

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 01/22



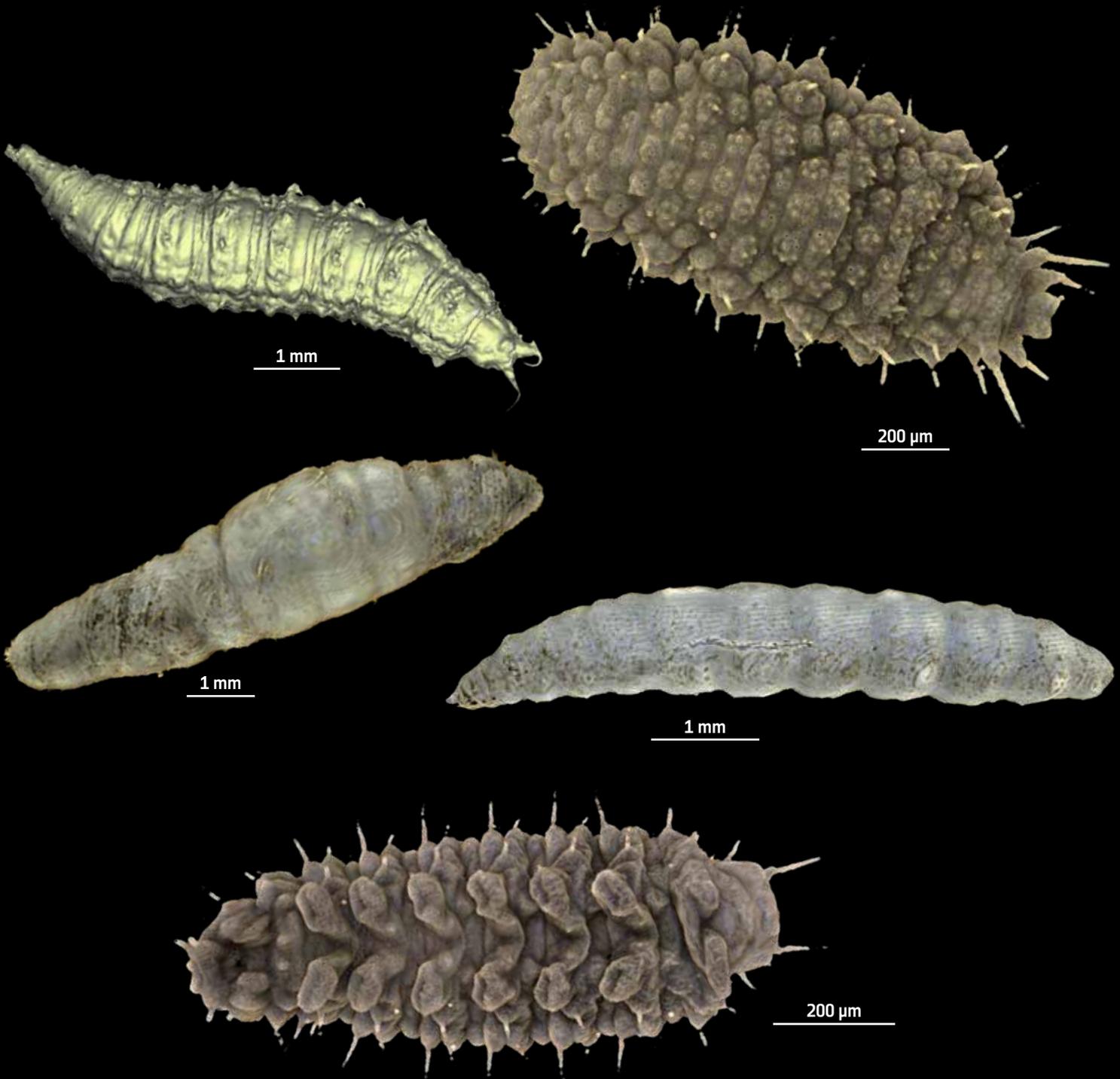
DIE ZWEITE QUANTEN REVOLUTION

Kosmische Chemie
im Labor

Coronavirus schädigt
Herzgefäße

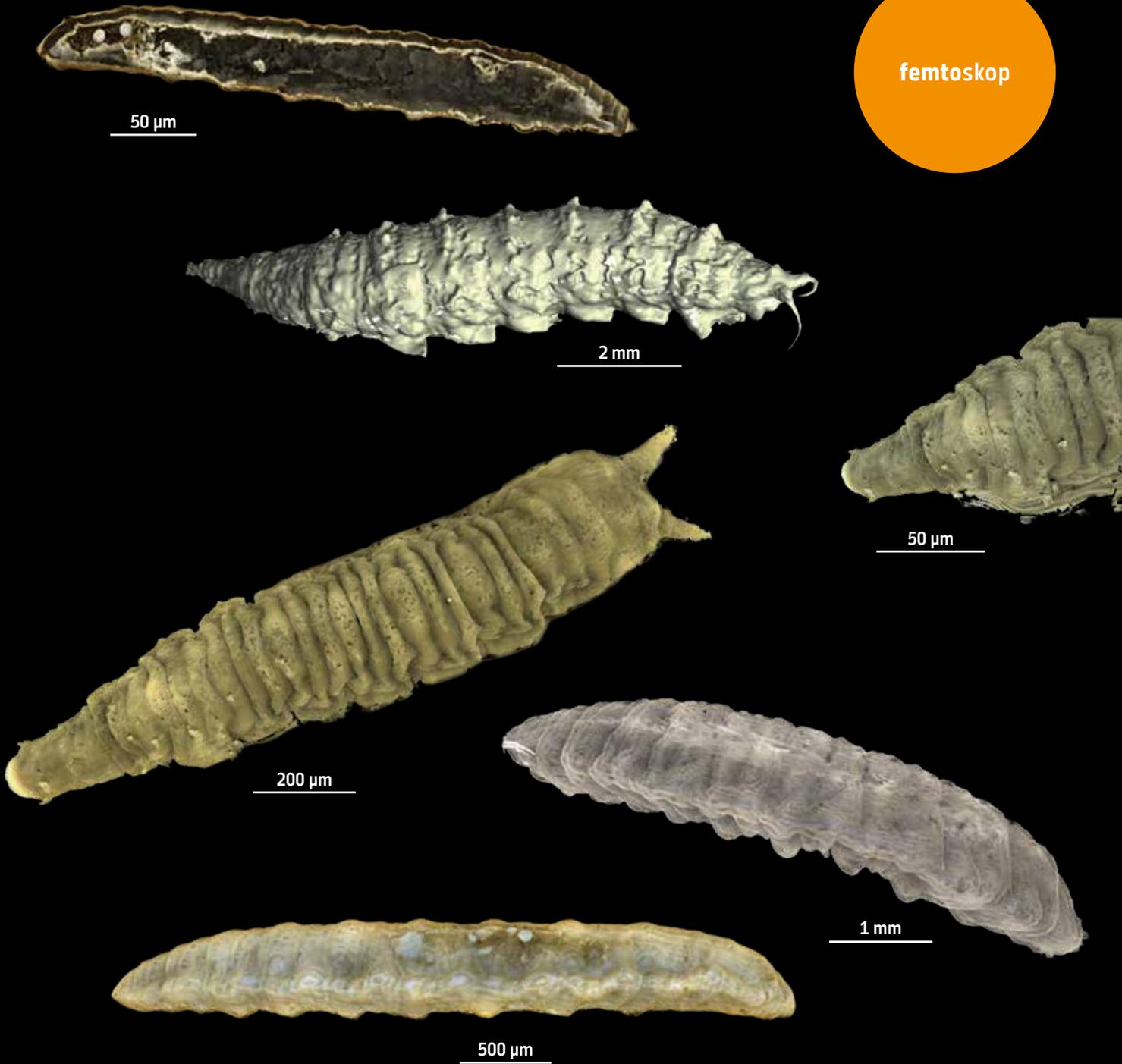
Strahlentierchen als
Konstruktionsvorbild





Computertomographie in Bernstein

Im späten Eozän – vor rund 38 bis 34 Millionen Jahren – bedeckte der baltische Bernsteinwald große Flächen im heutigen nördlichen Europa. Das Harz dieses Waldes ist die Quelle der meisten Bernsteinvorkommen in Europa. In einem baltischen Bernstein haben Forschende um Viktor Baranov und Joachim Haug von der Ludwig-Maximilians-Universität München eine überraschende Vielfalt an Fliegenlarven entdeckt – insgesamt 56 Larven, die offensichtlich auf einem Stück Säugetierkot sitzen. „Dieses Fossil ist besonders interessant, weil der Kot voller Pflanzenreste ist, was die Existenz vielleicht mittelgroßer Pflanzenfresser nahelegt“, sagt Baranov. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gehen deshalb davon aus, dass es offene Flächen mit Grasland gab, was frühere



Hypothesen unterstützt. „Der baltische Bernsteinwald war höchstwahrscheinlich kein dampfend dichter Dschungel, wie er oft dargestellt wurde, sondern ein viel offenerer, wärmtemperierter Lebensraum“, sagt Baranov.

Große Vielfalt

Mit dem hellen Röntgenlicht von DESYs Synchrotronstrahlungsquelle PETRA III untersuchte das Team die Larven im Detail und konnte extrem detaillierte Bilder der Urzeitfossilien aufnehmen. „Die Aufnahmen funktionieren im Prinzip wie bei einem Computertomographen, nur mit mikrometerfeiner Auflösung“, berichtet Ko-Autor Jörg Hammel vom Helmholtz-Zentrum Hereon. Dieses

betreibt die Messstation an PETRA III, an der die Aufnahmen gewonnen wurden. Ein Mikrometer ist ein tausendstel Millimeter. Insgesamt konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler 20 verschiedene sogenannte Morphotypen von Larven identifizieren, darunter 11 neue, die erst in dieser Studie beschrieben wurden. „Die große Vielfalt der Larven auf dem Kot deutet darauf hin, dass Fliegenlarven bereits im Bernsteinwald eine wichtige Rolle beim Recycling organischer Materie innehatten“, erläutert das Team im Fachblatt „Palaeontologia Electronica“, in dem es über seine Arbeit berichtet.

.....
Palaeontologia Electronica, DOI: 10.26879/1129

Inhalt

02 femtoskop

Computertomographie
in Bernstein

06 Covid-19 kann Gefäßschäden im Herz verursachen

Innovative Röntgenbildgebung
liefert ersten direkten Nachweis

08 Mit Hochdruck in den Erdmantel

Mineral-Zerfall löst rätselhafte
Geschwindigkeitsänderung von
Erdbebenwellen aus

09 „Es gibt noch sehr viele Fragen“

DESYs neue Teilchenphysik-
Direktorin Beate Heinemann



10 Kosmische Chemie im Labor

Forschungsteam simuliert
harsche Bedingungen des
interstellaren Raums

ZOOM

12 Die zweite Quantenrevolution

Wie die gezielte Kontrolle
von Quantenphänomenen
unsere Welt verändert

17 Ganz neue Möglichkeiten

Die Quantenrevolution 2.0
wird im Alltag ankommen, sagt
DESY-Direktor Helmut Dosch

19 Die Qubits von Bahrenfeld

Ein Quantencomputer auf Basis
schwebender Atome

21 Feinsinnige Fühler

Quantensensoren eröffnen
den Blick aufs Unbekannte

25 Verblüffende Eigenschaften

Quantenmaterialien ermöglichen
neue Anwendungen

28 Quanten-Dompteure

Ausgefeilte Tricks ermöglichen
Choreografie von Quantensystemen

30 femtopolis

Quantentechnik holt
Science Fiction ein

31 Flagship-Programm

Tommaso Calarco hat die
milliardenschwere Förderung
der EU mit initiiert

32 Disruptives Potenzial

Enorme Perspektiven für
Wirtschaft und Gesellschaft

34 Spektrum

Nachrichten aus der Forschung

37 femtomenal

46 600 000 000 Lichtjahre Horizont

38 Vorbild Strahlentierchen

Eine ungewöhnliche Allianz
stellt schwere Magnete
auf neuartige Beine

42 Quantenphysik in Proteinen

Künstliche Intelligenz liefert
neue Einblicke in die Funktion
von Biomolekülen

44 femtofinale

Wissenschaftliche Sinfonie



12



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

wie oft haben Sie heute Quantentechnologien benutzt? Der Blick aufs Smartphone, der Laserscanner an der Supermarktkasse, der Mikrowellenofen in der heimischen Küche – Quantentechnologien sind allgegenwärtig. Die Quantenphysik hat in den vergangenen rund 120 Jahren unser Weltbild ebenso revolutioniert wie unseren Alltag. Und nebenbei einen Multi-milliarden-Markt geschaffen.

Quantentechnologien der ersten Generation wie Transistoren und Laser machen sich gezielt bestimmte Quantenphänomene zunutze. Inzwischen erleben wir den Auftakt einer zweiten Quantenrevolution: Nach dem Verständnis von Quantenphänomenen haben Forscherinnen und Forscher gelernt, diese gezielt zu kontrollieren.

Die Erwartungen an die resultierenden Quantentechnologien der zweiten Generation sind groß: Quantencomputer sollen bislang unlösbare Big-Data-Auswertungen bewältigen, ebenso KI-Simulationen, Finanzmarktanalysen oder Verkehrssteuerung. Die Quantenkommunikation soll das Internet schneller, Daten sicherer und die Navigation viel genauer machen. Und Quantensensoren sollen große, teure Geräte wie etwa Magnetenzephalographen auf handliches Format schrumpfen, so dass sie beispielsweise direkt zum Patienten gebracht werden können.

In dieser Ausgabe lesen Sie, wie Forscherinnen und Forscher mit Quanten jonglieren, welche Anwendungen der Quantentechnologien 2.0 bereits erkundet werden und wo noch Herausforderungen liegen. 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



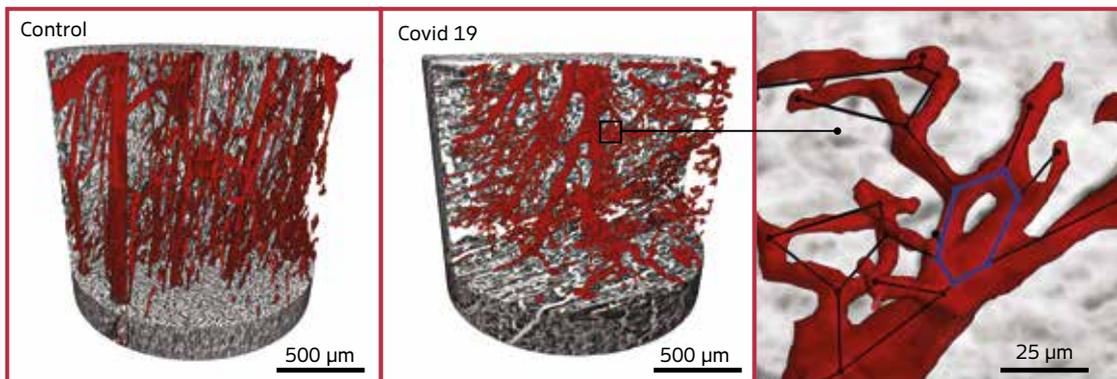
09



38

Covid-19 kann Gefäßschäden im Herz verursachen

Innovative Röntgenbildgebung liefert ersten direkten Nachweis



Gefäßnetzwerk (rot) im gesunden Herzgewebe (links) und bei schwerem Verlauf von Covid-19 (rechts). Durch fehlgeleitete Neubildung des Netzwerks in Folge von Covid-19 entstehen zahlreiche Verzweigungen, Verästelungen und sogar Schlaufen in den Kapillaren, die sich mathematisch durch Grafen analysieren lassen.

Das Coronavirus greift nicht nur die Lunge an, sondern kann auch im Herz die Gefäße schädigen. Ein interdisziplinäres Forschungsteam unter Leitung der Universität Göttingen und der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) hat mit Hilfe von DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III wesentliche Veränderungen im Herzmuskelgewebe von Menschen nachgewiesen, die an Covid-19 gestorben sind. Die Studie untermauert die Beteiligung des Herzes bei Covid-19 erstmals auf zellulärer Ebene durch eine Visualisierung und Analyse des betroffenen Gewebes in drei Dimensionen.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bildeten für ihre Studie die Gewearchitektur mit Hilfe der besonders brillanten Röntgenstrahlung von PETRA III in hoher Auflösung ab und stellten sie dreidimensional dar. Dazu nutzten sie ein spezielles Röntgenmikroskop, das die Universität Göttingen bei DESY errichtet hat und betreibt.

In den untersuchten schweren Krankheitsverläufen von Covid-19 beobachteten sie damit starke Veränderungen auf der Ebene feinsten Gefäße, der sogenannten Kapillaren, im Herzmuskelgewebe.

Chaotisch umgebautes Netzwerk

Im Vergleich zum gesunden Herz zeigte sich hier ein durch Neubildung und Aufspaltung der Gefäße chaotisch umgebautes Netzwerk voller Abspaltungen, Verzweigungen und Schlaufen. Diese Aufnahmen sind der erste direkte visuelle Nachweis einer speziellen Form der Gefäßneubildung im Gewebe, der sogenannten intussuszeptiven Angiogene, einer der Haupttreiber der bekannten und bereits gut untersuchten Lungenschädigung bei Covid-19. Um das Kapillarnetzwerk zu visualisieren, mussten die Gefäße im dreidimensionalen Volumen mit Methoden des maschinellen Lernens erst identifiziert werden. Dies erforderte zunächst eine aufwendige Markierung der Bilddaten.

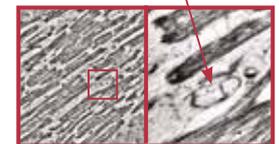
Gesundes Gewebe



Covid-19

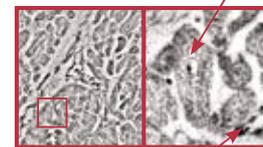


Säulenstruktur



Herzgewebe im gesunden Zustand (links) und bei schwerem Verlauf von Covid-19 (rechts). Während die Gefäße im gesunden Fall eine intakte Struktur zeigen (links unten), erkennt man in den feinen Gefäßen (Kapillaren) bei der Covid-19-Gewebeprobe Einstülpungen und säulenartige Strukturen, die auf bestimmte morphologische Umwandlungsprozesse der Gefäße hinweisen.

Zellkern



Kapillare

UNERREICHTE EINBLICKE INS HIRN VON ALZHEIMER-PATIENTEN

„Um die Bildverarbeitung zu beschleunigen, haben wir deshalb die Gewebearchitektur auch automatisiert in ihre lokalen Symmetriemerkmale zerlegt und dann verglichen“, erklärt Hauptautor Marius Reichardt von der Universität Göttingen. Die daraus gewonnenen Parameter zeigten dann im Vergleich zu gesundem Gewebe und Erkrankungen wie schwerer Influenza und gewöhnlicher Herzmuskelentzündung eine völlig andere Qualität, wie die Studienleiter Tim Salditt von der Universität Göttingen und Danny Jonigk von der MHH berichten.

Das Besondere an dieser Studie: Im Gegensatz zur Gefäßarchitektur ließ sich die notwendige Datenqualität schon an einer kompakten Röntgenquelle im Labor der Universität Göttingen erreichen – dies könnte im Prinzip auch in jeder Klinik realisiert werden, um Pathologinnen und Pathologen in der Routinediagnostik zu unterstützen. Den Ansatz, die charakteristi-

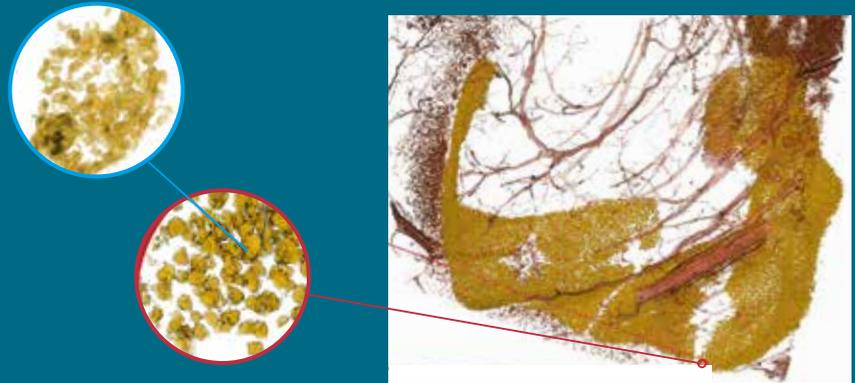
„Wir haben die Gewebearchitektur automatisiert zerlegt und verglichen“

Marius Reichardt, Universität Göttingen

schen Gwebemuster in abstrakte mathematische Auftragungen umzuwandeln, wollen die Forscherinnen und Forscher in Zukunft weiter ausbauen, um automatisierte Werkzeuge für die Diagnostik zu entwickeln, wiederum durch Weiterentwicklung der Labor-Röntgenbildgebung und Validierung mittels Synchrotronstrahlung von PETRA III. Die Zusammenarbeit mit DESY wird dazu in den kommenden Jahren weiter ausgebaut.

eLife, DOI: 10.7554/eLife.71359

Bild: Universität Göttingen, M. Eckermann/T. Salditt



Neuronale Zellkerne der sogenannten *Dentus gyratus* (gelb) und dazugehörige Blutgefäße (rot). Durch unterschiedliche Vergrößerung der Röntgenoptik kann man in das dicht gepackte Band von Neuronen hineinzoomen (im roten Oval) und darüber hinaus die Substruktur des Zellkerns auflösen (blaues Oval, ca. 0,015 Millimeter Durchmesser).

Mit Hilfe innovativer Röntgenbildgebung lassen sich nicht nur Gefäßschäden durch Covid-19 erkennen, sie bietet auch neue Einsichten in das Hirngewebe von Alzheimer-Patienten. Die Forscherinnen und Forscher der Universität und der Universitätsmedizin Göttingen beschränkten dazu einen neuen Weg, um die neuronale Gewebearchitektur mit Hilfe von DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III dreidimensional und hochaufgelöst zu analysieren. Dabei konnte das Team in Gewebeproben einen bislang unbekanntem Übergang in neuronalen Zellkernen von Alzheimer-Patienten nachweisen, der auf eine veränderte Aktivität der Neuronen hinweist.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchten Nervengewebe aus dem Hippocampus, einer Hirnregion, in der Erinnerungen aus dem Kurzzeit- in das Langzeitgedächtnis überführt werden. Dabei verwendeten sie einen speziellen Phasenkontrast-Tomographen, den das Team um Tim Salditt an PETRA III aufgebaut hat und mit dem sich auch Gewebe abbilden lassen, die Röntgenstrahlung nur schwach oder sogar gar nicht absorbieren. So konnten ganze Volumina zerstörungsfrei und ohne aufwendige Präparation vollständig erfasst werden. „Dazu muss das dreidimensionale Bild

aus optisch stark vergrößerten Projektionen erst durch spezielle Algorithmen auf dem Computer scharfgestellt werden, um ein dreidimensionales Bild mit Pixelgrößen im Bereich von einem zehntausendstel Millimeter zu erhalten“, erklärt die Göttinger Hauptautorin Marina Eckermann. In diesem „digitalen Zwilling“ der Probe lassen sich dann durch maschinelles Lernen Neuronen identifizieren, die erregbaren Zellen der Nervenreizleitung. Mit neuen mathematischen Methoden, die Bernhard Schmitzer an der Universität Göttingen entwickelt, verglich das Team Proben verschiedener Individuen.

„Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Zellkerne in einem Teilbereich des Hippocampus bei Alzheimer zu einer kompakten und heterogenen Struktur hin verändern“, berichtet Salditt. „Das führt zu einem höheren Anteil von dicht gepackter DNA im Zellkern und dazu, dass die DNA weniger häufig ausgelesen wird“, ergänzt Christine Stadelmann-Nessler von der Göttinger Universitätsmedizin. „Ob die beobachteten Veränderungen im Zellkern auch eine ursächliche Rolle bei der Erkrankung spielen, bleibt noch offen.“

Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS),

DOI: 10.1073/pnas.2113835118



Die 4,5 Meter hohe und 35 Tonnen schwere Riesenstempelzelle kann auf jeder ihrer drei Achsen einen Druck von 500 Tonnen ausüben, das entspricht dem 300 000-fachen atmosphärischen Druck oder den Druckverhältnissen 900 Kilometer tief unter dem Erdboden. Dabei lassen sich die Proben mit dem hellen Röntgenlicht von PETRA III durchleuchten und geben so ihre innere Struktur preis.

Mit Hochdruck in den Erdmantel

Mineral-Zerfall löst rätselhafte Geschwindigkeitsänderung von Erdbebenwellen aus

In einer Tiefe von 660 Kilometern unter der Erdoberfläche ändern Erdbebenwellen abrupt ihre Geschwindigkeit. Diese sogenannte seismische Diskontinuität ist eine der auffälligsten Strukturgrenzen im Erdmantel. Aus bislang unbekannter Ursache spaltet sich diese Strukturgrenze mancherorts jedoch in zwei Diskontinuitäten auf: Dort, wo ozeanische Kruste unter kontinentale Kruste abtaucht, liegen Diskontinuitäten im Bereich von 660 bis 670 Kilometern und von 740 bis 750 Kilometern Tiefe.

Mit Hochdruck-Experimenten hat ein Forschungsteam unter Leitung der Universität Bayreuth nun die Bedingungen in den abtauchenden Erdplatten nachgestellt und die Proben dabei mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III und der japanischen Röntgenquelle SPring-8 durchleuchtet. Die Untersuchung liefert eine Erklärung für das rätselhafte Phänomen: Für die Aufspaltung der Strukturgrenze sorgt demnach die Umwandlung eines speziellen Minerals.

Auch für die gewöhnliche seismische Diskontinuität am Übergang vom oberen zum unteren Erdmantel in etwa 660 Kilometern Tiefe ist die Umwandlung eines Minerals verantwortlich: Dort zerfällt Ringwoodit, das sich aus Magnesium, Eisen, Silizium und Sauerstoff zusammensetzt, in die Minerale Bridgmanit und Ferroperiklas. Infolgedessen

können sich seismische Wellen schneller fortpflanzen.

Die Aufspaltung dieser Strukturgrenze in zwei Diskontinuitäten zeigt sich nur unterhalb sogenannter kalter Subduktionszonen – Bereiche abtauchender Erdplatten, in denen es immer noch glühend heiß, aber deutlich kühler ist als in den normalen Subduktionszonen. Für die Aufspaltung der Strukturgrenze unter diesen Zonen kann der Zerfall von Ringwoodit allerdings nicht verantwortlich sein. Denn er ist weitgehend unabhängig von der Temperatur und ereignet sich daher stets unter einem Druck, wie er in einer Tiefe von rund 660 Kilometern herrscht.

Plausible Erklärung

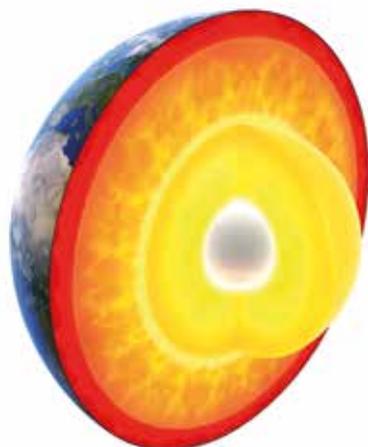
Die Forscherinnen und Forscher um Hauptautor Artem Chanyshv von DESY und der Universität Bayreuth haben daher das Verhalten eines

anderen Minerals untersucht:

Akimotoit kommt hauptsächlich in den kühleren Bereichen der Übergangszone zum unteren Erdmantel vor und wird auch in Bridgmanit umgewandelt. „Wir haben Mineralproben in unserer Riesenstempelzelle zusammengedrückt und erhitzt und dabei mit Röntgenlicht durchleuchtet“, erläutert Ko-Autor Robert Farla, Leiter der Messstation bei DESY, an der die Experimente stattfanden. „Auf diese Weise lassen sich Strukturänderungen in den Mineralen unter Bedingungen des Erdmantels verfolgen.“

Die Experimente zeigen eine unerwartet starke Temperaturabhängigkeit des Phasenübergangs von Akimotoit zu Bridgmanit: Je niedriger die Temperatur ist, desto höher muss der Kompressionsdruck sein. Der höhere Druck wird aber erst in einer größeren Tiefe erreicht. Bereits ein vergleichsweise geringes Absinken der Temperatur führt also dazu, dass sich der Phasenübergang von Akimotoit zu Bridgmanit deutlich tiefer ins Erdinnere verlagert.

„Die sehr auffällige seismische Diskontinuität in einer Tiefe von 740 bis 750 Kilometern unterhalb kalter Subduktionszonen kann auf der Grundlage unserer Experimente plausibel durch den Phasenübergang von Akimotoit zu Bridgmanit erklärt werden“, erläutert Chanyshv.



Nature, DOI: 10.1038/s41586-021-04157-z

„Es gibt noch sehr **viele Fragen**“

Die Physikprofessorin Beate Heinemann ist seit Jahresbeginn 2022 Forschungsdirektorin für Teilchenphysik bei DESY. DESYs erste Direktorin möchte junge Forscherinnen ermutigen und blickt gespannt auf mögliche revolutionäre Entdeckungen in der Zukunft.

femto: Sie sind die erste Frau im Direktorium in mehr als 60 Jahren DESY-Geschichte. Wieso hat das so lange gedauert?

Beate Heinemann: Naja, das ist ja auch in vielen anderen Organisationen der Fall, dass es 50 Jahre oder länger gedauert hat, und es gibt immer noch sehr viele, die noch nie eine Frau in den obersten Etagen hatten. Wir sind in der Gesellschaft leider immer noch weit entfernt von einer echten Gleichstellung von Frauen und Männern, aber immerhin geht es voran, wenn auch etwas langsamer, als ich es mir wünschen würde. Als ich meine Doktorarbeit hier bei DESY gemacht habe, gab es wesentlich weniger herausragende Frauen in allen Bereichen des öffentlichen Lebens, auch in der Wissenschaft. Ich hoffe sehr, dass die nächste Frau im DESY-Direktorium relativ bald kommt und nicht erst in weiteren 60 Jahren!

femto: Sehen Sie sich als Vorbild für andere Forscherinnen?

Beate Heinemann: Ich glaube, das kann ich gar nicht verhindern. Wenn man als eine von relativ wenigen Frauen in einer exponierten Position ist, ist man de facto ein Vorbild, ob man will oder nicht. Im Rückblick waren eigentlich alle Frauen in der Forschung, denen ich begegnet bin,

für mich Vorbilder. Und kaum etwas würde mich glücklicher machen, als wenn meine Präsenz in irgendeiner Weise dazu beitragen könnte, junge Forscherinnen zu ermutigen, sich einzubringen und ihre Meinungen zu vertreten.

femto: Sie sind Direktorin für Teilchenphysik. Was sind die zentralen Fragen der Teilchenphysik für die nächsten Jahre?

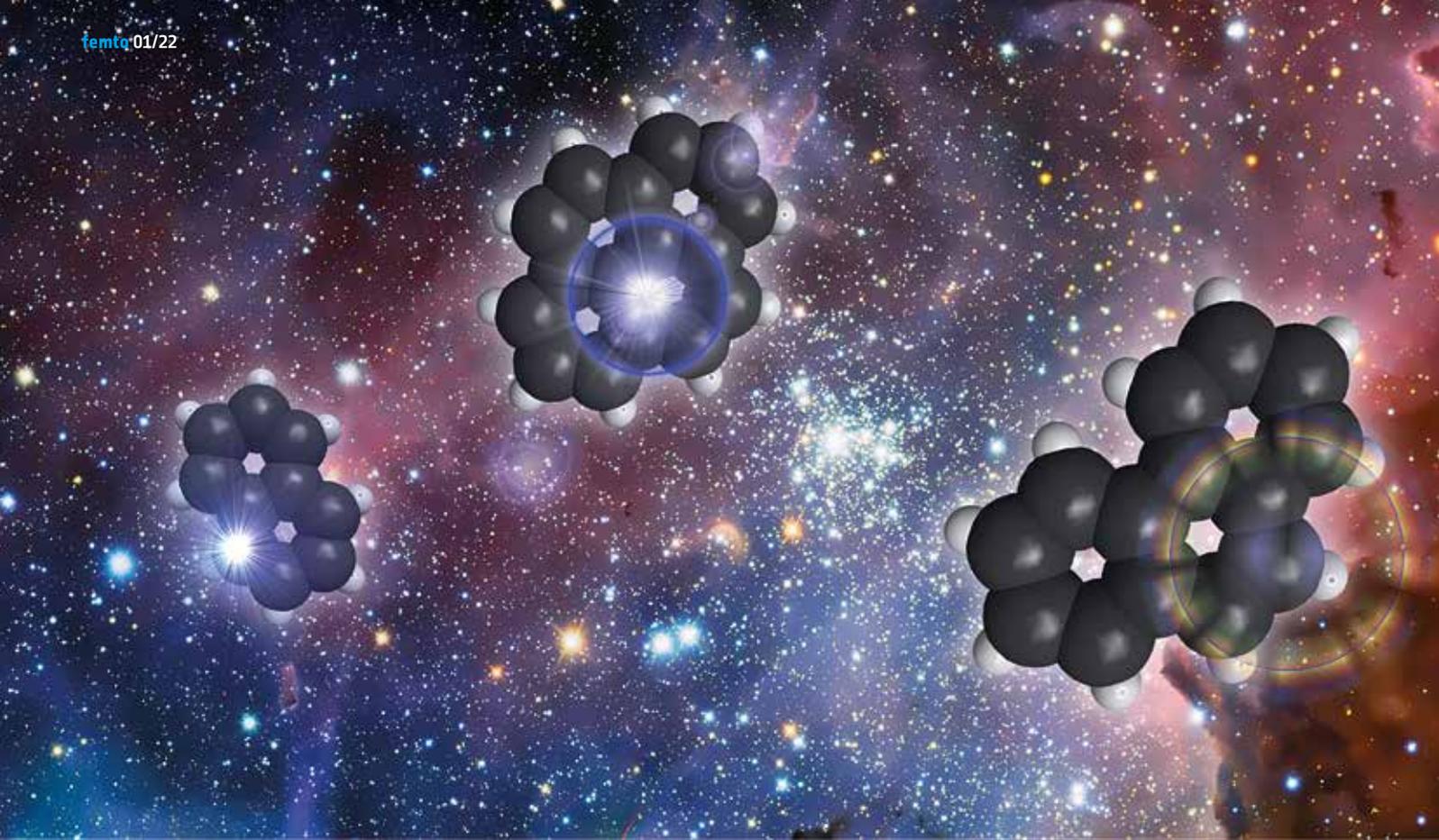
Beate Heinemann: Das größte und wichtigste Projekt der Teilchenphysik ist nach wie vor der Large Hadron Collider am CERN. Wir sind bei DESY sehr stark an den Analysen beteiligt, aber auch am Betrieb der Detektoren ATLAS und CMS sowie bei Software-Entwicklung und Computing. Der LHC kann im Prinzip zu sehr vielen fundamentalen Fragen Antworten liefern, etwa worum es sich bei Dunkler Materie handelt, was die Struktur des Vakuums ist, warum es verschiedene Arten von Materie gibt und vieles mehr. Die derzeit vielleicht spannendsten Ergebnisse gibt es aber in der sogenannten B-Physik, wo gemessen wurde, dass sich zwei verschiedene Arten Elementarteilchen, Elektronen und Myonen, etwas anders verhalten als erwartet. Wenn diese Hinweise stimmen, müssten noch andere neue Teilchen oder Kräfte am Werk sein. Ganz wichtig ist hier auch unsere Arbeit am Experiment Belle II in Japan. Auch nach Dunkler Materie kann nicht nur am LHC gesucht werden. Bei DESY haben wir ein Axion-Programm, das mit dem Experiment ALPS II richtig losgeht. Axionen sind hypothetische leichte Teilchen, aus denen die Dunkle Materie bestehen könnte. Später sollen

weitere Axion-Experimente hinzukommen. Und dann planen wir noch LUXE, ein Experiment, bei dem wir die Quantenphysik in extrem starken elektromagnetischen Feldern studieren wollen. Das war schon der Traum von Werner Heisenberg in den 1930er Jahren, aber erst jetzt ist dies technisch überhaupt möglich.



femto: Vor zehn Jahren wurde das Higgs-Teilchen gefunden. Was könnte der nächste große Durchbruch der Teilchenphysik sein?

Beate Heinemann: Das ist natürlich sehr spekulativ! Es gibt noch sehr viele Fragen und Ungereimheiten, und die Energieskala, die wir beispielsweise am LHC erreichen, ist vermutlich der Schlüssel zu einigen Antworten. Ich finde es sehr spannend, dass wir in Regionen vorstoßen, die noch nie ein Mensch untersucht hat. Das hat schon in der Vergangenheit häufig zu revolutionären Entdeckungen geführt, und ich bin überzeugt, dass das auch in Zukunft passieren wird.



Kosmische Chemie im Labor

Forschungsteam simuliert harsche Bedingungen des interstellaren Raums

Kohlenstoffverbindungen spielen in unserer Welt eine besondere Rolle: Die gesamte Chemie des Lebens beruht auf diesen sogenannten organischen Molekülen. Im Weltall ist ein Großteil des Kohlenstoffs in einer Gruppe einfacher Verbindungen enthalten, den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Mit DESYs Freie-Elektronen-Laser FLASH haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler jetzt einen Teil der harschen Umweltbedingungen des interstellaren Raums im Labor nachgestellt und die Reaktion dieser astrochemisch wichtigen Moleküle darauf analysiert.

Die Ergebnisse fördern das Verständnis der organischen Chemie im Weltraum, betont das internationale Team um Bastian Manschwetus

und Melanie Schnell von DESY. Die organische Chemie befasst sich mit Reaktionen, Zusammensetzung und Eigenschaften von Molekülen, die Kohlenstoff (C) enthalten. PAK sind eine wichtige Gruppe grundlegender organischer Verbindungen und bestehen aus Kohlenstoff und Wasserstoff (H). Die Messungen zeigen ein umfassendes Bild der Dynamik polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe unter extremer ultravioletter Strahlung im Vakuum – ähnlich wie im Raum zwischen den Sternen unserer Galaxie.

Weniger als eine billionstel Sekunde

„Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe sind in fast jedem Winkel des Universums zu finden und enthalten bis zu 20 Prozent

des gesamten Kohlenstoffs im Weltraum“, erläutert DESY-Forscher Jason Lee, einer der Hauptautoren der Studie. „Diese Moleküle spielen eine wichtige Rolle in der interstellaren Chemie: Unter anderem dienen sie als Grundlage für Reaktionen, formen größere Moleküle wie Fullere und zerfallen in Bausteine für andere organische Moleküle. Mit unserer Arbeit wollten wir die Reaktionsdynamik von PAK nach der Wechselwirkung mit der ionisierenden Strahlung im interstellaren Raum besser verstehen lernen.“

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchten die Reaktion der drei kleinen PAK Fluoren ($C_{13}H_{10}$), Phenanthren ($C_{14}H_{10}$) und Pyren ($C_{16}H_{10}$) auf die extrem-ultraviolette (XUV) Strahlung von FLASH. Die XUV-Blitze

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind Verbindungen, die aus Kohlenstoffringen (schwarz) mit einer unterschiedlichen Anzahl von Wasserstoffatomen (grau) bestehen. Infrarotmessungen zeigen, dass diese Moleküle im Weltraum allgegenwärtig sind.

wurden dazu auf eine Wellenlänge von 30,3 Nanometern abgestimmt, die einer wichtigen Emissionslinie von Helium im interstellaren Raum entspricht. Zum Vergleich: Sichtbares Licht hat Wellenlängen zwischen 400 und 800 Nanometern.

Die extrem-ultravioletten Photonen können bis zu drei Elektronen aus einem PAK-Molekül heraus schlagen, was zu einem stark ionisierten Zustand führt. Mit einem Spezialinstrument, der CAMP-Messstation, und einer superschnellen Kamera, PimMS, konnte das Team die komplexe Fragmentierungs- und Ionisierungsdynamik der Moleküle entschlüsseln. Die Analyse zeigt, dass alle untersuchten PAK ihren nach der Absorption der energiereichen Strahlung hochangeregten Zustand extrem schnell wieder verlassen. Dazu wandeln sie die aufgenommene Energie bereits in deutlich weniger als einer billionstel Sekunde (Pikosekunde) in atomare Bewegung um. Für diesen als Relaxation bezeichneten Vorgang hatten theoretische Modellrechnungen bereits in etwa die gleiche Zeitskala prognostiziert.

Doppelt geladen

Aus den Daten lassen sich Details zu den Reaktionen der PAK auf die intensive Strahlung ablesen: Werden beispielsweise durch ein XUV-Photon gleich zwei Elektronen aus einem PAK-Molekül herausgeschlagen, entsteht ein doppelt elektrisch positiv geladenes Ion. Solche Dikationen zerfallen den Experimenten zufolge bevorzugt in zwei Fragmente, die jeweils eine einzige elektrische Ladung tragen und daher Monokationen genannt werden. Häufig geht diese Aufspaltung in zwei Monokationen mit dem Verlust von zwei Kohlenstoffatomen (C_2) einher.



„PAK sind in fast jedem Winkel des Universums zu finden“

Jason Lee, DESY

Dies ist für die Astrochemikerinnen und -chemiker eine besonders spannende Beobachtung, denn sie spiegelt quasi die gegenwärtige Vorstellung von der ursprünglichen Entstehung der PAK. Nach dieser gängigen Vorstellung bauen sich die verschiedenen PAK-Moleküle nach und nach auf, indem sich schrittweise Acetylenmoleküle (C_2H_2) aneinanderfügen.

„Unsere Ergebnisse zeigen, dass die ultraschnelle Relaxation bei polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen eine allgemeine Eigenschaft sein könnte“, sagt Lee. Das Team wertet bereits weitere Experimente mit einer neuen Gruppe von PAK an FLASH aus, um diese Beobachtung zu bestätigen. Die Analyse der Fragmentierung dreifach geladener PAK-Moleküle (Triaktionen) ist so aufwändig, dass das Team in einem Folgeartikel darüber berichten wird.

Die Arbeiten, an denen ein internationales Team von Wissen-

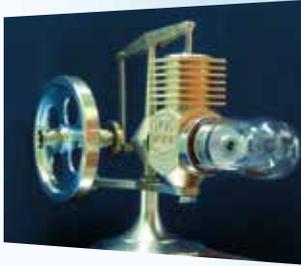
schaftlerinnen und Wissenschaftlern der Universitäten Oxford, Kiel, Lund, Göteborg, Hamburg, Amsterdam, Göttingen, der Radboud Universität in Nijmegen, der Staatlichen Universität St. Petersburg, der Kansas State University, der Vrije Universiteit Amsterdam, vom europäischen Röntgenlaser European XFEL und von DESY beteiligt waren, bieten wertvolle Einblicke in die Wechselwirkung dieser im Kosmos weit verbreiteten Gruppe organischer Moleküle mit interstellarer Strahlung. Die Ionen und Fragmente, die dabei entstehen, liefern die Bausteine für komplexere Moleküle und prägen damit entscheidend die organische Chemie des Kosmos.

Nature Communications,
DOI: 10.1038/s41467-021-26193-z



Der Versuchsaufbau im Laserzell mit der ultraschnellen Kamera PimMS an der CAMP-Messstation (überwacht vom Maskottchen Clyde, oben)

MAKROSKOPISCHE SYSTEME



- Mechanik
- Thermodynamik
- Elektrodynamik

BEOBACHTUNG

19. JH

MIKROSKOPISCHE SYSTEME



- Atome, Moleküle
- Fluktuationen
- Quantenmechanik
- Röntgenstrahlung

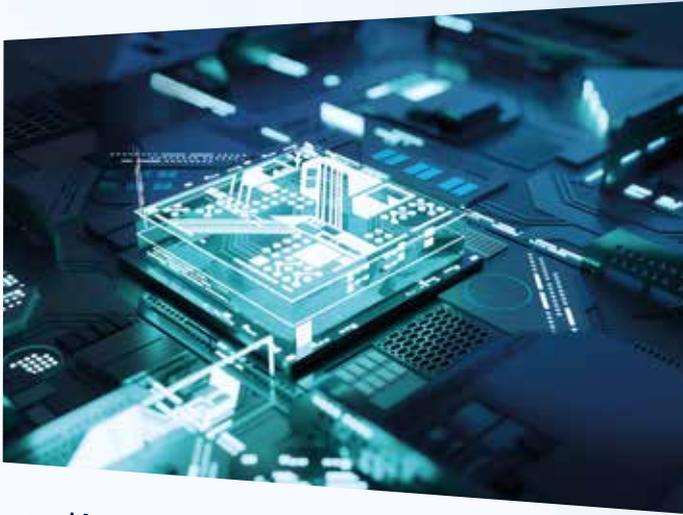
VERSTÄNDNIS

20. JH

DIE ZWEITE QUANTEN REVOLUTION

Die Quantenphysik hat die Welt revolutioniert – in unserem Verständnis der Natur ebenso wie in unserem Alltag. Mit der ersten Quantenrevolution wurden vor einigen Jahrzehnten Quantentechnologien wie Transistoren und Laser allgegenwärtig. Sie sind die Früchte eines immer tieferen Verständnisses der quantenphysikalischen Gesetze. Dabei waren die meisten praktischen Anwendungen von Quantenphänomenen bei ihrer Entdeckung noch gar nicht vorstellbar. Heute steht die Welt vor einer zweiten Quantenrevolution. Mittlerweile lassen sich einzelne Quantenobjekte wie Lichtteilchen,

QUANTENSYSTEME



- Kontrolle von Quanten in Materie und Energie
- Quantentechnologien
- Multifunktionale Materialien
- Medizinische Wirkstoffe
- Digitale Zwillinge

KONTROLLE

heute

21. JH

ZOOM

- 12 Die zweite Quantenrevolution
- 17 Interview mit DESY-Direktor Helmut Dosch
- 19 Die Qubits von Bahrenfeld
- 21 Quantensensoren liefern neue Einblicke
- 25 Quantenmaterialien für innovative Anwendungen
- 28 Die Quanten-Dompteure
- 30 Realität holt Science Fiction ein
- 31 Das Flagship-Programm der EU
- 32 Enormes Potenzial für Wirtschaft und Gesellschaft

Elektronen, Atome und Moleküle so gezielt identifizieren, unter Kontrolle bringen und ansteuern, dass komplett neue Techniken möglich sind: Quantensensoren, die Messungen von bis dato unerreichter Präzision erlauben. Oder Quantenmaterialien, die eine Grundlage der künftigen Elektronik bilden könnten. Oder der Quantencomputer, der ungleich schneller agieren kann als heutige Rechner. Für die Wissenschaft verspricht die zweite Quantenrevolution neue Erkenntniswerkzeuge, für die Wirtschaft Milliardenmärkte.

Die Flughafencrew ist im Stress: Das Wetter spielt verrückt, die meisten Maschinen haben Verspätung, unzählige Fluggäste drohen ihren Anschluss zu verpassen. Um das Chaos in Schach zu halten, müsste man jeden ankommenden Flieger an ein Gate lotsen, so dass die Umsteigezeiten unterm Strich möglichst minimal sind. Das mag einfach klingen – doch mathematisch gesehen ist das Problem, für diese Vielzahl von Jets in Minutenschnelle das optimale Gate zu finden, eine Herkulesaufgabe, an der heute selbst Superrechner oft scheitern.

Meistern könnte sie in Zukunft ein komplett neuer Rechnertyp, der auf den schwer verständlichen Regeln der Quantenphysik basiert – der Quantencomputer. Er ist Teil eines aufstrebenden Forschungsfelds, der Quantentechnologien. Am Quantencomputer tüfteln weltweit unzählige Labore in Industrie und Wissenschaft. Für ihn sollten nicht nur solche Optimierungsaufgaben wie am Flughafen ein Kinderspiel sein, sondern auch schnelle Suchen in Datenbanken, komplexe Berechnungen und aufwendige Computersimulationen sowie Algorithmen der künstlichen Intelligenz. Das Besondere am Quantencomputer: Er funktioniert nach einem ganz anderen Prinzip als ein normaler Prozessor. Der rechnet mit Bits, also mit Speichereinheiten, die entweder auf null oder auf eins stehen. Dagegen

basiert ein Quantenrechner auf dem Qubit (Quantenbit), und das kann beliebige Kombinationen von eins und null gleichzeitig sein und damit unendlich viele Werte annehmen.

Mehr Information als Atome im Universum

Werden mehrere Quantenbits zusammengeschaltet, ergibt sich ein mächtiger Rechner: Während ein PC mit zehn Bits nacheinander einen von rund tausend möglichen Werten kodieren kann, vermag der Quantencomputer in zehn Qubits alle tausend Werte auf einmal anzunehmen. Ein System mit tausend Qubits

Quantenalgorithmen könnten – so die Erwartung – deutlich schnellere und bessere Lösungen finden, indem sie quantenmechanische Prinzipien ausnutzen. Außerdem scheint der Quantenrechner für Computersimulationen prädestiniert zu sein. Denn er eignet sich dazu, Quantensysteme zu simulieren, also das Verhalten von Molekülen und Materialien – und nicht nur den Status zu einem bestimmten Zeitpunkt. Nützlich könnte das zum Beispiel für das gezielte Design von Medikamenten oder von Werkstoffen sein, etwa für bessere Batterien.

„Jetzt ist der richtige Zeitpunkt für die Entwicklung von Algorithmen, um später einen Quantencomputer optimal nutzen zu können“

Karl Jansen, DESY

kann im Prinzip mehr Informationen speichern, als es Atome im Universum gibt. Dadurch sollte ein solches Rechensystem bestimmte Operationen ungleich schneller und damit auch klimaverträglicher und nachhaltiger abarbeiten können als ein heutiger Supercomputer – die jeweils passende Programmierung, den sogenannten Algorithmus, vorausgesetzt.

Hilfreich könnten Quantenrechner damit unter anderem beim Durchforsten bestimmter Datenbanken sein oder als KI-Tool zum Aufspüren von Unregelmäßigkeiten, etwa von verdächtigen Gewebestrukturen auf einem Röntgenbild. Auch Optimierungsprobleme sollten sie knacken können, etwa für die Logistik: Wie findet ein Paketdienst die kürzesten Wege für seine Sendungen? Ein hochkomplexes System, geprägt vom Straßengewirr einer Stadt, aber auch von Baustellen und Staus. Schon heute setzen Logistikunternehmen auf Hochleistungscomputer, um ihre Transportrouten zu optimieren.

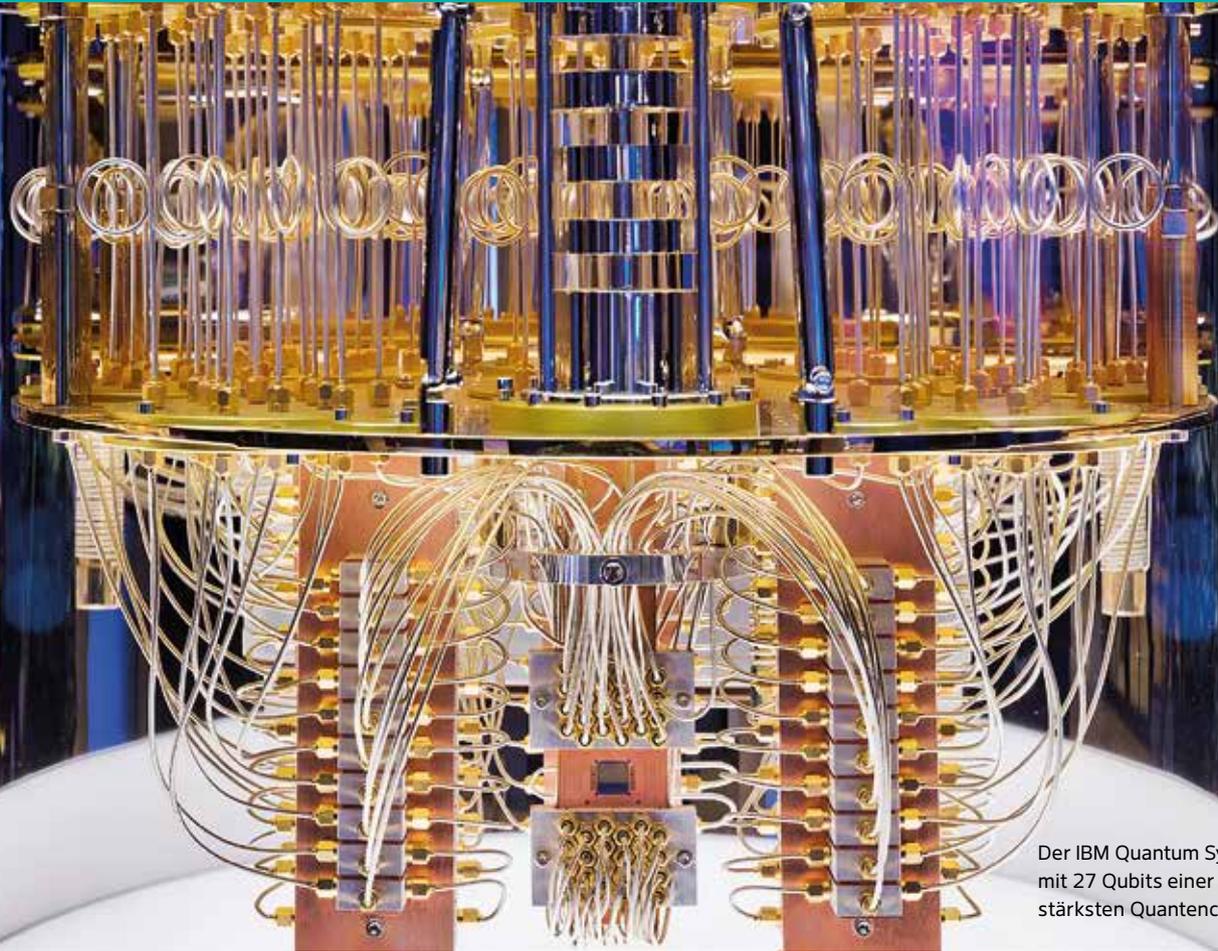
Eine Million Qubits

Allerdings ermöglicht die Technik bislang nur bedingt praktische Anwendungen in kleinem Stil. Der Grund: Die heutigen Prototypen für einen universellen Quantencomputer haben nur einige Dutzend Qubits – zu wenig, um mit gewöhnlichen Rechnern mithalten zu können. Und: „Im Moment sind die Quantencomputer noch sehr rauschbehaftet, jede kleinste Wechselwirkung mit der Umgebung kann sie empfindlich stören“, sagt DESY-Physiker Karl Jansen, Leiter des Zentrums für Quantentechnologie-Anwendungen (CQTA). „Deswegen passieren beim Rechnen noch sehr viele Fehler.“

Aber die Entwicklung schreitet voran: Für die nächsten Jahre haben Konzerne wie IBM und Google Systeme mit einigen hundert oder tausend Qubits angekündigt, 2030 könnten es gar eine Million sein. Auch gegen die Fehleranfälligkeit gibt es Rezepte: Bei einer Methode werden jedem Qubit Dutzende oder gar Hunderte weitere Qubits zur Seite gestellt,



Karl Jansen ist Ko-Koordinator für Quantentechnologien bei DESY und leitet das Zentrum für Quantentechnologie-Anwendungen (CQTA).



Der IBM Quantum System One ist mit 27 Qubits einer der leistungsstärksten Quantencomputer.

welche die Rechenresultate des ersten prüfen und korrigieren. Andere Ansätze versuchen, die Fehler mit Hilfe von künstlicher Intelligenz oder neuronalen Netzen zu korrigieren.

Zwar dürfte es noch eine Weile dauern, bis voll funktionsfähige Quantenrechner zur Verfügung stehen werden. Doch die Möglichkeiten, die sie dann bieten könnten, sind heute noch gar nicht absehbar. „Als der Laser entwickelt wurde, hatte man nicht daran gedacht, ihn eines Tages für die Augen Chirurgie einzusetzen“, sagt Peter Zoller, Direktor am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. „Womöglich wird uns in Zukunft auch der Quantencomputer Terrains eröffnen, von denen wir heute noch nicht einmal träumen.“

Vielversprechende Perspektiven

Große Hoffnungen setzen Fachleute auch in Quantensensoren. Sie können zum Beispiel aus speziell präparierten Diamanten bestehen

und sollen Hirnströme, Magnetkräfte oder Schwerefelder sehr viel präziser erfassen als bislang. Eine neue Generation von Atomuhren könnte die Satellitennavigation optimieren – jeder GPS-Satellit hat eine Atomuhr an Bord. Mit genaueren Uhren wären Navigationssysteme denkbar, die die Position eines Autos bis auf den Zentimeter genau verraten – wichtig etwa fürs autonome Fahren.

Quantenmaterialien bieten ebenfalls vielversprechende Perspektiven. In ihnen gehen die Elektronen untereinander sowie mit dem Kristallgitter ungewöhnliche Wechselwirkungen ein. Dadurch ergeben sich besondere elektronische Eigenschaften, die unter anderem schnellere und sparsamere Computerchips möglich machen könnten, aber auch Supraleiter, die nicht erst bei Extremkälte elektrischen Strom verlustfrei transportieren, sondern bereits bei Raumtemperatur.

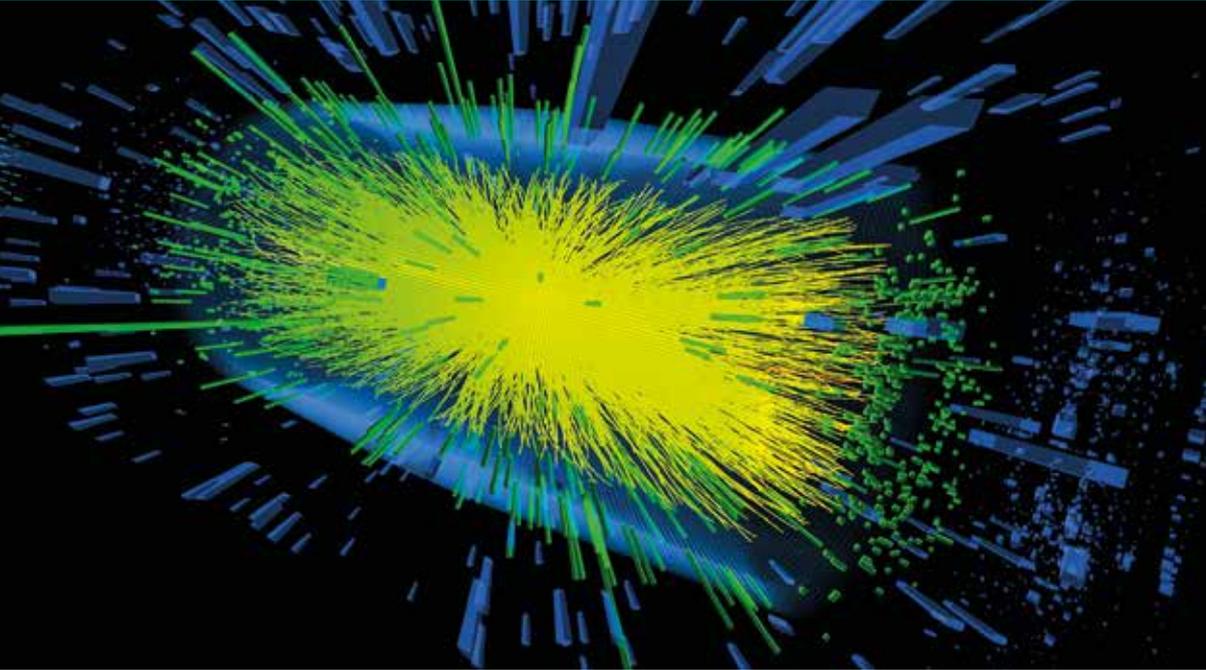
„All diese Technologien besitzen ein Riesenzusammenhang für die

Zukunft“, betont Kerstin Borras, die bei DESY die Quantentechnologie gemeinsam mit Jansen koordiniert. Wie Qubits in einem Quantencomputer setzt die Forschung dabei auf Synergien: Zusammen mit Partnerinstituten lässt sich der Fortschritt schneller erreichen. Nicht nur die

„Womöglich wird uns der Quantencomputer Terrains eröffnen, von denen wir heute noch nicht einmal träumen“

Peter Zoller, Österreichische Akademie der Wissenschaften

Wirtschaft dürfte dabei künftig von den Quantentechnologien profitieren, auch die Wissenschaft: Quantencomputer könnten etwa helfen, die hochkomplexen Messdaten von Teilchenbeschleuniger-Experimenten zu analysieren oder Theorieprobleme anzugehen, die heute nur >>



Bei den Teilchenkollisionen im Large Hadron Collider entstehen gigantische Datenmengen, die in der Zukunft noch deutlich wachsen werden. Quantencomputer könnten bei der Analyse helfen.

sehr schwer oder überhaupt nicht zu lösen sind. Quantensensoren können auf bislang unentdeckte Elementarteilchen lauern. Und mit DESYs Röntgenquellen lassen sich vielversprechende Quantenmaterialien extrem detailliert untersuchen und für spezielle Anwendungen optimieren, etwa einen Quantencomputer mit kleinen Fehlerraten.

Datenflut bei Teilchenkollisionen

„Interessant ist ein Quantencomputer zum Beispiel für die Experimente am Teilchenforschungszentrum CERN in Genf, und zwar speziell am LHC, dem größten Teilchenbeschleuniger der Welt“, sagt Kerstin Borrás, die am CMS-Detektor beteiligt ist, einer der großen Nachweis-

maschinen am LHC. Das Prinzip: Der 27 Kilometer große Ringbeschleuniger bringt Protonen (Wasserstoffkerne) auf extrem hohe Energien und lässt sie frontal zusammenprallen. Bei diesen Kollisionen entstehen durch elementare Wechselwirkungen unzählige Teilchen, die in verschiedene Richtungen auseinanderstieben.

Riesige Detektoren wie CMS beobachten das Geschehen und vermessen die Signale der ebenso schnellen wie winzigen Teilchen so genau wie möglich. Aus der Analyse der Messdaten lässt sich dann rekonstruieren, ob bei den Kollisionen neue, zuvor unentdeckte Teilchen entstanden sind oder durch Abweichungen von der Theorie Hinweise auf neue Physik zu sehen sind. Auf diese Weise konnte 2012 am LHC das berühmte Higgs-Boson aufgespürt werden – eine Entdeckung, die den Theoretikern Peter Higgs und François Englert 2013 den Nobelpreis einbrachte.

Bei jeder Kollision im LHC entstehen viele Teilchen, die es zu berücksichtigen gilt. Deshalb war die Analyse der LHC-Daten schon bislang nur mit massiver und neuartiger Computerunterstützung zu schaffen: Das WWW wurde im CERN für den weltweiten Datenaustausch erfunden, ebenso ist in den Geburts-

stunden des LHC das global aufgespannte Computer-GRID entwickelt worden. „In den nächsten Jahren werden die Analysen noch herausfordernder“, berichtet Borrás. „Derzeit wird der LHC so umgebaut, dass er in einigen Jahren noch wesentlich mehr Protonen als bislang aufeinander feuert und dadurch eine viel größere Datenflut erzeugt.“

„Diese Technologien besitzen ein Riesenpotenzial für die Zukunft“

Kerstin Borrás, DESY

Big-Data-Herausforderung

Laut Plan werden dann bis zu 200 Wechselwirkungen gleichzeitig stattfinden und enorm dichte Teilchensignale erzeugen. „Die neuen Bedingungen sind eine große Big-Data-Herausforderung. Da sehe ich im Quantencomputer eine große Chance“, sagt Borrás. Um die Potenziale der neuen Technik auszuloten, ergriff Borrás die Initiative und gründete mit Karl Jansen und Gleichgesinnten quer durch alle DESY-Forschungsbereiche eine Quantentechnologie-Task-Force. >>



Kerstin Borrás ist Leitende Wissenschaftlerin und Ko-Koordinatorin für Quantentechnologien bei DESY sowie Professorin an der RWTH Aachen.

„GANZ NEUE MÖGLICHKEITEN“

Die gezielte Kontrolle von Quanteneigenschaften bahnt den Weg für innovative Technologien

Die Entdeckung der Quantenmechanik hat die Grundgesetze der Physik verändert und die Basis für revolutionäre Technologien gelegt. Die Quantenrevolution 2.0 wird unseren Alltag nun erneut umkrempeln, erwartet DESY-Direktor Helmut Dosch.

femto: Im frühen 20. Jahrhundert entdeckte die Physik, dass die Welt aus Quanten besteht. Warum war das eine Revolution?

Helmut Dosch: Zuvor hatte man einen sehr makroskopischen Blick auf Materie – die Formeln der Mechanik und der Elektrodynamik galten als Grundgesetze der Physik. Doch dann wurden die Beobachtungsinstrumente besser, und es wurde immer klarer, dass sich Materie aus Atomen und Molekülen zusammensetzt. Diese allerdings gehorchen nicht mehr den klassischen Physikgesetzen, sondern den neuen, gewöhnungsbedürftigen Regeln der Quantenmechanik. Deren Gesetze besagen unter anderem, dass Atome nicht nur als Teilchen, sondern gleichzeitig auch als Welle agieren können. Dieses grundlegende Verständnis war später die Basis für Technologien wie Mikrochip und Laser, die unseren Alltag heute prägen. Diese Entwicklung wird als die erste Quantenrevolution bezeichnet.

femto: Jetzt stehen wir vor einer zweiten Quantenrevolution. Wodurch zeichnet die sich aus?

Helmut Dosch: Für Technologien wie Laser und Transistor war das Verständnis der Quantenwelt nötig. Doch nun ist die Wissenschaft in der Lage, Quanteneigenschaften gezielt zu kontrollieren – etwa jene geisterhafte Verschränkung, die es zwi-

schen zwei Quantensystemen geben kann. Sie lässt sich heute ausnutzen, um die Qubits in einem Quantencomputer miteinander rechnen zu lassen, und zwar ungleich schneller als in einem gewöhnlichen Rechner. Das verspricht für die Zukunft ganz neue Möglichkeiten.

femto: Was hat die Wissenschaft bereits geschafft, wo liegen noch die Herausforderungen?

Helmut Dosch: Beim Quantencomputer gibt es Prototypen, die beweisen, dass das Prinzip funktioniert. Hier geht es nun darum, größere Geräte mit deutlich mehr Qubits zu bauen, die zudem weniger störanfällig sind. Dafür gibt es zwar schon Ansätze, aber es könnte sein, dass wir dafür noch ganz neue Technologien entwickeln müssen, etwa auf der Basis neuartiger Quantenmaterialien. Doch andere Quantentechnologien sind bereits deutlich weiter, etwa die Quantenkryptographie. Sie ermöglicht eine abhörsichere Datenkommunikation mittels Lichtquanten. Geräte für den Einsatz über kurze Distanzen gibt es schon zu kaufen.

femto: Was kann die Forschung bei DESY dazu beitragen?

Helmut Dosch: DESY kann die Erforschung an mehreren Punkten unterstützen. So arbeiten wir an Quantenalgorithmien für die Teilchenphysik, die bei Beschleunigerexperimenten die Datenanalysen unterstützen sollen. Diese Algorithmen können wir auf neuen Quantencomputer-Prototypen laufen lassen, die derzeit in zahlreichen Laboren entwickelt werden. Dadurch können wir sie auf ihre Leistungsfähigkeit testen und ein regelrechtes Benchmarking be-



treiben, was dann bei der Weiterentwicklung hilft. Mindestens ebenso wichtig sind unsere Röntgenquellen PETRA III, FLASH und der European XFEL, an dem DESY maßgeblich beteiligt ist. Mit ihrer hochintensiven Strahlung lassen sich neuartige Quantenmaterialien extrem detailliert untersuchen. Und diese Materialien könnten dann die Grundlage für künftige Quantencomputer und Quantensensoren bilden.

femto: Werden wir Quantencomputer eines Tages in der Hosentasche tragen?

Helmut Dosch: Der Quantencomputer dürfte im Wesentlichen in Rechenzentren zum Einsatz kommen. Hier könnte er zum Beispiel für schnellere Routenberechnungen sorgen, aber auch helfen, bessere Medikamente und Werkstoffe zu entwickeln. Für den PC oder das Smartphone dürfte die Technologie allerdings auf absehbare Zeit zu komplex sein. Da scheint es eher denkbar, dass Smartphones irgendwann mit einem Quantenkryptographie-Chip ausgerüstet sind. Der könnte eine abhörsichere Datenübertragung garantieren und damit für eine unbedenkliche Internetkommunikation sorgen.

WETTLAUF DER SYSTEME

Noch ist unklar, auf welcher Basis künftige Quantencomputer funktionieren werden. Manche Konzepte sind schon recht fortgeschritten und ermöglichen den Bau funktionierender Prototypen. Andere Ansätze stecken noch in den Anfängen, versprechen aber einiges für die Zukunft. Einige Beispiele:

SUPRALEITENDE QUBITS: Basis sind mikrometerkleine, durch winzige Spalte unterbrochene Schaltkreise, sogenannte Josephson Junctions, aus einem supraleitenden Material. Werden sie nahe an den absoluten Temperaturnullpunkt herabgekühlt, fließt der Strom in ihnen verlustfrei – entweder links oder rechts herum. Mit Hilfe von Mikrowellen lassen sich die Drehrichtungen überlagern und dadurch ein Quantenbit erzeugen. IBM und Google setzen beispielsweise auf dieses Prinzip.

QUBITS AUS IONENFALLEN: In einer Vakuumkammer halten Magnetfelder einzelne Ionen gefangen. Kurze Laserblitze bringen die Elektronen in den Ionen gezielt in verschiedene Zustände. Dabei lassen sich zwei Zustände überlagern – ein Quantenbit entsteht. Mehrere Ionen lassen sich in benachbarte Käfige sperren. Sie können miteinander interagieren und ergeben zusammen eine größere Recheneinheit.

QUBITS AUS HALBLEITERN: Basis sind Materialien, wie sie für den Bau von Computerchips verwendet werden. Unter anderem nutzen Fachleute einen Chip aus hochreinem Silizium, in den sie gezielt ein Phosphoratom einbauen. Kern und ein Elektron dieses Atoms fungieren jeweils als ein Quantenbit. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt der Chiphersteller Intel.

QUBITS AUS DIAMANT-FEHLSTELLEN: Durch ein raffiniertes Verfahren lässt sich ein Diamant zum Quantenbit machen: In seinem Kristallgitter wird ein Kohlenstoffatom durch ein Stickstoffatom ersetzt, direkt daneben befindet sich ein unbesetzter Gitterplatz. Angesteuert mit Laserpulsen und Radiowellen agiert das winzige Ensemble als künstliches Molekül und stabiles Quantenbit.

Für die Teilchenphysikexperimente am CERN arbeitet die Forscherin bereits an Quantenalgorithmen zur Simulation und Analyse der Messdaten. Konkret handelt es sich um eine selbstlernende Software, die nach dem Konzept eines neuronalen Netzes funktioniert – einer Programmarchitektur, die der Arbeitsweise des menschlichen Gehirns nachempfunden ist. Noch läuft die Entwicklung, doch bis 2029, wenn der aufgerüstete LHC loslegen soll, hofft Kerstin Borrás, dass die Quantenalgorithmen so leistungsfähig sind, dass sie die Teilchenjagd erheblich unterstützen können.

Doch auch andere Physikphänomene sollten sich mit Quantenhilfe deutlich besser berechnen und simulieren lassen als bislang – von der Supraleitung bis hin zur noch jungen Materialklasse der topologischen Isolatoren. „Interessant könnte ein Quantencomputer auch sein, um das frühe Universum zu simulieren, als es noch klein war und seine Dichte und Temperatur extrem hoch waren“, sagt Jansen. „Das lässt sich mit einem klassischen Rechner kaum machen.“

Quantentechnologie-Zentrum

Bis 2019 hielt Jansen den Quantencomputer für eine Technologie, die fern in der Zukunft liegt. Dann wurde er auf das kalifornische Start-up Rigetti Computing aufmerksam – eine Firma, die per Internet Zugang zu einem kleinen Quantenrechner mit nur wenigen Qubits bietet. Als Jansen deren Webseite besuchte, machte er eine verblüffende Erfahrung: „Ich konnte den Quantencomputer von zu Hause aus mit meinem Laptop ansteuern, und zwar in einer gewöhnlichen, mir vertrauten Programmiersprache“, erzählt er. „Das war für mich ein Paradigmenwechsel.“

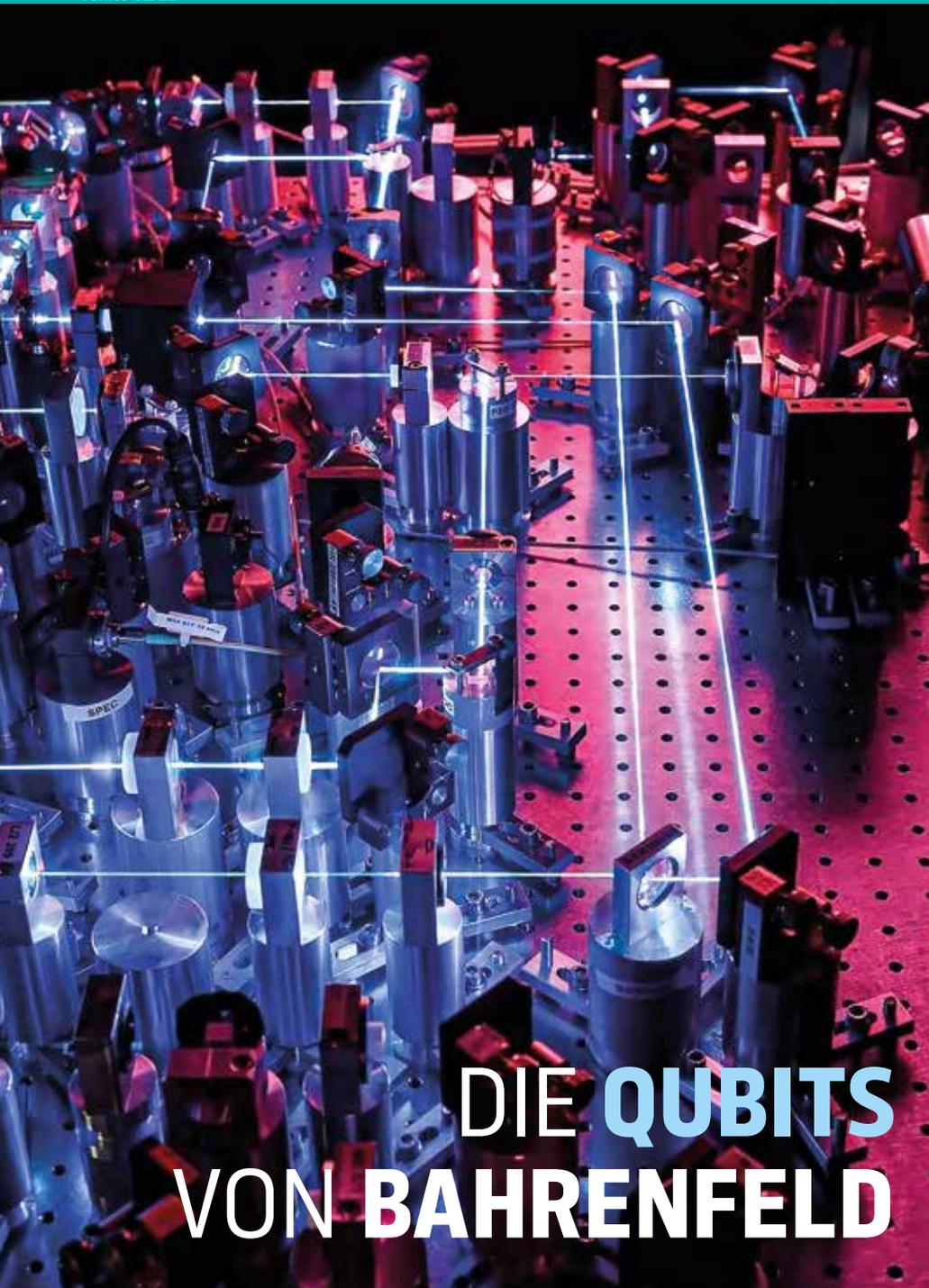
Der Physiker beschloss, tiefer in die Zukunftstechnologie einzusteigen und erkannte rasch ihr Potenzial für die Forschung. Schließlich initiierte er am DESY-Standort Zeuthen ein neues Zentrum, das

Zentrum für Quantentechnologie-Anwendungen (CQTA), um die Möglichkeiten des Quantencomputers systematisch auszuloten und konkrete Anwendungen für das neue Rechenwunder zu entwickeln. Das Zentrum wird fünf Jahre lang mit insgesamt 15 Millionen Euro durch den Zukunftsinvestitionsfonds des Landes Brandenburg gefördert.

„Quantum ready“

„Mit unserem Zentrum werden wir den DESY-Fachleuten und auch vielen anderen Nutzern Zugang zu den Quantencomputern von IBM bieten“, erklärt Karl Jansen. IBM zählt zu den führenden Herstellern und stellt seinen Partnern die Rechenkapazitäten seiner Quantenmaschinen über die Cloud zur Verfügung. Derzeit haben die Geräte zwar noch ein beschränktes Leistungsvermögen. Doch schon in einigen Jahren stellt der Konzern Quantenprozessoren in Aussicht, die heutigen Supercomputern zumindest in manchen Belangen überlegen sein sollen.

Die Technik nähert sich also der Schwelle zur Anwendung. „Jetzt ist der richtige Zeitpunkt für die Entwicklung von Algorithmen, um später einen Quantencomputer optimal nutzen zu können“, betont Jansen. „Und wir müssen herausfinden, für welche Anwendungen der Quantenrechner besonders nutzbringend sein wird.“ Das soll sich beim neuen Zentrum in Zeuthen nicht nur auf DESY-Projekte beschränken: „Wir möchten andere Forschungsinstitute sowie Firmen ansprechen und ihnen unsere Unterstützung anbieten“, sagt Karl Jansen. „Auch wollen wir Ansprechpartner für kleinere Unternehmen sein, die das mit dem Quantencomputing einfach mal ausprobieren wollen.“ Ein weiterer wichtiger Aspekt des neuen Zentrums sind Ausbildung und Training, ergänzt er: „Wir möchten Tutorials und Kurse anbieten, um Leute aus Wirtschaft und Wissenschaft mit der neuen Art des Programmierens vertraut und damit ‚quantum ready‘ zu machen.“



DIE QUBITS VON BAHRENFELD

Das Institut für Laserphysik der Universität Hamburg baut einen Quantencomputer auf Basis schwebender Atome

B litzschnelle Datenbank-suchen, umfassende Simulationen, das Knacken unlösbarer Codes – für einen Quantencomputer könnte all das ein Kinderspiel sein. Lange gab es nur Laborgeräte mit bescheidener Leistung. Doch seit einigen Jahren hat die Entwicklung Schwung aufgenommen. IT-Konzerne wie Google, IBM und Microsoft investie-

ren Abermillionen in die Forschung, Banken, Logistikunternehmen und Automobilkonzerne loten die Möglichkeiten der kommenden Wundermaschine aus.

Offen ist allerdings, wie die Systeme in Zukunft aussehen werden. Derzeit arbeiten Forschungsgruppen rund um den Globus an ganz unterschiedlichen Technologien, um einen wirklich

Der Quantencomputer Rymax One nutzt Laser, um einzelne Atome festzuhalten und in sogenannte Rydberg-Zustände zu überführen, die kontrolliert hochverschränkte Quantenzustände einnehmen können.

leistungsfähigen Quantencomputer zu realisieren: Manche setzen auf supraleitende Quantenbits, andere auf in Fallen gesperrte Ionen, wieder andere auf mit Stickstoff gespickten Diamant. „Im Moment läuft da ein Wettrennen, und wer es gewinnt, ist noch offen“, sagt Klaus Sengstock vom Institut für Laserphysik der Universität Hamburg. „Aber alle gehen davon aus, dass es eines Tages leistungsfähige Quantencomputer geben wird.“ Möglicherweise werden verschiedene Systeme auf unterschiedliche Aufgaben spezialisiert sein.

Laserstrahlen als Pinzetten

Auf dem Forschungscampus Hamburg-Bahrenfeld arbeitet das Team Henning Moritz, Peter Schmelcher und Klaus Sengstock in einem Projekt namens Rymax an einer speziellen Variante des Quantencomputers. Das Konzept: In einer Vakuumkammer agieren Laserstrahlen als Pinzetten und halten Hunderte von Ytterbiumatomen in der Schwebelage, angeordnet zu einem regelmäßigen Gitter, bei dem die Atome einige Mikrometer voneinander entfernt sind. Dann wird – ebenfalls per Laser – gezielt ein wenig Energie in die Atome gepumpt. Die Folge: Eines der Elektronen der Atomhülle gerät auf eine weit entfernte „Umlaufbahn“. Bildlich gesprochen bläht sich das Atom dadurch zu einem Riesengebilde auf, einem sogenannten Rydberg-Atom. Durch geschickte Laserbestrahlung kann es als Qubit >>

programmiert und zum Rechnen motiviert werden. Ausgelesen wird das Resultat mit speziellen Kameras.

Der Vorteil: Aufgrund ihrer Größe können die Rydberg-Qubits über relativ große Entfernungen miteinander „sprechen“ und dadurch zu Schalteinheiten verknüpft werden, die miteinander rechnen können. Außerdem lassen sich die Atome per Laserpinzette wie mit einem Traktorstrahl verschieben, um mit anderen Qubits Rechenoperationen ausführen zu können. „Wir können unsere Quantenbits sehr genau mit Laserstrahlen kontrollieren, ansprechen und messen“, sagt Sengstock – ein direkter Ausdruck der zweiten Quantenrevolution.

„Quantenabsturz“ durch LKW

Der Fahrplan: Nach und nach will das Team seinen Laboraufbau um immer mehr Qubits erweitern, auf insgesamt 500. Am Ende soll ein „Quanten-Annealer“ dabei herauskommen – eine spezielle Variante

„Im Moment läuft ein Wettrennen, und wer es gewinnt, ist noch offen“

Klaus Sengstock, Universität Hamburg

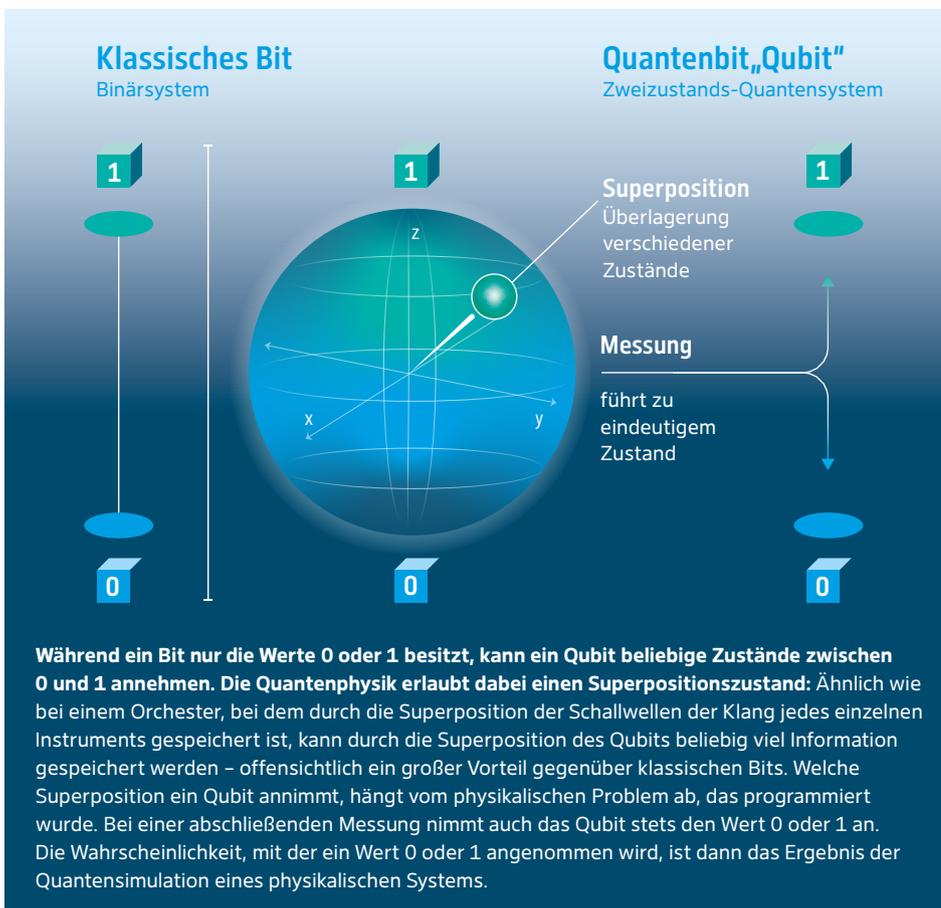


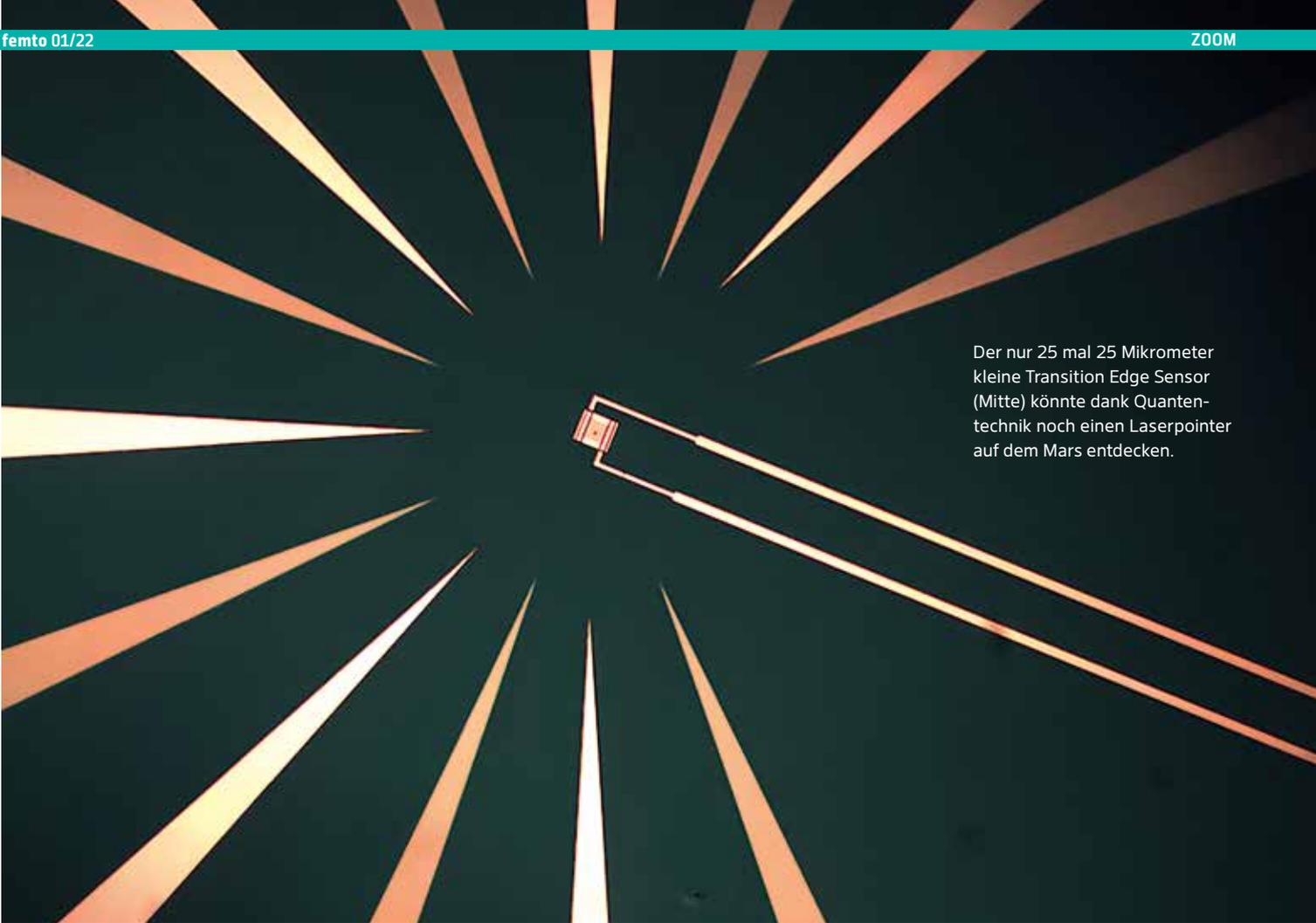
von Quantencomputer, spezialisiert auf das Lösen von Optimierungsproblemen. Das Prinzip: „Wir erzeugen ein Ensemble von Qubits und programmieren es so, dass es versucht, seine Energie zu minimieren“, erläutert Sengstock. Vergleichbar ist das mit einer Landschaft, die unfassbar viele Mulden enthält – und gesucht ist das tiefste Loch. Ein Quantencomputer sollte alle Mulden schneller und effizienter aufspüren können als gewöhnliche Rechner. In der realen Welt könnte diese Lösung zum Beispiel dem Optimum der

Paketzustellung entsprechen – die fixeste und effizienteste Zustellung braucht am wenigsten Energie.

Doch die Herausforderungen bei der Entwicklung sind nicht ohne: Naturgemäß sind Quantenbits extrem empfindlich gegenüber Störungen und müssen deshalb nahezu perfekt von der Außenwelt abgeschirmt werden. So lassen sich die Rydberg-Atome bereits von kleinsten elektrischen und magnetischen Feldern aus dem Takt bringen. Auch Vibrationen, hervorgerufen etwa von einem vorbeifahrenden LKW, können zum regelrechten „Quantenabsturz“ des Rechners führen. „All diese Störeinflüsse müssen wir extrem gut unter Kontrolle haben“, sagt Klaus Sengstock – und hofft, zum Projektende im November 2026 ein System zu haben, auf dem sich in Kombination mit konventionellen Hochleistungsrechnern erste Anwendungen realisieren lassen.

Danach dürfte es noch ein paar weitere Jahre dauern, bis dieser Quanten-Annealer in breitem Umfang einsetzbar ist. Konkrete Interessenten gibt es bereits: An Rymax, das mit insgesamt 29 Millionen Euro gefördert wird, sind mehrere Hightech-Firmen beteiligt, die Laser und Optiksysteme entwickeln. Mit der Otto Group und der Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA) sind auch potenzielle Anwender dabei. Und auch mit DESY sind Kooperationen geplant: Quantencomputing-Fachleute des Forschungszentrums tüfteln bereits an Quantenalgorithmen, die sie eines Tages am Rymax-Rechner testen wollen.





Der nur 25 mal 25 Mikrometer kleine Transition Edge Sensor (Mitte) könnte dank Quantentechnik noch einen Laserpointer auf dem Mars entdecken.

FEINSINNIGE FÜHLER

Quantensensoren eröffnen den Blick aufs Unbekannte

Sie stecken überall, sind aber kaum zu sehen: In der Technik spielen Sensoren eine immer wichtigere Rolle. Im Auto erfassen sie Abstände und Beschleunigung, im Smartphone messen sie Ort und Lage, in der Industrie spüren sie Gase und Gefahrstoffe auf. Dank Quantentechnologie könnten solche Messfühler noch deutlich empfindlicher werden. Denn sie machen sich die Eigenheiten der Quantenwelt zunutze: Atome verhalten sich wie Lichtwellen und umgekehrt, was neue, raffinierte Messtechniken möglich macht. Und Elektronen etwa in Atomuhren können so empfindlich auf die Umwelt reagieren, dass sie selbst winzigste Veränderungen registrieren.

Entsprechend groß sind die Erwartungen: Quantensensoren sollen als ultragenauere Gravimeter für die Bodenschatzsuche und die Erdbebenfrühwarnung fungieren sowie hochpräzise Navigationsgeräte ermöglichen, wichtig etwa fürs autonome Fahren. Auch die Wissenschaft setzt auf die neue Technik: Quantensensoren sollen beispielsweise helfen, von neuen Theorien vorausgesagte hypothetische Teilchen aufzuspüren und fundamentale Naturgesetze unter die Lupe zu nehmen – und zwar wesentlich genauer als bislang.

„Wenn man es schafft, Quanteneffekte für Sensoren nutzbar zu machen, kann man eine wirklich fantastische Empfindlichkeit

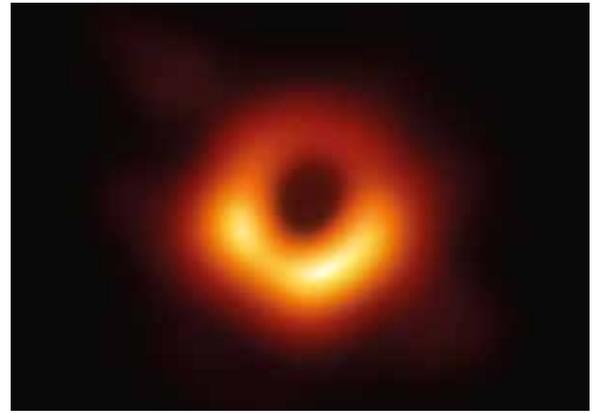
erreichen“, schwärmt DESY-Physiker Steven Worm. Vor allem in einem Bereich der Wissenschaft leisten solche Quantensensoren bereits wertvolle Dienste – für die Radioastronomie im Millimeter- und Submillimeter-Bereich. In diesem „astronomischen Fenster“ lässt sich unter anderem die Entstehung von Sternen beobachten und ebenso die chemische Zusammensetzung jener Gaswolken, aus denen sich die Himmelskörper bilden. Hier sind es supraleitende Empfänger, welche die Aufnahme der äußerst schwachen Radiosignale ermöglichen. Auch das spektakuläre erste Bild eines Schwarzen Lochs ist mit supraleitenden Empfängern entstanden. Die Supraleitung, bei der >>

bestimmte Materialien bei extrem tiefen Temperaturen Strom völlig verlustfrei leiten können, ist ein typischer Quanteneffekt, bei dem sich die sehr eigenen Regeln der Quantenphysik nicht nur im Reich der Atome und Moleküle zeigen, sondern auch im Großen, in unserer makroskopischen Welt.

Optische Atomuhren

Doch nun sind auch weitere wissenschaftliche Felder dabei, von der neuen Sensorgeneration zu profitieren – etwa ein Experiment namens QSNET. „Wir suchen nach superleichten Kandidaten für die Dunkle Materie“, erzählt Worm. „Und zwar wollen wir mit extrem empfindlichen Quantensensoren nachschauen, ob sich fundamentale Naturkonstanten, die ja eigentlich als unwandelbar gelten, mit der Zeit nicht doch ein wenig verändern.“ Solch eine Veränderung könnte theoretisch durch den

Blick in den Schwerkraft-Schlund: Die spektakuläre erste Aufnahme eines Schwarzen Lochs wäre ohne Quantentechnik nicht möglich gewesen.



Einfluss bestimmter, extrem leichter Dunkle-Materie-Teilchen zustande kommen und wäre ein Hinweis auf deren Existenz.

Die Quantensensoren, die Worm und sein Team verwenden wollen, sind sogenannte optische Atomuhren, eine aktuelle Weiterentwicklung konventioneller Atomuhren. Diese ticken deshalb so genau, weil sie auf einer unveränderlichen physikalischen Größe

basieren – auf der Strahlung, die Atome abgeben, wenn man sie gezielt anregt, also Energie hineingibt. Das ist vergleichbar mit dem Stimmen eines Musikinstruments. Eine abstimmbare Lichtquelle dient als ein Sender, der die Atome bestrahlt und ihnen Energie zuführt. Die Atome wirken dann wie ein Stimmgerät und gleichen die Frequenz des Senders auf den Wert ihrer eigenen Strahlungsfrequenz ab. Ist diese zu



Die Magnete des Dunkle-Materie-Experiments ALPS II müssen zum Betrieb mit flüssigem Helium auf minus 269 Grad Celsius abgekühlt werden.

tief, wird sie hochgestellt. Ist sie zu hoch, regelt man sie ein wenig tiefer.

Konventionelle Atomuhren arbeiten mit Mikrowellen. Bei den noch jungen optischen Uhren dienen dagegen Laser als Sender. Sie bestrahlen die Atome mit Licht, dessen Frequenz deutlich höher ist als die von Mikrowellen. Dadurch können sie bis zu hundertmal präziser ticken: Während die genauesten Mikrowellen-Uhren in 100 Millionen Jahren um eine Sekunde falsch gehen, dauert es bei den derzeit besten optischen Uhren 10 Milliarden Jahre, bis die gleiche Abweichung erreicht ist.

Präzisionswunder

Mit Hilfe dieser Präzisionswunder will das DESY-Team einer speziellen Naturkonstante auf den Zahn fühlen, der sogenannten Feinstrukturkonstante, von der Fachwelt als α (Alpha) bezeichnet. In der Physik gibt sie die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung an. „Wir wählen eine Uhr, die besonders empfindlich auf Alpha reagiert und vergleichen sie mit einer zweiten Uhr, die mit einer anderen Empfindlichkeit reagiert“, erläutert Worm. „Durch diesen Uhrenvergleich hoffen wir herauszufinden, ob sich Alpha zeitweise ein klein wenig verändert, weil gerade ein Schwung Dunkle-Materie-Teilchen durch die Uhren geistert.“ An QSNET sind mehrere Partner beteiligt, darunter das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg.

Eine spezielle Art von Quantensensor fahndet auch in einem DESY-Tunnel nach ultraleichten Teilchen, im Experiment ALPS II. Der 250 Meter lange Aufbau hält nach einer neuen, hypothetischen Teilchenklasse Ausschau, den Axionen beziehungsweise axionartigen Teilchen. Manche Theorien in der Physik gehen von der Existenz dieser extrem leichten und flüchtigen Sonderlinge aus. Auch sie könnten hinter der rätselhaften Dunklen Materie stecken, die offenbar in

„Wir rechnen damit, dass pro Tag nur ein einzelnes Lichtteilchen auftauchen wird“

Friederike Januschek, DESY

enormen Mengen das Universum bevölkert, sich bislang aber einzig durch ihre Schwerkraft verrät.

Um diese Partikel, die mit fast nichts in Wechselwirkung treten, nachweisen zu können, hat sich ein internationales Team um den DESY-Physiker Axel Lindner einen raffinierten Versuchsaufbau einfallen lassen: „Die Theorie sagt vorher, dass die Axionen ein kleines bisschen mit Licht reagieren“, erklärt er. „Wenn wir Laserlicht in ein Magnetfeld schicken, könnte sich ein winziger Anteil dieses Lichts in Axionen umwandeln.“ Da diese Geisterteilchen praktisch nicht mit dem Rest der Welt reagieren, müssten sie jede Wand durchfliegen können. Hinter dieser Wand könnten sie sich dann wieder in Licht zurückverwandeln – vorausgesetzt, dort herrscht ebenfalls ein starkes Magnetfeld.

Licht durch die Wand

Diesen „Licht-durch-die-Wand“-Effekt möchte das ALPS-Team in seinem Versuchsaufbau ausnutzen. Er besteht im Wesentlichen aus zwei jeweils gut 100 Meter langen, luftleer gepumpten Magnetstrecken, zusammengesetzt aus den Magneten von HERA, einem ausgemusterten DESY-Beschleuniger, getrennt durch eine lichtdichte Wand und hochpräzise optische Resonatoren, die die Magnetstrecken einschließen. „In die eine Hälfte schießen wir Laserlicht hinein, in der Hoffnung, dass sich ein Teil davon in Axionen verwandelt“, erläutert Lindner. „In der anderen Hälfte ist es komplett dunkel. Würde dort ein schwaches Leuchten erscheinen, müsste es von



Friederike Januschek bei der Arbeit am Sensor für die Suche nach Dunkler Materie aus axionartigen Teilchen.

einem Axion stammen, das sich in Licht zurückverwandelt hat.“

Nur: Die Herausforderungen sind enorm, denn die Lichtsignale, die es aufzuspüren gilt, sind extrem schwach. „Wir rechnen damit, dass pro Tag nur etwa ein einzelnes Photon, ein einzelnes Lichtteilchen auftauchen wird“, sagt Lindners Kollegin Friederike Januschek. „Es handelt sich um infrarote Photonen, also um Lichtteilchen von sehr geringer Energie.“ Um diese nachweisen zu können, müssen die Fachleute zum einen verhindern, dass von außen Licht in die Apparatur eindringt – das könnte für unzählige Fehlalarme sorgen. Zum anderen müssen die Sensoren, die das verräterische Photon registrieren sollen, überaus empfindlich und verlässlich sein.

Dazu setzt die Arbeitsgruppe auf gleich zwei Methoden: Zunächst soll ein Sensor zum Einsatz kommen, der eng verwandt ist mit der Technik in Gravitationswellendetektoren – ein mögliches Signal soll mit einer Referenzwelle verglichen >>



„Wenn wir Laserlicht in ein Magnetfeld schicken, könnte sich ein winziger Anteil dieses Lichts in Axionen umwandeln“

Axel Lindner, DESY

werden. In einen zweiten Schritt wollen die Fachleute eine spezielle Form von Quantensensor installieren, Transition Edge Sensor (TES) genannt. Das Prinzip: Der chipartige Sensor wird bis auf 100 Millikelvin gekühlt, auf ein zehntel Grad über den absoluten Temperaturnullpunkt bei minus 273 Grad Celsius. Bei dieser Extremkälte stellt sich im Sensor ein Quanteneffekt ein – die Supraleitung. Dabei fließt elektrischer Strom ohne jeden Widerstand.

Laserpointer vom Mars

Bei ALPS II ist der am US-Metrologielabor NIST entwickelte Sensor so eingestellt, dass er an der

Grenze zwischen Supraleitung und Normalleitung operiert. „In diesem Bereich ist sein Widerstand stark temperaturabhängig“, erklärt Januschek. „Fängt der Sensor ein Photon auf, wird er ein klein wenig wärmer. Dadurch erhöht sich sein Widerstand so stark, dass wir das messen können.“ Der TES-Chip ist so empfindlich, dass er im Prinzip das Licht eines Laserpointers aufschnappen könnte, der vom Mars aus auf die Erde leuchtet. Ein weiteres Plus: Im Gegensatz zu den meisten anderen Lichtsensoren schlägt er bei Dunkelheit kaum Fehlalarm – eine wichtige Voraussetzung für die Messungen.

Bislang hat das Team seinen Sensorchip erfolgreich getestet. Der Winzling ist lediglich 20 Nanometer dick und besitzt eine Fläche von 25 mal 25 Mikrometern – deutlich feiner als ein menschliches Haar. Eine spezielle Optik wird die schwachen Lichtsignale aufsammeln, bündeln und in eine Glasfaser einspeisen, die das Signal dann zum Chip führt. Eingebaut werden soll der Quantensensor 2023. Bis dahin soll die Apparatur mit der anderen, an die Gravitationswellendetektoren angelehnten Sensormethode auf das spärliche Leuchten lauern.

„Wir haben uns ganz bewusst entschieden, auf zwei verschiedene Nachweisttechnologien zu setzen“, erläutert Axel Lindner. „Denn wenn wir mit beiden Methoden ein Signal sehen, können wir uns sicher sein, dass es tatsächlich von einem Axion stammt.“ Für die Physik wäre das nichts weniger als eine Revolution: Die Entdeckung würde weit über die derzeit gültige Theorie der Teilchenphysik – das Standardmodell – hinausgehen und könnte damit das Verständnis vom Aufbau unserer Welt deutlich erweitern.

GEISTERBILDER FÜR DIE WISSENSCHAFT

„Ghost Imaging“ soll schonendere Aufnahmen erlauben

W er auf den Auslöser eines Fotoapparats drückt, lässt für gewöhnlich eine wahre Lichtflut auf den Kamerachip los – es sind Abermilliarden von Photonen. In der Wissenschaft hingegen ist so eine Lichtschwemme nicht immer erwünscht. Denn manche Objekte – zum Beispiel lebende Zellen – vertragen keine allzu üppige Bestrahlung, sie werden dadurch gestört oder sogar geschädigt. Um schonende, aber dennoch hochqualitative Aufnahmen machen zu können, arbeitet DESY an einer noch jungen Bildgebungsmethode, dem „Ghost Imaging“ – und nutzt dabei die Quantennatur von Licht.

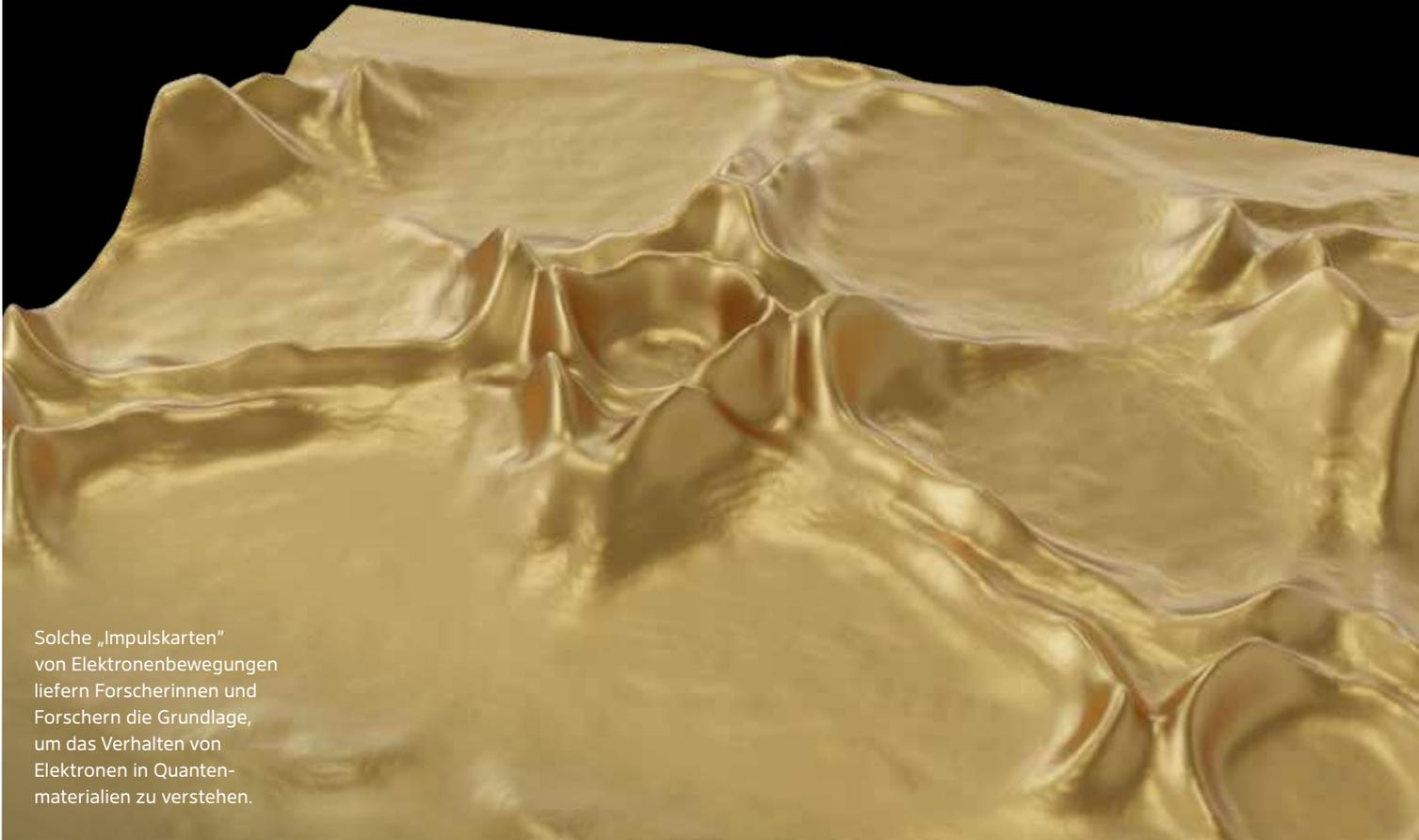
„Die Grundidee ist, dass man einen Röntgenstrahl mit Hilfe eines sogenannten Strahlteiler-Gitters in zwei identische Teile aufspaltet“, erklärt DESY-Physiker Ivan Vartaniants. „Mit dem schwächeren Teil lässt sich eine Probe relativ schonend durchleuchten.“ Als Nachweisinstrument würde hier ein Detektor genügen, der zwar die Helligkeit des durch die Probe geschickten Lichtsignals

erfasst, nicht aber dessen präzisen Ort registrieren muss. Diese Messung kann ein anderer, auf genaue Ortsmessungen spezialisierter Detektor übernehmen. Der Clou: Er nimmt das Signal des anderen, stärkeren Lichtstrahls auf, der die Probe gar nicht „gesehen“ hat. Dennoch können raffinierte Computeralgorithmen rekonstruieren, wo der schwächere Lichtstrahl die Probe durchdrungen hat. Der Grund: Da beide Strahlen an derselben Stelle entstanden sind, nämlich am Strahlteiler-Gitter, sind sie miteinander korreliert. Die Folge: Wenn klar ist, wo sich der eine Strahl befindet, lässt sich auch der andere lokalisieren.

Erste Vorstudien am DESY-Röntgenlaser FLASH haben die Fachleute schon unternommen. Im Laufe der kommenden Jahre wollen sie herausfinden, inwieweit das Ghost Imaging tatsächlich einen Vorteil bringt. „Im Fall von FLASH“, so Vartaniants, „geht es darum, die Dynamik lebender Organismen mit einer sowohl räumlichen also auch zeitlichen hohen Auflösung zu betrachten.“

VERBLÜFFENDE EIGENSCHAFTEN

Quantenmaterialien ermöglichen neue Anwendungen



Solche „Impulskarten“ von Elektronenbewegungen liefern Forscherinnen und Forschern die Grundlage, um das Verhalten von Elektronen in Quantenmaterialien zu verstehen.

Computerchips, die schneller rechnen und deutlich weniger Strom verbrauchen. Kabel, die bei Raumtemperatur elektrischen Strom verlustfrei leiten. Und Werkstoffe, die eine Massenproduktion leistungsfähiger Quantencomputer erlauben. All das könnte eine noch junge Werkstoffklasse möglich machen – die Quantenmaterialien. Mit seinen Röntgenquellen arbeitet DESY an den Grundlagen und schafft wichtiges Basiswissen für künftige Anwendungen.

Quantenmaterialien sehen äußerlich nicht viel ungewöhnlicher

aus als andere Stoffe, dafür haben sie es in sich: Die Elektronen in ihrem Inneren interagieren ungewöhnlich stark miteinander und auch mit dem Kristallgitter, weshalb die Fachwelt von „korrelierten Materialien“ spricht. Als Folge dieses innigen Wechselspiels zeigen sich starke Quanteneffekte. Diese äußern sich nicht nur im mikroskopischen Maßstab, sondern sehr deutlich auch im Makroskopischen. Die Folge: Die Stoffe zeigen höchst ungewöhnliche Materialeigenschaften. „Oft genügen schon kleine Änderungen von Temperatur, Druck oder elektrischen Spannungen, und die

Eigenschaften des Materials ändern sich drastisch“, erklärt Martin Beye, wissenschaftlicher Interims-Leiter des Freie-Elektronen-Lasers FLASH bei DESY. „Ein wenig Wärmezufuhr kann zum Beispiel reichen, und aus einem leicht bläulich schimmernden Stückchen wird ein rötlich schimmerndes Stück Metall.“

Bei manchen Quantenmaterialien spielt der Spin der Elektronen – quasi ihr Eigendrehmoment – eine zentrale Rolle: Vereinfacht gesagt kann seine Drehachse entweder nach oben oder nach unten zeigen. Dadurch lassen sich Bits speichern und verarbeiten, die Grundeinheiten des Computers: >>

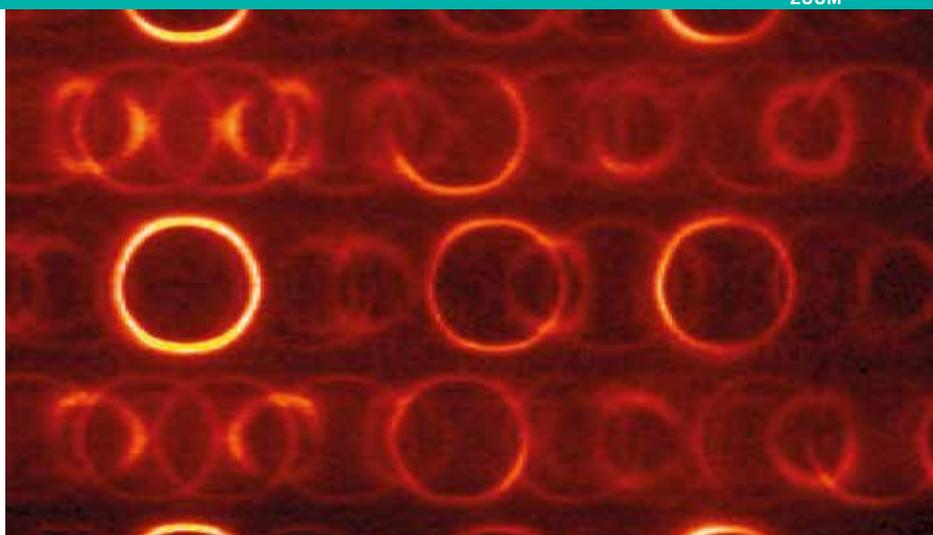
Wenn „Spin up“ eine digitale 1 bedeutet, wäre „Spin down“ die digitale 0. Der Clou: Während bei einem heutigen Computerchip winzige Ströme durch die Leiterbahnen fließen, könnten künftig die Elektronen an ihren Plätzen verharren und lediglich ihren Spin an die jeweiligen Nachbarn weitergeben – in etwa so, als würden die Leute bei einem Umzug nicht jeden Karton einzeln schleppen, sondern eine Kette bilden und die Kartons von Hand zu Hand weiterreichen. Dadurch wären Chips denkbar, die weniger Energie benötigen, da kaum noch Ströme in ihnen fließen. Spintronik nennt sich dieses Forschungsfeld, in dem manche bereits einen vielversprechenden Nachfolger der heutigen Elektronik sehen.

Leitende Blasen

Martin Beye beschäftigt sich mit einer anderen Variante von Quantenmaterialien, mit Legierungen, die Titanoxid enthalten. „Mit den Röntgenquellen bei DESY konnten wir im Detail beobachten, wie dieses Material unter bestimmten Bedingungen ganz plötzlich elektrisch leitend wird“, erläutert



Zweidimensionale Schichtkristalle aus Tantaldisulfid, gezüchtet an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Das Quantenmaterial ist ähnlich blättrig aufgebaut wie Graphit.



Farbcodierte Darstellung des Elektronenimpulses – also von Masse und Geschwindigkeit – in einem Misfit-Kristall, der nur in eine Richtung hohe Symmetrie aufweist.

der Forscher. „Zunächst beobachteten wir kleine leitende Blasen in einem großen, nichtleitenden See. Dann aber wurden die Blasen immer größer, bis sie miteinander verschmolzen, und die Probe wurde schlagartig leitend.“ Solche abrupten Übergänge sind potenziell für neuartige elektronische Bauteile interessant, etwa als Grundlage für einen Quantencomputer.

Zwar dürfte Titanoxid nicht unbedingt als Grundstoff für Quantenchips taugen. Doch die Grundlagenkenntnisse, die sich durch die Untersuchungen ergeben, liefern Hinweise, wie sich neue Elektronikmaterialien maßschneidern lassen könnten. Mit dem geplanten ultimativen Röntgenmikroskop PETRA IV werden sogar noch detailliertere Messungen möglich sein: „Damit ließe sich das Verhalten der Blasen bis auf wenige Nanometer genau beobachten“, schwärmt Beye. „Erst wenn man so genau hinschauen kann, lässt sich wirklich verstehen, wie so ein Material funktioniert.“

Zweidimensionale Materialien

Eine weitere Klasse von Quantenmaterialien erforscht DESY-Physiker Kai Rosnagel – Materialien, die extrem dünn sind, weil sie nur wenige Atomlagen messen. „In

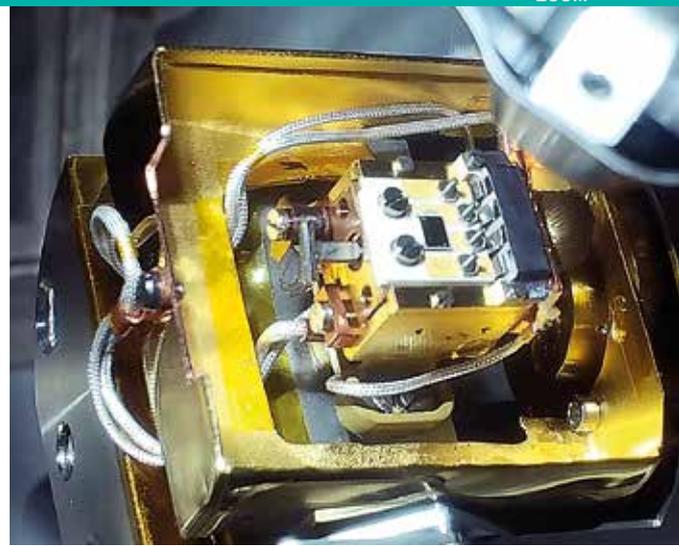
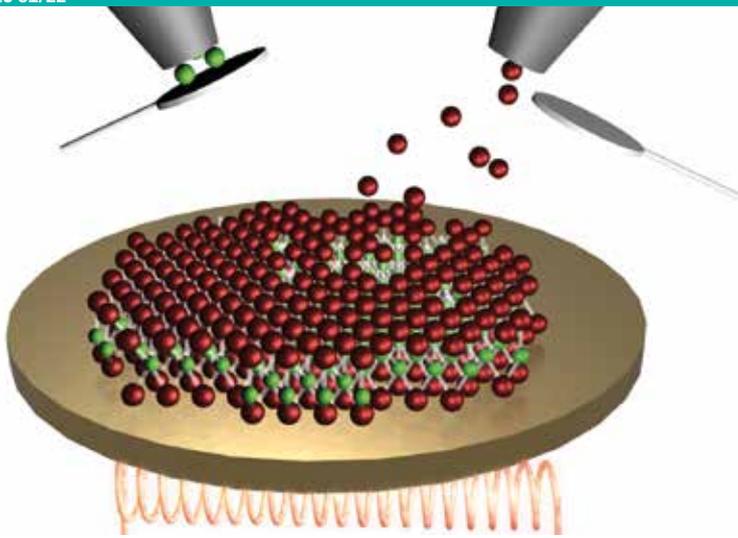
ihnen können sich die Elektronen nur in zwei Dimensionen bewegen, was ungewöhnliche Quanteneffekte nach sich zieht“, sagt er. Graphen

„Erst wenn man so genau hinschauen kann, lässt sich wirklich verstehen, wie so ein Material funktioniert“

Martin Beye, DESY

etwa – eine zweidimensionale Form von Kohlenstoff – kann elektrischen Strom außergewöhnlich gut leiten. Rosnagel dagegen befasst sich mit ultradünnen Sandwich-Strukturen: Außen als Brotscheiben zwei sogenannte Chalkogen-Lagen, den Käse in der Mitte bildet ein spezielles Metall.

„Da diese Materialien so dünn sind, lassen sie sich leicht verbiegen“, erläutert der Forscher. „Damit könnten sie als intelligente Pflaster



Neuartige Quantenmaterialien können mittels Molekularstrahlepitaxie maßgeschneidert hergestellt werden, indem einzelne Atome (hier zum Beispiel grün: Titanatome, rot: Selenatome) unter sehr sauberen Bedingungen (im Vakuum) auf ein Substrat gedampft werden und dort zu einem neuen Material reagieren. Elektronische Bauelemente aus diesen Materialien können dann im Betrieb mittels Photoelektronenspektroskopie bei DESY genau untersucht werden (rechts).

dienen, die man sich auf die Haut klebt und welche die Körpertemperatur oder den Sauerstoffgehalt im Blut messen.“ Die Prozesse, die sich in solchen Materialien abspielen, sind zum Teil extrem schnell – manches passiert innerhalb von Femtosekunden, im millionstel Teil einer milliardstel Sekunde. „Wenn man das verfolgen möchte, braucht man sehr kurze Lichtblitze, wie sie die beiden Röntgenlaser FLASH und European XFEL in Hamburg liefern“, erklärt Rossnagel. „Damit lassen sich regelrechte Stroboskop-Filme der Elektronenbewegungen aufnehmen.“

Nano-Sandwiches

Derzeit erkunden die Fachleute die physikalischen Grundlagen – irgendwann aber könnten die Nano-Sandwiches als Basis für spektakuläre Anwendungen dienen. Denn sie bieten – je nach Metall-Chalkogen-Kombination – eine enorme Vielfalt an elektrischen und optischen Eigenschaften. Und indem man die Lagen auf unterschiedlichste Weise aufeinander stapeln und gegeneinander verdrehen kann, lassen sich durch dieses „Sandwich-Lego“ schier unbegrenzte Kombinationen erreichen. Das verspricht faszinierende Perspektiven, zum Beispiel: „Lässt sich damit



„Damit lassen sich regelrechte Stroboskop-Filme der Elektronenbewegungen aufnehmen“

Kai Rossnagel, DESY

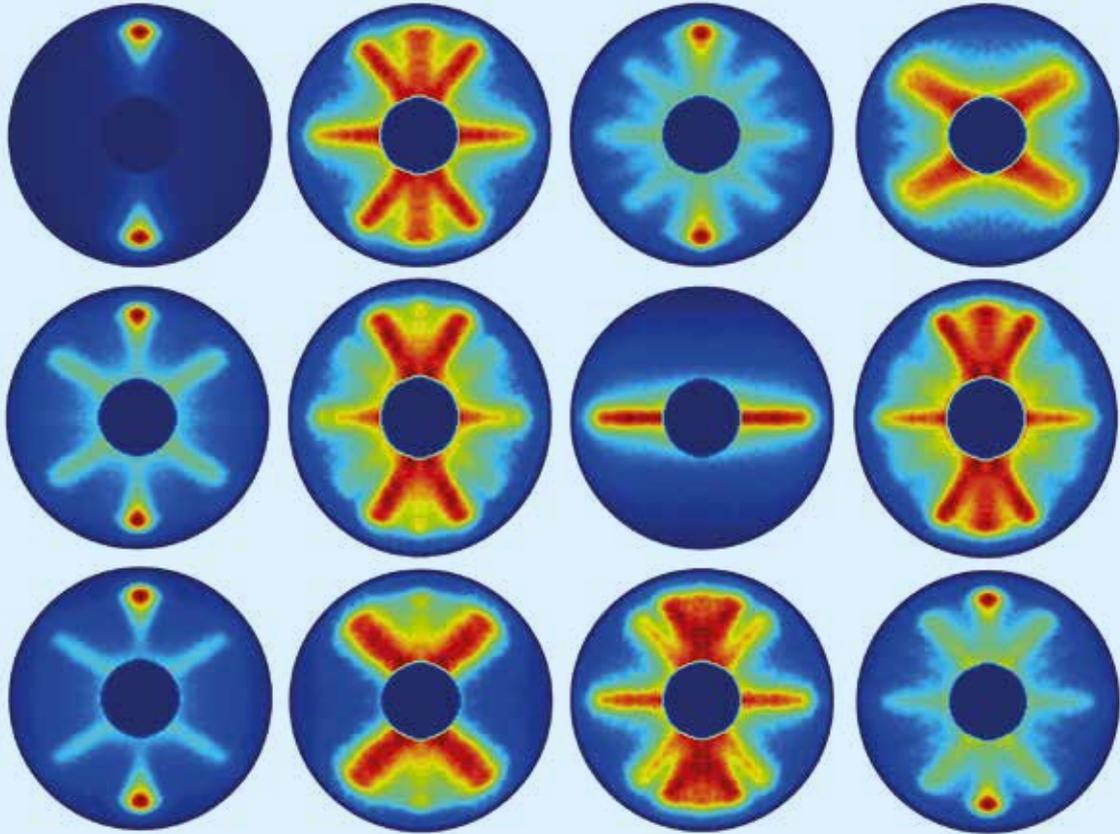
ein Supraleiter designen, der bei Zimmertemperatur funktioniert und nicht mehr gekühlt werden muss?“, fragt sich Rossnagel. Zwar gibt es schon heute Werkstoffe, die Strom verlustfrei leiten. Sie kommen in starken Elektromagneten oder speziellen Stromkabeln zum Einsatz. Allerdings bedürfen diese

Bauteile einer aufwendigen Kühlung, etwa mit flüssigem Stickstoff oder Helium. Ließe sich auf diese Kühlung verzichten, dürfte die Supraleitung deutlich günstiger werden und wäre für weitere Anwendungen interessant.

Qubits auf kleinstem Raum

Eine weitere Vision: Eines Tages könnten die zweidimensionalen Materialien als Qubits fungieren, die fundamentalen Rechenelemente eines Quantencomputers. Die Hoffnung: Dadurch könnten sich Millionen von Qubits auf kleinstem Raum unterbringen lassen – im Idealfall passte ein Quantenchip in ein Smartphone. Allerdings gilt es, zuvor noch diverse Grundfragen zu klären: Wie genau sollen diese Qubits aussehen? Wie lassen sie sich so robust bauen, dass sie ihre Quanteninformation nicht vor schnell verlieren? Und wie können solche Unmengen von Qubits verlässlich angesteuert und ausgelesen werden? „Die DESY-Röntgenquellen sind hervorragende und einzigartige Werkzeuge, um die Eigenschaften solcher Systeme sehr genau zu analysieren“, sagt Kai Rossnagel. „Damit werden wir künftig noch viele Beiträge für die Erforschung von Quantenmaterialien leisten, sicherlich auch für die Industrie.“

Quantenmechanische Rotation eines Carbonylsulfid-Moleküls, aufgenommen mit je rund sieben Piko-sekunden Abstand. Die Farben markieren die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des stäbchenförmigen Moleküls.



QUANTEN-DOMPTEURE

Ausgefeilte Tricks ermöglichen die gezielte Kontrolle von Quanten und Quantensystemen

Quantensysteme sind in der Regel hochempfindlich und deshalb zum Beispiel für leistungsfähige Sensoren und revolutionäre Computerarchitekturen prädestiniert. Doch die hohe Sensibilität ist auch ihre Schwäche: Schon die kleinste Störung kann Quantensysteme aus dem Takt bringen. Deshalb ist es wichtig, sie möglichst gut unter Kontrolle zu haben – unter Quantenkontrolle. Forscherinnen und Forscher haben vielfältige Tricks entwickelt, um Quanten erfolgreich zu bändigen. Dadurch schaffen sie neue Perspektiven, um Zeit extrem genau zu messen oder hochpräzise „Filme“ von molekularen Reaktionen aufzunehmen.

Mit einem raffinierten Verfahren hat etwa eine Arbeitsgruppe um DESY-Forscher Ralf Röhlsberger es geschafft, die inneren Schwingungen

von Eisenatomkernen und deren ausgesandte Strahlung mit enormer Präzision zu kontrollieren – bis auf 1,3 Zeptosekunden genau, das ist der tausendste Teil eines Milliardstels einer milliardstel Sekunde. Das Team regt dazu die Eisenatomkerne in einem hauchdünnen Magnetmaterial mit Blitzen aus der Röntgenquelle PETRA III an. Gleichzeitig schicken

die Fachleute eine Mikrowelle hinein – mit dem Effekt, dass ein kurzer Magnetimpuls durchs Material läuft. Der wiederum beeinflusst das Verhalten der Eisenkerne so, dass die innere Schwingung um 1,3 Zeptosekunden verschoben ist gegen den Ablauf ohne zusätzlichen Magnetimpuls. Mittels ausgefeilter Nachweistechniken kann das Team diesen winzigen Zeitverzug präzise messen.

„Damit haben wir der Wissenschaft ein neues Analysewerkzeug zur Hand gegeben“

Jochen Küpper, DESY

Takt der Kernuhr

Mit Hilfe von Magnetimpulsen lassen sich also Quantensysteme – in diesem Fall schwingende Eisenkerne – überaus gezielt kontrollieren. Perspektivisch scheint möglich, damit eine neue Generation von ultragenauen Uhren präzise einzustellen, die sogenannte Kernuhr. Sie basiert auf dem Schwingungsverhalten von Atomkernen und sollte deutlich

präziser „ticken“ können als heutige Atomuhren. Im Prinzip könnten die bei DESY gewonnenen Erkenntnisse helfen, diese Uhren etwa bei feinsten Temperaturschwankungen neu zu justieren und damit zu stabilisieren. Ähnliches ist für bestimmte Arten von Qubits denkbar, sogenannten Diamant-Fehlstellen. Auch hier könnten sich die Qubits – die elementaren Recheneinheiten eines Quantencomputers – präzise nachregeln lassen.

Eine andere Art von Quantenkontrolle beherrscht das Team um den DESY-Physiker Jochen Küpper: Es ist in der Lage, Moleküle, die frei in einer Vakuumkammer schweben, gezielt in Rotation zu versetzen oder exakt räumlich auszurichten – diese Quanten-Choreographie ist eine wichtige Voraussetzung, um die extrem schnellen Aktionen dieser Moleküle filmen zu können. Zwar gelingt es bereits seit längerem, selbst komplexe Moleküle mit Laserpulsen in der Zange zu halten und auszurichten. Doch dabei muss der Laser die ganze Zeit aktiv sein, was für bestimmte Arten von Experimenten höchst störend ist – insbesondere für Versuche zur chemischen Dynamik. „Wir haben eine neue Methode entwickelt, bei denen der Laser rasch wieder ausgeschaltet wird, nachdem er das Molekül über eine lange Anstiegszeit des Pulses ausgerichtet hat“, erläutert Küpper. „Dadurch lässt sich das ausgerichtete Molekül ungestört vom Laserfeld untersuchen.“

Reif fürs Guinnessbuch

So gelang es, Carbonylsulfid – ein stäbchenförmiges Molekül aus Sauerstoff, Kohlenstoff und Schwefel – per kurzem Laser-Kick in Rotation zu versetzen. Danach ließ sich die quantenmechanische Drehung des Moleküls mit einem speziellen Nachweisverfahren regelrecht filmen. Das Resultat: ein extrem kurzer Film aus 651 Einzelbildern, aufgenommen in 120 billionstel Sekunden, der es sogar ins



Ralf Röhlsberger erforscht Magnetismus und sogenannte kohärente Phänomene.

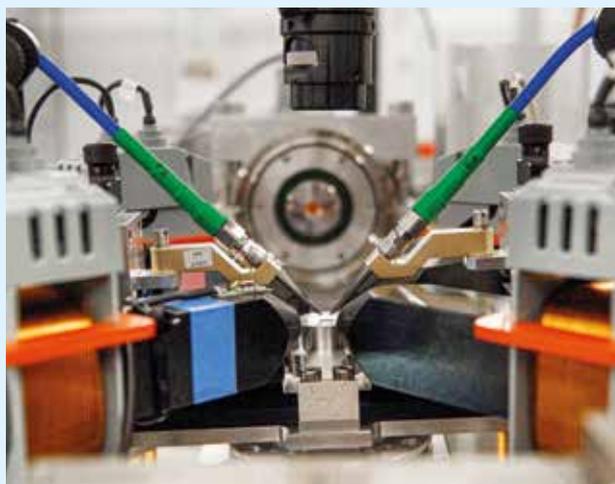
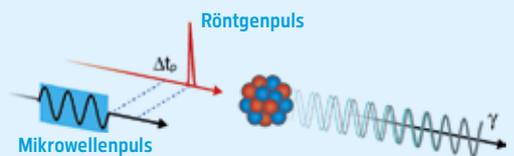
Guinnessbuch der Rekorde schaffte und der Aufnahme eines vollständigen „Quantenteppichs“ entspricht. Außerdem konnte das Team in einem darauf aufbauenden Elektronenbeugungsexperiment die Länge der chemischen Bindungen in Carbonylsulfid bis auf fünf billionstel Meter genau bestimmen – ebenfalls ein Weltrekord.

Jüngst konnte die Arbeitsgruppe ihre Technik weiter verfeinern und ein komplexer geformtes Gebilde per Laserpuls ausrichten – das Biomolekül Indol. Dieses spielt unter anderem bei der Absorption von UV-Strahlung in der Haut eine Rolle, etwa bei der Entstehung von Sonnenbrand. „Eine Herausforderung war, unsere Laser schnell genug abschalten zu können, nachdem sie das Indol ausgerichtet haben“, erklärt Küpper. Nach dem Abschalten steht zwar nur ein kleines Zeitfenster offen, bevor sich das Molekül wieder aus seiner Ausrichtung herausdreht. Doch die Zeit ist lang genug, um das Indol mit UV-Licht anzuregen und seine Reaktion mit raffinierten Methoden zu vermessen. Eine möglichst präzise Ausrichtung ist dabei wichtig, um die einzelnen Bestandteile des Moleküls richtig auflösen zu können – es macht einen erheblichen Unterschied bei den Analysen, ob es „steht“ oder „liegt“.

Dass die Ausrichtung des Indols funktioniert, konnten die Fachleute kürzlich zeigen. Jetzt arbeiten sie an ihrem eigentlichen Ziel: Sie wollen in dem ausgerichteten Molekül die einzelnen Atome und ihre jeweilige Rolle bei den Reaktionen identifizieren. „Im Prinzip ließen sich mit der Methode alle möglichen Moleküle ausrichten und untersuchen, zum Beispiel Vitamine oder Neurotransmitter“, schätzt Küpper. „Damit haben wir der Wissenschaft ein neues Analysewerkzeug zur Hand gegeben, um die Eigenschaften solcher Moleküle in Zukunft detaillierter zu verstehen.“

Schematischer Aufbau des Experiments:

Ein Atomkern wird mittels eines Röntgenpulses angeregt und sendet Gammastrahlung aus. Wird durch eine zweite Anregung mit einem Mikrowellenpuls (vorne links) eine sogenannte Magnonschwingung im Festkörper angeregt, erfährt die Schwingung des Atomkerns und damit die der Gammastrahlung eine Zeitverzögerung, die im Zeptosekundenbereich liegt.



Zeptotaktgeber:

Die Probe auf dem runden Tisch in der Bildmitte ist an Mikrowellenmessspitzen angeschlossen. Die von ihr ausgesandte Röntgenstrahlung wird am Ende mit einem Detektor analysiert. Elektromagnete mit Eisenjoch um den Proben Tisch erzeugen ein Magnetfeld am Probenort, um die Magnetisierung in der Probe auszurichten.

QUANTENTECHNIK HOLT SCIENCE FICTION EIN

In Anton Zeilingers Labor werden Science-Fiction-Träume wahr: Der Wiener Quantenphysiker hat mit seinem Team das Beamen in die Realität geholt. Allerdings zunächst für subatomare Teilchen. Die österreichischen Forscherinnen und Forscher nutzten dazu einen Effekt, den Albert Einstein ablehnend als spukhafte Fernwirkung bezeichnet hatte: die Verschränkung. Nach den Regeln der Quantenphysik lassen sich zwei Teilchen zu einem gemeinsamen Zustand verschränken, der nur als Ganzes beschreibbar ist, jedoch nicht durch die Summe beider Partner.

Das Besondere daran: Die beiden Teilchen lassen sich räumlich trennen, ohne dass der verschränkte Zustand zerstört wird. Wird eines der beiden Teilchen manipuliert, ändert sich das andere entsprechend, auch über große Distanzen. Auf diese Weise hat Zeilingers Team bereits vor 20 Jahren den Quantenzustand eines Lichtteilchens (Photon) unter der Donau hindurch „gebeamt“. Anders als im Raumschiff „Enterprise“ werden dabei Quantenzustände übertragen und nicht die Teilchen selbst. Die Folge ist jedoch dieselbe: Es entsteht eine exakte Kopie, das Original wird zerstört.

Inzwischen haben Teams in aller Welt diese Quantenteleportation ebenfalls umgesetzt und dabei auch gezeigt, dass sie nicht nur für masselose Photonen funktioniert, sondern auch für Teilchen mit Masse wie Elektronen. Das Beamen eines Menschen bleibt allerdings trotzdem vorerst Science Fiction: Die Informationen über die Quantenzustände eines Menschen, die zum Beamen übertragen werden müssten, würden einen CD-Stapel von 1000 Lichtjahren Höhe füllen, wie Zeilinger einmal ausgerechnet hat. Selbst bei der rasantesten heute denkbaren Datenübertragung wäre es wohl schneller zu laufen.

Dennoch hat die Quantenteleportation einen Sinn: Mit ihr lässt sich eine aus physikalischen Gründen abhörsichere Kommunikation realisie-



femtopolis

ren. Denn da sich Quantenzustände nicht klonen lassen, also das Original beim Kopieren immer zerstört wird, würde sich ein Lauscher in der Leitung sofort verraten. Zudem könnte die Quantenteleportation einen Weg zur Kommunikation unter Quantencomputern darstellen.

Das Beamen ist nicht das einzige Science-Fiction-Feature, das sich mit der Quantenphysik umsetzen lässt. Mit DESYs Röntgenlaser FLASH hat ein Forschungsteam beispielsweise durchsichtiges Aluminium hergestellt, wie es „Enterprise“-Schiffsingenieur Scotty im „Star Trek“-Film „Zurück in die Gegenwart“ erschafft. Anders als im Kinoabenteuer blieb das Aluminium im FLASH-Strahl allerdings nur für Sekundenbruchteile transparent und auch nur für Röntgenlicht einer bestimmten Wellenlänge. Ursache der Transparenz war eine Sättigung der Absorption im Aluminium durch den extrem intensiven Röntgenstrahl – die Metallatome konnten einfach keine weitere Strahlung absorbieren und ließen sie ungehindert passieren.

In einem weiteren Experiment gelang es einer Gruppe um DESY-Forscher Ralf Röhlsberger dann, auch Eisen transparent zu machen. Hierbei spielte die Verschränkung der Atome in zwei dünnen Eisenschichten die zentrale Rolle. Die Schichten wurden zwischen zwei winzigen Röntgenspiegeln platziert, wo sich eine stehende Röntgenlichtwelle bildete. Eine Eisenschicht befand sich dabei genau auf dem Wellenkamm, die andere im Wellental. Sind die Atome beider Schichten verschränkt, wird das Eisen durchsichtig. Der Effekt hielt wiederum nur Sekundenbruchteile, könnte aber nach Ansicht von Röhlsberger für die Entwicklung von Quantencomputern nützlich sein, unter anderem für optische Schalter.



Tommaso Calarco leitet am Forschungszentrum Jülich das Peter-Grünberg-Institut für Quantenkontrolle. Er ist einer der Initiatoren des milliardenschweren Flagship-Programms, mit dem die EU die Quantentechnologien in Europa fördert.

femto: Im Oktober 2018 ging das Quantum-Flagship-Programm der Europäischen Union an den Start. Was war die Motivation, warum wurde diese Initiative ins Leben gerufen?

Tommaso Calarco: Zwar gab es damals in Europa bereits viel wissenschaftliche Expertise in Sachen Quantentechnologien. Aber anders als die großen Konzerne insbesondere in den USA wollte die europäische Industrie noch nicht so richtig in diese Zukunftstechnologie investieren, da gab es eine Lücke. Also musste die öffentliche Hand ins Spiel kommen, um solche Investitionen anzuschieben. Das Programm ist auf zehn Jahre angelegt, alles in allem sollte es eine halbe Milliarde Euro umfassen, eine Hälfte von der Europäischen Kommission, die andere von den Mitgliedsstaaten.

femto: Das Flagship-Programm läuft jetzt seit gut drei Jahren. Was hat sich in dieser Zeit getan?

„MIT EINEM LEISTUNGSSTARKEN QUANTENCOMPUTER RECHNEN WIR IN 10 BIS 15 JAHREN“

Tommaso Calarco: Da ist einiges passiert. Wir sehen erste Erfolge, sowohl wissenschaftlich als auch industriell. Einige der Weltmarktführer in den Bereichen Quantencomputer und Quantenkommunikation sind inzwischen in Europa etabliert. Es haben sich Industrieinitiativen gebildet, zum Beispiel das „European Quantum Industry Consortium“, kurz QuIC. Und es wurden mehrere Startups gegründet, die Quantencomputer verkaufen, etwa in Österreich, Frankreich, Finnland und Deutschland. Außerdem ist das Programm gehörig aufgestockt worden. Die EU wird bis 2027 fast zwei Milliarden Euro zusätzlich investieren, hinzu kommen weitere Programme der Mitgliedsstaaten, zum Beispiel aus Frankreich, Italien und Deutschland. Insgesamt werden wir in den nächsten Jahren nicht eine Milliarde Euro in die Quantentechnologien investieren, sondern sieben Milliarden!

femto: Ist damit der Vorsprung, den die USA und vielleicht auch China hatten, aufgeholt?

Tommaso Calarco: Nach wie vor gibt es Punkte, wo uns die USA voraus sind, insbesondere bei Quantencomputern, die mit supraleitenden Qubits funktionieren. Hier haben Google und IBM große Anstrengungen unternommen, und wir konnten den Vorsprung zwar verringern, aber

noch nicht ganz aufholen, sind aber auf einem guten Weg. In anderen Bereichen dagegen, etwa bei Quantensimulatoren auf Basis von Neutral-Atomen, sind wir mittlerweile gleichauf.

femto: Worauf wird es in den nächsten Jahren ankommen, wenn es darum geht, die Forschungsergebnisse in die Praxis zu übertragen?

Tommaso Calarco: Bei den Quantencomputern müssen wir Anzahl und Qualität der Qubits steigern. Eine höhere Anzahl allein reicht nicht, wir brauchen hochwertige Qubits mit niedrigen Fehlerraten. Zwar konnten Google und auch die Chinesische Akademie der Wissenschaften mittlerweile zeigen, dass ein Quantenrechner spezielle Probleme viel schneller lösen kann als ein Supercomputer. Doch bislang sind diese Probleme eher von akademischem Interesse. Jetzt wollen wir demonstrieren, dass ein Quantencomputer auch Probleme von wirtschaftlichem Belang angehen kann. Gleichzeitig gibt es Herausforderungen auf der Software-Seite, insbesondere was die Verzahnung mit Hochleistungsrechnern und das Anbieten von Cloud-Diensten für die Industrie angeht.

femto: Wann könnten die Quantentechnologien so richtig durchstarten?

Tommaso Calarco: Bei der Quantenkommunikation erwarten wir, dass in drei bis fünf Jahren die ersten Weichen einer Kommunikationsinfrastruktur gestellt sind und erste Segmente existieren. Mit einem wirklich leistungsstarken Quantencomputer rechnen wir in 10 bis 15 Jahren. Wobei spezielle Anwendungen schon in fünf bis sieben Jahren nutzbringend sein könnten, etwa die Quantensimulation von Materialien oder Chemikalien.

femto: Es gibt heute in Europa unzählige Quantentechnologie-Aktivitäten, sowohl an den Universitäten als auch in der Industrie. Ist das alles gut genug koordiniert oder gibt es da Verbesserungspotenzial?

Tommaso Calarco: Auf EU-Ebene ist die wissenschaftliche Community gut vernetzt, wozu auch das EU-Flagship-Programm beigetragen hat. Was wir noch weiter stärken wollen, ist die Verzahnung mit der Industrie. Aber weil derzeit so viele Akteure aus der Industrie Interesse an den Quantentechnologien zeigen, sind wir optimistisch, dass sich das gut weiterentwickeln wird.

.....
Quantum-Flagship-Programm der EU:
<https://qt.eu>

Disruptives Potenzial

Quantentechnologien bieten enorme Perspektiven für Wirtschaft und Gesellschaft

Quantentechnologien bergen vielversprechende Möglichkeiten für Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft: Sie sollen komplexe Probleme schneller und vor allem besser lösen, neue Medikamente berechnen, Messtechnik und Bildgebungsverfahren für Anwendungen von der Medizin bis hin zu Umwelttechnologien neu aufstellen. Das sind nur einige der vielen denkbaren Anwendungen, an denen heute bereits weltweit viele Forscherinnen und Forscher arbeiten. Schätzungen zufolge wird etwa das Quantencompu-

ting schon bis zum Jahr 2040 ganze Branchen verändern und für einen geschätzten Umsatz von bis zu 850 Milliarden Dollar (rund 767 Milliarden Euro) sorgen. Der Technologie wird eine extreme wirtschaftliche Durchschlagskraft zugetraut.

Und das nicht erst in ferner Zukunft. Zwar wird es laut Expertenmeinung mindestens 10 bis 20 Jahre dauern, bis das wohl prominenteste Beispiel für Quantentechnologie – der Quantencomputer – breite Anwendung findet. Doch erste Prototypen zeigen bereits, dass Rechnen mit den sogenannten

Qubits tatsächlich deutlich schneller funktioniert und komplexere Aufgaben meistern kann als mit klassischen Bits. Jetzt gilt es noch, die Fehleranfälligkeit zu beheben und die Rechenkapazität zu erhöhen.

Fördergelder und Umsetzungsprobleme

In Bereichen wie Kommunikation, Sensorik und Materialwissenschaft ist der konkrete Einsatz von Quantentechnologien schon näher, moderne Laser und Transistoren arbeiten schon heute damit. „Quantentechnologien sind in unserer Realität bereits heute angekommen“, sagt Michael Bolle, ehemaliges Mitglied des Expertenrats Quantentechnologie der Bundesregierung und ehemaliger Geschäftsführer, Chief Technology Officer und Chief Digital Officer bei der Robert Bosch GmbH. „Da sie aber für die Zukunft noch viel mehr Potenzial haben und disruptiv wirken können, gilt es schon jetzt, massiv in solche Technologien zu investieren – sowohl von staatlicher, als auch von industrieller Seite.“



„Wer eine neue Technologie aufbauen will, braucht einen langen Atem“

Arik Willner, DESY

Für einen führenden Technologiestandort sei es ein absolutes „Must do“, eine solche Entwicklung mit voranzutreiben, empfiehlt der Expertenrat in seiner „Roadmap Quantencomputing“. „In der Grundlagenforschung ist Deutschland da auch sehr gut aufgestellt“, ergänzt Bolle. „Aber beim Transfer des Wissens in konkrete Industrieprodukte, also beispielsweise in komplette Quantencomputer, sind uns die USA und asiatische Länder weit voraus.“ Zwar sprudeln inzwischen die Fördergelder, „doch wir haben ein Umsetzungsproblem – wie sollen wir die vielen verschiedenen Akteure in Forschung und Industrie – auch europaweit – orchestrieren, um die Gelder effizient einzusetzen?“ Die Roadmap macht dazu Vorschläge, empfiehlt die Gründung von Hubs, Kompetenznetzwerken und der Dachorganisation „Deutsche Quantengemeinschaft“.

Brücke zu Industrie und Gesellschaft

DESY, das Michael Bolle als Mitglied des Innovation Advisory Committee berät, möchte vorangehen: „Es kann eine Brücke bilden zwischen Grundlagenforschung, Industrie und Gesellschaft“, sagt Bolle. Das Forschungszentrum verfüge über hochkompetente Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in diesem Bereich und viel Erfahrung mit Transfer in die Industrie. „Wir haben die Fachleute, wir haben die Großanlagen zur Untersuchung von Quantenmaterialien, und wir haben mit der Science City Hamburg Bahrenfeld schon jetzt faktisch ein Ökosystem, in dem wir mit Partnern wie der Max-Planck-Gesellschaft, der Technischen Universität Hamburg und der Hochschule für Angewandte Wissenschaften sowie diversen Unternehmen zusammenarbeiten und in dem Start-ups durchstarten können“, sagt DESYs Chief Technology Officer (CTO) Arik Willner.

Zudem könne DESY mit seinen einzigartigen technischen Möglich-



„Quantentechnologien sind in unserer Realität bereits heute angekommen“

Michael Bolle, Stiftungsratsvorsitzender der Carl-Zeiss-Stiftung und ehemaliges Mitglied des Expertenrats Quantentechnologie der Bundesregierung

keiten der Großforschungsanlagen etwa zur Normierung und Qualitätssicherung von Quantentechnologie beitragen. „Mit unseren Röntgenanlagen lässt sich zum Beispiel präzise messen, ob ein Quantenbauteil genauso reagiert und funktioniert, wie es soll“, erläutert der DESY-CTO. Darüber hinaus können bei DESY Physikerinnen, Ingenieure und Informatikerinnen ausgebildet werden – die Quantentechniker der nächsten Generation. Auch einen eigenen Studiengang Quantentechnologie in Hamburg hält der DESY-Manager für möglich.

Von „Push“ zu „Pull“

So ist DESY bereits im engen Austausch mit Hochschulen, akademischen und industriellen Akteuren wie etwa dem neuen Innovationszentrum für Quantentechnologien

des DLR in Hamburg. DESY selbst bündelt seine Aktivitäten in der Initiative DESY Quantum. „Die Saat ist gesät“, sagt Willner. Jetzt sei Ausdauer gefragt. Das bedeute auch für öffentliche Geldgeber: Nicht nervös machen lassen von zwischenzeitlichen Erfolgsmeldungen aus den USA oder China. „Wer eine neue Technologie aufbauen will, braucht einen langen Atem – und nachhaltige Förderung, die nicht auf halber Strecke abbricht.“

Dann, so schreibt der Expertenrat in der Roadmap, gelinge der Übergang von „Push to Market“, also der Subventionsabhängigkeit einer neuen Technologie, hin zu „Market Pull“ – der Technologiestandort wird so attraktiv, dass er Unternehmen und Gelder anlockt. „Die Welt wartet nicht auf Deutschland“, mahnt der Expertenrat. „Wir müssen jetzt starten.“

UMWÄLZENDE FOLGEN

Der Begriff „disruptiv“ beschreibt umwälzende Folgen einer neuen Technologie für einen bestimmten Sektor oder sogar die ganze Gesellschaft. Er soll betonen, dass eine Technologie etwas radikal Neues bringt und wird oft synonym für „revolutionär“ eingesetzt. Während der Begriff heute gern als Modewort benutzt wird, erwarten Fachleute von der Quantentechnologie echte Disruptionen. Denn sie wird nicht nur das Computing revolutionieren, sondern voraussichtlich auch viele andere technische Disziplinen ebenso wie Bereiche der Gesellschaft. Unser Verständnis von Bereichen der Natur, vom Leben auf molekularer Ebene und vom Gehirn dürfte viel genauer werden. Die Medizin wird nach Expertenerwartung ebenso profitieren wie etwa die Logistik und Mobilität. „Zur Wahrheit gehört allerdings auch, dass Quantentechnologien missbraucht werden könnten“, sagt Michael Bolle. „Zum Beispiel, um komplexe Verschlüsselungen zu hacken.“ Die schöne neue Quantenwelt birgt also neben den Chancen auch potenziell disruptive Gefahren.

SPEKTRUM

Nachrichten aus der Forschung

Doppelphotonentechnik: Nach der Absorption eines Röntgenphotons kann sich das Wassermolekül so weit aufbiegen, dass sich nach nur etwa zehn Femtosekunden (billiardstel Sekunden) beide Wasserstoffatome (grau) gegenüberstehen, mit dem Sauerstoffatom (rot) in der Mitte. Diese Bewegung lässt sich durch die Absorption eines zweiten Röntgenphotons untersuchen.



Röntgenlaser zeigt Entstehung von Strahlungsschäden

Mit dem europäischen Röntgenlaser European XFEL hat ein internationales Forschungsteam neue Einblicke in die Entstehung von Strahlungsschäden in biologischem Gewebe gewonnen. Die Untersuchung zeigt erstmals im Detail, auf welche Weise Wassermoleküle durch energiereiche Strahlung in potenziell gefährliche Radikale und elektrisch geladene Ionen auseinanderbrechen, die im Organismus dann schädliche Reaktionen auslösen können. Da Wasser in jedem lebenden Organismus vorkommt, steht diese sogenannte Photolyse von Wasser, also die Spaltung der Wassermoleküle (H_2O) durch energiereiche Strahlung, oft am Beginn der Entstehung von Schäden.

Das Team um Maria Novella Piancastelli und Renaud Guillemin von der Pariser Sorbonne, Ludger Inhester

von DESY und Till Jahnke von European XFEL beschoss Wasserdampf mit den Blitzen des Röntgenlasers und analysierte die Reaktion mit einer neuen Technik. Der Zerfall des Wassermoleküls läuft demnach deutlich komplexer ab als zunächst erwartet. Das Molekül beginnt, sich zu dehnen und zu strecken, bevor es schließlich auseinanderbricht. Die beiden Wasserstoffatome (H), die normalerweise im Winkel von 104 Grad an das Sauerstoffatom (O) gebunden sind, können sich dabei so weit aufschaukeln, dass sie sich nach nur zehn Femtosekunden (billiardstel Sekunden) mit rund 180 Grad in etwa gegenüberstehen.

Das Sauerstoffatom wird dadurch beim Zerschlagen des Moleküls nicht so stark weggeschleudert, weil sich die Impulse der beiden wegfliegenden Wasserstoffkerne nahezu ausgleichen und der Sauerstoff weit-

gehend ruhend in der Mitte bleibt. In wässriger Umgebung kann dieses freie Sauerstoffradikal dann leichter zu weiteren potenziell schädlichen chemischen Reaktionen führen. „Der Zerfallsprozess des Wassermoleküls ist ein wichtiger initialer Schritt für weitere Reaktionsketten, die am Ende zu Strahlungsschäden führen“, betont Inhester, der im Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) arbeitet, einer Kooperation von DESY, Universität Hamburg und der Max-Planck-Gesellschaft. Die neu gewonnenen Einsichten adressieren elementare Fragen über Reaktionsdynamiken in Wasser, zu deren weiterer Erforschung derzeit das Centre for Molecular Water Science (CMWS) mit internationalen Partnern bei DESY aufgebaut wird.

Physical Review X,

DOI: 10.1103/PhysRevX.11.041044

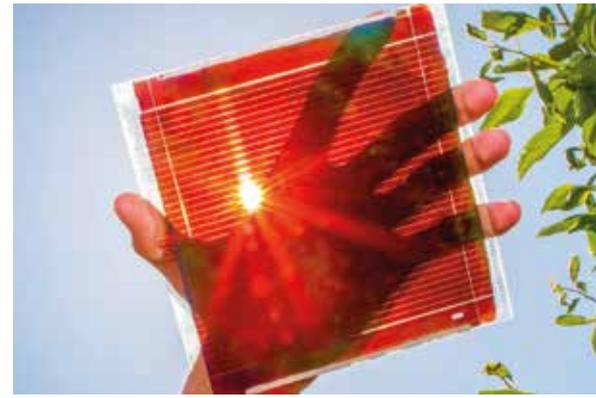
Atmosphäre verändert Stabilität neuartiger Solarzellen

Ein internationales Wissenschaftsteam unter Leitung der Technischen Universität München (TUM) hat an DESYs Röntgenquelle PETRA III erstmals beobachtet, wie sich unterschiedliche Atmosphären auf den Betrieb neuartiger Hochleistungssolarzellen aus Perowskit auswirken. Die Forscherinnen und Forscher entdeckten dabei, dass eine Stickstoffatmosphäre diese Degradation aufhält, ein Vakuum hingegen zum schnellen Abbau der strukturellen Zusammensetzung und damit auch der Effizienz der Zellen führt.

Perowskite sind sehr häufig vorkommende Mineralien. In den vergangenen zehn Jahren konnten For-

schende den Wirkungsgrad von Perowskit-Solarzellen von 3,8 auf 25,5 Prozent erhöhen und sie somit wettbewerbsfähig machen. Das Haupthindernis für eine Industrialisierung ist die oft geringe Langzeitstabilität der Zellen. Innerhalb weniger Stunden kann die Stromausbeute drastisch sinken, da sich die Nanostruktur der Kristalle ändert und diese sich entmischen.

Die Forschungsgruppe um TUM-Forschungsleiter Peter Müller-Buschbaum hat jetzt gezeigt, dass verschiedene inerte Atmosphären Degradationspfade für Perowskit-Solarzellen beschleunigen oder unterdrücken können. Die Entdeckung



Solarzellen aus Perowskit sind eine vielversprechende Alternative zu den herkömmlichen Varianten aus Silizium.

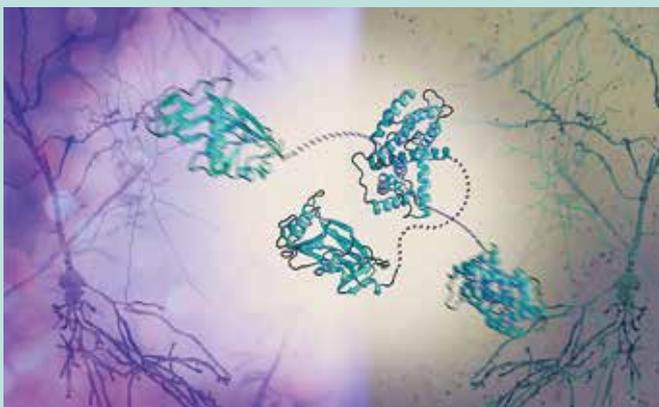
könne Testprotokolle für Experimente zur Langzeitstabilität von Perowskit-Solarzellen verbessern und das Bewusstsein für solche Effekte auch in anderen Studien schärfen, schreibt das Team.

Nature Energy,

DOI: 10.1038/s41560-021-00912-8

Bild: TNO

Herpesviren besitzen „Handschellen“

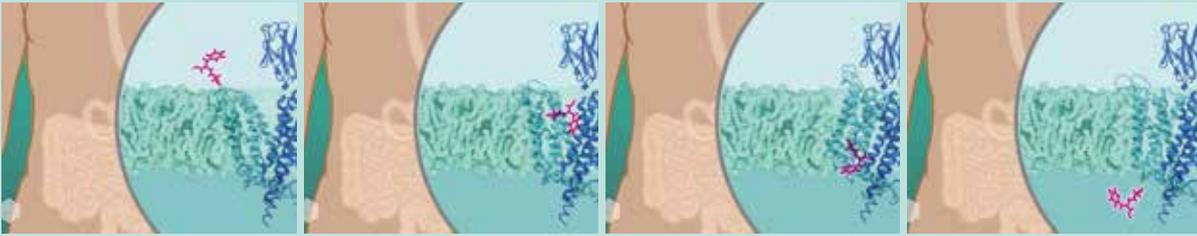


Viele Viren besitzen spezialisierte Proteine, um Wirtszellen umzuprogrammieren. Das Virusprotein pUL21 kann dank seiner großen Flexibilität nicht nur ein einziges, sondern viele Wirtspoteine kontrollieren.

Herpesviren legen bestimmten Proteinen in infizierten menschlichen Zellen eine Art molekularer Handschellen an, um sie zu gewünschten Aktionen zu zwingen. Das zeigen Untersuchungen des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III. Die Forscherinnen und Forscher um EMBL-Gruppenleiter Dmitri Svergun sowie Stephen Graham und Colin Crump von der Universität Cambridge hatten die Wirkung des Herpes-Simplex-Virus 1 (HSV-1) auf sogenannte Phosphatasen untersucht. Diese gehören zu den Produktionsmanagern in der Zelle, die andere Proteine bei Bedarf an- und abschalten.

Die Untersuchung zeigt, dass ein virales Protein namens pUL21 die Phosphatase und andere menschliche Proteine bindet, die an der Proteinsekretion beteiligt sind. pUL21 hat demnach die Form einer flexiblen Schnur mit starren Komponenten an beiden Enden, die andere Proteine binden. Es kettet die menschliche Phosphatase 1 an ein anderes Protein wie eine Handschelle. Durch die Annäherung der beiden Proteine zwingt pUL21 die Phosphatase, die Aktivität des anderen Proteins zu steuern, was wiederum die Produktion und Freisetzung von Viruskopien aus der Zelle unterstützt. „Zu verstehen, wie sich das virale Protein verhält und mit menschlichen Proteinen interagiert, könnte helfen, neue Medikamente und Impfstoffe gegen Herpes zu entwickeln“, sagt Graham.

Bild: EMBL, Isabel Romero Calvo



PepT1 ist ein vielseitiger Peptid-transporter, der zahlreiche Moleküle durch die Darmwand ins Blut befördern kann.

Struktur eines Transportproteins soll bessere Medikamente ermöglichen

Ein Team vom Centre for Structural Systems Biology (CSSB) bei DESY hat die Struktur eines wichtigen Nährstofftransporters aus dem menschlichen Darm entschlüsselt. Das Protein PepT1 sitzt in der Darmwand und transportiert kleine Moleküle aus der Nahrung in den Blutkreislauf, damit unser Körper diese sogenannten Peptide zum Aufbau eigener, neuer Proteine nutzen kann.

PepT1 transportiert aber nicht nur Nahrungspeptide, sondern auch verschiedene Arten von Arzneimitteln,

zum Beispiel Antibiotika, antivirale Mittel und Medikamente gegen Bluthochdruck. Allerdings befördert PepT1 die Medikamente weniger effizient als viele der natürlichen Peptide. Infolgedessen gelangt nur ein Bruchteil der Medikamente, die wir aufnehmen, in unseren Blutkreislauf. Der Rest bleibt im Darm, was zu verschiedenen Nebenwirkungen führen kann.

„Derzeit ist es fast unmöglich vorherzusagen, ob ein Wirkstoffkandidat die Darmwand über dieses Transportsystem überwinden kann“, sagt

Christian Löw vom Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL), der die Studie zusammen mit Thomas Marlovits von DESY und dem Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE) geleitet hat. „Jetzt, da wir wissen, wie die PepT1-Struktur aussieht, ermöglicht dies die Entwicklung neuer Medikamente, die PepT1 gezielt nutzen, um die Darmwand viel effizienter als bisher zu passieren.“

Science Advances,
DOI: 10.1126/sciadv.abk3259

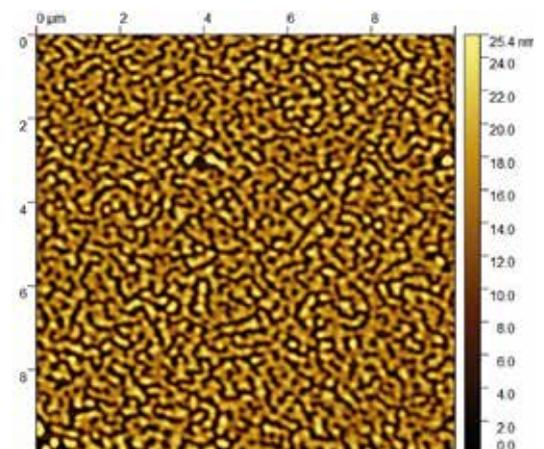
Bild: EMBL, Isabel Romero Calvo

Flexible und transparente Magnete

Eine neue Klasse organischer magnetischer Materialien verspricht innovative Anwendungen und könnte eine nachhaltige Alternative zu Metallmagneten mit Seltenen Erden ermöglichen. An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III hat ein internationales Team erstmals Magnetismus in rein organischen Dünnschichten nachgewiesen. Untersucht wurden dazu sogenannte organische Radikale – das sind Kohlenstoffverbindungen, die ein ungepaartes Elektron besitzen. Dies resultiert in einem permanenten magnetischen Moment, das nicht auf die Wirkung eines äußeren Magnetfelds zurückzuführen ist.

„Bislang kannte man den Magnetismus rein organischer Radikale nur von Kristallen, während er von dünnen Filmen völlig ungeklärt war“, erläutert Forschungsleiterin Maria Benedetta Casu von der Universität Tübingen. Für eine Anwendung sind jedoch in der Regel Dünnschichten nötig. Mit einer

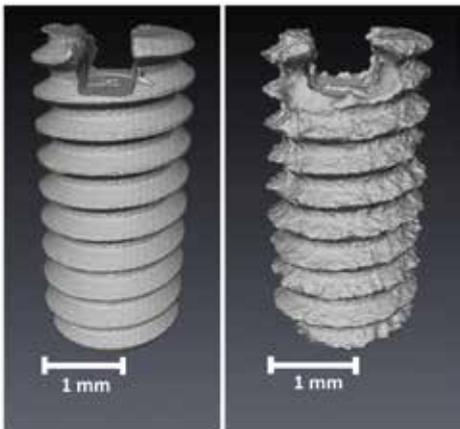
Rasterkraftmikroskop-Aufnahme eines magnetischen Dünnschichtfilms aus organischen Radikalen



geschickten Kombination aus tiefen Temperaturen und einem starken Magnetfeld konnte das Team nun zeigen, dass die Radikal-Dünnschichten tatsächlich einen langreichweitigen Magnetismus aufweisen und sich ihre Eigenschaften sogar durch die Bedingungen bei der Herstellung beeinflussen lassen. „Diese Ergebnisse eröffnen den Weg zu flexiblen, leichten und transparenten Magneten und damit zu einer Vielzahl neuer, zukunftsweisender Anwendungen“, betont Casu.

Chem, DOI: 10.1016/j.chempr.2021.11.021

Bild: Universität Tübingen, Maria Benedetta Casu



Die Untersuchung an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III zeigte nach 56 Tagen (rechts), dass als erstes die Spitzen beziehungsweise Zähne des Gewindes aufgelöst und nach und nach abgerundet werden. Dagegen schreitet die Korrosion in den Gewindetälern nicht so stark voran.

Erwünschte Korrosion

Knochenschrauben und -platten, die sich von selber auflösen, nachdem ein gebrochener Knochen verheilt ist, versprechen einen großen Nutzen – sie könnten manchen Betroffenen eine Folgeoperation ersparen. Ein vom Helmholtz-Zentrum Hereon geführtes Forschungsteam konnte nun erstmals mit einer 3D-Röntgenmethode quantitativ herausfinden, wie sich verschiedene Magnesiumlegierungen unter körperähnlichen Bedingungen mit der Zeit auflösen.

Die Forscherinnen und Forscher hatten Schrauben aus zwei unterschiedlichen Legierungen hergestellt, die eine mit fünf, die andere mit zehn Prozent Gadolinium. Diese Proben setzten sie 56-Tage lang in Petrischalen, gefüllt mit körperflüssigkeitsähnlichen Gemischen aus Salzen, Vitaminen und Proteinen, in Brutschränken körperähnlichen Bedingungen aus und untersuchten sie mehrfach an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III.

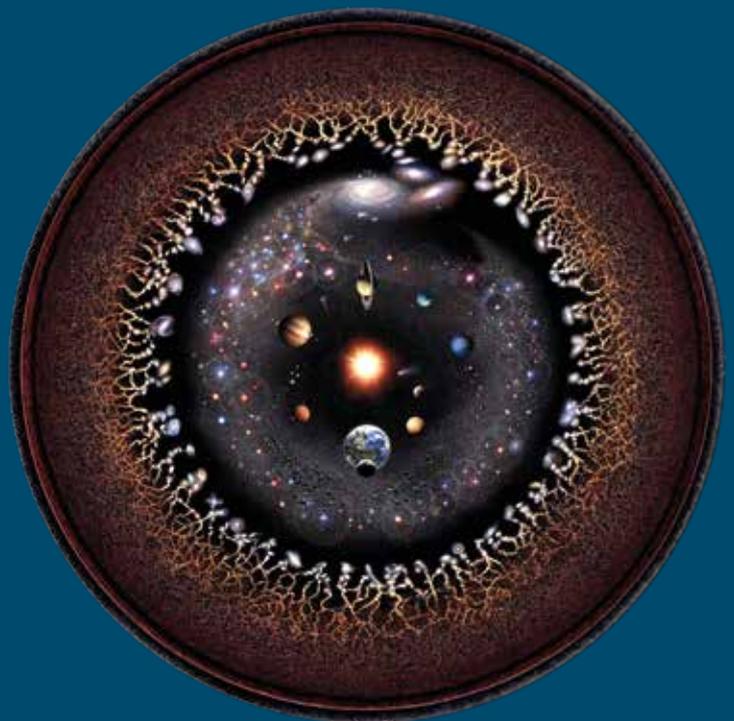
„Die Magnesiumlegierung mit fünf Prozent Gadolinium korrodierte deutlich schneller als die mit zehn Prozent“, sagt Wiese. Hochgerechnet würde sich eine Schraube mit wenig Gadolinium nach etwas mehr als vier Jahren vollständig im Körper aufgelöst haben. Eine mit viel Gadolinium wäre dagegen erst nach circa acht Jahren komplett verschwunden. Das bedeutet: Kommt es nach einem Knochenbruch auf eine langfristige Stabilisierung an, sollten besser Magnesiumschrauben mit dem höheren Gadoliniumgehalt implantiert werden.

Journal of Magnesium and Alloys, DOI: 10.1016/j.jma.2021.07.029

femtomenal

46 600 000 000
LICHTJAHRE HORIZONT.

Wer auf einer hohen Düne am Meer steht, hat einen Horizont von vielleicht 20 Kilometern. Im Weltall dagegen ist der Horizont noch erheblich weiter: Die Grenze des beobachtbaren Universums befindet sich nach heutigem Wissen in einer Distanz von rund 46,6 Milliarden Lichtjahren. Das ist deutlich weiter, als Licht während des bisherigen Alters des Kosmos von 13,8 Milliarden Jahren reisen konnte. Aber der Raum selbst hat sich seit dem Urknall immer weiter ausgedehnt, wie ein Hefeteig, und so ist die Grenze des beobachtbaren Universums immer weiter in die Ferne gerückt. Dabei hat die Raumdehnung auch die Lichtwellen selbst gestreckt, so dass ferne Objekte langwelliger, also röter erscheinen, als sie in Wahrheit sind. Diesen Effekt nennen Astronominen und Astronomen kosmische Rotverschiebung, und mit ihr lässt sich die Entfernung eines Objekts bestimmen.



In der künstlerischen Darstellung hat der Südamerikaner Pablo Carlos Budassi das beobachtbare Universum in einer logarithmischen Skalierung dargestellt – von unserem Sonnensystem im Zentrum über den Nachbarstern Alpha Centauri, die Milchstraße, ihre Nachbargalaxie Andromeda und fernere Galaxien bis zum sogenannten Kosmischen Netz, der Kosmischen Hintergrundstrahlung und dem Plasmazustand kurz nach dem Urknall.

Vorbild

Strahlentierchen

Wie eine ungewöhnliche Allianz von Physikern und Meeresbiologen schwere Magnete auf neuartige Beine stellt

Kunstvoll: Blick ins Detail des ungleichmäßig geformten Prototyps eines Magnetuntergestells für PETRA IV

Strahlentierchen gehören zu den kleinsten Lebewesen der Welt. Die größten unter ihnen kann man mit bloßem Auge gerade so als winzige Pünktchen erkennen. Nicht selbst zur Fortbewegung fähig, lassen sich die Einzeller von der Strömung nahe der Meeresoberfläche treiben und ernähren sich von Partikeln, die sich in ihren „Strahlen“ verfangen – das sind längliche Auswüchse ihres Endoskeletts zu allen Seiten. Wer die Zeichnungen von Ernst Haeckel anschaut, die der berühmte Naturforscher im 19. Jahrhundert auf Basis von Mikroskopaufnahmen anfertigte, ist fasziniert von der filigranen Formenvielfalt dieser Kleinlebewesen: Ihre radial abstehenden Fortsätze werden gestützt von dünnen Stacheln aus Siliziumdioxid und fein verästelten sogenannten Mikrotubuli, die aus Proteinen bestehen. Manche Exemplare sehen mit ihren symmetrischen Armen aus wie Schneekristalle, andere gleichen Schmuckbrotschen oder rundlichen Bienennestern mit sechseckigen Waben in ihrem Zentrum und Zacken nach außen.

Kaum zu glauben, dass ausgerechnet diese feingliedrigen Winzlinge, die seit Urzeiten unsere Meere bevölkern, zum Vorbild für den Bau einer kilometergroßen Teilchenbeschleunigeranlage mit ihren massiven Hightech-Maschinen werden sollen. Doch genauso ist es: Einige unverzichtbare Bestandteile des neuen hochauflösenden 3D-Röntgenmikroskops PETRA IV, das in den kommenden Jahren bei DESY in Hamburg entstehen soll, werden wohl die Konstruktionsprinzipien der Strahlentierchen nachahmen.

Dabei handelt es sich um die Untergestelle der Magnete, die den Teilchenstrahl der Anlage auf seiner Ringbahn halten. Diese stählerne Tische, von den Fachleuten Girder genannt, sind um die drei Meter lang, 60 Zentimeter breit und tonnenschwer, damit sie ein unerschütterliches, solides Fundament bieten. „Doch die enormen Anforder-

ungen an die Präzision der nächsten Beschleunigergeneration können herkömmliche Gestelle nicht mehr erfüllen“, sagt Markus Körfer, Leiter der Gruppe Maschinen- und Experimenteaufbau bei DESY.

Mikrometergenau

PETRA IV soll durch einen umfassenden Umbau die bisherige Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle PETRA III ersetzen. Schon diese ist eine der stärksten Anlagen ihrer Art auf der Welt und dient Forschung und Industrie für Untersuchungen

„PETRA IV wird den Röntgenblick auf alle Längenskalen erweitern, von Millimetern bis hinunter zu einzelnen Atomen“

Wim Leemans, DESY

etwa in der Materialwissenschaft. Ihr Elektronenstrahl produziert ein extrem brillantes Röntgenlicht, mit dem die Forschenden in verschiedenen angeschlossenen Experimentierstationen ihre Proben durchleuchten. „PETRA IV wird den Röntgenblick auf alle Längenskalen erweitern, von Millimetern bis hinunter zu einzelnen Atomen“, sagt DESY-Beschleunigerdirektor

Wim Leemans. „So werden die Forschungsteams noch genauer als bisher Prozesse im Inneren eines Katalysators, einer Batterie oder eines Mikrochips unter realitätsnahen Betriebsbedingungen analysieren und Werkstoffe mit Nanostrukturen oder auch Wirkstoffe für Medikamente gezielt maßschneidern können.“

Dafür jedoch muss der Elektronenstrahl, der in dem 2,3 Kilometer langen Ringtunnel kreist, noch präziser auf seiner Bahn gehalten werden. Und das ist eine Herausforderung, denn so massiv die Unter-

gestelle der leitenden Magnete auch sind: Sie schwingen. Äußere Impulse wie die Pumpe für die Wasserkühlung oder der Schwerlastverkehr in der Umgebung lassen die Girder minimal vibrieren. Das ist nicht zu vermeiden und bis zu einem gewissen Grad zu verschmerzen. Problematisch wird es, wenn die Frequenz dieser externen Anregung der Eigenschwingfrequenz der Girder >>



Simone Andresen mit einem Modell des von ihr entworfenen Girders vor dem Prototyp

entspricht und so mit dieser in Resonanz tritt. Dann passiert im Prinzip das Gleiche, wie wenn Eltern ihr Kind auf der Schaukel anstupsen: Tun sie das im richtigen Rhythmus, schaukelt das Kind immer höher.

„Bei einer Synchrotronstrahlungsquelle allerdings gilt es, dieses Aufschaukeln der Schwingung unbedingt zu vermeiden“, erklärt der Projektleiter für den PETRA IV-Beschleuniger, Riccardo Bartolini. „Der Strahl bei PETRA IV soll nicht mehr als 100 Nanometer von seiner optimalen Flugbahn abweichen, das entspricht einem zehntausendstel Millimeter.“ Dazu müssen zum einen die Aufbauten auf wenige Mikrometer (tausendstel Millimeter) genau aufgestellt und ausgerichtet werden. Vor allem aber darf die Eigenfrequenz der Magnetische nicht zu niedrig sein: „Alles unter 26 Hertz Eigenfrequenz birgt die Gefahr, dass die Schwingung mit äußeren Anregungen in Resonanz

„Der Strahl bei PETRA IV soll nicht mehr als 100 Nanometer von seiner optimalen Flugbahn abweichen“

Riccardo Bartolini, DESY

tritt“, sagt Maschinenbauexperte Daniel Thoden aus Körfers Gruppe.

Leichtbaulösung

Da der äußere Effekt in diesem Fall gegeben ist, muss also der Rhythmus, die Eigenfrequenz des Systems selbst, so gestaltet werden, dass keine Resonanz auftreten kann. Bei der Schaukel würde man dazu vielleicht die Länge der Aufhängung verändern – bei PETRA IV verändern die Fachleute die Vibrationseigenschaften der Untergestelle. Wobei das nicht durch eine noch massivere Bauweise erfolgen kann. Dann würden die Girder zu schwer und teuer. Vielmehr muss eine stabile Leichtbaulösung mit

hoher Schwingfrequenz her. Und um die zu finden, sind die DESY-Physiker eine ungewöhnliche Allianz eingegangen: mit Meeresbiologen.

Das Alfred-Wegener-Institut, kurz AWI, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven, untersucht nicht nur die Meere, das Leben in ihnen und wie etwa der Klimawandel es beeinflusst. Das Team Bionischer Leichtbau und Funktionelle Morphologie um Christian Hamm bringt seit Jahren Erkenntnisse aus der maritimen Welt erfolgreich zur Anwendung in Industrie und Technik. Stichwort Bionik: die Natur als Vorbild für technische Anwendungen.



Meeresbiologin Simone Andresen beim Belastungstest des Prototyps mit Normann Koldrack (l.), Arbeitspaketleiter Girder im DESY-Projekt PETRA IV, und DESY-Schwingungsexperte Norbert Meyners (r.)

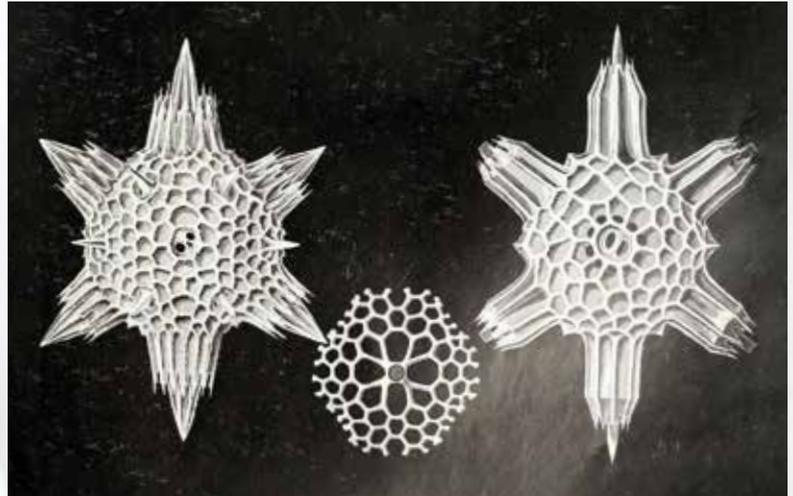
Über die Transferabteilungen dieser unterschiedlichen Helmholtz-Zentren haben die Physiker bei DESY mit den Biologen und Ingenieuren vom AWI nun für die Entwicklung neuartiger, von der Natur inspirierter Untergestelle kooperiert. Simone Andresen, Projektleiterin und Doktorandin beim AWI, sah sich für die Anforderungen aus der Beschleunigerphysik nach einem möglichst hochfrequent schwingenden und gleichzeitig stabilen sowie leichten Konstruktionsprinzip in der Natur um. Bei den genannten Strahlentierchen und den ganz ähnlich konstruierten und ebenso winzigen Kieselalgen wurde sie fündig. Beide Silikatpanzer sind für Fressfeinde wie Ruderfußkrebse kaum zu knacken. Dennoch sind sie so leicht, dass die Mikroorganismen ganz oben nahe der Meeresoberfläche schweben können. Und das, obwohl Silikat eine deutlich höhere Dichte als Wasser hat.

Mischung aus Bienenwaben und Spinnennetz

Die gesuchte Verquickung von Festigkeit und Leichtigkeit erreichen die Winzlinge durch die Verästelungen und Streben ihres Korsetts. „Wie wir in genauen Analysen festgestellt haben, setzen sie nur dort an, wo es tatsächlich einwirkende Kräfte aufzufangen gilt“, erklärt Andresen. „Aus dem gleichen Grund braucht man unter einem Küchentisch nur vier dünne Tischbeine, um ihn samt den Gegenständen darauf zu halten. Das ist stabil – aber natürlich viel materialsparender und leichter, als wenn die Tischplatte auf einem massiven Holzklotz läge.“ Hinzu kommt, dass die Streben an den Übergängen abgerundete Winkel aufweisen. Das trägt ebenfalls zur Festigkeit bei.

Andresen hat im Computer modelliert, wie sich die Lastpfade an einer solchen Konstruktion unter verschiedenen Bedingungen ausdehnen. Auf Basis ihrer Erkenntnisse hat sie dann einen Prototyp entworfen. Auffallend ist an dem

Beispiel für die filigranen Formen der Strahlentierchen, festgehalten vom Naturforscher Ernst Haeckel in seinem Band „Kunstformen der Natur“ (1904)



„Das sieht chaotisch aus. Doch wenn die aufliegenden Lasten nicht gleichförmig verteilt sind, ist eine unregelmäßige Konstruktion am stabilsten.“

Simone Andresen, AWI

neuen Tisch vor allem die Unterkonstruktion. Sie erinnert an eine Mischung aus Bienenwaben und einem unregelmäßigen Spinnennetz. „Das sieht chaotisch aus. Doch darin besteht eine wesentliche Erkenntnis des Projekts: Insbesondere, wenn die aufliegenden Lasten nicht gleichförmig verteilt sind, ist eine unregelmäßige Konstruktion am stabilsten, wenn sie gleichzeitig leicht sein soll.“

Der Prototyp besteht aus Gusseisen. Bei ersten Belastungstests lagen seine Schwingungen tatsächlich nahe den Computerberechnungen. „Damit haben wir die Konzeptphase nun abgeschlossen und nachgewiesen, dass es funktioniert“, sagt Daniel Thoden. „Doch die Entwurfsphase kommt erst noch.“

Von Forschung bis Brückenbau

So wie er dasteht, wird der Prototyp eher nicht zum Einsatz kommen, denn die Magnetoptik von PETRA IV wird parallel entwickelt, und diese hat großen Einfluss auf das finale Produkt. Realistisch ist eine Art Hybrid aus herkömmlichen und neuen Konstruktionsprinzipien, die die

Schwingungskriterien bei möglichst geringem Materialeinsatz erfüllen.

Andresens Prototyp ist also das Referenzobjekt, das die zumindest teilweise neuartige Konstruktion der nächsten Girder-Generation inspirieren wird. Doch darin wird sich die Anwendung der von DESY und AWI gemeinsam entwickelten Technologie nicht erschöpfen. Auch jenseits von PETRA IV gibt es für schwingungsarme Leichtbaukonstruktionen nach dem Vorbild der Natur viel Verwendung. Etwa für die Untergestelle von Lasern und anderen Präzisionsinstrumenten in der Forschung. Und weiter gedacht natürlich überall dort, wo es gilt, Schwingungen in komplexen (Auf-)bauten zu vermeiden, von industriellen Produktionsstraßen bis hin zum Brückenbau.

Die ältesten Funde von Strahlentierchenskeletten aus dem Mittelkambrium Australiens sind mehr als 500 Millionen Jahre alt. Auch in Zukunft wird ihr uraltes raffiniertes Konstruktionsprinzip also breite Nachahmung finden – nicht zuletzt in der Hightech-Forschung.

Quantenphysik in Proteinen

Künstliche Intelligenz liefert neue Einblicke in die Funktion von Biomolekülen



Robin Santra leitet die Theoriegruppe im Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) bei DESY.

Eine neue Analyse­methode liefert bislang unerreichbare Einblicke in die extrem schnelle Dynamik von Biomolekülen. Das Entwicklungsteam um Abbas Ourmazd von der University of Wisconsin Milwaukee und Robin Santra von DESY hat mit der cleveren Kombination aus Quantenphysik und Molekularbiologie verfolgt, wie das photoaktive gelbe Protein (photoactive yellow protein, PYP) in weniger als einer billionstel Sekunde seine Struktur ändert, nachdem es durch Licht angeregt worden ist.

„Um biochemische Vorgänge in der Natur, wie beispielsweise die Photosynthese in bestimmten Bakterien, genau zu verstehen, ist es wichtig, den detaillierten Ablauf zu kennen“, erläutert Santra die Motivation. „Wenn photoaktive Proteine von Licht getroffen werden, ändern sie ihre räumliche Struktur, und diese Strukturänderung bestimmt die Rolle, die ein Protein in der Natur übernimmt.“ Bislang ist es allerdings kaum möglich, den genauen Verlauf solcher Strukturänderungen zu verfolgen: Es lassen sich lediglich Anfangs- und Endzustand eines Moleküls vor und nach einer Reaktion bestimmen und theoretisch deuten. „Aber wie die Energie- und Formänderung dazwischen genau abläuft, wissen wir nicht“, sagt Santra. „Das ist, als könnte man sehen, dass

rinnen und Forscher helles Röntgenlicht wie von einem Röntgenlaser. Dank seiner sehr kurzen Wellenlänge kann es sehr kleine räumliche Strukturen entschlüsseln, etwa die Positionen der Atome in einem Molekül. Allerdings entsteht dabei kein Abbild wie bei einem Foto, sondern ein charakteristisches Streumuster der Röntgenstrahlen, aus dem sich die räumliche Struktur berechnen lässt.

Kurze, helle Röntgenblitze

Da die Bewegung auf der Molekülebene extrem schnell ist, müssen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler äußerst kurze Röntgenblitze verwenden, weil die Aufnahme sonst verschmiert. Erst seit der Erfindung der Röntgenlaser ist es möglich, ausreichend helle und kurze Röntgenblitze zu produzieren, um diese Dynamik festzuhalten. Da sich die Moleküldynamik im Bereich der Quantenphysik abspielt, wo die aus dem Alltag vertrauten Gesetze der Physik nicht mehr gelten, lassen sich die Messungen ohne eine quantenphysikalische Analyse allerdings nicht verstehen.

Dabei gibt es eine Besonderheit der photoaktiven Proteine zu beachten: Durch das eingestrahelte Licht geht ihre Elektronenhülle in einen angeregten Quantenzustand über, der eine erste Formänderung des Moleküls bewirkt. Diese Formänderung wiederum kann zu einer Überschneidung des angeregten und des Grund-Quantenzustands führen. Die Folge ist ein Quantensprung vom angeregten zurück in den Grundzustand, wobei die geänderte Form des Moleküls zunächst bestehen bleibt. Die trichterförmige Überschneidung der Quantenzustände heißt wissenschaftlich konische Durchschneidung und öffnet einen Pfad zu einer neuen räumlichen Struktur des Proteins im quantenmechanischen Grundzustand.

Dem Team um Santra und Ourmazd ist es nun erstmals gelungen, die Struktur­dynamik eines photoaktiven Proteins an einer solchen trichterförmigen Überschneidung zu enträtseln. Dabei griffen sie auf Hilfe durch maschinelles Lernen zurück. Denn für eine solche Beschreibung der Dynamik müssten eigentlich alle Bewegungsmöglichkeiten aller beteiligten Teilchen betrachtet

„Das ist, als könnte man sehen, dass jemand seine Hände gefaltet hat, aber nicht verfolgen, wie er die Finger dafür beugt“

Robin Santra, DESY

jemand seine Hände gefaltet hat, aber nicht verfolgen, wie er die Finger dafür beugt.“

Während die Hand ausreichend groß und die Bewegung langsam genug ist, damit wir sie mit unseren Augen beobachten können, ist das im Reich der Moleküle nicht so einfach. Der Energiezustand eines Moleküls lässt sich sehr genau mit Hilfe der Spektroskopie bestimmen. Und zur Analyse der Form von Molekülen nutzen Forschende

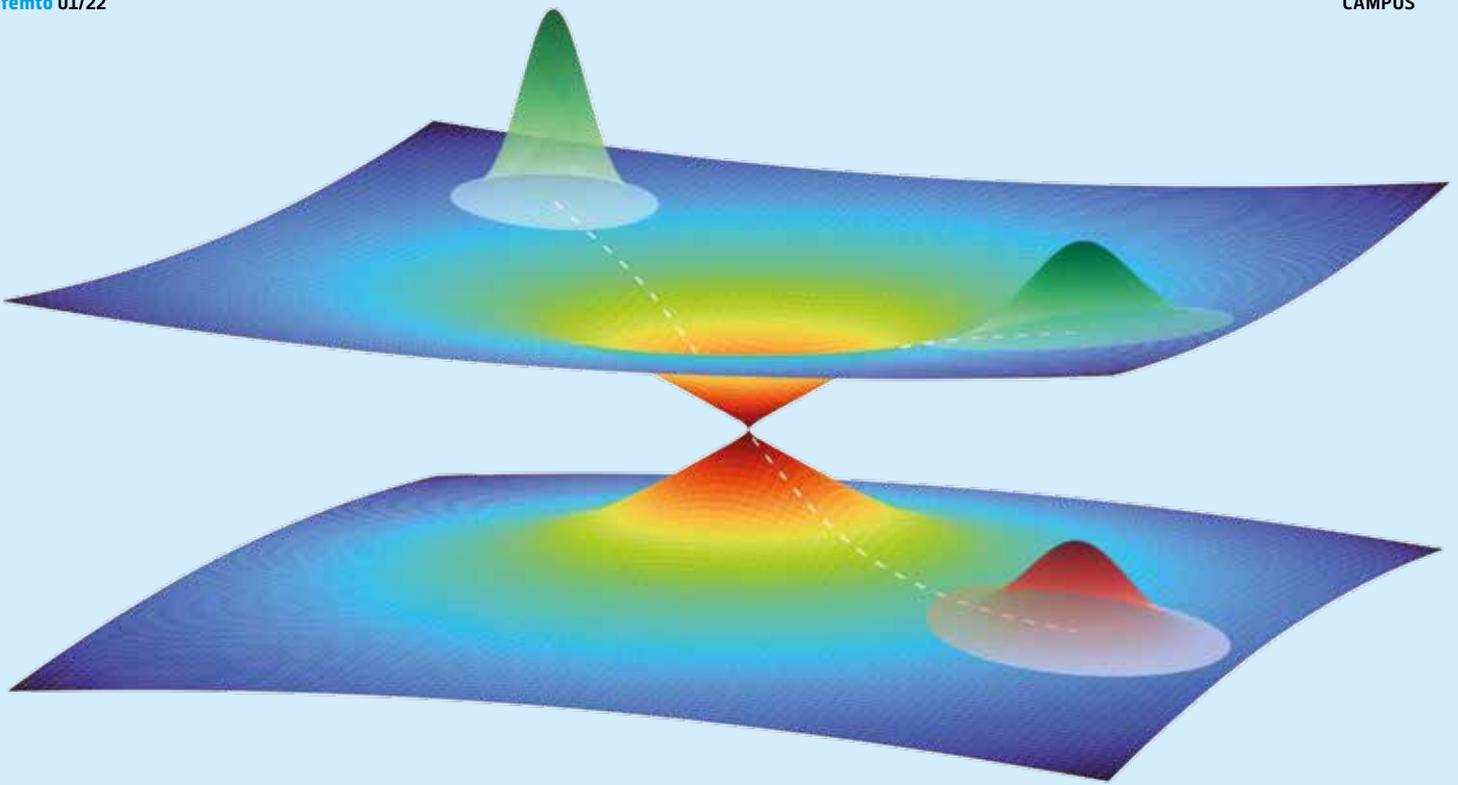


Illustration eines Quantenwellenpakets in unmittelbarer Nähe einer konischen Durchschneidung zweier Quantenzustände. Das Wellenpaket repräsentiert hierbei die kollektive Bewegung mehrerer Atome im photoaktiven gelben Protein. Ein Teil des Wellenpakets bewegt sich über die Durchschneidung von einer Potenzialfläche auf die andere. Der restliche Anteil verbleibt auf der oberen Fläche, und es entsteht eine Überlagerung der beiden Quantenzustände.

werden. Das führt jedoch schnell zu unübersichtlichen, nicht mehr löslichen Rechnungen.

Rund 6000 Dimensionen

„Das photoaktive gelbe Protein, das wir untersucht haben, besteht aus rund 2000 Atomen“, berichtet Santra, der Leitender Wissenschaftler bei DESY und Physikprofessor an der Universität Hamburg ist. „Da sich jedes Atom grundsätzlich in allen drei Raumdimensionen bewegen kann, gibt es insgesamt 6000 Bewegungsoptionen. Das führt zu einer quantenmechanischen Rechnung mit 6000 Dimensionen – und die ist selbst mit den heute leistungsstärksten Computern nicht lösbar.“

Per Computeranalyse basierend auf maschinellem Lernen ließen sich jedoch kollektive Bewegungsmuster der Atome in dem komplexen Molekül identifizieren. „Das ist wie beim Falten der Hände: Da betrachten wir auch nicht jedes Atom einzeln, sondern deren konzertierte Bewegung“, erklärt Santra. Anders als bei einer Hand, bei der die kollektiven Bewegungsmöglichkeiten offensichtlich sind, lassen sich diese bei den Atomen eines Moleküls nicht so einfach erkennen. Der Computer konnte die rund 6000 Dimensionen

auf diese Weise jedoch auf vier reduzieren. Mit der Demonstration dieser neuen Methode kann Santras Team auch erstmals eine konische Durchschneidung von Quantenzuständen in einem komplexen Molekül aus Tausenden von Atomen charakterisieren.

Die detaillierte Rechnung zeigt, wie sich dieser konische Trichter in dem vierdimensionalen Raum bildet und das photoaktive gelbe Protein durch ihn nach einer Anregung mit Licht seine Struktur ändert und dabei wieder in den Ausgangszustand zurückfällt. Diesen Ablauf können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nun in Schritten von einigen Dutzend Femtosekunden (billiardstel Sekunden) beschreiben und so zum Verständnis der photoaktiven Prozesse beitragen. „So liefert die Quantenphysik neue Einblicke in ein biologisches System, und die Biologie bringt neue Anregungen für die quantenmechanische Methodik“, sagt Santra, der auch Mitglied im Hamburger Exzellenzcluster „CUI: Advanced Imaging of Matter“ ist. „Beide Gebiete befruchten sich dabei gegenseitig.“

Nature, DOI: 10.1038/s41586-021-04050-9

femtofinale

Wie kann man sich Ihre
WISSENSCHAFTLICHE SINFONIE
vorstellen, Maestro ?

Ausschließlich in
FUSSNOTEN
komponiert !



mahler

Impressum

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

Redaktionsanschrift

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

Redaktion

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

Mit Beiträgen von

Frank Grotelüschen, Jan Berndorff, Georg-August-Universität Göttingen, Ludwig-Maximilians-Universität München, European Molecular Biology Laboratory EMBL, Helmholtz-Zentrum Hereon, European XFEL

Schlussredaktion

Ilka Flegel

Layout

Jutta Krüger

Artdirektion und Produktion

Diana von Ilseman

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

April 2022

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie
femto kostenlos!
www.desy.de/femto



HELMHOLTZ



Das Forschungszentrum DESY

DESY zählt zu den weltweit führenden Teilchenbeschleuniger-Zentren und erforscht die Struktur und Funktion von Materie – vom Wechselspiel kleinster Elementarteilchen, dem Verhalten neuartiger Nanowerkstoffe und lebenswichtiger Biomoleküle bis hin zu den großen Rätseln des Universums. Die Teilchenbeschleuniger und die Nachweisinstrumente, die DESY an seinen Standorten in Hamburg und Zeuthen entwickelt und baut, sind einzigartige Werkzeuge für die Forschung: Sie erzeugen das stärkste Röntgenlicht der Welt, bringen Teilchen auf Rekordenergien und öffnen neue Fenster ins Universum.

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