordnung der Nanowürfel, rechts eine kubische.

Die Nanopartikel umgibt in der Regel ein Film aus Ölsäure. Das ist eine Standardbehandlung, die dafür sorgt, dass sich die Partikel besser verbinden. Chloroform wechselwirkt stärker mit der Ölsäure, ihre Moleküle spreizen sich mehr, so dass diese die Form des Nanopartikels besser reproduzieren. So entsteht eine kubische Schicht. Mit Toluol hingegen ist die Wechselwirkung schwächer, die Nanopartikel sehen in ihrer Ölsäurehülle eher kugelförmig aus und bilden eine hexagonale Schicht.

Die verschiedenen Strukturen erinnern an jene, die Atome in einem Kristallgitter bilden, nur dass die Nanopartikel selbst winzige Kristalle sind. „Das ist ein typisches Bauprinzip, wie die Natur harte Beschichtungen herstellt, beispielsweise Perlmutt oder Zahnschmelz“, sagt Gerold Schneider von der Technischen Universität Hamburg. „Mit unserer Methode haben wir nun die Möglichkeit, Schichten mit gewünschten Eigenschaften zu erzeugen.“

Nanoscale, DOI: 10.1039/D2NR03043H

Salzige Eismonde

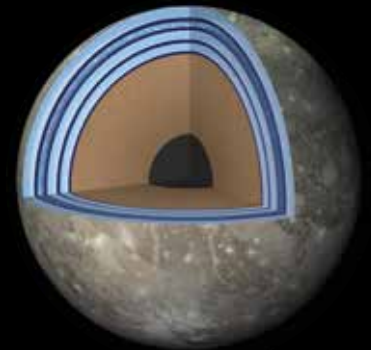
Neu entdecktes Kochsalzhydrat könnte Suche nach außerirdischem Leben den Weg weisen



Der Jupitermond Ganymed ist der größte Mond in unserem Sonnensystem und sogar größer als der Planet Merkur.

Gibt es Leben jenseits der Erde? Als aussichtsreiche Orte für die Fahndung nach außerirdischen Lebensformen gelten in unserem Sonnensystem die eisigen Monde der Riesenplaneten Jupiter und Saturn. Denn manche von ihnen besitzen große Ozeane unter ihren Eispanzern, wie die Messungen von Raumsonden gezeigt haben. Die Trabanten der Gasriesen im

äußeren Sonnensystem sind daher für die Forschung von besonderem Interesse. Ein internationales Forschungsteam um Baptiste Journaux von der Universität von Washington hat nun im Labor die Bedingungen auf den Eismonden nachgestellt und dabei zwei neue Formen von salzigem Eis entdeckt. Die Entdeckung könnte auch der Suche nach extraterrestrischem Leben nutzen. >>



Ganymed besitzt möglicherweise sogar mehrere Ozeanschichten in seinem Inneren, jeweils getrennt durch Eisschichten.

Man nimmt an, dass Eismonde wie Europa und Ganymed vom Jupiter oder Enceladus und Titan vom Saturn entstanden sind, indem sie Gas und Eispartikel ihrer Heimatplaneten aufgesammelt haben. „Es sind abgesehen von der Erde die ein-

Wasser so weit von der Sonne entfernt in den kalten Bezirken unseres Sonnensystems flüssig bleibt.“

Natürliches Frostschutzmittel

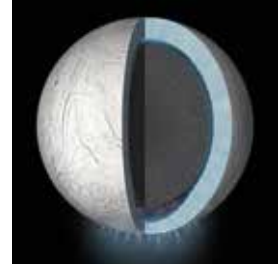
Vermutlich enthalten diese Ozeane Kochsalz (Natriumchlorid, NaCl), das als natürliches Frostschutzmittel den Gefrierpunkt des Wassers herabsetzt und es ihm so ermöglicht, auch bei frostigen Temperaturen noch flüssig zu bleiben, bei denen reines Wasser bereits gefrieren würde. Allerdings konnten die Planetenforscherinnen und -forscher das Kochsalz bisher selbst mit den ausgefeilten Methoden der Infrarot-Oberflächenspektroskopie der Raumsonden nicht eindeutig an der Oberfläche der Monde identifizieren. Keine der bekannten Verbindungen passt zu den Infrarotspektren der eisigen Mondoberflächen.

„Salz und Wasser sind unter den normalen Bedingungen sehr gut bekannt“, erläutert Journaux die möglichen Ursachen. „Aber darüber hinaus tappen wir völlig im Dunkeln. Jetzt beschäftigen wir uns mit diesen planetaren Objekten, die wahrscheinlich Verbindungen enthalten, die uns

„Damit können wir die am besten geeigneten Orte auf der Oberfläche der Monde finden, um sie auf außerirdisches Leben zu untersuchen“

Baptiste Journaux, Universität von Washington

zigen planetaren Körper, auf denen flüssiges Wasser über geologische Zeiträume hinweg stabil ist, was für die Entstehung und Entwicklung von Leben entscheidend ist“, erläutert Journaux. „Deshalb müssen wir ihre exotischen Ozeane und ihr Inneres untersuchen, um ihre Entstehung und Entwicklung besser zu verstehen und herauszufinden, wie ihr



Auf dem Saturnmond Enceladus wurden Eisvulkane entdeckt, die sich wahrscheinlich aus einem unterirdischen Ozean speisen und einen der Saturnringe erzeugen.

sehr vertraut sind, aber unter sehr exotischen Bedingungen. Wir mussten im Prinzip die gesamte mineralogische Grundlagenforschung aus dem 19. und frühen 20. Jahrhundert wiederholen, allerdings unter hohem Druck und niedriger Temperatur.“

Innere Struktur

Unter diesen Bedingungen kristallisiert das Wasser mit den darin gelösten Salzen und bildet sogenannte Hydrate. An der europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble (Frankreich) und bei DESY untersuchte das Team diese Kristalle mit Hilfe der Röntgenbeugung. Damit lässt sich die innere Struktur kristallisierter Materialien bestimmen, indem man sie mit Röntgenstrahlung beleuchtet und beobachtet, wie die Strahlung von der Probe gebeugt wird.

An der Oberfläche des Jupitermonds Europa wird es nur frostige -130 Grad Celsius warm. Messungen der Raumsonde „Galileo“ deuten jedoch darauf hin, dass sich unter einem kilometerdicken Eispanser ein 100 Kilometer tiefer Ozean befindet.

„Wir wollten herausfinden, welche Verbindungen sich unter dem hohen Druck und den niedrigen Temperaturen auf den Eismonden bilden“, berichtet Ko-Autorin Anna Pakhomova. „In unseren Experimenten haben wir die Einkristall-Röntgenbeugung eingesetzt, um zu verstehen, wie die neuen Hydrate auf atomarer Ebene organisiert sind. Das ist eine hervorragend geeignete Technik, um eindeutige Informationen über die Kristallstruktur eines Festkörpers zu erhalten.“

25 000-facher Atmosphärendruck

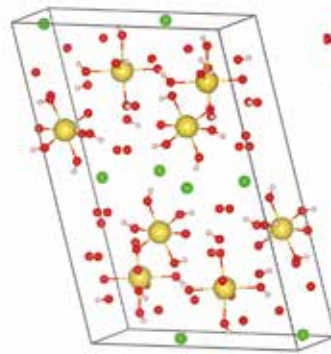
An der „Extreme Conditions Beamline“ von DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III stellten die Forscherinnen und Forscher die Bedingungen auf den Eismonden nach, indem sie die Proben aus Wasser und Kochsalz in einer sogenannten Diamantstempelzelle zwischen zwei winzigen Diamanten bis auf den 25 000-fachen Atmosphärendruck zusammenpressten und dabei in einem Kryostaten gekühlt hielten, einer Art wissenschaftlichem Tiefkühlschrank. Unter diesen Bedingungen kristallisierten die Proben

„Wir wollten herausfinden, welche Verbindungen sich unter dem hohen Druck und den niedrigen Temperaturen auf den Eismonden bilden“

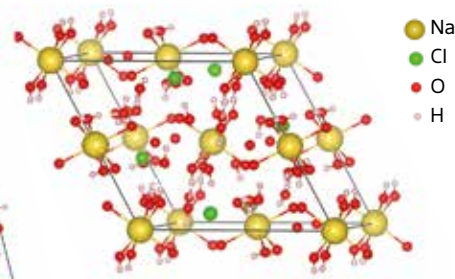
Anna Pakhomova, DESY und ESRF

und bildeten dabei bisher unbekannte Formen von Salzhydraten.

Bislang kannte die Wissenschaft nur ein einziges Kochsalzhydrat, eine Verbindung, bei der nur wenige Wassermoleküle im Kristallgitter eingeschlossen sind.



NaCl·8.5(H₂O)



NaCl·13(H₂O)

Innere Struktur der beiden neu entdeckten Kochsalzhydrate

● Na
● Cl
● O
● H

Es handelt sich um eine einfache Struktur mit einem Salzmolekül für je zwei Wassermoleküle. Die neuen Experimente enthüllten zwei neue, unterschiedliche Formen bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen, die beide einen viel größeren Wasseranteil in ihrer Struktur besitzen: In der einen kommen zwei Kochsalzmoleküle auf 17 Wassermoleküle, in der anderen ein Salzmolekül auf 13 Wassermoleküle. Diese Beobachtung kann erklären, warum die Infrarot-Signaturen auf der Oberfläche der Jupitermonde „wässriger“ sind als erwartet.

Stabil auf Mondoberflächen

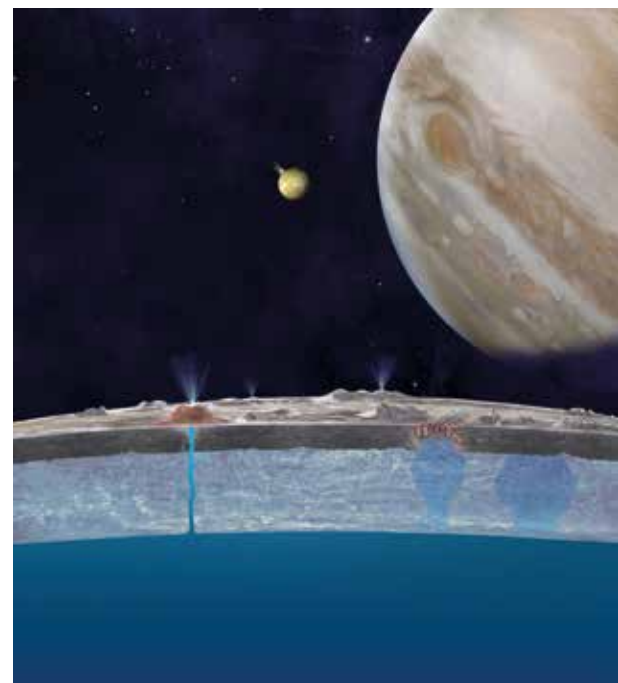
„Diese neuen Phasen sind faszinierend, weil sie eine unerwartete Vielfalt von Wasser-Salz-Kristallstrukturen bei hohem Druck und niedriger Temperatur zeigen, die auch für andere Verbindungen noch erforscht werden sollte“, sagt Journaux.

Das Team konnte auch zeigen, dass eines der neuen Salzhydrate, NaCl·8.5(H₂O), unter den Oberflächenbedingungen eisiger Monde stabil ist und das häufigste Salzhydrat auf eisigen Welten sein dürfte. „Es besitzt die Struktur, auf die Planetenforscher gewartet haben, um die mysteriösen Spektren eisiger Oberflächen zu erklären“, betont Journaux. „Damit können wir die am besten geeigneten Orte auf der Oberfläche der Monde finden, um sie auf außerirdisches Leben zu untersuchen und um dort einmal zu landen und zu graben.“

Als nächstes planen die Wissenschaftlerinnen und Wissen-

schaftler, andere Salzarten zu untersuchen, die für eisige Ozeanwelten relevant sind, und ihre spektralen Eigenschaften zu bestimmen, damit sie von Raumsonden wie dem jüngst gestarteten „Jupiter ICy moon Explorer“ (JUICE) der Europäischen Weltraumorganisation ESA oder dem geplanten „Europa Clipper“ der US-Raumfahrtbehörde NASA entdeckt werden können, die beide Anfang der 2030er Jahre in eine Jupiterumlaufbahn einschwenken sollen.

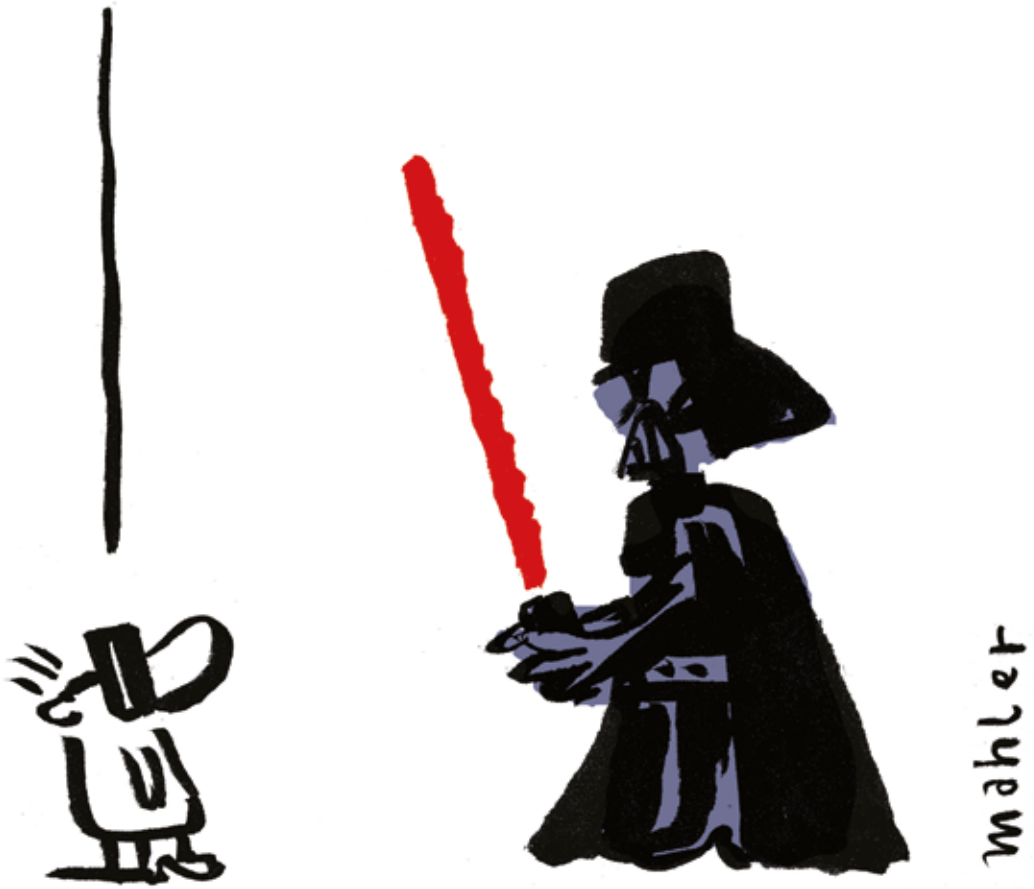
Proceedings of the National Academy of Sciences, DOI: 10.1073/pnas.2217125120



Forscherinnen und Forscher nehmen an, dass aus dem unterirdischen Ozean auf dem Jupitermond Europa Chloridsalze an die Oberfläche blubbern.

femtofinale

Und Sie sind **SICHER**,
dass ich danach ohne
Brille sehen kann?



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.)

Mit Beiträgen von

Frank Grotelüschen, Barbara Warmbein, Thomas Zoufal,
Joseph Piergrossi, Melissa Prass, Maike Bierbaum,
Till Mundzeck

Schlussredaktion

Ilka Flegel

Layout

Jutta Krüger

Titelgestaltung

Cristina Lopez Gonzalez

Artdirektion und Produktion

Diana von Ilseemann

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

Mai 2023

Bildnachweise

Seite 4/5: Science Photo Library, Van Ravenswaay/Detlev;
iStock, Михаил Руденко; Coronavirus Structural Task Force,
Thomas Splettstößer; NASA/JPL-Caltech

Seite 12/13: Theodor Maiman: commons.wikimedia: Unknown
(Associated Press), Public domain, via Wikimedia Commons;
stockphoto.com, ValentynVolkov; Luis Elias, CC BY 3.0; Simon
Fraser University/Communications, CC BY 2.0; Bengt Nyman,
CC BY 2.0.; stockphoto.com, FotografieLink; Marilyn Chung/
Berkeley Lab; H. N. Chapman, J. Hajdu et al.; Thorsten Naeser,
Max-Planck-Institut für Quantenoptik; DESY, Heiner Müller-Elsner

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie
femto kostenlos!

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.



HELMHOLTZ

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