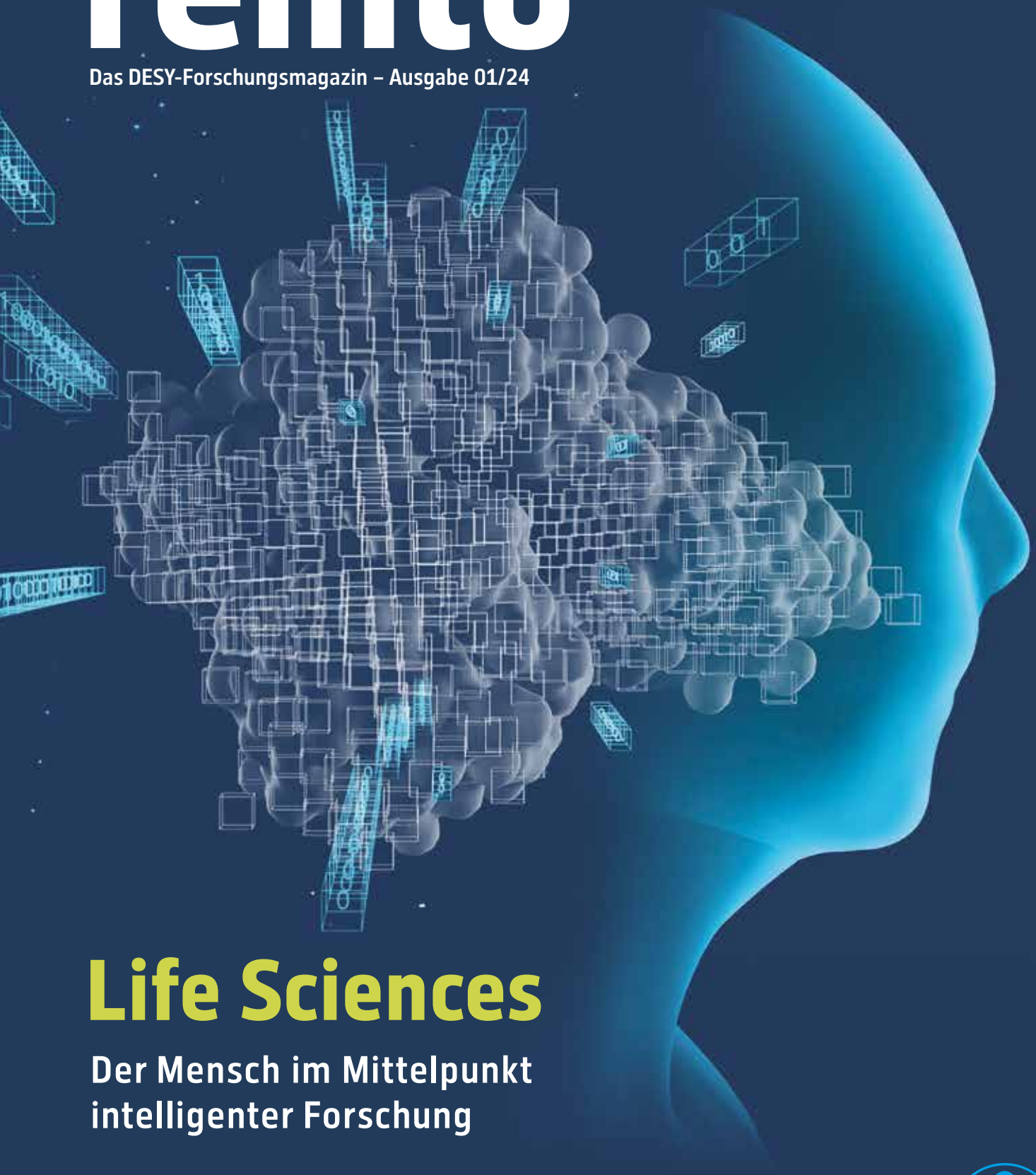
femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 01/24



Life Sciences

Der Mensch im Mittelpunkt intelligenter Forschung

Neutrinos aus der Milchstraße

KI im Beschleunigerkontrollraum

Das Gelbe vom Ei

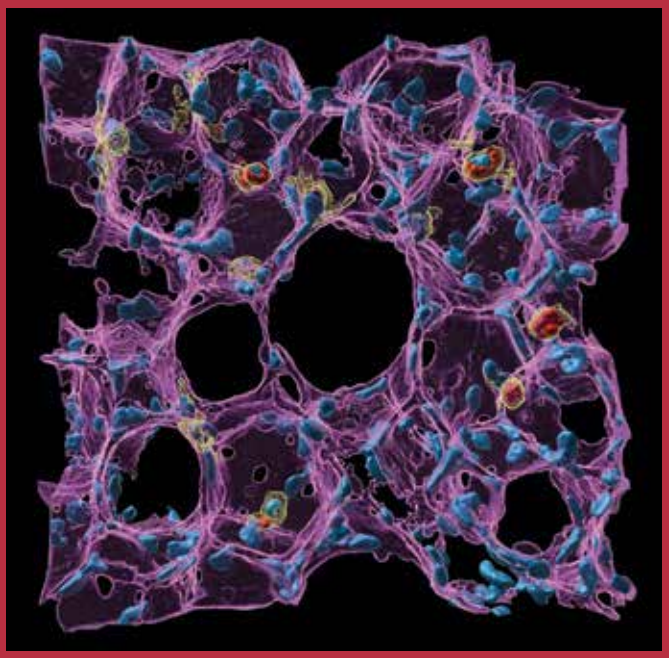
Arsen und Spitzenplätze

Auf der ganzen Welt gibt es Tausende durch Arsen verseuchte Flächen. Das Gift gelangt etwa durch Bergbau in die Umwelt, aber auch bestimmte Mikroorganismen setzen Arsen frei. Es gibt allerdings einen tropischen Farn – *Pteris vittata* –, der die außergewöhnliche Fähigkeit besitzt, Arsen auf natürliche Weise in seinem lebenden Gewebe anzureichern. Das an der Röntgenquelle PETRA III bei DESY aufgenommene Bild des Farns (rechts oben) hat dieses Jahr den zweiten Platz beim Helmholtz-Wettbewerb Helmholtz Imaging Award um die besten Wissenschaftsbilder belegt.

Dieser Querschnitt ist eine per Mikrofluoreszenz-Computertomographie erstellte Rekonstruktion (also ein Mikro-Röntgenbild) des Farn-Stängels. Das Arsen leuchtet hier grün. Die DESY-Forschenden Kathryn Spiers und Dennis Brückner haben gemeinsam mit dem Pflanzen-Ökophysiologen Anthony van der Ent von der Universität Wageningen in den Niederlanden untersucht, wo der Farn das Halbmetall genau einlagert. Das Bild zeigt das Arsen in der Endodermis und dem Perizykel des Farns – der jeweils inneren und äußeren Schicht um die Wasserleitbündel der Pflanze. Die Arsenkarte hilft, den molekularen und physiologischen Mechanismus der Arseneinlagerung besser zu verstehen.

Helmholtz Imaging hat dieses Jahr zum dritten Mal die besten Wissenschaftsbilder gekürt. Der erste Platz in der Wahl der Jury ging an Lin Yang vom Helmholtz Zentrum München für eine Aufnahme der delikaten Architektur von Lungen-Alveolen (links unten). Den dritten Platz belegten Angelika Humbert vom Alfred-Wegener-Institut und Tilman Bucher vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt für das Luftbild eines entwässerten Gletschersees auf Grönland (rechts unten).

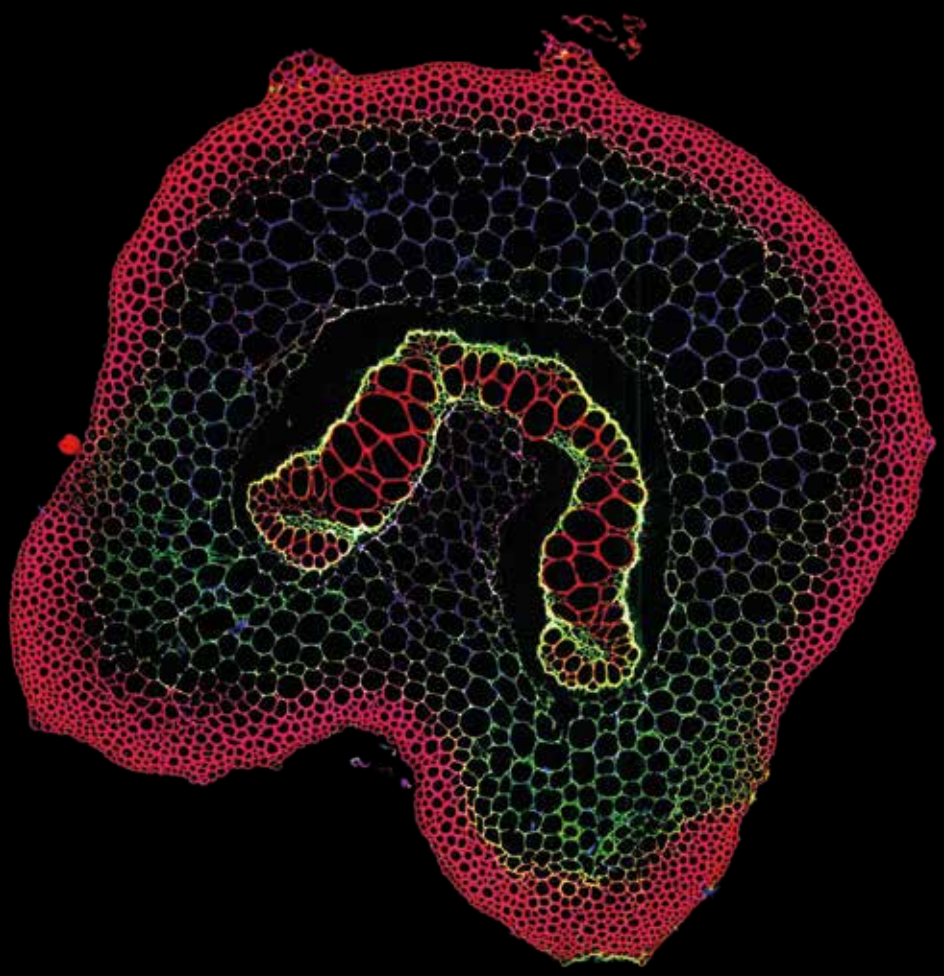
https://helmholtz-imaging.de



1. Platz
Dieses Bild zeigt die spektakuläre und faszinierende Architektur der Lungen-Alveolen aus miteinander verbundenen Lungenbläschen, Mikrogefäßen und Kapillaren (alle in lila) sowie zahlreiche Stellen mit Lungenmakrophagen (gelb), die fremde Schadstoffe (hier fluoreszierende Partikel in rot) umhüllen. Die Zellkerne sind hellblau gefärbt.

Bild: CPC/LHI, HMGU, Lin Yang

2. Platz
Querschnitt durch den Stängel des tropischen Farns *Pteris vittata* mit hellgrün leuchtendem Arsen



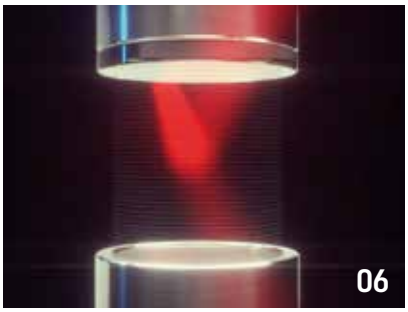
3. Platz
Dieses Bild wurde mit Hilfe von Luftbildern erstellt, die die Eisdynamik in der Arktis überwachen. Der fischförmige supraglaziale See, also ein See an der Gletscheroberfläche, befand sich in Nordostgrönland. Er wurde durch einen Riss trockengelegt, wobei Staub und Sedimente auf dem ehemaligen Seegrund zurückblieben.

Bild oben: DESY / Wageningen University & Research, Kathryn Spiers, Dennis Brückner / Antony van der Ent
Bild unten: DLR / AWI, Tilman Bucher / Angelika Humbert

Inhalt

02 femtoskop
Arsen und Spitzenplätze

06 Volle Dröhnung für Laserstrahlen
Innovatives Konzept lenkt Laserstrahlen durch Luft ab



08 Jetzt gibt der Kern den Takt an
Röntgenlaser weist den Weg zu besserer Präzisionszeitmessung mit Atom(kern)uhren

09 Energiereichste kosmische Gammastrahlen von einem Pulsar
H.E.S.S.-Observatorium registriert 20 Tera-Elektronen-volt-Photonen vom Vela-Pulsar

10 femtoweb
Bildschirmsafari durch die Milchstraße

11 Ein neuer Blick auf unsere kosmische Heimat
IceCube-Detektor entdeckt Neutrinos aus der Milchstraße

12 ZOOM: Life Sciences
Der Mensch im Mittelpunkt intelligenter Forschung

14 Proteine, Impfstoffe und klebrige Biofilme
Gesundheitsforschung auf dem DESY-Campus

15 Ultrakalte Aufnahmen, gestochen scharf
Wie das Kryo-Elektronenmikroskop Proteine und Viren abbildet

16 Die Suche nach dem Super-Wirkstoff
Minutenschnelles Screening

18 Proteine bei der Arbeit beobachten
Reaktionen gezielt auslösen

19 „Wir erleben eine rasante Transformation"
Interview mit Helmut Dosch

20 Kurze Blitze – schnelle Aufnahmen
Röntgenlaser enthüllt rasante Bioreaktionen

22 Teilchenkanonen gegen Krebs
Tumortherapie mit Elektronen

24 Die Reise der Immunzellen
Die Bewegung von Zellen im Organismus verfolgen

25 Extrem scharfe Röntgenbilder
Blick in menschliches Gewebe

26 Die weltbeste Röntgen-lichtquelle ihrer Art
Ganz neue Forschungs-möglichkeiten mit PETRA IV

27 Verschwindende Knochenschrauben
Implantate aus Magnesium lösen sich selbst auf

28 Bakterielle Schleimfilme
Wie Bakterien zu einem Biofilm zusammenfinden

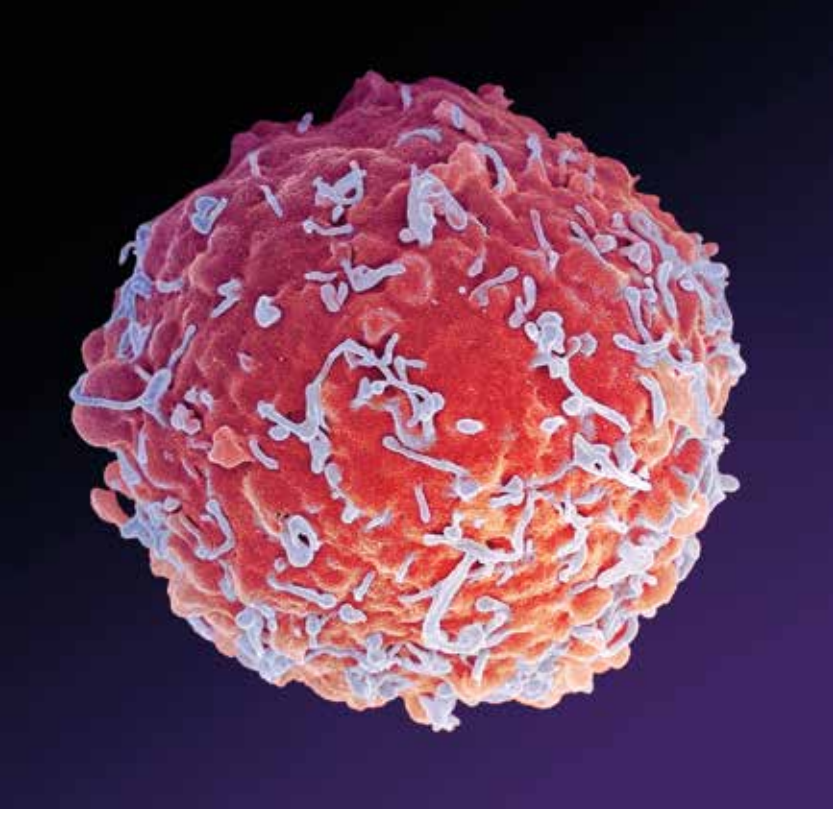
29 Die Proteinfaser-Detektivin
Amyloid-Ablagerungen verstehen und verhindern

30 KI goes Bio
Lernfähige Algorithmen für die Medizinforschung

32 Erfolgreiche Bio-Kooperationen
Zusammenarbeit mit Industriepartnern

33 Ein guter Grund, in Deutschland zu bleiben
Interview mit Mathias Kraas

Bilder: DESY, Science Communication Lab



34 Spektrum
Nachrichten aus der Forschung

37 femtomenal
1777,09 ± 0,14 MeV:
Diese Zahl ist ein Rekord

38 Wer macht hier die Gravitationswelle?
Niederfrequentes Rauschen aus Gravitationswellen gesichtet

40 Bosonen im Dreierpack
ATLAS-Detektor sieht extrem seltenen Prozess

41 femtopolis
Sprechen Quarks mit dem Weltall?

42 Das Gelbe vom Ei
PETRA III enthüllt Phänomene in gelierendem Eigelb

43 Mit Hochdruck ins Innere der Erde geschaut
Heißes Eisenoxid bremst Erdbebenwellen

44 femtofinale
Sternstunde

Bild: Science Photo Library, Steve Gschmeissner

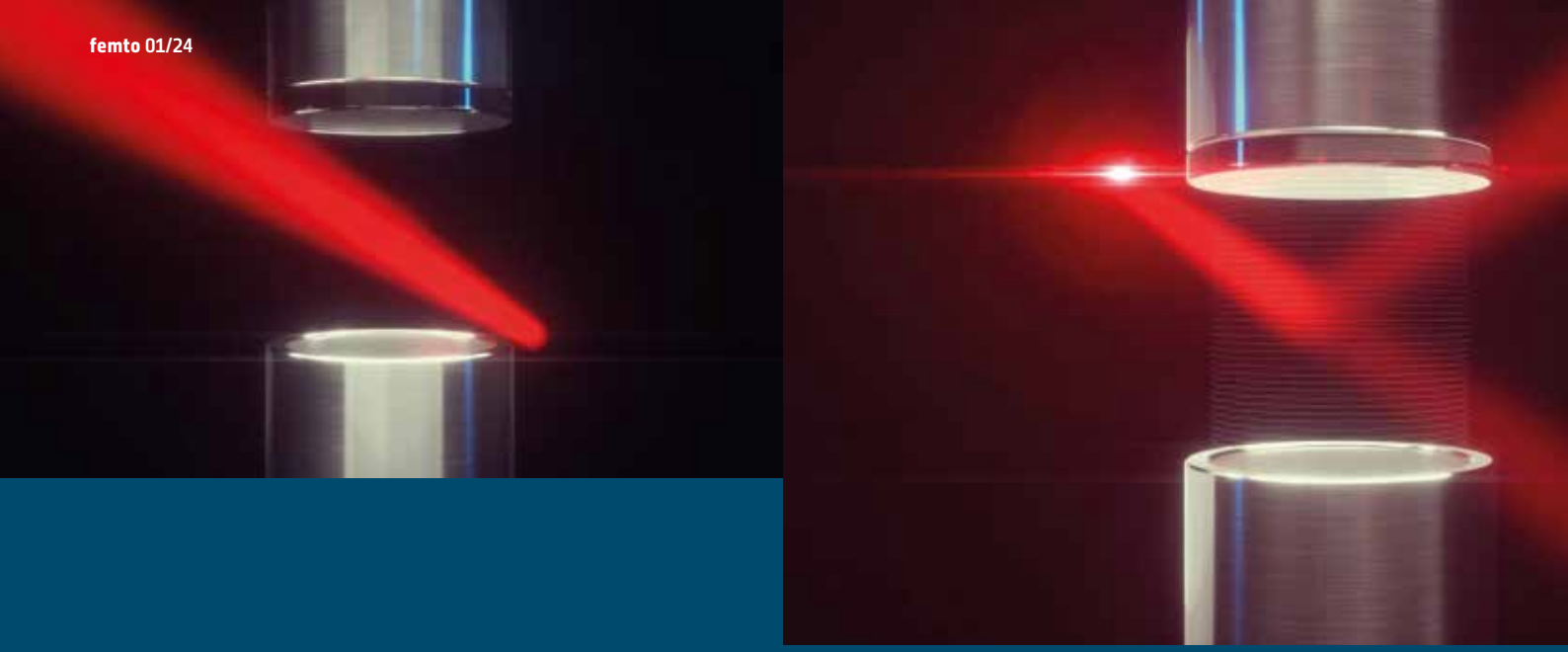
Liebe Leserinnen und Leser,

die Gesundheitsforschung erfährt einen rasanten Wandel: Es geht um Tempo in der Erforschung biologischer Prozesse, um Geschwindigkeit in der Medizinforschung, um die intelligente Kombination präziser Daten von Hightech-Anlagen mit Künstlicher Intelligenz. Oder anders ausgedrückt – um die enorme Beschleunigung von Erkenntnisgewinn in den Lebenswissenschaften. Dazu bedarf es eines ganzheitlichen Ansatzes mit hochqualifizierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die auf die Grundlagenforschung spezialisiert sind und in interdisziplinären Partnerschaften zusammenarbeiten. Sie benötigen modernste Methoden zur Strukturanalyse, Hochleistungs-Röntgenlichtquellen und eine Infrastruktur, die die Forschenden optimal unterstützt, mit kurzen Wegen und Vernetzungsmöglichkeiten. All das begeistert und eint die Forschenden auf dem DESY-Campus im wachsenden Bereich der Gesundheitsforschung. Sie arbeiten an den Grundlagen zur Medikamenten- und Impfstoffentwicklung zum Beispiel gegen Alzheimer und Parkinson, an neuen, schonenden Verfahren zur Tumorstrahlentherapie oder an innovativen Materialien für Implantate, die belastende Operationen vermeiden könnten.

In dieser Ausgabe stellen wir Ihnen die ausgefeilten und teils einzigartigen Methoden zur Gesundheitsforschung bei DESY vor. Die Idee für dieses Thema stammt von unserem kürzlich verstorbenen Kollegen Till Mundzeck. Als einer der Erfinder von femto hatte er die Redaktionsleitung auch für dieses Heft. Er war ein großartiger Wissenschaftsjournalist und sehr geschätzter DESY-Kollege, dem wir viel verdanken. Dieses Heft ist Till gewidmet.

Das femto-Team,

Diana von Ilsemann, Frank Grotelüschen, Barbara Warmbein, Joseph Piergrossi, Ilka Flegel, Jutta Krüger, Cristina Lopez Gonzalez, Thomas Zoufal, Kerstin Straub



Volle Dröhnung für Laserstrahlen

Innovatives Konzept lenkt Laserstrahlen durch Luft ab

Das Patent ist schon angemeldet: Mit einem neuartigen Verfahren, bei dem auch Lautsprecher eine Rolle spielen, lassen sich Laserstrahlen berührungslos in der Luft ablenken. Das könnte großen Einfluss auf Forschungsbereiche wie die Hochleistungsoptik haben. Der Schlüssel für die neue Technik ist ein unsichtbares optische Gitter aus Luft, das nicht nur immun gegen Beschädigungen durch den Laserstrahl ist, sondern auch dafür sorgt, dass der Laserstrahl nicht an Qualität verliert. Das Gitter wird durch Schallwellen erzeugt, die die Luft in dem Bereich modulieren, den der Laserstrahl durchkreuzt.

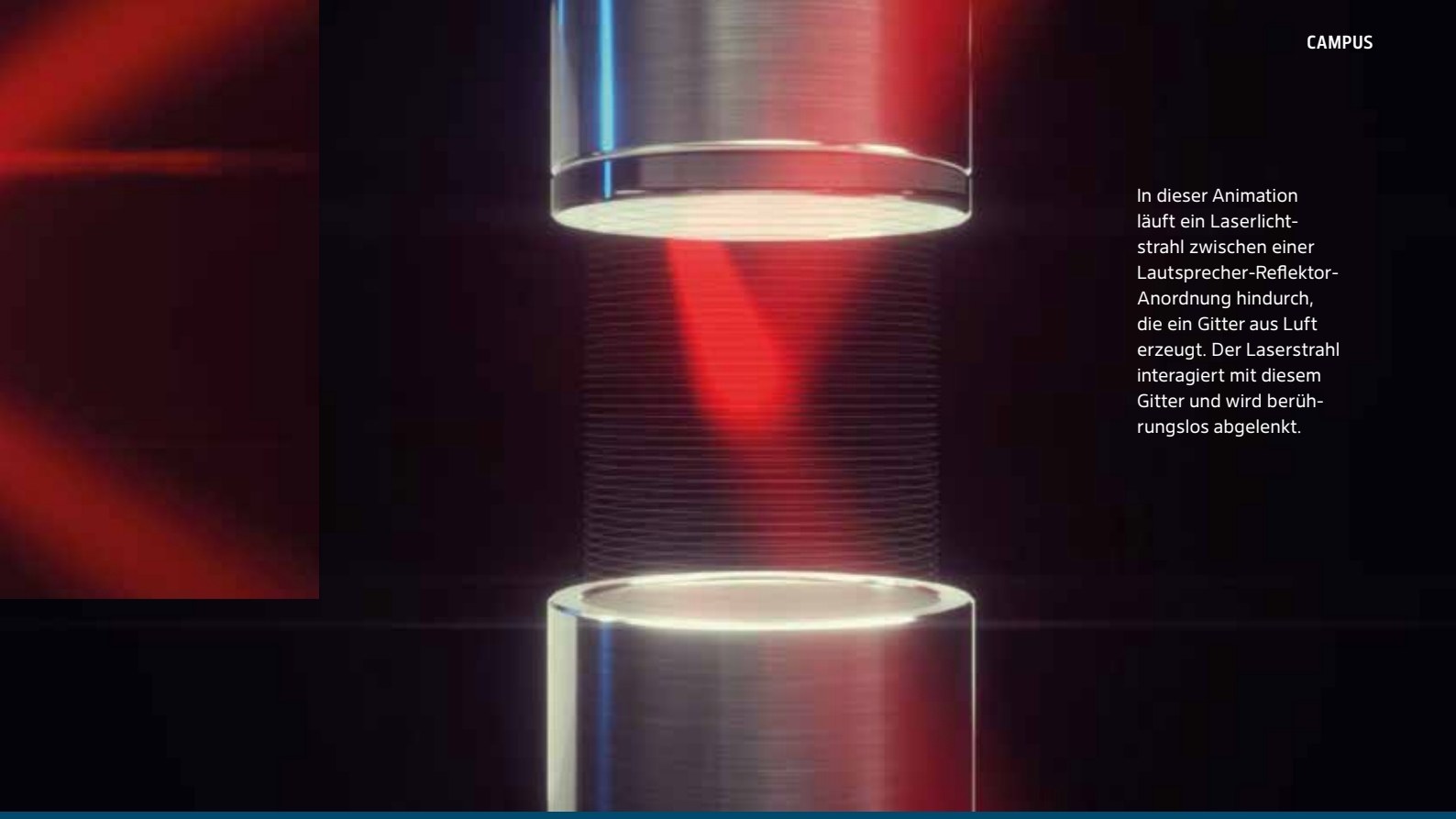
„Wir erzeugen ein optisches Gitter mit Hilfe akustischer Dichtewellen“, erläutert DESY-Forscher Yannick Schrödel aus dem interdisziplinären Entwicklungsteam, der Hauptautor des Artikels. Mit Hilfe starker Speziallautsprecher prägen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein Streifenmuster aus dichteren und weniger dichten Bereichen in die Luft. Ähnlich wie unterschiedlich dichte Luftschichten auch in der Erdatmosphäre Licht ablenken, übernimmt das Dichtemuster in der Luft die Funktion eines optischen Gitters, das den Laserstrahl beugt. Dabei lässt sich die Ablenkung des Laserlichts sehr präzise kontrollieren. „Die Eigenschaften des optischen Gitters lassen sich über die Lautstärke der Schallwellen beeinflussen“, erklärt Schrödel.

Das Entwicklungsteam im Reinraum an der akustischen Laseroptik

Ultraschall statt Hochglanzspiegel

Auf diese Weise ließ sich in ersten Labortests ein starker Infrarot-Laserpuls mit einer Effizienz von 50 Prozent ablenken. Aufgrund ihrer Modellierungen hoffen die Forschenden, in Zukunft deutlich höhere Effizienzen zu erreichen. Für den ersten Test mussten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihre Speziallautsprecher weit aufdrehen. „Wir bewegen uns bei einem Schallpegel von etwa 140 Dezibel, das entspricht einem

Bilder: DESY, Angela Pfeiffer; Animation: DESY, Science Communication Lab



In dieser Animation läuft ein Laserlichtstrahl zwischen einer Lautsprecher-Reflektor-Anordnung hindurch, die ein Gitter aus Luft erzeugt. Der Laserstrahl interagiert mit diesem Gitter und wird berührungslos abgelenkt.

Düsentriebwerk in wenigen Metern Entfernung“, erläutert Forschungsleiter Christoph Heyl von DESY und dem Helmholtz-Institut Jena. „Zum Glück befinden wir uns im Ultraschallbereich, den unsere Ohren nicht wahrnehmen.“

„Das Potenzial der berührungslosen Kontrolle von Licht lässt sich derzeit nur erahnen“

Christoph Heyl, DESY und Helmholtz-Institut Jena

Das Team sieht in der Technik großes Potenzial für die Hochleistungsoptik. Bei ihren Versuchen verwendeten die Fachleute einen Infrarot-Laserpuls mit einer Spitzenleistung von 20 Gigawatt – das entspricht rund sechs Milliarden LED-Birnen. Laser dieser und noch höherer Leistungsklassen werden beispielsweise zur Materialbearbeitung, in der Fusionsforschung oder für neueste Teilchenbeschleuniger eingesetzt. „In diesem Leistungsbereich schränken die Materialeigenschaften den Einsatz von Spiegeln, Linsen und Prismen deutlich ein, und solche optischen Elemente werden in der Praxis leicht von starken Laserstrahlen beschädigt“, erklärt Heyl. „Zudem leidet die Qualität des Laserstrahls. Wir schaffen es dagegen, Laserstrahlen qualitätserhaltend berührungslos abzulenken.“

Vom Gitter zur Linse

Das Prinzip der akustischen Kontrolle von Laserlicht in Gasen ist nicht auf die Erzeugung optischer Gitter beschränkt, betonen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Es lasse sich voraussichtlich auch auf andere optische Elemente wie Linsen und Wellenleiter übertragen. „Wir haben seit langem über diese Methode nachgedacht und schnell festgestellt, dass extreme Schallpegel notwendig sind. Diese schienen zunächst technisch nicht realisierbar“, erläutert Heyl. „Wir haben aber nicht aufgegeben und schließlich mit Unterstützung der Technischen Universität Darmstadt sowie des Unternehmens inoson eine Lösung gefunden. Zunächst haben wir unsere Technik mit gewöhnlicher Luft ausprobiert, als nächstes werden wir auch andere Gase einsetzen, um beispielsweise andere Wellenlängen sowie andere optische Eigenschaften und Geometrien zu erschließen.“

Die bereits gezeigte Lichtablenkung direkt in Umgebungsluft eröffnet vielversprechende Anwendungen, insbesondere als schneller Schalter für Hochleistungslaser. „Das Potenzial der berührungslosen Kontrolle von Licht und deren Erweiterung auf andere Anwendungen lässt sich derzeit nur erahnen“, betont Heyl. „Die moderne Optik beruht fast ausschließlich auf der Interaktion von Licht mit fester Materie. Unser Ansatz eröffnet eine völlig neue Richtung.“

Nature Photonics,
DOI: 10.1038/s41566-023-01304-y

Forschende konnten mit den Röntgenpulsen des European XFEL im Kern von Scandium-Atomen Prozesse anregen, die ein Signal mit einer noch nie dagewesenen Präzision von einer Sekunde in 300 Milliarden Jahre generieren können.

Jetzt gibt der Kern den Takt an

Röntgenlaser weist den Weg zu besserer Präzisionszeitmessung mit Atom(kern)uhren

Im Moment misst keine Uhr die Zeit so präzise wie eine Atomuhr: Über einen Zeitraum von 300 Millionen Jahren geht sie auf die Sekunde genau, was zum Beispiel für die exakte Ortung in der Satellitennavigation sehr wichtig ist. Ein internationales Forschungsteam will die nächste Uhrengeneration allerdings noch tausendmal präziser machen, so dass sie eine Genauigkeit von einer Sekunde in 300 Milliarden Jahren erreicht. Ein entscheidender Schritt ist dem Team jetzt am europäischen Röntgenlaser European XFEL gelungen: Auf Basis des Elements Scandium haben die Fachleute einen wesentlich exakteren Taktgeber erzeugt.

Atomuhren nutzen eine Eigenschaft von Elektronen: Diese lassen sich mit Mikrowellen einer bekannten Frequenz auf ein höheres Energieniveau anheben und absorbieren dabei die Mikrowellenstrahlung. Die Elektronen sitzen in der Atomhülle chemischer Elemente, zum Beispiel Cäsium. Eine Atomuhr bestrahlt die Cäsium-Atome mit Mikrowellen und regelt die Frequenz der Strahlung so, dass die Mikrowellen möglichst stark absorbiert werden – die sogenannte Resonanz. Der Quarzoszillator, der die Mikrowellen erzeugt, lässt sich mit Hilfe der Resonanz extrem stabil halten.

Ausschlaggebend für die Genauigkeit einer Atomuhr ist die Breite der Resonanz, die sich mit der Anregung von Elektronen allerdings praktisch nicht mehr verbessern lässt. Deswegen arbeiten bereits seit einigen Jahren Teams weltweit an einer Atomkernuhr, die Übergänge im Atomkern statt in der Atomhülle als Taktgeber nutzt. Diese Kernresonanzen sind deutlich schärfer als die Resonanzen von Elektronen in der Atomhülle, aber auch deutlich schwieriger anzuregen.

Atomkernuhren bieten ganz neue Möglichkeiten

Am European XFEL hat das Team genau das im Kern des Elements Scandium geschafft. In dem bahnbrechenden Experiment bestrahlten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine 0,025 Millimeter dünne Scandium-Folie mit Röntgenlaserlicht. Dabei konnten sie ein charakteristisches Nachleuchten detektieren, das von den angeregten Atomkernen ausgesendet wurde und die extrem schmale Resonanzlinie von Scandium eindeutig belegt. Die neue Methode verspricht eine Genauigkeit von 1:10 000 000 000 000 000 000. „Das entspricht einer Sekunde in 300 Milliarden Jahren“, erklärt DESY-Forscher Ralf Röhlsberger.

Die Forschenden müssen auch die Energie der Röntgenlaserstrahlung, bei der die Resonanz eintritt, genau kennen, was sie durch eine ausgeklügelte, extreme Rauschunterdrückung und hochauflösende Kristalloptiken erreichen konnten. „Der Durchbruch bei der Resonanzanregung von Scandium und der präzisen Messung ihrer Energie eröffnet nicht nur neue Möglichkeiten für Atomkernuhren, sondern auch in der Ultrapräzisionsspektroskopie und für die Präzisionsmessung von fundamentalen physikalischen Effekten“, erläutert der Projektleiter des Experiments, Yuri Shvyd’ko vom Argonne National Laboratory in den USA. Das Team erkundet nun weitere Schritte zur Verwirklichung einer solchen Atomkernuhr.

> *„Die Genauigkeit entspricht einer Sekunde in 300 Milliarden Jahren“*
>
> ***Ralf Röhlsberger, DESY und Helmholtz-Institut Jena***

Nature, DOI: 10.1038 s41586-023-06491-w

Bild: European XFEL / Helmholtz-Institut Jena, Tobias Wüstefeld / Ralf Röhlsberger

Energiereichste kosmische Gammastrahlen von einem Pulsar

H.E.S.S.-Observatorium registriert 20 Tera-Elektronenvolt-Photonen vom Vela-Pulsar

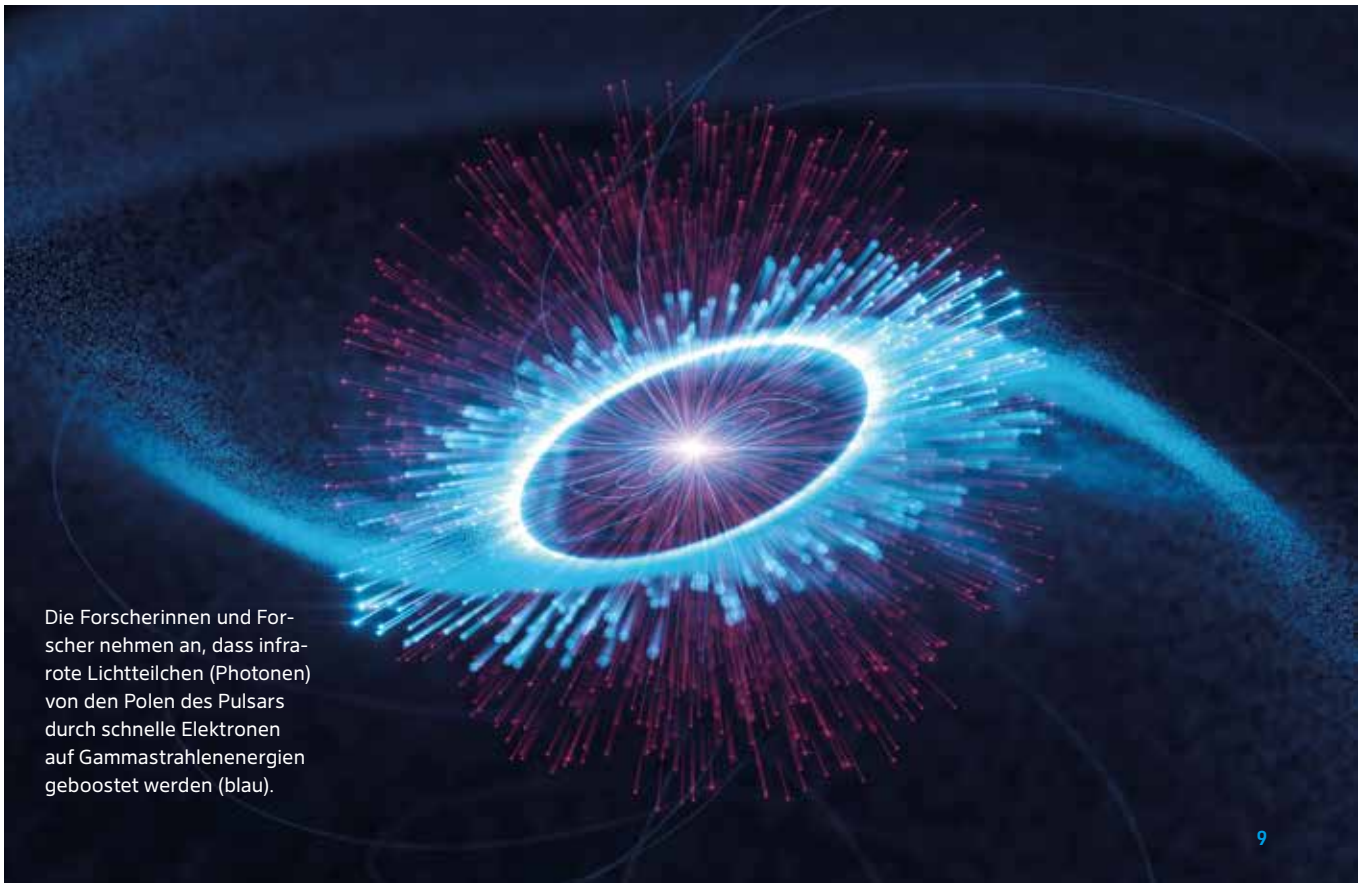
Mit dem H.E.S.S.-Observatorium in Namibia hat ein internationales Forschungsteam die bislang energiereichsten Gammastrahlen von einem Pulsar entdeckt, einem ausgebrannten, toten Stern. Die registrierte Strahlung hat rund zehn Billionen Mal so viel Energie wie sichtbares Licht. Die Beobachtung lässt sich nur schwer mit der gängigen Theorie zur Erzeugung solcher gepulsten Gammastrahlung vereinbaren.

Pulsare sind die übrig gebliebenen Reste von Sternen, die spektakulär in einer Supernova explodiert sind. Die Explosion hinterlässt einen winzigen, toten Stern mit einem Durchmesser von nur etwa 20 Kilometern, der extrem schnell rotiert und mit einem enormen Magnetfeld ausgestattet ist. „Diese toten Sterne bestehen fast ausschließlich aus Neutronen und sind unglaublich dicht: Ein Teelöffel ihres Materials wiegt mehr als fünf Milliarden Tonnen, was etwa dem 900-fachen Gewicht der Großen Pyramide von Gizeh entspricht“, erklärt H.E.S.S.-Wissenschaftlerin Emma de Oña Wilhelmi von DESY, Mitautorin der Veröffentlichung.

Der hellste Pulsar-Leuchtturm

Wie eine Art kosmische Leuchttürme senden Pulsare kreisende Strahlen ins All. Wenn ihr Strahl über unser Sonnensystem hinwegfegt, sehen wir in regelmäßigen Abständen Strahlungsblitze. Diese Blitze lassen sich bei zahlreichen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums beobachten, von den Radiowellen bis zur Gammastrahlung. Der gängigen Theorie nach stammt die Strahlung von schnellen Elektronen, die von den starken Magnetfeldern des Pulsars beschleunigt und abgelenkt werden. Die Elektronen bewegen sich dabei von der Oberfläche des Pulsars nach außen bis zum Rand seiner Magnetosphäre. „Auf ihrer Reise nach außen nehmen die Elektronen Energie auf und setzen sie in Form der beobachteten Strahlung frei“, sagt Co-Autor Bronek Rudak vom Astronomischen Zentrum Nikolaus Kopernikus (CAMK PAN) in Polen. Der Bereich, in dem dies geschieht, wird Lichtzylinder genannt.

Der Vela-Pulsar befindet sich am Südhimmel im Sternbild Vela (Segel des Schiffes). Er ist der hellste Pulsar im Radioband des elektromagnetischen Spektrums und die hellste anhaltende Quelle kosmischer Gammastrahlung im Giga- ››



Die Forscherinnen und Forscher nehmen an, dass infrarote Lichtteilchen (Photonen) von den Polen des Pulsars durch schnelle Elektronen auf Gammastrahlenenergien geboostet werden (blau).

Bild: DESY, Science Communication Lab

Elektronenvolt-Bereich. Er rotiert etwa elfmal pro Sekunde. Oberhalb einiger Giga-Elektronenvolt (GeV) endet seine Strahlung jedoch abrupt, vermutlich weil die Elektronen das Ende der Magnetosphäre des Pulsars erreichen und aus ihr entweichen.

Mit bekannten Modellen nicht zu erklären

Doch wie sich nun herausstellte, ist das noch nicht alles: H.E.S.S. hat eine neue Komponente der Strahlung bei noch höheren Energien registriert. Diese kosmischen Gammaquanten besaßen eine Energie von bis zu 20 Tera-Elektronenvolt (TeV). „Das ist etwa 200 Mal energiereicher als sämtliche Strahlung, die bisher von diesem Objekt gemessen wurde“, erklärt Co-Autor Christo Venter von der North-West University in Südafrika. Diese neu entdeckte Komponente tritt synchron zur Strahlung im GeV-Bereich auf. Um diese enormen Energien zu erreichen, müssten die Elektronen jedoch stärker beschleunigt werden, als dies eigentlich in der Magnetosphäre möglich ist. Und dabei muss der Rhythmus der Emission intakt bleiben.

„Dieses Ergebnis stellt unser bisheriges Wissen über Pulsare in Frage und erfordert ein Überdenken der Theorie von der Funktionsweise dieser natürlichen Beschleuniger“, erläutert Arache Djannati-Atai vom Astroteilchen- und Kosmologie-Labor (APC) in Frankreich, der die Forschung geleitet hat. „Das traditionelle Schema, wonach die Teilchen entlang der Magnetfeldlinien innerhalb oder leicht außerhalb der Magnetosphäre beschleunigt werden, kann unsere Beobachtungen nicht ausreichend erklären. Vielleicht sind wir Zeugen der Beschleunigung von Teilchen durch die sogenannte magnetische Rekonnexion jenseits des Lichtzylinders, bei dem das Rotationsmuster noch irgendwie erhalten bleibt? Aber selbst dieses Szenario tut sich schwer mit der Erzeugung solch extrem energiereicher Strahlung.“ Die Theoretikerinnen und Theoretiker müssen daher neue Modelle entwickeln.

„Dieses Ergebnis stellt unser bisheriges Wissen über Pulsare in Frage und erfordert ein Überdenken der Theorie von der Funktionsweise dieser natürlichen Beschleuniger“

Arache Djannati-Atai, Astroteilchen- und Kosmologie-Labor APC, Frankreich

Auf der Suche nach weiteren Pulsaren

Wie auch immer die Erzeugung der Strahlung abläuft, hält der Vela-Pulsar neben anderen Superlativen nun offiziell den Rekord als Pulsar mit der energiereichsten Gammastrahlung, die bislang von einem solchen Objekt entdeckt worden ist. „Diese Entdeckung öffnet ein neues Beobachtungsfenster für die Entdeckung anderer Pulsare im Bereich von einigen Dutzend Tera-Elektronenvolt mit aktuellen und zukünftigen empfindlicheren Gammateleskopen und ebnet damit den Weg für ein besseres Verständnis der extremen Beschleunigungsprozesse in stark magnetisierten astrophysikalischen Objekten“, so Djannati-Atai.

Nature Astronomy,
DOI: 10.1038/s41550-023-02052-3

femtoweb

Bildschirmsafari durch die Milchstraße

Das preisgekrönte Kieler Science Communication Lab hat für DESY die IceCube-Beobachtungen galaktischer Neutrinos (rechts) in einem interaktiven Modul visualisiert. Betrachterinnen und Betrachter können darin selbst durch die Neutrinomessungen in der Milchstraße navigieren und die Neutrinoverteilung mit elektromagnetischer Strahlung unserer Heimatgalaxie in verschiedenen Wellenlängen vergleichen. Außerdem lässt sich der IceCube-Detektor erkunden.

https://neutrino-map.science/

Neutrinos aus der Milchstraße: Helle Bereiche symbolisieren Messungen mit hoher Signifikanz, dunkle solche mit geringer Signifikanz.

Ein neuer Blick auf unsere kosmische Heimat

Der Antarktis-Detektor IceCube entdeckt Neutrinos aus der Milchstraße

Mit dem IceCube-Observatorium am Südpol haben Forscherinnen und Forscher zum ersten Mal Neutrinos aus unserer Heimatgalaxie nachgewiesen, der Milchstraße. Neutrinos sind Elementarteilchen, die meist aus energiereichen Prozessen im All stammen. Mit ihrer Hilfe können wir mehr über diese Ursprungsprozesse erfahren.

Neutrinos sind überall: Allein aus den Kernfusionsreaktionen in der Sonne durchdringen uns in jeder Sekunde unbemerkt rund 60 Milliarden dieser kosmischen Geisterteilchen, und zwar pro Quadratzentimeter – das ist etwa die Fläche eines Daumennagels. Neutrinos reagieren fast nie mit der Materie, die sie durchqueren.

Um dennoch Neutrinos aus dem Kosmos beobachten zu können, haben Forschende im ewigen Eis der Antarktis den größten Neutrinodetektor der Welt aufgebaut: Der einen Kubikkilometer große, ins Eis eingelassene IceCube-Detektor sucht dort nach den extrem seltenen Neutrinoreaktionen. Aus der Leuchtspur, die ein Neutrino nach einer Wechselwirkung mit dem Eis gelegentlich erzeugt, lassen sich seine Herkunftsrichtung und seine Energie bestimmen.

Wo sind die Neutrinoquellen der Milchstraße?

Dennoch ist das Neutrinosignal unserer Milchstraße nicht leicht zu entdecken. „Faszinierend ist, dass – ganz anders als im elektromagnetischen Spektrum, also bei Licht verschiedener Wellenlängen – im Regime der Neutrinos das ferne Universum unsere unmittelbare kosmische Nachbarschaft bei weitem überstrahlt“, erläutert Francis Halzen, Professor an der University of Wisconsin-Madison in den USA und Forschungsleiter von IceCube. Erst durch eine ausgeklügelte Analyse von rund 60 000 Neutrinomessungen aus zehn Jahren, bei der KI-Methoden einen entscheidenden Beitrag lieferten, ließ sich das Neutrinopanorama unserer Milchstraße isolieren.

Die Energie der nun von IceCube nachgewiesenen Neutrinos ist viele Millionen Mal größer als die Energie des stetigen Neutrinostroms aus den Kernfusionsreaktionen in der Sonne. Die Neutrinos stammen also ganz offensichtlich nicht aus den Sternen der Milchstraße selbst. „Der nächste Schritt besteht nun darin, Neutrinoquellen innerhalb der Milchstraße direkt zu identifizieren“, erklärt Ignacio Taboada, Professor am Georgia Institute of Technology in den USA und IceCube-Sprecher. Die Fachleute hoffen, durch die Fahndung nach den Neutrinoquellen auch etwas über die Quellen der Kosmischen Strahlung zu erfahren, einem Hagel elektrisch geladener Atomkerne, der aus allen Richtungen gleichmäßig auf die Erde einprasselt. Die Herkunft dieses Teilchenhagels ist auch mehr als 100 Jahre nach seiner Entdeckung noch immer nicht befriedigend geklärt.

> *„Im Regime der Neutrinos überstrahlt das ferne Universum unsere kosmische Nachbarschaft“*
>
> ***Francis Halzen, University of Wisconsin-Madison, USA***

„Die IceCube-Beobachtungen öffnen ein neues Fenster zur Milchstraße und stimmen uns zuversichtlich, dass wir mit Neutrinos in den kommenden Jahren auch die Quellen der Kosmischen Strahlung in unserer Galaxie aufspüren werden können“, betont Marek Kowalski, Leiter der IceCube-Gruppe bei DESY und Professor an der Humboldt-Universität zu Berlin.

Science, DOI: 10.1126/science.adc9818

Bild: DESY, Science Communication Lab; Milchstraßenpanorama: ESO, S. Brunier CC BY 4.0

14
Die Bausteine des Lebens entschlüsseln

Life Sciences

Der Mensch im Mittelpunkt intelligenter Forschung

Die Medizin hat mit der Zeit enorme Fortschritte gemacht. Und die Entwicklung geht immer weiter. Die Ziele: Medikamente, die besser wirken und weniger Nebenwirkungen zeigen. Impfstoffe, die perfekt vor Infektionskrankheiten schützen. Und Strahlentherapien, mit denen sich Tumore gezielter bekämpfen lassen. DESY und seine Partner arbeiten an den Grundlagen dafür – und nutzen dazu einen vielfältigen Werkzeugkasten, bestückt mit ausgefeilten, teils einzigartigen Methoden.

Bilder: DESY, Science Communication Lab

ZOOM

14 Proteine, Impfstoffe und klebrige Biofilme

15 Ultrakalte Aufnahmen, gestochen scharf

16 Die Suche nach dem Super-Wirkstoff

18 Proteine bei der Arbeit beobachten

19 Rasante Transformation

20 Kurze Blitze – schnelle Aufnahmen

22 Teilchenkanonen gegen Krebs

24 Die Reise der Immunzellen

25 Extrem scharfe Röntgenbilder

26 Die weltbeste Röntgenlicht-quelle ihrer Art

27 Verschwindende Knochenschrauben

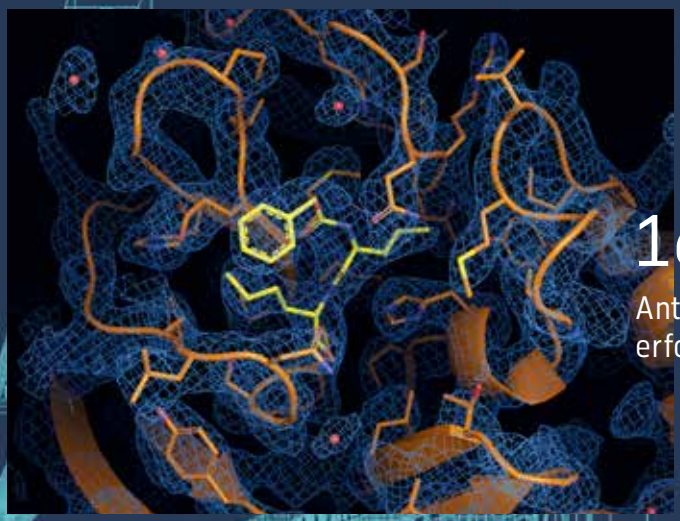
28 Bakterielle Schleimfilme

29 Die Proteinfaser-Detektivin

30 KI goes Bio

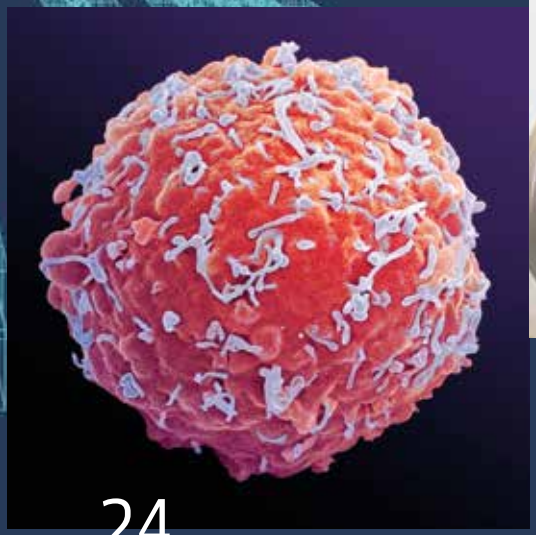
32 Erfolgreiche Bio-Kooperationen

33 Ein guter Grund, in Deutschland zu bleiben



16
Antivirale Wirkstoffe erforschen

18
Biochemische Reaktionen verfolgen



24
Die Reise der Immunzellen beobachten

Bilder: Science Photo Library, Steve Gschmeissner; DESY, Gesine Born

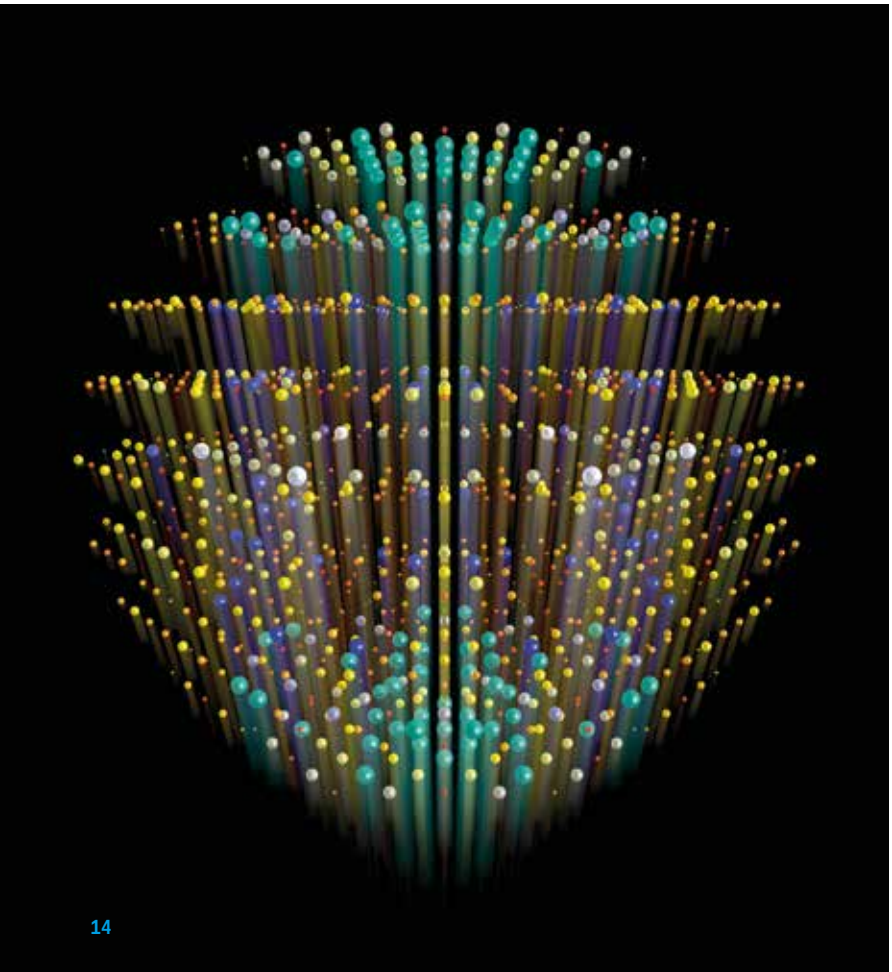
Proteine, Impfstoffe und klebrige Biofilme

Auf dem DESY-Campus widmen sich unterschiedliche Teams der Gesundheitsforschung

Der Blick durch das Mikroskop offenbart Kristalle mit scharfen Ecken und Kanten – es könnten winzige Edelsteine sein. Doch in Wirklichkeit handelt es sich um Forschungsobjekte der Biomedizin: Das Mikroskop steht an der Niederlassung des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) in Hamburg. Es gehört zu einer Messstation an einer der leistungsstärksten Röntgenquellen Europas – dem Teilchenbeschleuniger PETRA III auf dem DESY-Campus in Hamburg-Bahrenfeld.

Die bunten Kristalle bestehen aus Proteinen – essenziellen Bausteinen des Lebens. Gleich werden sie behutsam auf einem drehbaren Präzisionstisch positioniert, danach zielt der gebündelte Röntgenstrahl von PETRA III auf einen der Winzlinge. Der Mini-Kristall lenkt den Strahl ein wenig ab und erzeugt dadurch ein verwirrendes Punktemuster, das ein Röntgendetektor aufnimmt. Anschließend folgt die Computeranalyse: Ausgefeilte Algorithmen rechnen das Punktemuster in ein detailliertes Bild des untersuchten Proteins um – eine komplexe Architektur aus unterschiedlichen Atomgrüppchen, miteinander verknüpft durch chemische Bindungen.

Proteinkristallographie, so heißt die Methode, die für die Biomedizin unschätzbare Dienste leistet. Sie vermag die dreidimensionale Struktur etwa eines Enzyms detailliert aufzulösen, zum Teil bis auf die Atome genau. Für die Lebenswissenschaften eine zentrale Information: Erst wenn die genaue Struktur eines Proteins bekannt ist, lässt sich ermitteln, wie es im Detail funktioniert. Ausgehend davon kann die Fachwelt Ansatzpunkte für bessere Medikamente aufspüren – zum Beispiel Bindungstaschen, die ein neuer Wirkstoff blockieren könnte, wodurch ein schädliches Virusprotein außer Gefecht gesetzt würde.



Die atomare Struktur der Proteine ergibt sich aus dem Beugungsmuster der Röntgenstrahlen, die durch den Proteinkristall gestreut werden. Die regelmäßige Anordnung der Atome im Kristall erzeugt starke Reflexe im Beugungsbild, hier als farbige Kugeln dargestellt.

Bild: CFEL/DESY, Thomas White

Detailblick auf Tuberkuloseprotein

2009 gab es für drei Fachleute, die mit dieser Methode einen Durchbruch erzielt hatten, den Nobelpreis für Chemie. Die drei, darunter die israelische Biochemikerin Ada Yonath, hatten die Struktur des Ribosoms geknackt – ein Proteinkomplex, der als die Eiweißfabrik des Körpers gilt. Maßgebliche Voruntersuchungen hatte Yonath unter anderem bei DESY gemacht. „Ich bewundere Ada Yonath für ihre Geduld“, sagt EMBL-Forscher Matthias Wilmanns. „Die Analysen des Ribosoms waren extrem schwierig und langwierig.“ Heute allerdings würde man dafür andere, modernere Methoden verwenden.

Die Gruppe von Matthias Wilmanns konnte im Lauf der Jahrzehnte ebenfalls viele Proteinstrukturen aufklären, insbesondere aus dem Genom des Tuberkulosebakteriums. Seit einiger

Zeit hat sich der Werkzeugkasten der Fachleute erweitert – es sind völlig neuartige Methoden dazugekommen. „In den letzten Jahren haben wir regelrechte Revolutionen in der Strukturbiologie erlebt“, schwärmt Wilmanns. „Zum einen gibt es KI-Algorithmen, die die Gestalt von Proteinen verblüffend genau errechnen können. Zum anderen kann nun auch eine weitere Technik, das Kryo-Elektronenmikroskop, detailreiche Aufnahmen von Proteinen liefern.“

Damit gelang Wilmanns Team etwas Bemerkenswertes: Es konnte die Struktur eines Proteinkomplexes aufklären, der dem Tuberkulosebakterium hilft, wichtige Stoffe zur Infektion des menschlichen Körpers in ihn einzuschleusen. „Wir konnten diesen Proteinkomplex per Kryo-Elektronenmikroskopie so aufnehmen, dass sich jedes einzelne Atom erkennen lässt“, erzählt

„In den letzten Jahren haben wir regelrechte Revolutionen in der Strukturbiologie erlebt“

Matthias Wilmanns, EMBL

Wilmanns. „Das war unglaublich, noch vor zehn Jahren hätte ich das für unmöglich gehalten.“

Mittlerweile sind die Daten veröffentlicht. Den Entwicklern von Tuberkulosemedikamenten können sie Hinweise liefern, an welcher Stelle des Proteinkomplexes ein neues Antibiotikum angreifen und den Infektionsprozess stoppen könnte. Grundsätzlich, betont Wilmanns, ergänzen sich die beiden Methoden: Das Kryo-Elektronenmikroskop eignet sich für die Analyse von relativ großen Proteinkomplexen, aber auch von Viren und sogar Zellen. Durch Kristallographie am Beschleuniger lassen sich besonders kleinere Biomoleküle genau darstellen, sowie ihr Wechselspiel mit anderen Substanzen, etwa mit potenziellen Wirkstoffen. ››

Bilder: EMBL, Kinga Lubowiecka; Carolin Seuring

ULTRAKALTE AUFNAHMEN, GESTOCHEN SCHARF

Wie das Kryo-Elektronenmikroskop Proteine und Viren abbildet

Im Keller des Zentrums für strukturelle Systembiologie (CSSB) zeigt Carolin Seuring auf einen Spalt im Fußboden: „Hier beginnt ein spezielles, schwingungsgedämpftes Fundament“, erklärt die Biochemikerin. „Damit schützen wir unsere Mikroskope vor Vibrationen, so dass sie hochauflösende Bilder aufnehmen können.“ Die Mikroskope, für die Seuring verantwortlich ist, sind zimmerhohe Hightech-Klötze, Stückpreis einige Millionen Euro. Sie arbeiten nicht mit Licht, sondern mit Elektronenstrahlen. Da in ihrem Inneren Temperaturen von minus 150 Grad herrschen, spricht die Fachwelt von Kryo-Elektronenmikroskopen.

Der Durchbruch der Technik kam vor gut zehn Jahren: Damals wurden Kameras erfunden, die die Elektronen direkt und präzise detektieren. Dadurch ließ sich die Auflösung um das Zehnfache steigern, nun wurden einzelne Atome erkennbar. 2017 gab’s den Chemie-Nobelpreis für die Entwicklung, heute nutzen sie Forschungsteams in aller Welt.

Schockgefrorene Proteine

Das Prinzip: Ein Elektronenstrahl trifft auf eine Probe, die zum Beispiel ein Protein enthält. Damit das Protein nicht zerstört wird, muss es zuvor schockgefroren werden. An den Vorbereitungsplätzen hantieren die Forschenden mit Spezialpinzetten und flüssigem Stickstoff, um ihre Proben so einzufrieren, dass sich keine Eiskristalle bilden – diese nämlich könnten die empfindlichen Gebilde zerstören. „Die Luftfeuchtigkeit beträgt in unserem Labor nur 20 Prozent“, beschreibt Seuring. „Das hilft uns, unsere millimetergroßen Proben ohne größere Verunreinigungen homogen einzufrieren.“

Herrin über die Tiefkühl-Mikroskope: Carolin Seuring leitet am CSSB die Kryo-Elektronenmikroskop-Einrichtung.

Dann kommen die Proben in eine Halterung, immer zwölf in eine Cassette. Damit sie nicht schmelzen, wird die Cassette in eine Art Thermoskanne gesteckt, gefüllt mit Flüssigstickstoff. Seuring greift sich das kaffeebechergroße Behältnis und trägt es in den Nachbarraum. Dort öffnet sie das Gehäuse des Mikroskops, das Innenleben wird sichtbar – ein senkrechtes, luftleer gepumptes Rohr für den Elektronenstrahl, bestückt mit Ventilen, umringt von Kabeln.

Nun setzt die Wissenschaftlerin das Tiefkühlbehältnis in eine Aussparung ein. Ein Mechanismus zieht die Cassette nach oben, bald darauf kann die Bildaufnahme beginnen: Elektronen durchstrahlen die Probe und werden von ihr abgelenkt. Ein Detektor nimmt das Ablenkmuster auf und speichert es im Computer. „Pro Tag können Tausende von Bildern zusammenkommen“, erzählt Seuring. „Das sind zwei bis drei Terabyte pro Datensatz, die mit Hilfe unseres Rechenclusters analysiert werden.“ Das Resultat: extrem detaillierte Bilder von Enzymen und Proteinkomplexen, von Viren und Zellen – die ganze Bandbreite an biologischen Objekten, die an einer Infektion beteiligt sind, dem Kernthema des CSSB.

Hinzu kommt eine weitere Methode, der sich EMBL in Hamburg bedient – die Röntgenkleinwinkelstreuung. Bei ihr können die Biomoleküle in Lösung untersucht werden, was eher ihrem natürlichen Zustand entspricht. Diese Methode ist als Ergänzung zur Kristallographie und Kryo-Elektronenmikroskopie sehr nützlich und kann auch Einblicke in die Strukturen von ungefalteten Bereichen geben. Mit dieser Methode gelang es dem EMBL gemeinsam mit dem Mainzer Unternehmen BioNTech, die Gestalt sogenannter Nanolipide zu analysieren. Diese agieren als Träger von mRNA-Impfstoffen – und bildeten eine wichtige Voraussetzung für den Corona-Impfstoff von BioNTech.

„Unsere Arbeiten haben geholfen, die biophysikalischen Eigenschaften dieser Partikel zu verbessern“, erläutert Wilmanns. „Das dürfte dazu beigetragen haben, dass BioNTech das Vakzin ziemlich schnell auf den Markt bringen konnte.“ Und die Kooperation geht weiter. Im jüngsten Gemeinschaftsprojekt konnten die Partner per Kleinwinkelstreuung ermitteln, wie viel mRNA in den Nanolipid-Käfigen steckt – womöglich eine nützliche Information für das Unternehmen, um seine Impfstoffe zu verbessern.

Vielfältige Forschungslandschaft

In den letzten Jahren haben die Lebenswissenschaften bei DESY weiter an Gewicht gewonnen: Auf dem Campus in Hamburg-Bahrenfeld ist mit dem Zentrum für strukturelle Systembiologie (CSSB) ein interdisziplinäres Zentrum mit dem Fokus Infektionsbiologie entstanden, an dem sich verschiedene Universitäten und Forschungseinrichtungen beteiligen. Die Universität Hamburg hat mit HARBOR ein Laborgebäude errichtet, in dem das zeitlichen Verhalten molekularbiologischer Systeme erforscht wird. Und auch die ungemein starken Röntgenlaserblitze des European XFEL, an dem DESY maßgeblich beteiligt ist, werden unter anderem dazu genutzt, biologische Proben zu analysieren.

Ferner ist DESY dabei, seine Kooperationen mit biomedizinischen Forschungseinrichtungen wie dem Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, dem Leibniz-Institut für Virologie oder dem Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin zu vertiefen. Mittlerweile bieten auch zwei Start-ups ihre Dienste an: Mit Hilfe der Kleinwinkelstreuung untersucht BIOSAXS im Auftrag von Unternehmen medizinisch relevante Makromoleküle. Und CrystalsFirst unterstützt die Arzneimittelforschung durch eine gezielte, KI-gestützte Suche nach neuen Wirkstoffen.

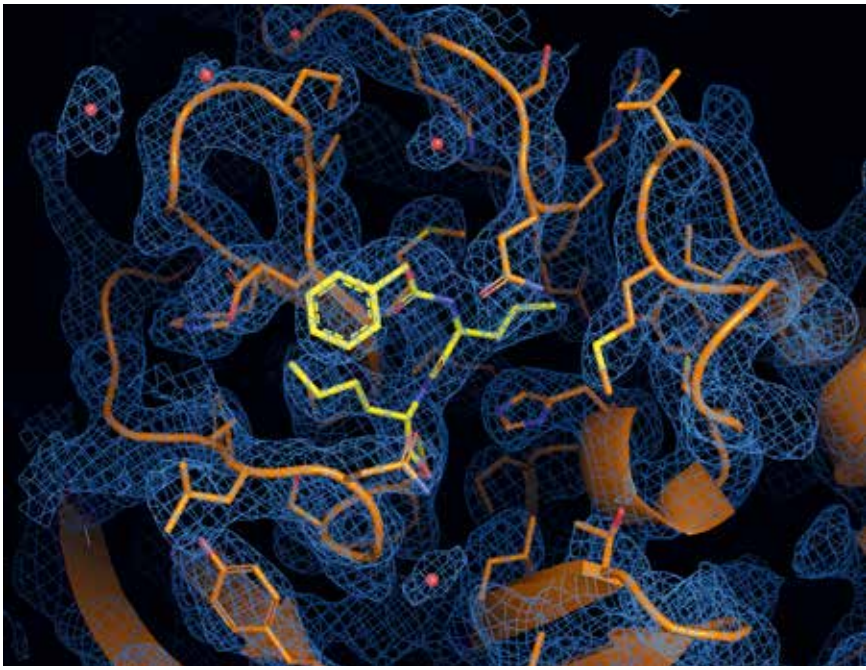
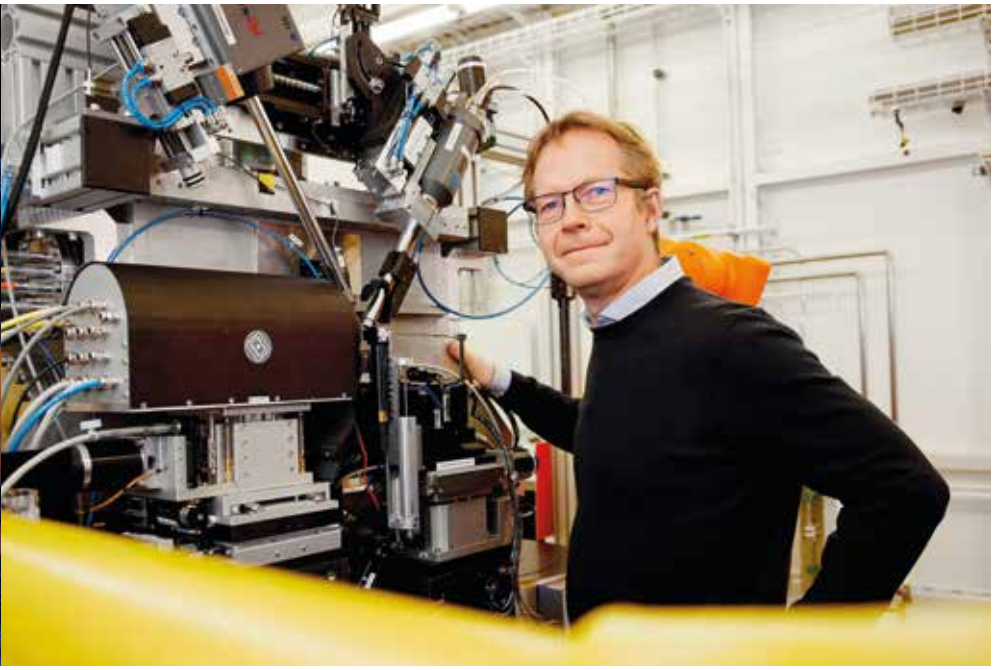


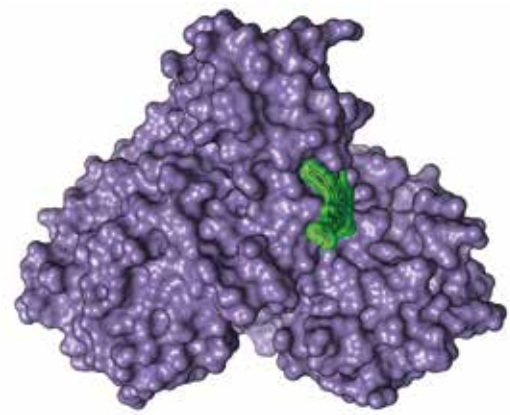
Bild: DESY

Die Suche nach dem **Super-Wirkstoff**

Seit einiger Zeit nutzt die Fachwelt die Proteinkristallographie, um systematisch nach neuen Medikamenten zu fahnden, etwa gegen Infektionskrankheiten. Das Prinzip: Tausende von Wirkstoffkandidaten werden zusammen mit jenem Protein kristallisiert, an dem sie angreifen sollen. Diese Kristalle werden mit dem intensiven Röntgenlicht von PETRA III beleuchtet. Aus den Messdaten lässt sich herauslesen, ob und wie viele der Wirkstoffkandidaten an das Protein gebunden haben.

Zur Anwendung kam das Verfahren zu Beginn der Coronapandemie. Ein Team um DESY-Forscher Alke Meents konnte innerhalb kurzer Zeit nahezu 8000 Kristalle untersuchen, jeder von ihnen mit einem anderen, schon bekannten Wirkstoffkandidaten. Und tatsächlich: „Wir fanden Stoffe, die an ein bestimmtes Virusprotein binden, die Hauptprotease“, erzählt Meents. „Ließe sich diese per Medikament blockierten, wäre das Virus außer Gefecht gesetzt.“ Bei näherer Untersuchung eines vielversprechenden Wirkstoffkandidaten zeigte sich, dass er nicht nur an die Hauptprotease des Virus bindet, sondern auch an das körpereigene Protein Cathepsin L, welches das Virus für den Eintritt in





Der antiviral wirksame Inhaltsstoff Calpeptin (gelb) hat an der Hauptprotease des Coronavirus angedockt (links). DESY-Forscher Alke Meents vor seinem Arbeitsgerät an der Röntgenquelle PETRA III (Mitte). Auch der Wirkstoff Pelitinib (grün) bindet an die Corona-Hauptprotease (rechts).

die menschlichen Zellen benutzt: Der Wirkstoff Calpeptin blockiert nicht nur die Funktion der Hauptprotease, sondern auch die des körpereigenen Cathepsin L und kann damit die Virusvermehrung zusätzlich behindern.

Doch für eine routinemäßige Coronabehandlung scheint Calpeptin wegen seiner zu erwartenden Nebenwirkungen kaum geeignet. Dafür aber ließen sich womöglich andere, deutlich schwerere Viruserkrankungen mit einem ähnlichen Infektionsmechanismus behandeln – zum Beispiel Ebola, da spielen die Nebenwirkungen dann eine geringere Rolle. „Gemeinsam mit einem Forschungsteam in Südafrika wollen wir herausfinden, ob Calpeptin den Eintritt von Ebolaviren in die Zellen verhindern kann“, erläutert Meents. Im Idealfall könnte der oft tödlich verlaufenden Krankheit damit der Schrecken genommen werden. Außerdem wollen die Fachleute gemeinsam mit dem Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin schauen, ob sich Wirkstoffkandidaten gegen Hantaviren und Lassaviren finden lassen – Erreger, von denen Epidemien oder sogar Pandemien ausgehen können.

Minutenschnelles Screening

Hilfreich für solche Untersuchungen dürfte eine neue Screening-Methode sein, die das DESY-Team derzeit entwickelt. Bislang wird bei den Experimenten jeder Kristall einzeln per Roboterarm so positioniert, dass ihn der gebündelte Röntgenstrahl optimal trifft. Um nicht durch das intensive Röntgenlicht beschädigt zu werden, muss der Proteinkristall dabei auf extreme Minusgrade gekühlt werden. „Bei unserer neuen Methode wachsen wir Hunderttausende von Kristallen gleichzeitig auf einem Chip auf“, berichtet Meents’ Kollege Sebastian Günther. „Dieser Chip lässt sich dann in einem einzigen Arbeitsgang durchleuchten, und zwar ohne Kühlung, also bei Raumtemperatur.“ In einem Pilotexperiment konnte die Arbeitsgruppe unlängst zeigen, dass die Methode funktioniert und dieselbe Auflösung liefert wie das konventionelle Verfahren – ein Durchbruch.

„Wir können mit dem neuen Verfahren in derselben Zeit viel mehr Wirkstoffkandidaten testen als bislang“

Sebastian Günther, DESY

„Das neue Verfahren lässt sich weitgehend automatisieren und wird das Screening deutlich beschleunigen“, betont Günther. „Wir können damit in derselben Zeit viel mehr Wirkstoffkandidaten testen als bislang.“ Mit der bei DESY geplanten Röntgenquelle PETRA IV ließe sich ein Proteinkristall-Chip sogar innerhalb von Minuten durchtesten – hochinteressant nicht nur für die Grundlagenforschung, sondern auch für Pharmaunternehmen auf der Suche nach neuen, wirksameren Medikamenten.

Bilder: DESY, Christian Schmid; DESY, Marta Mayer

Proteine bei der Arbeit beobachten

Wie laufen biochemische Reaktionen ab, wie erledigt ein lebenswichtiges Enzym seinen Job? Das lässt sich im Detail mit der Strahlung von Röntgenquellen wie PETRA III herausfinden: Durch zeitaufgelöste Messungen lässt sich fast wie in einem Film verfolgen, wie Proteine mit anderen Stoffen reagieren. Für solche Experimente braucht es raffinierte und zugleich anwenderfreundliche Methoden. Die Entwicklung solcher Verfahren zählt zu den Aufgaben von HARBOR, dem Hamburg Advanced Research Centre for Bioorganic Chemistry, das 2020 auf dem Campus Hamburg-Bahrenfeld eröffnet wurde. HARBOR beherbergt unter anderem den Exzellenzcluster „CUI: Advanced Imaging of Matter“ der Universität Hamburg und arbeitet eng mit den Forschungseinrichtungen vor Ort zusammen.

Eine der Herausforderungen: Um eine biochemische Reaktion beobachten zu können, muss man sie gezielt auslösen können. Dafür entwickeln die HARBOR-Arbeitsgruppen von Pedram Mehrabi und Eike Schulz in Kooperation mit EMBL sowie dem Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie gemeinsam mehrere Methoden. Eine davon ist eine ausgefeilte Mischtechnik: Eine feine Düse spritzt winzige Tröpfchen auf das zuvor kristallisierte Protein. Die Tröpfchen enthalten einen Liganden, also einen Reaktionspartner des Proteins. Da die Kristalle nur 10 bis 20 Mikrometer messen, können die Tröpfchen im Handumdrehen in sie hineindringen. Die biochemische Reaktion beginnt – mit ihr startet die Stoppuhr für die Röntgenaufnahme an der Messstation T-REXX bei PETRA III.

„Die korrigierten Daten wurden von der Arzneimittelforschung aufgegriffen“

Arwen Pearson, Universität Hamburg und CFEL

Bild: DESY, Gesine Born

Flotte Düse

„Mit dieser Methode lassen sich Reaktionen verfolgen, die sich innerhalb von Millisekunden abspielen“, erklärt Biophysikerin Arwen Pearson – und startet ein Video, das den Prozess zeigt: Zu sehen ist das vergrößerte Bild eines Siliziumchips mit einer schachbrettartigen Oberfläche. In jedem Feld steckt ein Mikro-Proteinkristall. „Dieser Schatten da ist eine kleine piezoelektrische Düse“, beschreibt Pearson. „Diese Düse rastert die Felder ab und spritzt auf jedem Feld ein Tröpfchen mit dem Liganden auf den Kristall – zu erkennen an den dunklen Flecken.“ Der raffinierte Spuckmechanismus trägt einen treffenden Namen: LAMA.

Das HARBOR-Team von Andrea Thorn hat eine andere wichtige Aufgabe übernommen – und zwar mitten in der Coronazeit. Um die Pandemie wirkungsvoll zu bekämpfen, haben zahlreiche Forschungsteams in aller Welt die Struktur der Virusproteine vermessen und umgehend veröffentlicht. Aufgrund des Zeitdrucks schlichen sich dabei manche Fehler und Ungenauigkeiten ein. Um diese auszubügeln, initiierte Thorn die Corona Virus Structural Taskforce – ein Team aus überwiegend jungen Forschenden rund um den Globus. Es prüfte systematisch alle neu veröffentlichten Strukturen, identifizierte Mängel und sorgte dafür, dass die Daten ergänzt und korrigiert wurden. „Die korrigierten Daten wurden dann von der Arzneimittelforschung aufgegriffen“, erzählt Pearson. „Damit dürfte die Arbeit der Taskforce einen positiven Einfluss auf die Bewältigung der Coronakrise gehabt haben.“

„WIR ERLEBEN EINE RASANTE TRANSFORMATION“

Die Lebenswissenschaften erfahren derzeit einen markanten Wandel: Das Verständnis biologischer Prozesse auf der Ebene einzelner Moleküle wächst in hohem Tempo. Experiment und Künstliche Intelligenz arbeiten dabei Hand in Hand, erläutert der Vorsitzende des DESY-Direktoriums, Helmut Dosch.

femto: Herr Dosch, wie sieht die Gesundheitsforschung der Zukunft aus?

Helmut Dosch: Wir erleben derzeit eine rasante Transformation in den Lebenswissenschaften: KI-Methoden ermöglichen Untersuchungen auf der Ebene der Moleküle, die früher undenkbar waren. Programme wie AlphaFold können heute die räumliche Struktur von Proteinen vorhersagen und so enorm zum Verständnis der Maschinerie des Lebens beitragen. Auf diese Weise lassen sich Wirkstoffmoleküle am Computer vorentwerfen und voruntersuchen und damit die Wirkstoffentwicklung enorm beschleunigen.

femto: Bislang wird die räumliche Struktur von Biomolekülen mit Röntgenstrahlung oder an Elektronenmikroskopen bestimmt. Macht die KI diese Anlagen überflüssig?

Helmut Dosch: Das Gegenteil ist der Fall! Die KI ist auf solche Untersuchungsdaten angewiesen. AlphaFold braucht die Daten aus hochaufgelösten Strukturuntersuchungen, um zu lernen. Diese Daten sollten natürlich von besonders guter Qualität sein. Wir bauen also mit hochaufgelösten Analysen eine Datenbank auf, füttern die KI damit, und die liefert auf dieser Grundlage dann eine Art digitalen Zwilling des Moleküls als Input für die weiteren Untersuchungen. Am Ende müssen wir die Strukturen molekular optimieren. Dazu benötigen wir hochbrillante Röntgenquellen und spezialisierte Kryo-Elektronenmikroskope.

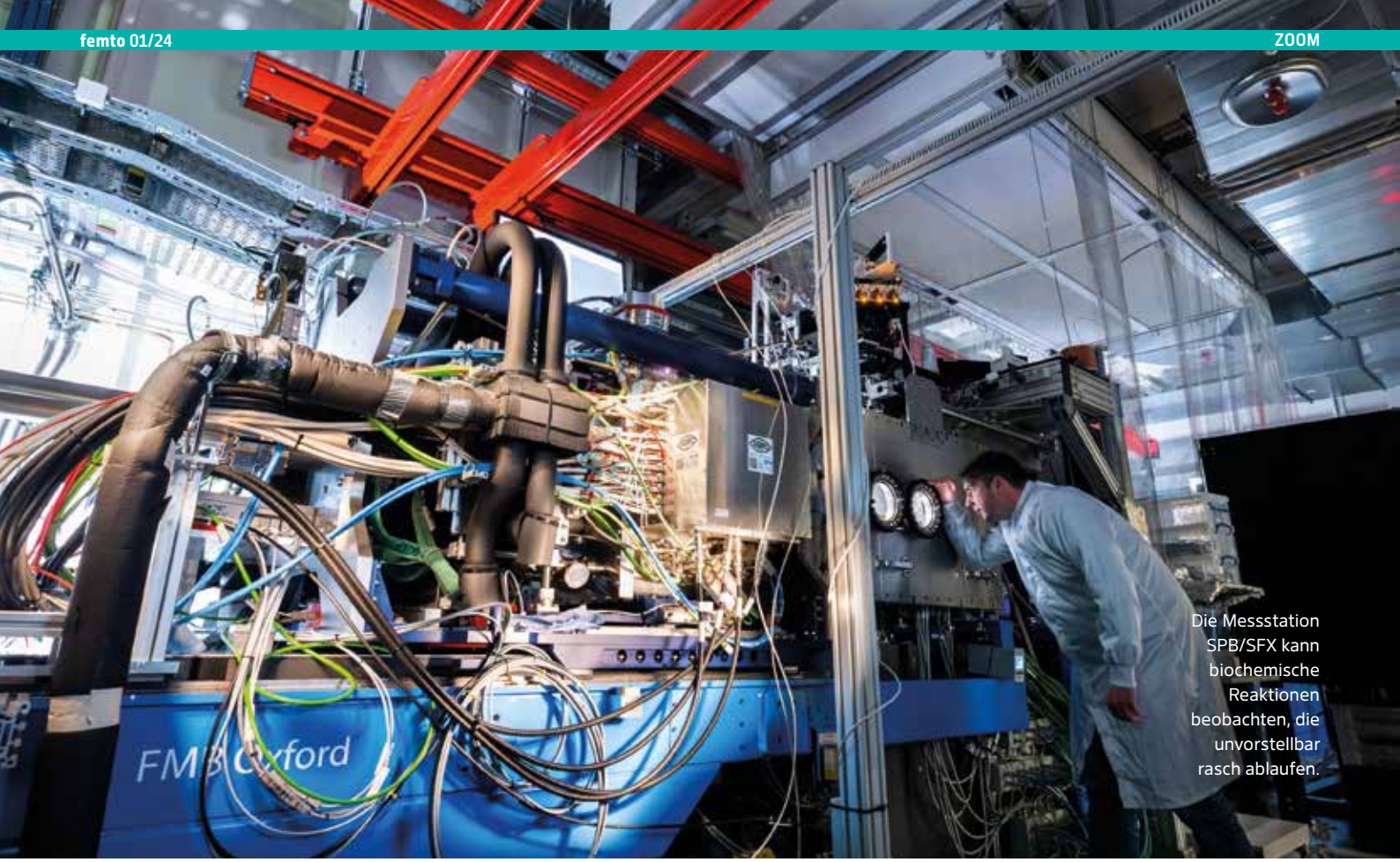
femto: Das heißt, Messung und Simulation gehen Hand in Hand?

Helmut Dosch: Ja, und das ist das Einzigartige an unserem Standort in der Science City Hamburg Bahrenfeld: Wir haben sämtliche Werkzeuge zur Strukturanalyse – übrigens nicht nur von Proteinen – und die KI-Expertise hier auf dem Campus, bei uns und unseren Partnern. Also verschiedene Röntgenquellen wie PETRA III und in Zukunft PETRA IV, die Röntgenlaser FLASH und European XFEL sowie Kryo-Elektronenmikroskope. Dazu Partner wie EMBL, das ja AlphaFold mitentwickelt hat, und Institute wie CSSB, in dem sich neun Partner aus den Life Sciences zusammengeschlossen haben, sowie Speziallabore zur Proteinaufbereitung. Diese Möglichkeiten und geballte Expertise finden Sie so leicht kein zweites Mal auf der Welt.

femto: Dient das vor allem der Grundlagenforschung, oder profitiert davon auch zum Beispiel die medizinische Anwendung?

Helmut Dosch: Das lässt sich nicht trennen. Zunächst einmal betreiben unsere Partner und wir hier natürlich Grundlagenforschung. Unsere Analytikmöglichkeiten sind für mich auch eine Frage der Vorsorge, beispielsweise vor weiteren Pandemien. Mit der Röntgenstrukturanalyse konnten beispielsweise extrem schnell die zentralen Proteine des Coronavirus entschlüsselt werden. Wir haben dann in einem Schnellverfahren Tausende von existierenden Wirkstoffen darauf getestet, ob sie gegen das Coronavirus helfen – das können Sie in diesem Tempo auf keine andere Weise. Der mRNA-Impfstoff gegen das Virus besteht aus kleinen Erbgutschnipseln, die in winzigen Hüllen aus Fettmolekülen in die Körperzellen geschleust werden. Wie baut man diese Hülle, so dass sie unbeschadet durch den Organismus reist, in die Zelle eindringen kann und dort zuverlässig ihre Fracht freisetzt? Das ist keine triviale Aufgabe. An DESYs Röntgenquellen haben Impfstoffhersteller untersucht, wie sich diese Lipid-Kügelchen, die als Fähren für die mRNA-Schnipsel dienen, optimieren lassen. Das könnte später auch für eine Impfung gegen Krebs helfen, die auf dieselbe Weise Krebsmedikamente in Tumorzellen schleusen will. Wir haben vorgeschlagen, ein umfassendes Analytikzentrum bei DESY aufzubauen. Das würde nicht nur der Gesundheitsvorsorge dienen, sondern wäre auch ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung neuer Materialien, die genauso wie Wirkstoffe und Proteine heute auf der molekularen Ebene analysiert und designt werden.

Bild: DESY, Rüdiger Nehmzow



Die Messstation SPB/SFX kann biochemische Reaktionen beobachten, die unvorstellbar rasch ablaufen.

Kurze Blitze – schnelle Aufnahmen

Auf die Analyse schneller Bioreaktionen ist auch eine Anlage spezialisiert, an der DESY maßgeblich beteiligt ist: Seit 2017 erzeugt der Röntgenlaser European XFEL die derzeit stärksten Röntgenblitze der Welt. Basis ist ein kilometerlanger, supraleitender Linearbeschleuniger, der Elektronenpakete nahezu auf Lichtgeschwindigkeit bringt, um sie durch langgestreckte Magnetstrukturen zu schicken. Diese zwingen die Elektronenbündel auf einen präzisen Schlingerkurs, wodurch sie ungemein starke Röntgenblitze aussenden. „Die Blitze sind extrem kurz, um den Faktor 10 000 kürzer als bei einem Synchrotron wie PETRA III“, erklärt Sakura Pascarelli, wissenschaftliche Direktorin bei European XFEL. „Dadurch können wir äußerst schnelle biologische Prozesse verfolgen.“

Rasante Photosynthese

Rasant ist in der Natur so einiges – etwa wenn Licht im Spiel ist: Trifft ein Sonnenstrahl auf eine Pflanze, kann dieser in wenigen Femtosekunden (billiardstel Sekunden) eine elektrische Ladung in einem Rezeptormolekül erzeugen. „Diese Ladung wandert dann zu einem anderen Teil des Proteins“, sagt Pascarelli. „Dort kann die Pflanze Wasser spalten und Photosynthese stattfinden lassen.“ Versteht man diese Prozesse im Detail, könnten sie sich in Zukunft nutzen lassen, etwa um neuartige Biokatalysatoren zu entwickeln, zum Beispiel für die Medizin oder die Lebensmitteltechnologie.

Ein weiterer Vorteil der ultrastarken Röntgenblitze: Es reichen relativ kleine Proteinkristalle, um die genaue Form der Biomoleküle zu enträtseln. Das ist vor allem bei Eiweißmolekülen von Vorteil, die sich nur widerwillig in eine Kristallform zwängen lassen – etwa bei medizinisch relevanten Membranproteinen, die lebenswichtige Stoffe in eine Zelle hinein oder aus ihr heraus transportieren. Manche Bakterien erzeugen sogar auf natürlichem Weg winzige Nanokristalle. Sie kommen in der Landwirtschaft als Insektizide zum Einsatz und lassen sich ebenfalls am European XFEL im Detail studieren. Außerdem tüfteln die Fachleute daran, einzelne Proteine per Röntgenblitz zu analysieren. Gelänge das Unterfangen, könnte man auf das Kristallisieren der Eiweiße künftig verzichten – ein unschätzbarer Vorteil. Allerdings ist die Intensität der Strahlung am

Bild: European XFEL, Jan Hosan

„Mit den extrem kurzen Röntgenlaserblitzen können wir äußerst schnelle biologische Prozesse verfolgen“

Sakura Pascarelli, European XFEL

European XFEL so enorm, dass bereits ein einziger Blitz genügt, um eine Bioprobe komplett zu zerstören. „Zum Glück hat die Röntgenstrahlung die Probe dann schon passiert, die Aufnahme ist also im Kasten“, erklärt Pascarelli.

Haarfeiner Proteinstrahl

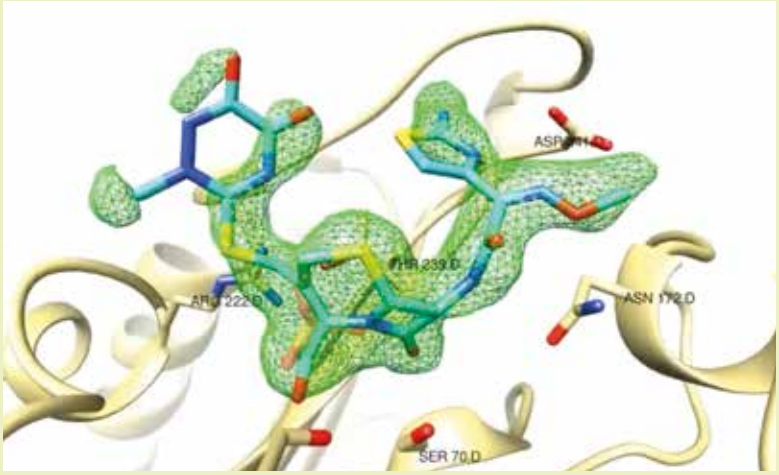
Wie die Experimente aussehen, zeigt Pascarellis Kollege Richard Bean in der unterirdischen, fußballfeldgroßen Experimentierhalle im schleswig-holsteinischen Schenefeld. In einem der wuchtigen Container steckt die Messstation SPB/SFX – hier finden die meisten biomedizinischen Versuche am European XFEL statt. „Hier sieht’s ziemlich kompliziert aus“, gibt Bean zu. „Eine lange Apparatur mit lauter Metallkästen, verbunden durch unzählige Kabel und Leitungen.“ Das Prinzip aber sei simpel: Durch eine luftleere Röhre in der Stirnwand schießen die Röntgenblitze in die Apparatur, in der Mitte treffen sie auf die Probe, meist ein winziger Kristall aus Proteinen. Die Blitze werden von den Molekülen abgelenkt und von einem Detektor registriert, einem silbrig glänzenden Ungetüm, das pro Sekunde bis zu 3500 Aufnahmen schafft. Dann rechnen Computeralgorithmen die aufgenommenen Ablenkmuster um. Heraus kommen Bilder, auf denen im Idealfall jedes einzelne Atom des Proteins zu erkennen ist.

Die vielleicht größte Schwierigkeit bei den Versuchen: „Da die Kristalle nur einen Schuss überleben, müssen wir stetig neue nachführen“, erklärt Bean. „Dazu schießen wir von oben einen feinen Flüssigkeitsstrahl ein, der die Proteinkristalle enthält.“ In der Mitte der Kammer kreuzen die Röntgenblitze diesen Proteinstrahl, in der Regel alle 900 Nanosekunden (milliardstel Sekunden). Doch das Hantieren mit dem mikrometerfeinen Flüssigkeitsstrahl ist heikel: Zuweilen neigen die Proteinkristalle zum Verklumpen, wodurch sie die winzigen, 3D-gedruckten Präzisionsdüsen verstopfen: Der Proteinnachschub stockt, die Crew muss eingreifen.

Resistent gegen Antibiotika

Am European XFEL gelang einem Forschungsteam ein bemerkenswertes Experiment: Das Team, am dem neben DESY unter anderem die US-Universitäten Cornell, Wisconsin-Milwaukee und Arizona beteiligt waren, konnte nachverfolgen, wie das Tuberkulosebakterium ein Antibiotikum außer Gefecht setzt. Zwar wusste die Fachwelt schon länger, dass die Mikrobe dafür ein bestimmtes Enzym nutzt, die Beta-Lactamase. Doch das Team war in der Lage, die extrem rasche Reaktion zwischen Enzym und Antibiotikum quasi in Zeitlupe zu beobachten. „Das konnte nur am European XFEL gelingen, denn mit ihm lassen sich sehr kleine Proteinkristalle untersuchen“, erläutert DESY-Forscher Henry Chapman. „Und wir brauchten kleine Kristalle, um die Reaktion von Wirkstoff und Enzym einfangen zu können.“

Kombiniert mit anderen Studien kann sich die Fachwelt nun ein detailliertes Bild darüber machen, wie die Beta-Lactamase den Wirkstoff deaktiviert. „Das liefert Hinweise, wie man das Antibiotikum verändern könnte, damit das Enzym es nicht mehr knacken kann“, erklärt Chapmans Kollege Dominik Oberthür. „Oder man könnte Moleküle entwickeln, die das Enzym ››



Das Enzym Beta-Lactamase aus Tuberkulosebakterien reagiert mit dem Antibiotikum Ceftriaxon. Die Reaktion verläuft enorm schnell. Die hohe Blitzwiederholrate des European XFEL ermöglicht es in Kombination mit einer speziellen Injektionstechnik, die Anfangsphase der Bindung in Echtzeit zu verfolgen.

Bilder: ESRF, C. Argoud; Animation: University of Wisconsin-Milwaukee, Marius Schmidt

wirkungsvoll hemmen.“ Damit würden die konventionellen Antibiotika wieder zu scharfen Waffen – das Enzym, das sich ihnen in den Weg stellt, würde im Idealfall unschädlich gemacht.

Gemeinsam mit Forschenden der Universität Hamburg und des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf entwickelt Oberthür Methoden, um auch an einem Synchrotron wie PETRA III mit zeitaufgelösten Methoden nach solchen Hemmstoffen zu suchen – in diesem Fall für ein anderes Enzym, ebenfalls eine Lactamase. „Wir haben festgestellt, dass Verbindungen der Boronsäure und ihrer chemischen Verwandten sehr interessant sind“, beschreibt Oberthür. Jetzt plant das Team weitere Experimente, um die Tauglichkeit dieser Verbindungen detaillierter zu prüfen.

Aber: „Eine Grenze für das Wirkstoff-Screening bei PETRA III stellt derzeit der Durchsatz dar – die besten Experimentierstationen schaffen 800 Datensätze pro Tag“, sagt Oberthür. „Doch mit einem von uns entwickelten Fließbandsystem sollten wir künftig in der Lage sein, 10 000 Datensätze pro Tag zu sammeln – was die Methode zunehmend auch für Pharmaunternehmen interessant machen könnte.“ Und auch die Macher von KI-Algorithmen wie AlphaFold dürften von der neuen Fließbandtechnik profitieren: Schließlich sind sie auf möglichst viele hochwertige und objektive Datensätze angewiesen, um ihre Algorithmen zu verbessern.

„Das konnte nur am European XFEL gelingen, denn mit ihm lassen sich sehr kleine Proteinkristalle untersuchen“

Henry Chapman, DESY

Bild: DESY, Gesine Born

TEILCHENKANONEN GEGEN KREBS

Zwei Anlagen erforschen das Potenzial der Tumortherapie mit energiereichen Elektronen

Durch eine Sicherheitstür ist Florian Burkart in einen Tunnel mit meterdicken Betonwänden gelangt. Jetzt steht er vor einem 45 Meter langen, hochkomplexen Forschungsgerät: ein dünnes Edelstahlrohr, eingepackt in Spezialmagnete, Diagnosesensoren und Apparaturen, in denen Radiowellen winzige Elektronenbündel auf nahezu Lichtgeschwindigkeit bringen. Allerdings nervt die Hightechanlage mit einem hohen Pfeifton – eine Nebenwirkung der Präzisionswasserkühlung. „Sie hält die beschleunigenden Strukturen bis auf wenige hundertstel Grad genau auf einer konstanten Temperatur“, erklärt der Physiker.

ARES, so heißt die Apparatur, ist zwar einer der kleinsten Teilchenbeschleuniger auf dem Hamburger DESY-Campus. Doch die Anlage wartet mit einer Besonderheit auf: „Sie kann extrem kurze Elektronenbündel erzeugen“, beschreibt ARES-Koordinator Burkart. „Diese messen nur wenige Femtosekunden, eine Länge von ein paar Nanometern.“ Damit eignet sich ARES unter anderem für medizinische Forschungsprojekte – ähnlich wie eine weitere DESY-Anlage, der Beschleunigerteststand PITZ am

Am Elektronenbeschleuniger ARES erproben Forschungsteams von DESY und dem UKE eine neue Variante der Strahlentherapie. Die energiereichen Elektronen können zentimetergroße Objekte problemlos durchdringen, zum Beispiel sogenannte Phantome aus Kunststoff.

DESY-Standort Zeuthen. Beide erforschen neue, effektivere Varianten der Tumorstrahlentherapie.

Flash-Effekt

Bei PITZ geht es um ein noch junges, vielversprechendes Phänomen, in der Fachwelt als Flash-Effekt bezeichnet. „Das bedeutet, dass man mit einer sehr intensiven und kurzen Bestrahlung das Tumorgewebe mindestens so schädigen kann wie mit der konventionellen Bestrahlung", erläutert PITZ-Leiter Frank Stephan. „Aber, und das ist das Besondere, das gesunde Gewebe um den Tumor herum wird geschont." Für die Praxis hätte das einen enormen Vorteil: Bislang müssen Krebserkrankte mehrere Bestrahlungen über sich ergehen lassen, manchmal sind es Dutzende, verteilt über mehrere Wochen. Künftig könnte eine Sitzung reichen – bei gleicher Wirkung auf den Tumor, aber deutlich geringeren Nebenwirkungen für das umliegende gesunde Gewebe.

> *„Das gesunde Gewebe um den Tumor herum wird geschont"*
> ***Frank Stephan, DESY***

Zwar funktioniert der Flash-Effekt im Prinzip, das konnten einige Forschungsteams bereits zeigen. Nur: Bei welchen Strahlungsdosen und Bestrahlungsdauern er am wirkungsvollsten ist, liegt noch im Dunklen. Hier setzt PITZ an. „Die Anlage ist sehr flexibel und kann Elektronenpulse von ganz unterschiedlicher Stärke und Länge erzeugen", erläutert Stephan. „Damit können wir einen großen Parameterbereich abscannen und herausfinden, wo der Flash-Effekt besonders wirksam ist." Ende 2022 liefen erste vielversprechende Experimente. Nun baut Stephans Team den Teststand so aus, dass er sich für die Messungen ideal eignet. Unter anderem planen die Fachleute eine Art Scanner, der den Elektronenstrahl Zeile für Zeile über das Untersuchungsobjekt führt, etwa eine Kultur mit Tumorzellen. „Zahlreiche Gruppen aus der Medizin haben bereits die Absicht geäußert, bei uns den Flash-Effekt zu erforschen", betont Stephan. „Darunter das Pionierteam aus Lausanne sowie das Deutsche Krebsforschungszentrum."

Diagnose und Therapie

ARES in Hamburg kann diese Arbeiten ergänzen: Zwar sind seine Teilchenbündel nicht so stark wie bei PITZ, sie enthalten schlicht weniger Elektronen. Dafür bringt sie der Beschleuniger auf deutlich höhere Energien. „Dadurch könnten die Elektronen tiefer ins Gewebe eindringen", erklärt Florian Burkart. „Das würde dann nicht nur die Behandlung von oberflächennahen Geschwüren ermöglichen, sondern auch von Tumoren, die tiefer im Körper liegen." ARES kann bereits erste Ergebnisse dieser Very High Energy Electron-Methode präsentieren. Unter anderem arbeitet das Team dabei mit dem Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE) zusammen – auch um den Flash-Effekt besser zu verstehen. Die UKE-Fachleute hoffen, mit der neuen Methode langfristig einen seltenen Hirntumor bei Kindern behandeln zu können.

Bei PITZ wie auch bei ARES hegt man sogar schon weitergehende Pläne: Im Prinzip nämlich sollten die Elektronenbeschleuniger auch zu Diagnosezwecken taugen. Die Vision: Zunächst feuern die Anlagen schwache Elektronenpulse ab, sie machen den Tumor sichtbar und ermitteln dadurch seine präzise Position. Kurz darauf soll dann ein ungleich stärkerer Elektronenpuls folgen, der dem Geschwür gezielt den Garaus bereitet – so die Idee. Und auch für einen klinikgeeigneten Beschleuniger laufen bei DESY bereits Vorarbeiten: Das Zentrum entwickelt Anlagen, bei der intensive Laserblitze die Elektronen auf Trab bringen. Diese könnten deutlich kompakter gebaut werden als ARES mit seinen 45 Metern – und dadurch locker in einem Krankenhauskeller Platz finden.

Bilder: Frank Mayet; Frank Grotelüschen

Die Reise der **Immunzellen**

Eine neuartige Röntgenmethode entwickelt das Team um den Physiker Florian Grüner von der Universität Hamburg: Die Röntgenfluoreszenz-Bildgebung (XFI) macht es möglich, die Bewegung von Zellen oder Wirkstoffen in einem Organismus zu verfolgen. Das verspricht neue Erkenntnisse für die Medizin: Bei der Erforschung bestimmter Krankheiten ließe sich beobachten, wie sich Immunzellen auf den Weg zu Entzündungsorten machen. Und bei der Suche nach Krebsmedikamenten könnte man zuschauen, ob ein Wirkstoff wie erhofft in den Tumor eindringt oder nicht.

Das Prinzip: Zunächst müssen die Gebilde, die im Körper nachverfolgt werden sollen, markiert, also mit einem Label versehen werden. „Bei einem Wirkstoff, etwa einem Enzym, können es einzelne Atome sein, zum Beispiel Jod“, erläutert Grüner. „Größere Gebilde wie Immunzellen labeln wir mit Nanopartikeln oder molekularen Kontrastmitteln.“ Die markierten Zellen oder Wirkstoffe werden in den Organismus injiziert, dann folgt die Röntgenaufnahme. Trifft ein gebündelter Röntgenstrahl auf die Markierungen, antworten sie mit charakteristischen „Röntgenechos“. Diese Fluoreszenzsignale kann ein Detektor registrieren. Seine Bilder zeigen, wie sich die Markierungen nach der Injektion im Körper verteilen – und damit auch die Zellen oder Wirkstoffe, an denen die Markierungen haften.

„Bei DESY konnten wir Immunzellen sichtbar machen und beobachten, wie sie sich im Körper verteilen“

Florian Grüner, Universität Hamburg

Die Markierungen entwickelt Grüners Gruppe gemeinsam mit dem Fraunhofer-Zentrum für Angewandte Nanotechnologie (CAN) sowie dem Center for Hybrid Nanostructures (CHyN) auf dem Campus Hamburg-Bahrenfeld. Gemeinsam mit dem Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE) gelang unlängst eine aufsehenerregende Pilotstudie. „An DESYs Röntgenquelle PETRA III konnten wir Immunzellen, die vorher am UKE in lebende Mäuse injiziert wurden, sichtbar machen und beobachten, wie sie sich im Körper verteilen“, berichtet Grüner. „Das hat vor uns noch keiner mit XFI geschafft.“

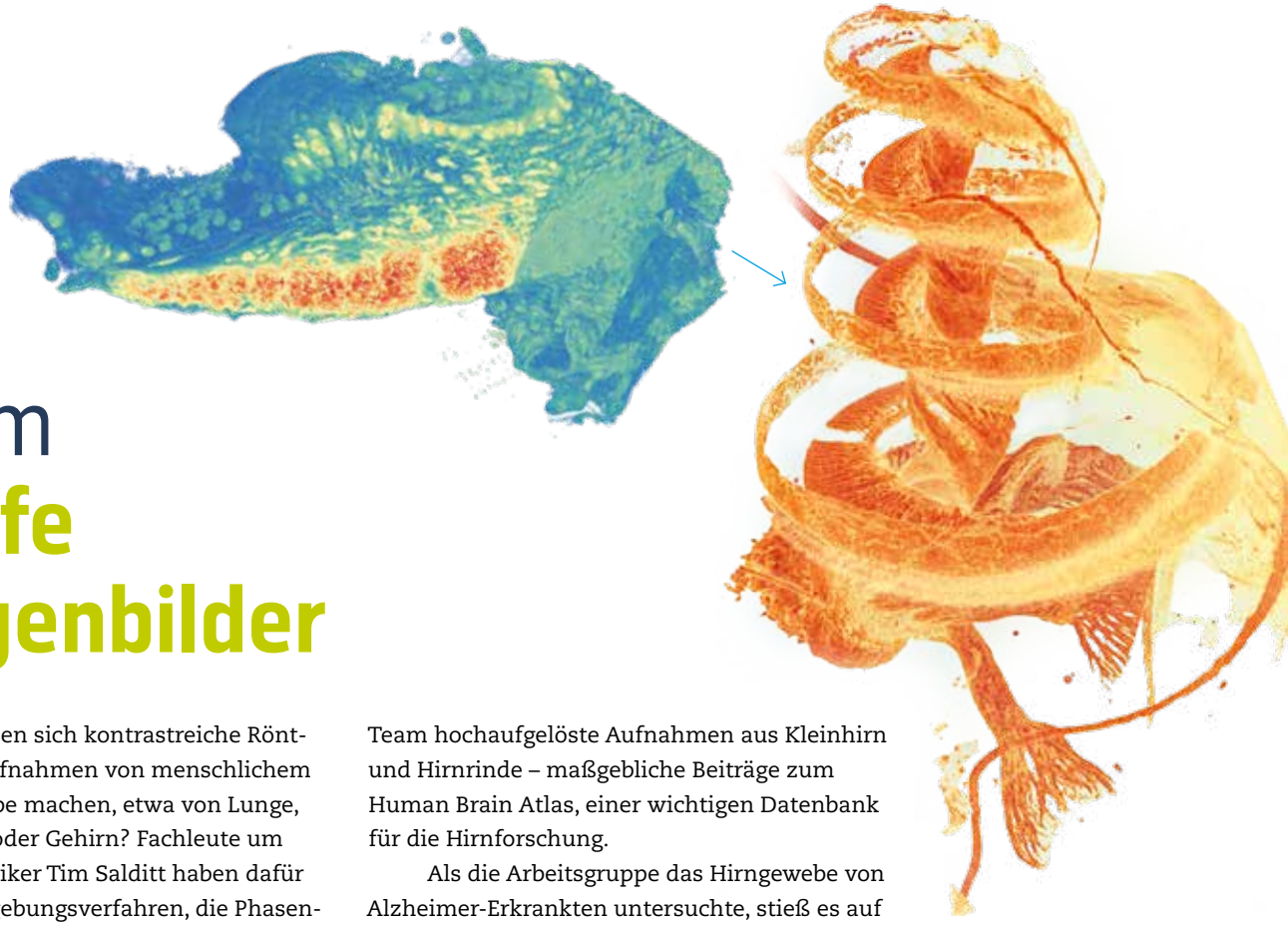
Lymphozyten sind eine Untergruppe der weißen Blutkörperchen. Sie haben eine zentrale Aufgabe in der Immunabwehr, indem sie gezielt Krankheitserreger erkennen und beseitigen.

Überraschend schnell

Bereits dieses Pilotexperiment förderte Erstaunliches zutage: Sechs Stunden nach der Injektion hatten die Immunzellen bereits zwei Drittel des Tierkörpers bevölkert – überraschend viel und unerwartet schnell. Nun wollen die Fachleute die Methode nutzen, um die Ursachen von Morbus Crohn besser zu verstehen, einer immunvermittelten Krankheit des Darms.

Eine weitere Anwendung: die Suche nach besseren Krebsmedikamenten. Denn nicht jede Chemotherapie verläuft so wirksam wie erhofft, da der verabreichte Wirkstoff nicht tief genug in das Geschwür eindringt. „Eine Art innerer Druck im Tumor verhindert, dass selbst winzigste Wirkstoffmoleküle hineinkommen“, erläutert Grüner. „Mit unserer Bildgebung wollen wir das genau untersuchen und herausfinden, wie sich diese Barriere überwinden lässt.“ Entsprechende Machbarkeitsstudien sind bereits in Planung. Gemeinsam mit seinen Kooperationspartnern will Grüners Team drei Wirkstoffe markieren, um ihren Weg zum Tumor mit Hilfe der XFI-Methode präzise zu verfolgen.

Bilder: Science Photo Library, Steve Gschmeissner; DESY, Marta Mayer



Extrem scharfe Röntgenbilder

Wie lassen sich kontrastreiche Röntgenaufnahmen von menschlichem Gewebe machen, etwa von Lunge, Herz oder Gehirn? Fachleute um den Göttinger Physiker Tim Salditt haben dafür ein spezielles Bildgebungsverfahren, die Phasenkontrast-Tomographie, so weiterentwickelt, dass ungefärbtes Gewebe dreidimensional und hochaufgelöst dargestellt werden kann. Dazu braucht es intensives Röntgenlicht, wie es PETRA III liefert. Das Prinzip: Der Strahl durchdringt eine Probe, etwa ein Scheibchen Lungengewebe. Dabei verändert das Gewebe die Phase der Röntgenstrahlung und erzeugt winzige Laufzeitunterschiede.

„Das ist ein bisschen so, als wenn Sie in die glatte Strömung eines Bachs ein paar Steine legen – die Steine stören die Strömung und erzeugen kleine Verwirbelungen“, erläutert Salditt. „Bei der Gewebeprobe sind es die Atome der Probe, die den glatten Röntgenfluss stören.“ Dann wird die Probe im Röntgenstrahl gedreht, so dass sich Aufnahmen aus verschiedenen Richtungen machen lassen. Am Ende kann ein ausgefeilter Algorithmus aus den kleinen Phasenstörungen in den Messdaten hochaufgelöste 3D-Bilder zaubern.

Nervenzellen im Ruhestand

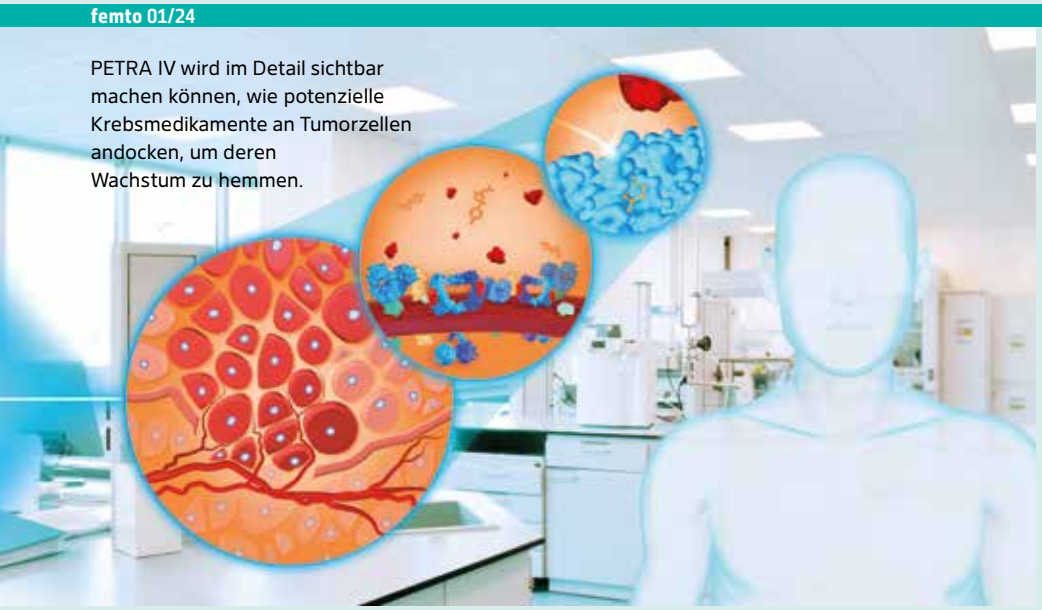
Damit das Verfahren funktioniert, müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein: „Wir benötigen einen möglichst parallelen Röntgenstrahl wie bei PETRA III und mussten eigene Röntgenoptiken konstruieren“, erklärt Salditt. Außerdem braucht es hochentwickelte Algorithmen und eine enorme Computerpower, um aussagekräftige Bilder aus den kleinen Phasenstörungen in den Messdaten zu berechnen. Damit gelangen dem Team hochaufgelöste Aufnahmen aus Kleinhirn und Hirnrinde – maßgebliche Beiträge zum Human Brain Atlas, einer wichtigen Datenbank für die Hirnforschung.

Als die Arbeitsgruppe das Hirngewebe von Alzheimer-Erkrankten untersuchte, stieß es auf eine unerwartete Auffälligkeit: „In einer Region des Hippocampus, wo so etwas wie eine Erinnerungsverwaltung stattfindet, haben wir Hinweise gefunden, dass viele Nervenzellen in eine Art Vorruhestand gehen“, berichtet Salditt. Ergebnisse wie diese unterstützen das Verständnis der Krankheit und können als Anstoß für künftige Therapieansätze dienen. Auch bei der Erforschung von COVID-19 lieferte die Methode wichtige Impulse: Die Fachleute konnten die Vermutung bestätigen, dass das Virus unter bestimmten Bedingungen neue Blutgefäße in der Lunge bildet, wodurch die Infektion schwerer verlaufen kann. „Das war wichtig für die Behandlung der Erkrankten und hat dazu beigetragen, dass wir gegen Ende der Pandemie wenige Tote zu beklagen hatte als zu Beginn“, betont Salditt.

Damit aber ist das Potenzial der Phasenkontrast-Tomographie noch nicht ausgereizt. Neue Perspektiven könnte vor allem PETRA IV bieten, der geplante Nachfolger der heutigen Röntgenquelle. Mit dem extrem feinen Röntgenstrahl ließen sich in gleicher Zeit viel mehr Proben untersuchen als bisher. „Außerdem könnten wir die Bildauflösung um das Zehnfache steigern, bis auf zehn Nanometer“, schwärmt Salditt. „Damit ließe sich zum Beispiel erkennen, wie Nervenzellen miteinander verbunden sind“ – was dann für die Suche nach neuen Medikamenten, etwa gegen Alzheimer oder Parkinson, hilfreich wäre.

Phasenkontrast-Aufnahme vom Nervengewebe des Innenohrs. Zoomt man in die Hörschnecke (orange) hinein, sind winzige Haarzellen zu erkennen. Diese wandeln den Schall in elektrische Reize um, die letztendlich zum Hirn geleitet werden. Dort findet die eigentliche Hörwahrnehmung statt.

Bild: @Iannis: Graphiken unter Drittmittelprojekte / MBExC



PETRA IV wird im Detail sichtbar machen können, wie potenzielle Krebsmedikamente an Tumorzellen andocken, um deren Wachstum zu hemmen.

„DIE WELTWEIT **LEISTUNGSSTÄRKSTE RÖNTGENLICHTQUELLE** IHRER ART"

PETRA IV wird der biomedizinischen Forschung ganz neue Möglichkeiten erschließen

In Hamburg laufen einige der besten Röntgenquellen der Welt: Mit der hochintensiven Strahlung von DESYs Speicherring PETRA III lassen sich unterschiedlichste Materialien analysieren und Proteine atomgenau durchleuchten. Und auch am Röntgenlaser European XFEL ist DESY maßgeblich beteiligt. Doch selbst im Bereich der Hochleistungs-Röntgenlichtquellen macht der technische Fortschritt nicht Halt: Um Forschungsteams weltweit weiterhin die besten Bedingungen bieten zu können, soll PETRA III grundlegend umgerüstet werden, um einen Röntgenstrahl zu erzeugen, wie es ihn bisher nicht gibt. Er wird ungleich stärker und gebündelter sein als bislang. PETRA IV wird damit auch der biomedizinischen Forschung neue Impulse verleihen – etwa bei der Suche nach neuen Medikamenten oder der hochdetaillierten Abbildung von Organgewebe.

„PETRA IV wird bis zu tausendmal leistungsfähiger sein als die derzeitige Maschine, es wird die weltweit leistungsstärkste Röntgenlichtquelle ihrer Art", schwärmt

„PETRA IV wird bis zu tausendmal leistungsfähiger sein als die derzeitige Maschine"

Harald Reichert, DESY

DESY-Gesamtprojektleiter Harald Reichert. „Die Röntgenstrahlen, die diese Anlage liefern wird, sind deutlich feiner und gebündelter – und Laserlicht deutlich ähnlicher." Für biomedizinische Studien verspricht das gleich mehrere Vorteile: Zum einen lässt sich die Struktur von Proteinen mit Hilfe der Kristallographie deutlich schneller bestimmen. Und: „Bei den heutigen Versuchen sehen Sie im Wesentlichen ein statisches Bild eines Proteins", erläutert Reichert. „Mit PETRA IV werden zunehmend auch zeitaufgelöste Messungen möglich. Man wird regelrecht zusehen können, wie ein Eiweißmolekül seine Arbeit verrichtet, und zwar auf einer Zeitskala von Mikrosekunden."

Unschlagbare Bildauflösung

Ein weiteres wichtiges Plus: PETRA IV wird sehr viel bessere Röntgenbilder von Gewebeproben erlauben – mit einer unschlagbaren Bildauflösung, mit der sich sogar verschiedene Zelltypen voneinander unterscheiden lassen. So sollen sich feinste Veränderungen erkennen lassen, die von neurodegenerativen Erkrankungen wie Parkinson verursacht werden. Und: „Man wird genauer als bislang beobachten können, wo sich in einem Organ ein Medikament ansammelt", erklärt Reichert. „Wandert es tatsächlich zu seinem Zielort, oder landet es womöglich woanders?"

Kombiniert wird die Umrüstung zu PETRA IV mit einem neuen Betriebskonzept. „Zukünftig werden wir Forschungsteams aus der Biomedizin einen besseren Service anbieten", kündigt Reichert an. „Dadurch werden wir uns diesem Fachgebiet sehr viel mehr öffnen." Die Idee: DESY übernimmt einen Großteil der komplexen Verarbeitung der Rohdaten, die bei den Röntgenexperimenten anfallen. Mit Hilfe neuer Software-Tools soll diese Datenverarbeitung dann weitgehend automatisch erfolgen.

Dadurch werden sich die Fachleute künftig auf ihre eigentliche Kernkompetenz konzentrieren können – die biomedizinische Interpretation der Messdaten. „Das dürfte die Einstiegsschwelle nicht nur für akademische Teams herabsetzen", glaubt Harald Reichert. „Auch für Firmen, die im Gesundheitsbereich unterwegs sind, wird DESY damit deutlich attraktiver."

Bilder: stock.adobe.com; DESY, Marta Mayer

Verschwindende Knochenschrauben

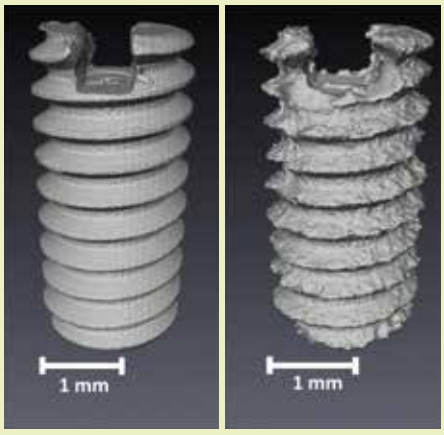
Ist ein Knochen gebrochen, muss er manchmal mit Metallimplantaten fixiert werden. Nach der Heilung ist oft eine Folgeoperation nötig, bei der das Implantat wieder entfernt werden muss. Um solche patientenbelastenden Eingriffe künftig zu vermeiden, arbeitet das Helmholtz-Zentrum Hereon an einer innovativen Methode: Es entwickelt Implantate aus Magnesiumlegierungen, die sich mit der Zeit von selbst im Körper auflösen. Auch Stents – gitterartige Stützen für verschlossene oder verengte Herzgefäße – könnten künftig auf Magnesium basieren und sich im Körper auflösen, nachdem sich das Gewebe von selber stabilisiert hat.

„Damit lässt sich genauer erkennen, wie das umliegende Gewebe auf ein Implantat reagiert“

Felix Beckmann, Helmholtz-Zentrum Hereon

Top-Legierung gesucht

Eine der Herausforderungen stellt die Suche nach geeigneten Magnesiumlegierungen dar. Würden sich die Materialien allzu rasch zersetzen, könnten sie den Knochen nicht lange genug stabilisieren. Verschwinden sie zu langsam, muss womöglich doch wieder operiert werden. Deshalb erproben die Fachleute verschiedene Legierungen in Langzeitversuchsreihen auf ihre Tauglichkeit. Ein wichtiges Verfahren zur Überwachung des Zersetzungsprozesses ist die Mikrotomographie. Sie ähnelt in ihrer Funktionsweise einem CT-Scanner im Krankenhaus, der 3D-Röntgenbilder aus dem Körperinneren liefert. Im Unterschied zum CT werden die Proben allerdings mit dem intensiven Röntgenstrahl von PETRA III beleuchtet. Kombiniert mit weiteren Röntgenmethoden lässt sich detailliert analysieren, wie sich die Implantate nach und nach zersetzen und wie der Knochen darauf reagiert – ob er zum Beispiel durch das Implantat zum Wachstum angeregt wird.



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.

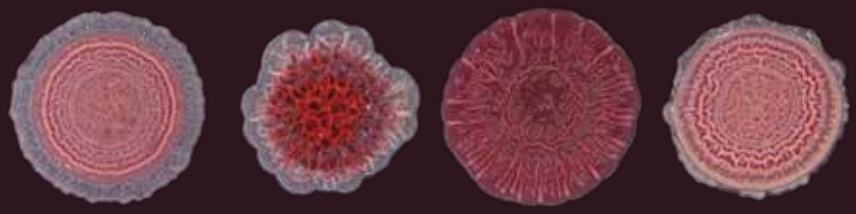
Seit einiger Zeit nutzen die Fachleute auch das sogenannte Phasenkontrast-Verfahren. „Damit lässt sich weiches Gewebe, das in gewöhnlichen Aufnahmen nur recht unscharf zu erkennen ist, wesentlich detaillierter darstellen“, erläutert Felix Beckmann, Forscher am Helmholtz-Zentrum Hereon, das bei DESY eine Außenstelle unterhält. „Damit lässt sich dann genauer erkennen, wie das umliegende Gewebe auf ein Implantat reagiert, etwa was die Knorpelbildung anbelangt.“

Röntgenlupe zeigt Knochenaufbau

Hierbei könnte PETRA IV große Fortschritte bringen, der geplante Nachfolger der jetzigen Röntgenquelle PETRA III. „Durch den sehr stark gebündelten Röntgenstrahl ließe sich zum Beispiel die Knorpelbildung viel genauer analysieren als bisher“, sagt Beckmanns Kollegin Berit Zeller-Plumhoff. „Sie geht dem Knochenaufbau voraus und markiert ein wichtiges Stadium beim Heilungsprozess.“ Auch die Erforschung von selbstauflösenden Stents würde profitieren. Bislang sind die Gefäße, in die ein Stent eingesetzt ist, auf den Röntgenbildern nur recht ungenau zu erkennen. Dagegen könnte die intensive Strahlung von PETRA IV die detaillierte Gefäßgestalt sichtbar machen – und damit die Reaktion des Gefäßes auf das Implantat.

Bilder: Hereon, Krüger et al., JMA, CC BYNCND 4.0; DESY, Lars Berg

Bakterielle Schleimfilme



Biofilmkolonien des Bakteriums *Pseudomonas aeruginosa*, entstanden unter verschiedenen Bedingungen

Im Vergleich zu höheren Lebensformen sind Bakterien einfältige Organismen, die irgendwo herumschwimmen. Als Holger Sondermann in den 1990er Jahren Biologie studierte, galt das als Lehrbuchwissen. Heute ist die Fachwelt schlauer: „Mittlerweile wissen wir, dass Bakterien viel komplexer sind und Verbünde eingehen – sie schließen sich zu Biofilmen zusammen“, sagt der Wissenschaftler, er leitet bei DESY die Arbeitsgruppe „Strukturelle Mikrobiologie“ am CSSB. Oft ergeht es den Mikroben in Gemeinschaft besser denn als Einzelkämpfer: So können sie harschen Umweltbedingungen trotzen und sich wirkungsvoller gegen Antibiotika wappnen.

In der Natur finden sich Biofilme an vielen Stellen, etwa als Schutzmantel für Pflanzenwurzeln. Doch sie können auch krank machen: „Eine Großzahl an chronischen Infektionserkrankungen ist auf sie zurückzuführen“, erklärt Sondermann. „In einem Biofilm sind die Bakterien besser vor unserem Immunsystem und vor Antibiotika geschützt. Außerdem erleichtert das Leben im Biofilm den Austausch von Genen zwischen den Mikroben, wodurch Antibiotikaresistenzen entstehen können.“

Vor diesem Hintergrund versucht Sondermanns Team grundlegende Fragen zu beantworten: Wie finden die Bakterien überhaupt zu einem Biofilm zusammen? Wie kommunizieren die Mikroben miteinander, und könnte sich die Bildung eines Biofilms verhindern lassen?

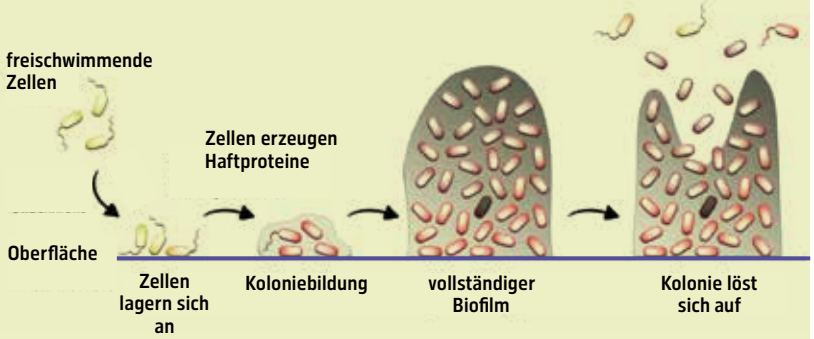
Klebrige Proteine

Klar ist: Diese Ketten sind komplex. „Mikroorganismen wie der Cholera-Erreger besitzen dutzende Proteine für Prozesse, die es den Bakterien ermöglichen, ihre Umgebung wahrzunehmen und darauf zu reagieren“, erläutert Sondermann. Als Anstoß, sich zu einem Film zusammentun, können Nährstoffmoleküle dienen, aber auch Lichtreize. Rezeptoren an der Oberfläche der Einzeller schnappen diese Reize auf und leiten sie mittels Membranproteinen ins Zellinnere, was dort eine komplexe Kaskade an Reaktionen auslöst. Als Folge werden haftgebende Proteine generiert und eine Matrix ausgeschieden, durch die Bakterien Verbünde eingehen und Oberflächen kolonisieren können – der Biofilm entsteht. Um das Geschehen zu analysieren, setzt Sondermanns Team verschiedenste Methoden ein: Mit DESYs Röntgenquelle PETRA III und den Kryo-Elektronenmikroskopen am CSSB enträtseln die Fachleute die Gestalt der beteiligten Enzyme – was ihnen Rückschlüsse auf deren Funktion erlaubt. Und KI-Algorithmen wie AlphaFold können aus der Sequenz eines Proteins dessen Gestalt verblüffend genau berechnen – eine wertvolle Ergänzung zu den Experimenten.

> *„Eine Großzahl an chronischen Infektionserkrankungen ist auf Biofilme zurückzuführen“*
>
> ***Holger Sondermann, DESY und Universität Kiel***

Damit konnte das Team die Rolle bestimmter Rezeptormoleküle in der Signalkette entschlüsseln, die den Einzellern signalisieren, einen Biofilm zu bilden. „Könnten wir gezielt eingreifen, etwa mit passenden Wirkstoffen, ließe sich vielleicht die Bildung eines Biofilms verhindern“, so Sondermann. „So könnte die Stabilität von Biofilmen geschwächt oder den Organismen vermittelt werden, gar nicht erst in einen Biofilm einzutreten.“ Würde diese Täuschstrategie den Biofilm verhindern, könnten traditionelle Antibiotika effizienter gegen die Keime wirken – eine vielversprechende Strategie gegen Antibiotikaresistenzen.

Wie sich ein Biofilm bildet: Bestimmte Faktoren, zum Beispiel Lichtreize, können freischwimmende Bakterien dazu veranlassen, sich auf einer Oberfläche niederzulassen und eine Kolonie zu gründen. Bei Änderung der Umweltbedingungen wird die Kolonie wieder aufgelöst.



Grafiken: DESY-FS-CSSB, H. Sondermann

DIE PROTEINFASER-DETEKTIVIN

Meytal Landau enträtselt Amyloide – und nutzt dazu verschiedenste Methoden

Ihr Büro ist noch nicht ganz eingerichtet, nach wie vor lehnen unausgepackte Möbelkartons an der Wand. Erst kürzlich hat Meytal Landau ihre Räume am CSSB bezogen, dem Zentrum für strukturelle Systembiologie auf dem DESY-Campus in Hamburg. Zuvor hatte die Biochemikerin am Technion geforscht, dem Israel Institute of Technology in Haifa. Doch auch wenn in Hamburg noch nicht alle Möbel stehen – innerlich scheint sie bereits angekommen. „Ich sehe hier in Hamburg für mich und meine Kinder viele Möglichkeiten für eine wissenschaftliche und persönliche Weiterentwicklung", erklärt Landau. 2020, also mitten in der Coronazeit, war sie schon einmal zu einem einjährigen Forschungsaufenthalt in Hamburg zu Gast – und hat sich in die Stadt verliebt. Als sich dann die Möglichkeit eröffnete, dauerhaft als leitende Wissenschaftlerin bei DESY anzuheuern, verbunden mit einer Professur am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, musste Landau nicht lange überlegen.

Denn auf dem DESY-Campus findet die 47-Jährige beste Bedingungen für ihre Arbeit: die Erforschung der Amyloide. So heißen Strukturen, bei denen Proteine zu überaus stabilen Fasern verkleben – zum Teil ähnlich fest wie Spinnenseide. Diese Amyloid-Fasern stabilisieren unter anderem Bakterienkulturen, die sich zu Biofilmen zusammengefunden haben. Bedeutsam sind sie auch bei Krankheiten wie Alzheimer und Parkinson. Dort bilden Amyloide sogenannte Plaques, die sich in den Hirnzellen von Erkrankten finden. „Die Fachwelt geht davon aus, dass diese Proteine an der Entstehung der Krankheit beteiligt sind", erläutert Landau. „Aber man weiß nicht genau wie, es gibt offenbar keinen Zusammenhang zwischen der Menge dieser Proteinablagerungen und den Symptomen, die jemand zeigt."

Hochleistungsmikroskope gegen Amyloide

Solchen Zusammenhängen möchte die Wissenschaftlerin künftig bei DESY auf die Spur kommen. „Die Voraussetzungen hier auf dem Campus sind deutschlandweit einzigartig", betont sie. „Gut ausgestattete Labore, mehrere Hochleistungsmikroskope und mit PETRA III eine Röntgenquelle, mit der sich präzise enträtseln lässt, welche Gestalt die Amyloide besitzen." Fasziniert zeigt sich Landau unter anderem von Proteinfasern, die von Bakterien gebildet werden. Zwar basieren sie auf völlig anderen Gensequenzen als beim Menschen, dennoch sind die resultierenden Strukturen verblüffend ähnlich, wie die Forscherin bei früheren Experimenten feststellte. Ein bemerkenswertes Ergebnis – es darf als Indiz dafür gelten, dass Amyloide in der Evolution eine wichtige Rolle spielten. Manche mutmaßen gar, dass sie vor Jahrmilliarden bei der Entstehung des Lebens mitgemischt hatten, gemeinsam mit RNA-Schnipseln und sogenannten Lipiden, zu denen unter anderem Fettmoleküle zählen.

> *„Amyloide machen Bakterien aggressiver"*
> ***Meytal Landau, DESY***

„Amyloide machen Bakterien aggressiver", erläutert Meytal Landau. „Wenn Sie mit einer Mikrobe infiziert sind, die Amyloid produziert, kann die Infektion viel schwerer verlaufen." Denn die Bakterien setzen Proteinfasern frei, die weiße Blutkörperchen angreifen und dadurch das Immunsystem schwächen. Ließe sich ein Wirkstoff entwickeln, der die Amyloid-Bildung verhindert, wäre die Mikrobe um eine ihrer Waffen ärmer – der Körper könnte sich besser gegen die Infektion wehren. Landau und ihre Arbeitsgruppe tüfteln an den Grundlagen, die derartige Medikamente eines Tages möglich machen könnten. Gegen solche Wirkstoffe sollten die Bakterien dann keine Resistenzen entwickeln – ein Vorteil gegenüber konventionellen Antibiotika.

Millionenschwere Forschungsförderung

Da die mikrobiellen Amyloide eine ähnliche Struktur wie die Alzheimer-Plaque besitzen, könnten Wirkstoffe aus der Alzheimer-Forschung womöglich auch gegen amyloidbildende Keime helfen. Und tatsächlich: Bei zwei dieser Wirkstoffe konnte Landau bereits beobachten, dass sie es Salmonellen erschwert haben, einen Biofilm aus Amyloiden zu bilden. „Künftig wollen wir weitere Wirkstoffe testen", sagt Landau. „Allerdings erfordern solche Studien beträchtliche Ressourcen." Hilfreich ist hierbei eine millionenschwere Forschungsförderung des Europäischen Forschungsrats (ERC), den die Wissenschaftlerin unlängst einheimsen konnte.

Damit kann sie in Zukunft auch weiteren Fragen nachgehen. So gibt es die Vermutung, dass den Amyloiden im Grunde eine wichtige Funktion zukommt: Sie können Mensch und ››

Bild: Helge Mundt

Tier bei der Bekämpfung von Mikroben helfen. In der Vergangenheit konnte Landaus Team Dutzende von amyloidbildenden Molekülen mit antimikrobieller Wirkung aufspüren, etwa bei Fröschen und Fischen. „Hier stehen wir noch ganz am Anfang", betont die Forscherin. „Nun wollen wir herausfinden, wie die Struktur dieser Moleküle im Detail aussieht, um dadurch Näheres über ihre Wirkungsweise zu erfahren." Womöglich lassen sich die Erkenntnisse eines Tages in die Praxis überführen, etwa für antimikrobielle Beschichtungen von medizinischem Gerät oder Hüftimplantaten. Die vielfältigen Forschungswerkzeuge in Hamburg jedenfalls sollten es möglich machen, das Basiswissen über Amyloide deutlich zu erweitern.

Von Haifa nach Hamburg

„Ich habe das Gefühl, dass es der richtige Schritt war, von Haifa nach Hamburg zu wechseln", sagt Meytal Landau – auch wenn dieser Schritt für sie als Israelin, deren Großvater in Auschwitz seine damalige Frau und zwei Kinder verloren hatte, ein spezieller war. „Als ich das erste Mal nach Deutschland reiste, stieß ich in einer Bar auf angetrunkene Leute mit kahl geschorenen Köpfen", erinnert sie sich. „Das fühlte sich nicht gerade gut an." Und in der Hamburger S-Bahn mussten sie und ihre Tochter die antisemitischen Ergüsse eines Betrunken erdulden – und niemand im Wagon schritt ein.

„Doch es gab auch andere Erlebnisse", erzählt Landau. Etwa als eine 90-jährige Nachbarin ihrem Sohn nach einigem Zögern von ihrer Zeit in der Hitlerjugend berichtete. Oder als auf einer Neujahrsparty eine Frau erfuhr, dass Landau aus Israel kommt und daraufhin in Tränen ausbrach – einige Zeit zuvor hatte sie erfahren, dass ihr Großvater ein überzeugter Nazi war. „Sie wollte nicht die Enkelin eines Nazis sein", sagt Meytal Landau. „Da wurde mir klar, dass auch manche Deutsche ein Trauma mit sich herumschleppen – für mich eine veränderte Perspektive."

KI goes Bio

Warum lernfähige Algorithmen für die Medizinforschung immer wichtiger werden

Immer bedeutsamer für die biomedizinische Forschung wird die Informatik: So können KI-Algorithmen wie AlphaFold für zahlreiche Proteine verblüffend genau errechnen, wie deren räumliche Gestalt aussieht – die Grundlage, um die Funktion eines Eiweißes zu enträtseln. Ausgangspunkt für die Berechnungen ist die Gensequenz eines Proteins. Trainiert werden die Algorithmen mit experimentellen Datensätzen, gewonnen zum Beispiel mit Hilfe der Proteinkristallographie an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III.

Darüber hinaus kann maschinelles Lernen auch bei anderen Fragen wertvolle Dienste leisten. Manches findet sich bereits in der Praxis, etwa bei Brustkrebstherapie: „Hier ist die Frage, ob der Krebs nach einem Eingriff wiederkommt", erläutert Jan Baumbach, Bioinformatiker an der Universität Hamburg. „Weil sich das nicht gut vorhersagen lässt, erhalten die Patientinnen oft eine relativ aggressive Chemotherapie." Mittlerweile können KI-Algorithmen spezifische Muster in den genetischen Informationen des Tumorgewebes

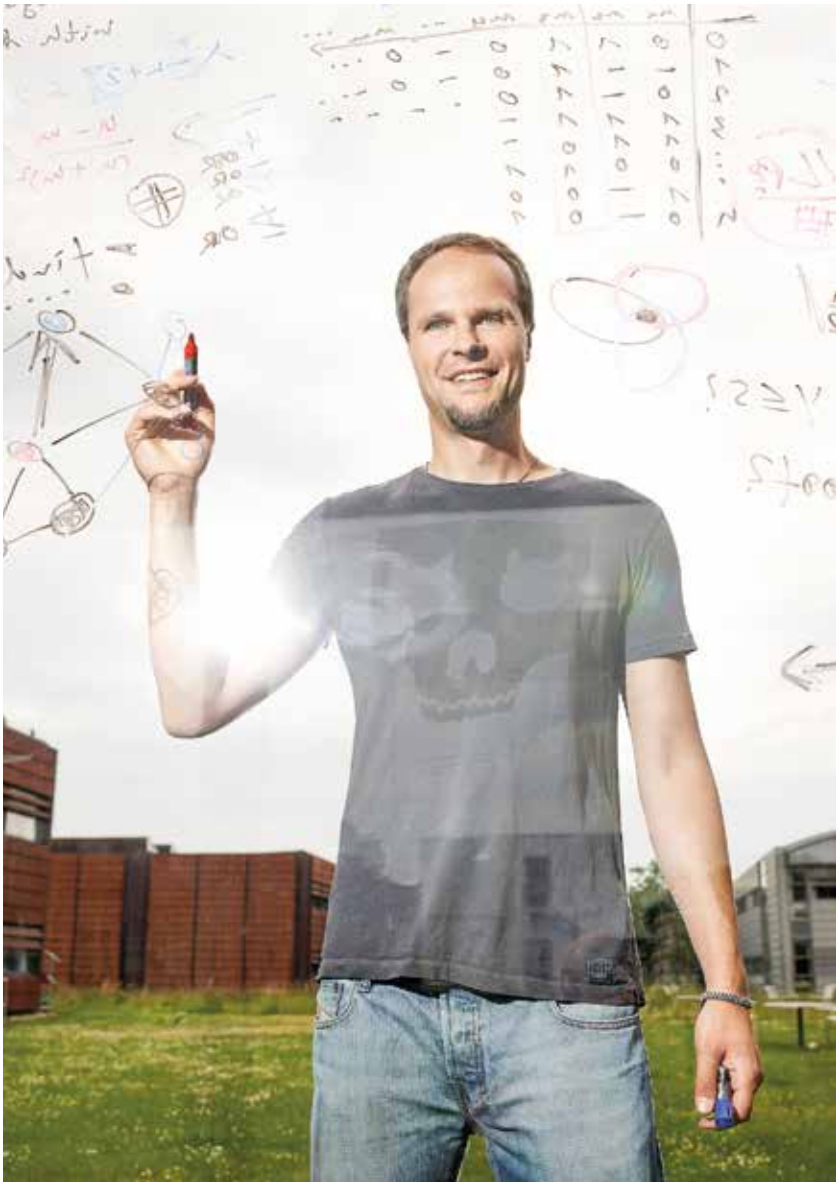


Bild: Ricky John Molloy

erkennen, die über den Brustkrebs-Subtyp Auskunft geben – mit dem Ergebnis, dass in bestimmten Fällen eine Chemotherapie vielleicht gar nicht sein muss.

Altbekannte Wirkstoffe – neu eingesetzt

Baumbach und sein Team forschen an neuen Informatikverfahren, etwa für die Medikamentensuche. So ist es möglich, dass ein altbekannter Wirkstoff auch gegen eine Krankheit hilft, für die er ursprünglich gar nicht entwickelt wurde. Gerade bei neu auftretenden Infektionserkrankungen könnte eine solche „Zweitverwertung" eine relativ rasch verfügbare Waffe gegen den Erreger bilden – schließlich ist das Medikament bereits zugelassen. Nur: Die Anzahl der Proteine, die als Angriffspunkt in Frage kommen, ist immens. „Um mögliche Kandidaten aus diesem Datenwust herauszufischen, nutzen wir Programme, die von der Natur inspiriert sind, sogenannte Ameisenalgorithmen", erläutert Baumbach. „Sie simulieren Ameisen, die das Problem als Schwarm lösen."

Gegen Infekte richtet sich auch eine andere Strategie, die Baumbachs Team verfolgt – in Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen auf dem DESY-Campus, etwa EMBL und CSSB. „Dabei versucht man, sogenannte defekte Viren herzustellen", erklärt der Bioinformatiker. „Die sind zwar lebensfähig, können sich aber nicht so gut fortpflanzen und sind deshalb weniger gefährlich." Die Vision: Injiziert in den menschlichen Körper würden diese Defektviren mit den echten Viren konkurrieren – und sie dadurch im Idealfall an der Fortpflanzung hindern, etwa bei Influenza. Mit KI-Software versuchen die Fachleute herauszufinden, wie das Genom eines probaten Defektvirus idealerweise aussehen müsste – eine Forschung, die noch in den Grundlagen steckt.

Ein Problem dabei: Um vernünftig zu funktionieren, müssen

DESY Zeuthen hat Zugriff auf die Quantencomputer von IBM – und kann dadurch künftige Algorithmen entwickeln und testen.

KI-Algorithmen mit möglichst vielen Daten trainiert werden, oft mit genetischen Daten. Die aber sind in der Regel personenbezogen – im Prinzip ließen sich per genetischem Fingerabdruck Menschen identifizieren. Deshalb braucht es strenge Datenschutzregeln, die beim KI-Training eingehalten werden müssen. Baumbachs Team entwickelt Programme, die mit dem Datenschutz konform gehen: Statt sensible Gendaten auf einer zentralen Cloud zu sammeln, reist die Software von Krankenhaus zu Krankenhaus – wobei sie bei jedem „Besuch" schlauer wird. Die Daten selber verlassen die Klinik nicht, der Datenschutz bleibt gewährt.

Quantenalgorithmen für die Medizinforschung

Klar ist: KI hat das Feld der Biomedizin umgewälzt – und so dürfte es auch weitergehen. Baumbach setzt dabei auf einen neuen Rechnertyp, den Quantencomputer. Statt mit Bits rechnet er mit sogenannten Qubits. Die können unzählige Berechnungen gleichzeitig bewältigen und dadurch die Maschine ungleich schneller machen als heutige Supercomputer. Zwar ist die Technik noch nicht soweit, auf großen realweltlichen Problemen Anwendung zu finden – derzeitige Prototypen sind konventionellen Rechnern nur ansatzweise überlegen. „Ich gehe aber davon aus, dass Quantencomputer in einigen Jahren manche KI-Anwendungen schneller ausführen können", schätzt Baumbach. „Deshalb entwickeln wir unsere Algorithmen schon heute so, dass sie später auch auf einem Quantencomputer laufen können."

Mit Quantenalgorithmen befasst sich auch der DESY-Standort Zeuthen: Dort hat das Zentrum für Quantentechnologie-Anwendungen (CQTA) per Cloud einen Zugang zu den Quantencomputern von IBM. „Wir beteiligen uns an einer von IBM initiierten Arbeitsgruppe zum Thema Medizinforschung", sagt CQTA-Leiter Karl Jansen. „Dabei entwickeln wir zum Beispiel Quantenalgorithmen, die aus der Art und Weise, wie sich Zellen zusammenfinden, ausrechnen können, was diese Zellen machen." Dahinter stecken raffinierte Verfahren zur Mustererkennung, wie sie etwa auch in der Teilchenphysik Verwendung finden.

> *„Die Algorithmen simulieren Ameisen, die das Problem als Schwarm lösen"*
>
> ***Jan Baumbach, Universität Hamburg***

Eines der CQTA-Projekte befasst sich mit der Früherkennung von Krebs. Das Prinzip: Algorithmen klassifizieren jene Bereiche auf einem Gen, die wirklich aktiv sind, die zum Beispiel bewirken, dass ein bestimmtes Enzym produziert wird. Lassen sich solche Bereiche – Exonen genannt – zuverlässig klassifizieren, kann man ihre Verteilung mit der auf einem gesunden Gen vergleichen. Kommt es dabei zu Abweichungen, deutet das auf ein erhöhtes Krebsrisiko hin. „Konventionelle Programme schaffen bislang eine Trefferquote von etwa 80 Prozent", so Jansen. „Selbstlernende Quantenalgorithmen dürften das künftig deutlich verbessern können, zumindest hoffen wir das." Um das Jahr 2030, schätzt er, könnten Quantencomputer auf dem Markt sein, auf denen solche Programme nutzbringend laufen.

Bild: IBM

Erfolgreiche Bio-Kooperationen

DESY arbeitet mit Industriepartnern zusammen und beteiligt sich an Netzwerken. Warum? Physikalische Methoden und neuartige Beschleunigertechnologien können eine zügigere Medikamentenentwicklung, wirksamere Impfstoffe und den Einsatz von Beschleunigern in Diagnostik oder Behandlung ermöglichen. Drei Beispiele:

Medikamente schneller entwickeln

Gemeinsam mit dem Start-up CrystalsFirst hat DESY das Projekt LigandML initiiert. Es hat zum Ziel, die Entwicklung neuer Medikamente schneller und kostengünstiger zu machen. Basis ist die Proteinkristallographie: Proteinkristalle werden mit unzähligen Liganden kombiniert, also mit Wirkstoffkandidaten. Dann wird an PETRA III enträtselt, welcher Wirkstoff an das Protein angedockt hat. CrystalsFirst hat eine Methode entwickelt, mit der sich die Kristalle effektiv stabilisieren lassen. Zudem wertet eine KI die Röntgendaten rascher als bislang aus und lernt, welche Details für die Bindung notwendig sind. Damit kann die Zeit für die Identifikation eines Wirkstoffs von Monaten auf Wochen oder gar Tage sinken. Bei LigandML übertragen die Projektpartner das Verfahren in die Routine, um dadurch die Experimente an PETRA III zu beschleunigen.

„Unser gemeinsames Ziel ist es, dass LigandML einen effizienteren, datengesteuerten Ansatz für die Entwicklung neuer Therapeutika ermöglicht“

Johanna Hakanpää, DESY
Serghei Glinca, CEO von CrystalsFirst

mRNA-basierte Wirkstoffe optimieren

DESY kooperiert mit dem Mainzer Biotechnologieunternehmen BioNTech und der Universität Hamburg. An PETRA III führen die Projektpartner Untersuchungen zur Bildgebung von lipidbasierten Nanopartikeln durch. Diese ultrakleinen Partikel aus Fetten, sogenannte Drug-Delivery- oder Formulierungstechnologien, sorgen mit dafür, dass mRNA-basierte Wirkstoffe an den für sie vorgesehen Zielort im Körper transportiert werden. Konkret soll an PETRA III ein Verfahren namens Röntgenfluoreszenz für die breite Anwendung fit gemacht werden. Die Methode kann u.a. Aufschluss über die Bioverteilung von pharmazeutischen Nanopartikeln geben. Die Erkenntnisse können für die Weiterentwicklung und Optimierung von Impfstoffen und Medikamenten auf mRNA-Basis wertvolle Hinweise liefern.

„Der Ansatz stellt eine innovative Technik dar, die biologische Verteilung von mRNA effizienter zu evaluieren. Derzeit gibt es keine vergleichbare Methode, um diese Informationen mit einer einzigen Messung und mit einer Auflösung im Submikrometerbereich zu erfassen. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen können uns dabei helfen, Formulierungstechnologien für mRNA-basierte Wirkstoffe weiter zu optimieren und möglicherweise neue Technologien zu entwickeln“

Dr. Jens Schumacher, Senior Director – Analytical Development bei BioNTech SE

Bilder: Privat; DESY, Marta Mayer

Beschleuniger für bessere Strahlentherapie
DESY arbeitet an einer neuen, vielversprechenden Technologie, der Plasmabeschleunigung. Das Prinzip: Starke Laserblitze bringen Elektronen auf kleinstem Raum auf beträchtliche Energien. Dadurch werden zum Beispiel kompakte Röntgenquellen für Krankenhäuser denkbar. Sie haben das Potenzial, die Diagnose und Therapie von Tumoren zu verbessern – mehr Behandlungserfolge bei geringeren Nebenwirkungen. Die von DESY koordinierte Innovationsplattform Hi-Acts hat zum Ziel, die Technik schnellstmöglich praxisreif zu machen. Industrieunternehmen arbeiten mit Forschungseinrichtungen schon in den ersten Entwicklungsschritten zusammen.

„Mit der Innovationsplattform Hi-Acts stärken wir die Synergien zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Hi-Acts bringt Helmholtz-Zentren mit Unternehmen zusammen und treibt Entwicklungen voran“

Wim Leemans, Direktor des Beschleunigerbereichs bei DESY

Bilder: DESY, Werner Bartsch; DESY, Marta Mayer

EIN GUTER GRUND, IN DEUTSCHLAND ZU BLEIBEN

Dr. Mathias Kraas arbeitet als Entwicklungsleiter bei der Medizintechniksparte von Olympus. Er ist Mitglied im Stiftungsrat sowie im Innovation Advisory Committee von DESY.

femto: Olympus stellt hochspezialisierte Geräte für minimalinvasive Diagnosen und Therapien her. Wie viel Grundlagenforschung steckt in diesen Produkten?

Mathias Kraas: Wesentliche Impulse kommen aus der Laserforschung und den Materialwissenschaften. So benötigen wir für manche Produkte Keramiken, die unter sehr speziellen Bedingungen funktionieren müssen. Wir können nicht selbst nach solchen Werkstoffen suchen, dafür fehlen uns die Kapazitäten. Deshalb sind Ergebnisse aus der Materialforschung für uns sehr wichtig.

femto: DESY ist dabei, den Transfer von Forschungsergebnissen in die Wirtschaft weiter zu professionalisieren. Wo sehen Sie für die Medizintechnik- und die Pharmabranche die Perspektiven für eine erfolgreiche Zusammenarbeit?

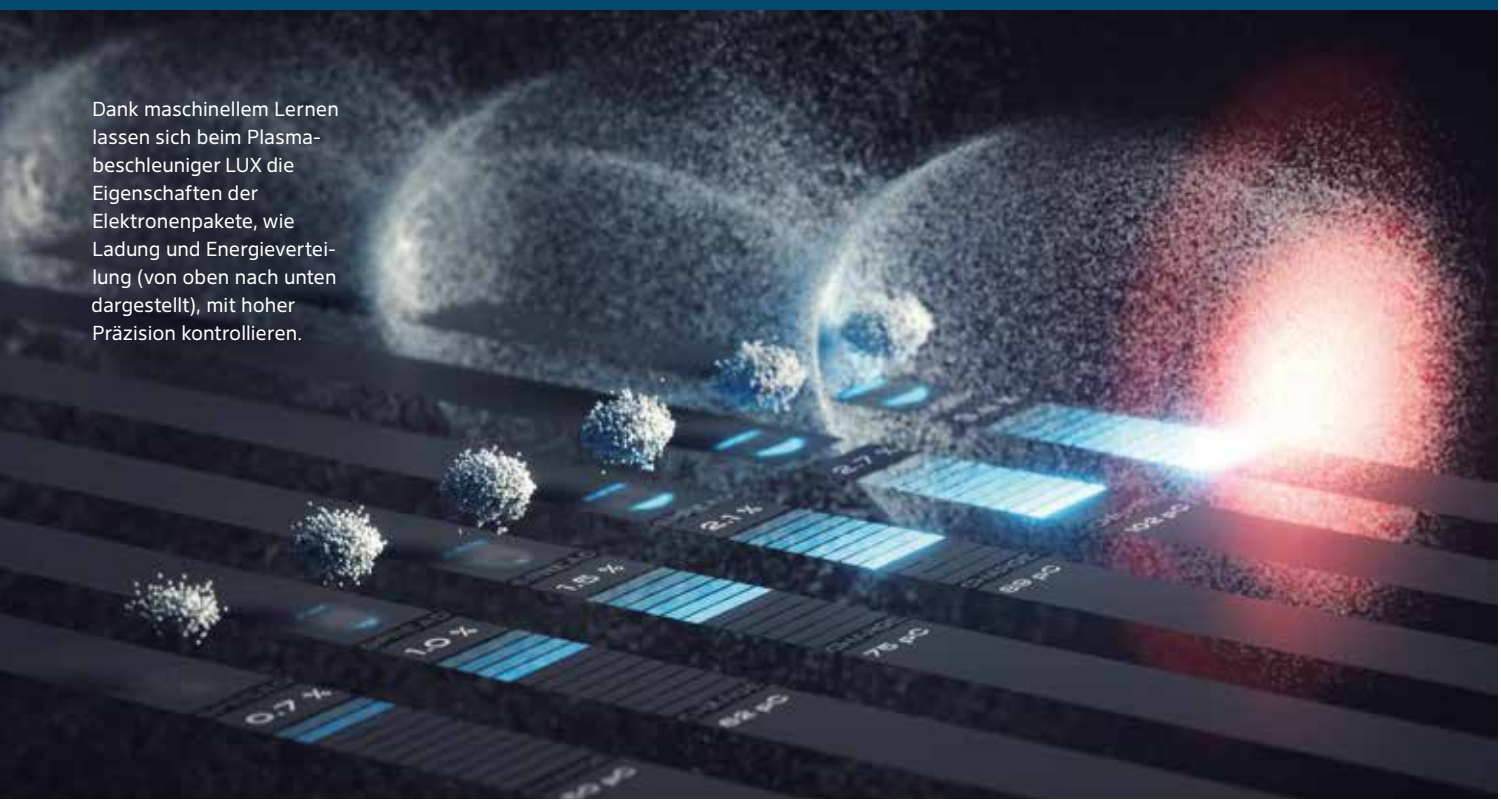
Mathias Kraas: Es gibt viele Ansätze, etwa in der Informationstechnologie. DESY beherrscht es, riesige Datenmengen zu strukturieren und zu analysieren, auch mit Hilfe von KI. Diese Werkzeuge können für unsere Branche sehr nützlich sein, etwa bei der Analyse medizinischer Bilddaten. Außerdem könnte die Pharmaindustrie mit Hilfe von DESYs Röntgenquellen neue Tumormarker für die Früherkennung von Krebs finden. Und die kompakten Beschleuniger, an denen DESY arbeitet, könnten den Kliniken neue Möglichkeiten bei der Tumordiagnose und -therapie eröffnen.

femto: Was sind aus Ihrer Sicht die besten Möglichkeiten, um die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft zu verbessern?

Mathias Kraas: Wichtig ist, dass Forschungszentren Start-ups fördern und ihnen erlauben, Produkte in hochspezialisierten Laboren zu entwickeln. Wichtig ist auch die bewusste Öffnung der Forschungszentren für Großunternehmen. Allerdings wissen viele Firmen noch gar nicht, welches Potenzial Einrichtungen wie DESY zu bieten haben. Das sollte noch stärker publik gemacht werden. Auch bei der Politik sollten wir das Bewusstsein schärfen, welche Bedeutung die Grundlagenforschung für den Standort Deutschland hat. Immer mehr Unternehmen denken darüber nach, ins Ausland zu gehen – es gibt nicht mehr viele Gründe zum Hierbleiben. Doch Zentren wie DESY sind für ein Großunternehmen ein guter Grund, in Deutschland weiterzumachen.

SPEKTRUM

Nachrichten aus der Forschung



Dank maschinellem Lernen lassen sich beim Plasmabeschleuniger LUX die Eigenschaften der Elektronenpakete, wie Ladung und Energieverteilung (von oben nach unten dargestellt), mit hoher Präzision kontrollieren.

Computer steuert Plasmabeschleuniger

Per maschinellem Lernen hat ein Team um DESY-Forscher Sören Jalas einem kompakten Teilchenbeschleuniger beigebracht, maßgeschneiderte Strahlen für verschiedene Anwendungen zu liefern. Die Technik erweitert den denkbaren Einsatzbereich sogenannter Laser-Plasmabeschleuniger, innovativer kompakter Beschleuniger der nächsten Generation. Plasmabeschleuniger können rund tausendmal kleiner sein als konventionelle Anlagen. Was bei Bau, Betrieb und Anwendung einen großen Vorteil verspricht, ist bei der Steuerung der Strahlparameter allerdings eine Herausforderung.

Bei Plasmabeschleunigern müssen die Beschleunigerexpertinnen und -experten im Prinzip behutsam an allen Einstellmöglichkeiten gleichzeitig drehen, um die verschiedenen Eigenschaften des Elektronenpakets auszubalancieren. Allerdings ist es für Menschen sehr schwierig, den richtigen Kompromiss zwischen den vielen unterschiedlichen Einstellparametern zu finden – im vorliegenden Fall waren es sechs.

„Computer sind viel geschickter darin, sich in diesen hochdimensionalen Parameterräumen zurechtzufinden", betont Jalas, der Hauptautor der Studie. „Für unseren Beschleuniger haben wir uns einer Methode bedient, die Bayessche Optimierung genannt wird. Dabei übernimmt im Grunde der Computer die Kontrolle über den Beschleuniger. Er probiert einige Konfigurationen der Maschine aus und misst die Parameter des Elektronenpakets, das der Beschleuniger ausspuckt. Aus den Messungen generiert der Computer nach und nach eine Art Landkarte und findet somit die Parameterkurven, die uns zeigen, was wir einstellen müssen, um auf optimale Weise die Eigenschaften des Elektronenpakets zu bekommen, die wir gerade benötigen."

Bei ihrem experimentellen Plasmabeschleuniger LUX haben die Forschenden das Verfahren zunächst für die Energie und die elektrische Ladung der Teilchenpakete eingesetzt. Es soll auch beim großen Plasmabeschleuniger KALDERA zum Einsatz kommen, der derzeit bei DESY aufgebaut wird.

Physical Review Accelerators and Beams, DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.071302

Bild: DESY, Science Communication Lab

Stringtheoretiker Edward Witten erhält Hamburger Preis für theoretische Physik

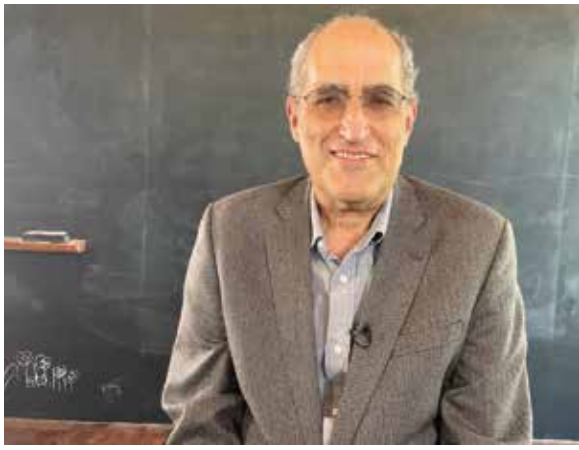


Bild: OFC LLC

Der US-amerikanische Physiker Edward Witten ist mit dem Hamburger Preis für Theoretische Physik 2023 ausgezeichnet worden. Der emeritierte Professor am Institute for Advanced Study in Princeton, USA, wurde für seine wegweisenden Beiträge zu einer vereinheitlichten mathematischen Beschreibung fundamentaler Naturkräfte geehrt. Mit seiner herausragenden Forschung zur String- und Quantentheorie hat Witten das Verständnis von Raum, Zeit, Materie und Struktur des Kosmos nachhaltig beeinflusst.

Witten zählt zu den renommiertesten theoretischen Physikern unserer Zeit. Seit Jahrzehnten gibt er wichtige Impulse für die Entwicklung einer großen vereinheitlichten Theorie der Physik, die alle Kräfte und Bausteine des Universums beschreibt. Als aussichtsreicher Kandidat dafür gilt seit den 1970er Jahren die Stringtheorie, weil sie eine Brücke zwischen zwei etablierten Grundpfeilern der Physik baut: der Quantentheorie, die das Zusammenspiel subatomarer Teilchen bestimmt, sowie Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, die Gravitation als Folge der Krümmung des Raumes beschreibt und die Entwicklung von Sternen, Galaxien und Schwarzen Löchern vorhersagt.

Der Stringtheorie zufolge lassen sich Quanten- und Gravitationstheorie in einem neuen mathematischen Formalismus vereinigen. Dabei werden Elementarteilchen als winzige linienförmige Objekte betrachtet, die Strings. Alle bekannten Elementarteilchen sind demzufolge verschiedene Schwingungsmuster desselben Urteilchens. In den 1980er Jahren kristallisierte sich unter maßgeblicher Mitwirkung Wittens heraus, dass sich so alle vier Naturkräfte – Gravitation, Elektromagnetismus, schwache Kraft, starke Kernkraft – durch eine vereinheitlichte quantenmechanische Feldtheorie beschreiben lassen. Witten wurde vielfach ausgezeichnet, unter anderem erhielt er 1990 als erster Physiker überhaupt die Fields-Medaille, die höchste Auszeichnung in der Mathematik.

Der Hamburger Preis für Theoretische Physik ist einer der höchstdotierten Wissenschaftspreise für Physik in Deutschland. Das Preisgeld beträgt 137 036 Euro, eine Anspielung auf die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante, die in der theoretischen Physik eine wichtige Rolle spielt. Die Auszeichnung wird von der Joachim Herz Stiftung gemeinsam mit DESY, dem Wolfgang Pauli Centre von DESY und Universität Hamburg sowie den Exzellenzclustern „CUI: Advanced Imaging of Matter“ und „Quantum Universe“ an der Universität Hamburg verliehen.

Innovationspreis für Röntgenfluoreszenz-Technik

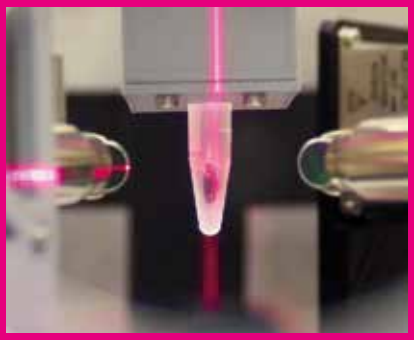


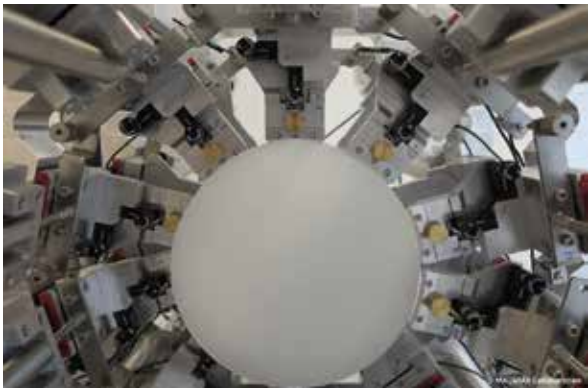
Bild: Universität Hamburg, Florian Grüner

Versuchsaufbau für Röntgenfluoreszenz-Messungen

Florian Grüner, Professor an der Universität Hamburg und am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL), wurde mit dem Innovationspreis für Synchrotronstrahlung des Vereins „Freunde des Helmholtz-Zentrums Berlin“ (HZB) ausgezeichnet. Er erhielt den Preis für seine Arbeiten zur Nachverfolgung von Molekülen in Biomaterialien und lebenden Organismen mit der Röntgenfluoreszenz-Bildgebung. Seine Pionierarbeit bereitet den Weg für die präzise Verfolgung von Immunzellen, Biomolekülen wie etwa Wirkstoffen, aber auch Antikörpern und Arzneimittelträgern, um deren Verteilung in lebenden Organismen in Echtzeit zu messen. Das Verfahren kann unschätzbare Erkenntnisse für die medizinische Forschung liefern.

Der entscheidende Durchbruch von Grüner und seinem Team liegt in der Weiterentwicklung einer Methode, die es mit Hilfe von Synchrotronstrahlung ermöglicht, kleinste Tumore präzise nachzuweisen oder die Verteilung von Medikamenten in lebenden Organismen zu beobachten. Der neue Ansatz birgt großes Potenzial für die pharmazeutische Forschung, die Entwicklung von Medikamenten oder die Untersuchung biologischer Auswirkungen von Umweltverschmutzung durch Mikro- und Nanoplastik. Da sie ein nichtinvasives Verfahren ist, mit dem ein Organismus über viele Zeitpunkte hinweg vermessen werden kann, verspricht die Methode zudem, die Zahl der in vorklinischen Versuchen benötigten Tiere erheblich zu reduzieren.

Deutsch-französisches Labor zur Erforschung der Dunklen Materie gegründet



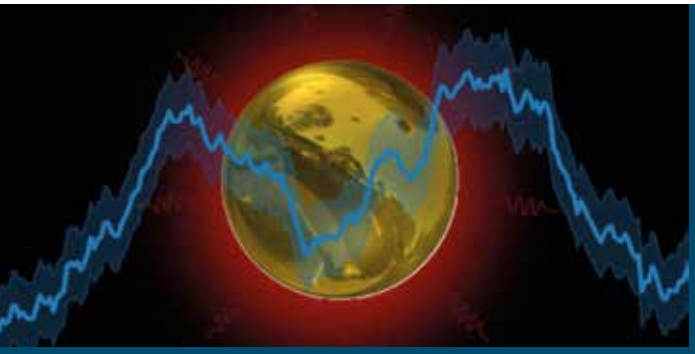
Das Axionen-Experiment MADMAX ist eines der Projekte, bei denen sich das DMLab engagieren will.

Bild: MADMAX-Kollaboration

Die französische Forschungsorganisation CNRS und drei Helmholtz-Zentren – DESY, GSI in Darmstadt und KIT in Karlsruhe – haben sich zum Dark Matter Lab (DMLab) zusammengeschlossen, einem internationalen Forschungslabor, das sich der geheimnisvollen Dunklen Materie widmet. Diese ist eines der größten wissenschaftlichen Rätsel des Universums: Aus astronomischen Beobachtungen weiß man, dass sie rund 26 Prozent des gesamten Energieinhalts des Universums ausmacht und damit etwa fünfmal so häufig vorkommt wie die uns bekannte „normale" Materie. Ziel des DMLabs ist es, die Zusammenarbeit zwischen den beiden Ländern zu stärken und das Potenzial für Entdeckungen zu fördern. Das DMLab, das auf deutscher Seite von DESY koordiniert wird, wurde für zunächst fünf Jahre ins Leben gerufen.

Zu den Themengebieten des DMLab gehören direkte Suchen nach Teilchen der Dunklen Materie, die Entwicklung innovativer Detektor- und Beschleunigertechnologien sowie das theoretische Studium von Dunkler Materie. Aber auch die Astroteilchenphysik mit ihrem Multimessenger-Ansatz, der auch Gravitationswellen einbezieht, und das wissenschaftliche Rechnen mit Themen wie Künstliche Intelligenz und Datenmanagement zählen zu den Aktivitäten des Labors.

Ein gemeinsames Projekt, in dem sich das DMLab engagieren wird, ist das Experiment MADMAX, das auf Initiative der Max-Planck-Gesellschaft entstanden ist. Die internationale MADMAX-Kollaboration hat sich 2017 bei DESY gegründet und will nach Axionen suchen, hypothetischen ultraleichten Teilchen, die Bausteine der Dunklen Materie sein könnten.



Verschobene Elektronen lassen Gold-Nanopartikel schwingen

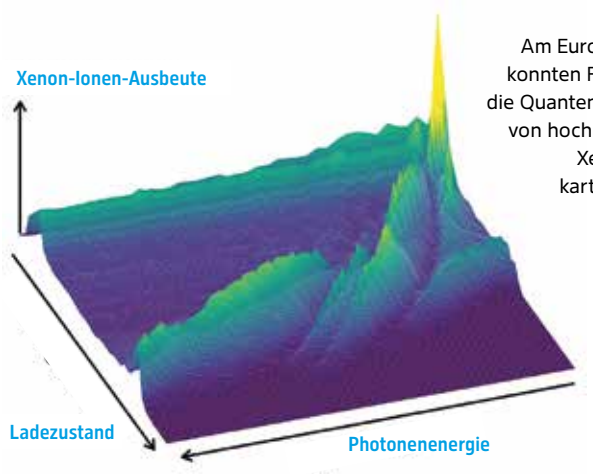
Solarzellen, Sensoren, Photokatalysatoren: Lichtempfindliche Nanopartikel versprechen eine Vielzahl von Anwendungen – sofern sich die Prozesse, die ihr Verhalten bestimmen, kontrollieren lassen. Einer dieser Prozesse ist eine Art kollektive Elektronenbewegung im Nanopartikel, „Plasmon" genannt, die zu einem Energieaustausch führt, der günstig oder störend sein kann. Die Details dieser kollektiven Bewegung waren bislang unklar. Mit DESYs Freie-Elektronen-Laser FLASH hat ein Team Beobachtungen in Gold-Nanopartikeln gemacht, die sich nicht durch etablierte Modelle erklären lassen, und einen neuen theoretischen Ansatz vorgeschlagen, der die beobachtete Dynamik beschreibt.

Die gängige Theorie besagt, dass Plasmonen sehr energiereiche, „heiße" Elektronen erzeugen, die ihre Energie durch Streuung an anderen Elektronen verlieren und ein „warmes" Elektronengas bilden. Dieses heizt das Nanopartikel auf, das die überschüssige Energie letztlich an die Umgebung abgibt. Beim Erhitzen gerät das Nanopartikel in eine kollektive Schwingung, fast wie eine „atmende" Kugel. Die Effizienz des Energietransfers zwischen heißen und warmen Elektronen und dem Nanopartikel ist wichtig für verschiedene Anwendungen, etwa in Solarzellen und Sensoren.

Das Team hat an FLASH und der Universität Hamburg Nanopartikel mit einem Laser angeregt und untersucht. Die Partikel dehnten sich viel schneller aus als bisher angenommen – und zwar deutlich bevor sich das warme Elektronengas bilden konnte. Das Team entwickelte daraus ein neues Modell des Plasmonenverhaltens. Zur Erklärung der „Partikelatmung" enthält es neben der „klassischen" thermischen Ausdehnung einen neuen Effekt – eine vom Licht ausgelöste Umverteilung der Elektronen, die das Partikel direkt zum Schwingen anregt. Dieser neue Anregungsbeitrag zeigt, dass sogenannte plasmadynamische Prozesse viel stärker miteinander verwoben sind als angenommen und bestehende Modelle über warme und heiße Elektronen in Frage gestellt werden müssen.

Nano Letters, DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c00920

Quantenlandschaft hohler Atome kartografiert



Am European XFEL konnten Forschende die Quantenlandschaft von hoch geladenen Xenon-Ionen kartografieren.

Forschende haben exotische Quantenzustände von schweren Atomen identifiziert, denen bis zu sechs Elektronen in ihren innersten Elektronenschalen fehlen. Ermöglicht wurde der Durchbruch durch die einzigartige Möglichkeit am Röntgenlaser European XFEL, die Energie der Röntgenstrahlen über einen weiten Bereich zu verändern, sowie die Anwendung eines leistungsstarken Computerprogramms zur Vorhersage des Quantenverhaltens.

Wird ein Atom von einem Photon, einem Lichtteilchen, mit ausreichend Energie getroffen, kann es ionisiert werden, d. h. ein Elektron wird aus dem Atom herausgeschlagen und hinterlässt ein positiv geladenes Ion mit einem Loch in seiner Elektronenhülle. Die vom European XFEL erzeugten Röntgenpulse sind so intensiv und haben eine so kurze Dauer, dass die Atome mehr als ein Photon gleichzeitig absorbieren können. Damit sollte es sogar möglich sein, Atome mit mehreren Löchern in ihren Kernelektronenschalen zu erzeugen. In diesen innersten Schichten der Elektronenhülle sind die Elektronen sehr eng an den Atomkern gebunden und nehmen nicht an chemischen Bindungen teil.

In einer theoretischen und experimentellen Studie hat das Team an Xenon-Atomen erstmals die Abhängigkeit dieser „Mehrphotonen-Wechselwirkung" von der Röntgenenergie untersucht. Die gemessenen Spektren enthielten zahlreiche Quantenstrukturen in einer von Photonenenergie und Ladungszustand gebildeten „Landschaft". Mit Hilfe neuester theoretischer Berechnungen konnten die Forschenden diese Strukturen elektronischen Übergängen in entsprechende Ionenzustände zuordnen. Bei bestimmten Photonenenergien und Ladungszuständen wurden die Spektren von stark „ausgehöhlten" Atomen mit bis zu sechs gleichzeitigen Löchern in ihren innersten Elektronenschalen bestimmt. Die entdeckten ungewöhnlichen Atomspezies könnten auch durch Kollisionen im Weltraum entstehen und womöglich nicht identifizierte Röntgenemissionslinien in der Astrophysik erklären.

Nature Communications, DOI: 10.1038/s41467-023-41505-1

Bild: DESY, Sang-Kil Son

femtomenal

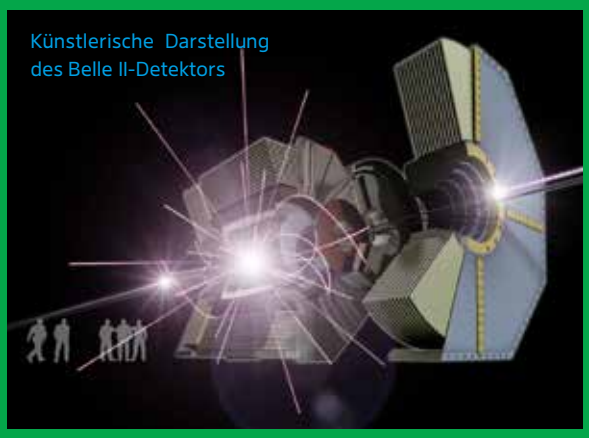
1777,09 ± 0,14 MeV: Diese Zahl ist ein Rekord

Keine Sorge, Sie müssen sich diese Zahl nicht merken: 1777,09 ± 0,14 MeV. Sie ist die bisher genaueste Messung der Masse des Tau-Leptons, eines schweren Verwandten des Elektrons. Aber sie wird uns auf lange Sicht mehr über die Spielregeln unseres Universums verraten. Eine Forschungsgruppe unter der Leitung von DESY hat sie mit dem Belle II-Detektor am japanischen Forschungslabor KEK bestimmt und dafür etwa 175 Millionen Zerfälle von Tau-Teilchen analysiert. Denn das Tau hat zwar ähnliche Eigenschaften wie das Elektron, ist aber viel schwieriger zu untersuchen, weil es nur extrem kurz existiert.

Die jetzige Messung stimmt zwar mit früheren, weniger genauen Messungen überein, aber das Tau gilt als guter Kandidat, um Vorgänge jenseits des heute Bekannten aufzuspüren. Tatsächlich gibt es einen kleinen Unterschied zwischen theoretischer Vorhersage und gemessenen Werten. Sollte sich dieser bei genaueren Messungen vergrößern, könnte dies ein Hinweis auf „neue Physik" jenseits des Standardmodells sein.

Falls das Gespräch bei Ihrer nächsten Dinnerparty also auf die Masse des Tau-Leptons kommt, wissen Sie jetzt, wo Sie nachschlagen müssen:

https://arxiv.org/abs/2305.19116



Künstlerische Darstellung des Belle II-Detektors

Bild: Rey Hori, KEK

Die künstlerische Darstellung zeigt, wie eine Reihe von Pulsaren von Gravitationswellen beeinflusst werden, die von einem Paar supermassiver Schwarzer Löcher aus einer entfernten Galaxie stammen.

Wer macht hier die Gravitationswelle?

Daten aus 15 Jahren liefern Hinweise auf ein niederfrequentes Hintergrundrauschen aus Gravitationswellen im Universum – vielleicht direkt vom Urknall

Diese Wellen sind echt lang: Astrophysikerinnen und Astrophysiker haben erstmals überzeugende Hinweise auf die Existenz von Gravitationswellen gefunden, die mit Perioden von Jahren bis Jahrzehnten schwingen. Für ihre Untersuchungen werteten die Fachleute Daten aus 15 Jahren aus, die das North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves, kurz NANOGrav, gesammelt hat. Unter anderem stellen sie die Hypothese auf, dass NANOGrav Gravitationswellen sieht, die beim Urknall erzeugt wurden.

Pulsare helfen bei der Suche

„Nach jahrelanger Arbeit öffnet NANOGrav ein neues Fenster zum Gravitationswellen-Universum und zeigt, dass es Gravitationswellen bei sehr niedrigen Frequenzen gibt", betont Stephen Taylor von der Vanderbilt University in den USA, der Leiter der Suche und der Kollaboration.

Das NANOGrav-Konsortium, ein Zusammenschluss von mehr als 190 Forschenden, unter anderem von der Universität Münster, DESY, dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover und der Universität Mainz, beobachtet Pulsare in unserer Galaxie mit großen Radioteleskopen und sucht dabei nach Gravitationswellen. Ein Pulsar ist der unvorstellbar dichte Überrest des Kerns eines massereichen Sterns nach dessen Lebensende in einer Supernova-Explosion. Pulsare drehen sich schnell und senden Strahlen von Radiowellen durch den Weltraum, so dass sie von der Erde aus gesehen zu pulsieren scheinen. „Wenn der Pulsar richtig orientiert ist, lässt sich dieses sehr regelmäßige Signal von der Erde aus messen. Man kann den Effekt mit dem Lichtkegel eines Leuchtturms vergleichen, der in einem bestimmten Takt aufblitzt – nur dass Pulsare viel schneller blinken; im Falle der von NANOGrav beobachteten Pulsare sogar im Millisekundentakt", erklärt Kai Schmitz, Juniorprofessor am Institut für Theoretische Physik der Universität Münster.

Perioden über Jahrzehnte

Albert Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie sagt genau voraus, wie Gravitationswellen Pulsarsignale beeinflussen sollten. Durch die Dehnung und Stauchung der Raumstruktur beeinflussen die Gravitationswellen die Ankunftszeit jedes Pulses auf eine kleine, aber vorhersehbare Weise, indem sie einige Pulse verzögern und andere früher die Erde erreichen lassen. Abweichungen nach einem bestimmten Muster, das sich auf langsam wogende (nieder-

Bild: NANOGrav / Sonoma State University, Aurore Simonnet

Die Radioteleskope des Very Large Array in San Agustin, New Mexico (USA), gehören zu den Teleskopen des NANOGrav-Konsortiums.

frequente) Gravitationswellen zurückführen lässt, zeichnen sich nun in den Daten von 68 beobachteten Pulsaren ab, die das Konsortium zusammengetragen hat. Frühere Ergebnisse von NANOGrav hatten zwar bereits ein rätselhaftes Signal in den gemessenen Zeitreihen gezeigt, das allen beobachteten Pulsaren gemeinsam war. Es war aber zu schwach, um daraus Rückschlüsse auf seinen Ursprung zu ziehen.

Der jüngste Datensatz von NANOGrav zeigt nun zunehmend klare Hinweise auf Gravitationswellen mit Perioden von Jahren bis Jahrzehnten. Diese Wellen könnten von Paaren von Schwarzen Löchern kommen, die einander umkreisen und zu den massereichsten im gesamten Universum gehören: Sie haben Milliarden Mal mehr Masse als die Sonne und sind größer als der Abstand zwischen Erde und Sonne. Aus der Überlagerung der Signale vieler einzelner solcher Paare ergibt sich ein diffuses Gravitationswellen-Hintergrundrauschen. Weitere Studien dieses Signals werden ein neues Fenster zum Gravitationswellen-Universum öffnen und unter anderem Einblicke in die Verschmelzung von gigantischen Schwarzen Löchern in fernen Galaxien gewähren.

Die NANOGrav-Ergebnisse erschließen damit ein neues Frequenzband im Gravitationswellenspektrum. Denn Instrumente auf der Erde, wie zum Beispiel LIGO, das Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, können nur hochfrequente Gravitationswellen sehen – die niederfrequenten Gravitationswellen lassen sich nur mit Hilfe von Pulsaren beobachten. Im Jahr 2015 hatte LIGO die ersten hochfrequenten Gravitationswellen direkt gemessen.

Wellenmacher Schwarze Löcher oder Urknall?

Das von NANOGrav gemessene Signal könnte auch Gravitationswellen aus dem frühen Universum enthalten. „In unserer Arbeit nehmen wir die Möglichkeit unter die Lupe, dass NANOGrav im Urknall erzeugte Gravitationswellen sieht – anstelle eines Signals astrophysikalischen Ursprungs, das von gigantischen Schwarzen Löchern ausgesendet wird, die einander im Zentrum von Galaxien umkreisen“, erklärt Andrea Mitridate, Postdoktorand bei DESY.

„Es gibt viele Theorien, die die Entstehung von Gravitationswellen im Urknall voraussagen, zum Beispiel Phänomene wie kosmische Inflation, kosmologische Phasenübergänge oder sogenannte kosmische Strings“, erklärt Schmitz. Mitridate ergänzt: „In diesem Sinne ermöglichen uns die NANOGrav-Daten, Modelle neuer Physik bei Energien zu untersuchen, die in Laborexperimenten auf der Erde unerreichbar sind.“ Die Forscherinnen und Forscher brauchen jedoch weitere Daten, um festzustellen, ob sich letztlich die astrophysikalische Interpretation in Form von Doppelsystemen aus extrem massereichen Schwarzen Löchern oder die kosmologische Interpretation in Form von Gravitationswellen aus dem Urknall durchsetzen wird.

„Wir nehmen die Möglichkeit unter die Lupe, dass NANOGrav im Urknall erzeugte Gravitationswellen sieht“

Andrea Mitridate, DESY

The Astrophysical Journal Letters,
DOI: 10.3847/2041-8213/acdc91

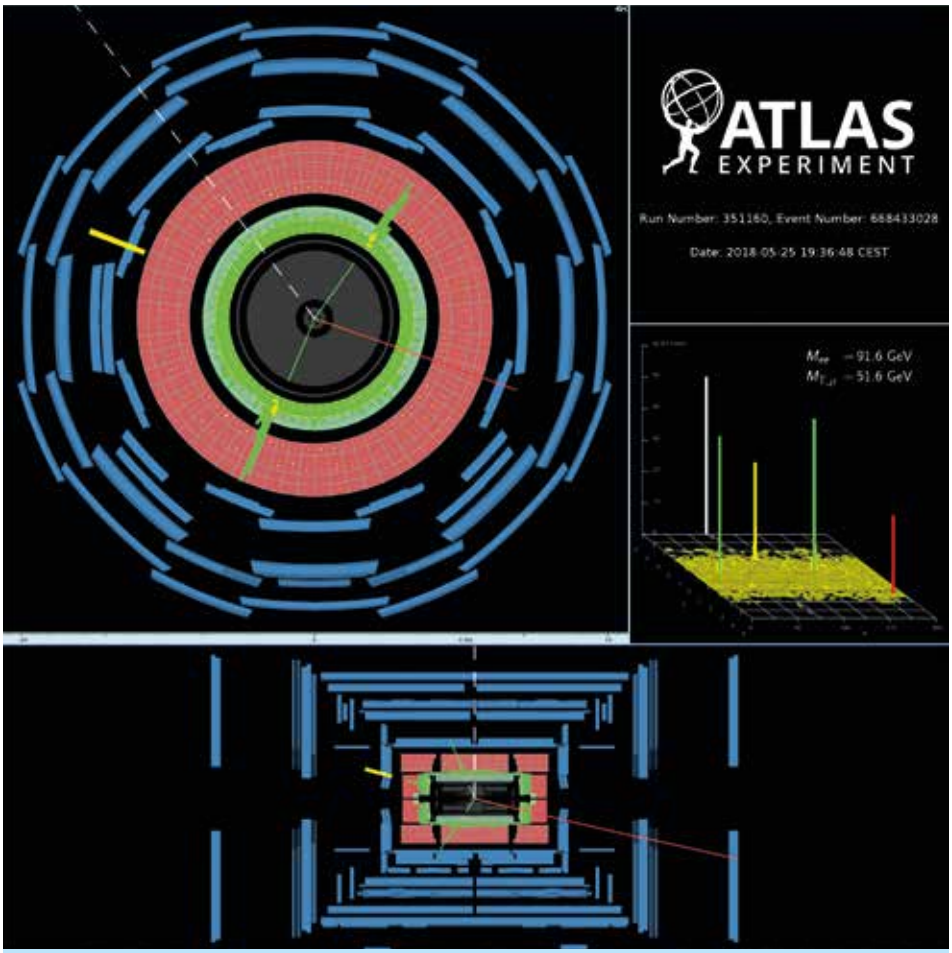
Bild: NRAO / AUI / NSF

Bosonen im Dreierpack: ATLAS sieht extrem seltenen Prozess

DESY-gesteuerte Analyse enthüllt drei verschiedene Bosonen auf einmal

Das hat vorher noch niemand gesehen: DESY-Forschende haben in Daten des Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf einen seltenen Prozess aufgedeckt, bei dem drei wichtige Botenteilchen auf einmal erzeugt werden. In dem Datensatz, den der ATLAS-Detektor in den letzten Jahren gesammelt hat, konnte das Team einen Prozess beobachten, der die Beziehung zwischen zwei der vier fundamentalen Kräfte im Universum näher beschreibt – die schwache Kraft und den Elektromagnetismus: Bei dem Prozess entstehen gleichzeitig die beiden Botenteilchen der schwachen Kraft, die W- und Z-Bosonen, sowie das Photon, das Botenteilchen der elektromagnetischen Kraft.

Die elektromagnetische und die schwache Kraft stehen in enger Beziehung zueinander. Seit der ersten Beschreibung der Allgemeinen Relativitätstheorie haben Theoretikerinnen und Theoretiker sich rückwärts vorgearbeitet, um herauszufinden, wie die vier fundamentalen Kräfte – Elektromagnetismus, schwache Kraft, starke Kernkraft und Gravitation – einmal eine einzige Kraft waren, die aus dem Urknall hervorging. Demnach müssten die elektromagnetische und die schwache Kraft am längsten vereint gewesen sein. Viele experimentelle Ergebnisse untermauern diese Berechnungen. Die beiden Botenteilchen der schwachen Kraft, das elektrisch geladene W- und das elektrisch neutrale Z-Boson, wurden bereits jeweils einzeln mit dem Photon beobachtet. Jetzt wurden zum ersten Mal alle drei zusammen bei einer einzigen Kollision gesichtet.



Bessere Analysemethoden, genauere Werte für die Kollisionsrate am LHC-Beschleuniger und eine gute Idee machen Bilder wie diese möglich. Es zeigt eine seltene Kollision im ATLAS-Detektor, bei der drei Bosonen – je ein W- und Z-Boson und ein Photon – zu sehen sind.

Bild: ATLAS-Kollaboration

Analyse-Idee stammt von DESY

Der Vorschlag, die riesige Datenmenge der letzten LHC-Laufzeit zu nutzen, um Beweise für die gleichzeitige Erzeugung aller drei Bosonen zu finden, stammt von DESY-Teilchenphysik-Direktorin Beate Heinemann. „Wenn man den gesamten Datensatz nutzt, kann man solche seltene Prozesse finden“, erklärt Ludovica Aperio Bella aus der ATLAS-Gruppe bei DESY, die Leiterin der Analyse.

„Ich bin begeistert, dass wir zum ersten Mal die gleichzeitige Produktion aller drei elektroschwachen Bosonen beobachtet haben“, betont Heinemann. „Das ist ein sehr seltener Prozess, daher konnten wir ihn erst jetzt, fast 15 Jahre nach dem Start des LHC, und auf der Basis einer riesigen Datenmenge sehen. Zu verstehen, wie diese Bosonen miteinander wechselwirken, ist der Schlüssel zum Verständnis unseres frühen Universums.“

Ein Teil der Herausforderung bei der Analyse bestand darin, die gruppierten Signaturen der W- und Z-Bosonen und des Photons zu finden. Leider unterscheidet sich dieses Signal nicht stark von vielen anderen Spuren von Teilchen aus der Kollision. Das Team musste also Wege finden, um das gesuchte Signal leichter zu identifizieren, und entwickelte dafür neue statistische Methoden. „Nur mit diesen Techniken, die komplexer sind, als wir sie je zuvor hatten, können wir die Produktion von drei Bosonen erkennen“, erläutert Bella.

Statistisch und physikalisch signifikant

Entscheidend für den Erfolg des Teams war aber auch ein unter intensiver Beteiligung von DESY aktualisierter Wert für die Luminosität des LHC, also die durchschnittliche Anzahl von Protonenkollisionen. Je präziser diese Zahl, desto präziser die Messungen. Die Fachleute haben für ihre Beobachtung der drei Bosonen eine Signifikanz von 6,3 sigma berechnet. Das heißt, sie sind sich zu 99,99966 Prozent sicher – die Wahrscheinlichkeit, dass das Phänomen irrtümlich beobachtet wurde, liegt bei 3 zu einer Million.

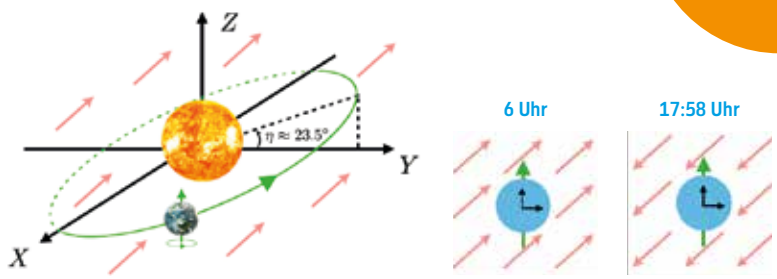
„Das Ergebnis ist wichtig für die Erforschung der Physik jenseits des Standardmodells, denn wann immer wir einen seltenen Prozess wie diesen beobachten, zwingen wir unsere Freunde von der Theorie, ihn in einen Kontext zu stellen. Dieser Kontext trägt dazu bei, dass künftige Ergebnisse viel präziser werden, so dass wir wissen, wonach wir suchen müssen“, so Bella.

„Das ist der Schlüssel zum Verständnis unseres frühen Universums“

Beate Heinemann, DESY

SPRECHEN QUARKS MIT DEM WELTALL?

femtopolis



Auch Quarks erhalten die Rotations- und Lorentz-Invarianz, zeigt eine auf Basis von Daten des ZEUS-Experiments veröffentliche Studie.

Jedes Experiment, das auf der Erde gemacht wird, hat zu jedem Zeitpunkt eine genau definierte Ausrichtung und Geschwindigkeit in Bezug auf das Zentrum des Sonnensystems, das Zentrum unserer Galaxie und das Ruhesystem des Universums. Die Rotations- und Lorentz-Invarianz besagen, dass diese beiden Symmetrien keine Auswirkungen auf die Teilchen im Experiment haben sollten. Während dies bei vielen Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik überprüft werden kann, ist es bei den Quarks etwas schwieriger. Ob auch sie diese grundlegenden Symmetrien der Natur erhalten, war lange unklar.

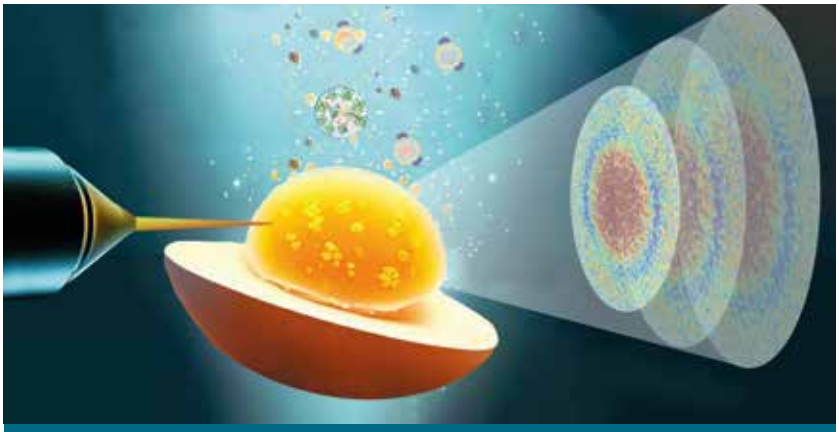
Quarks bilden Hadronen – zum Beispiel das Proton und das Neutron – und gehören damit zu den Grundbausteinen des Atomkerns. Allerdings sind sie schwierig zu untersuchen, weil man sie nie einzeln erwischt – sie tauchen immer im Verbund mit anderen Quarks auf.

Hier kommt HERA ins Spiel, DESYs 2007 in den Ruhestand versetzter, einzigartiger Teilchenbeschleuniger zur Untersuchung der Struktur des Protons. Dank HERA kennen wir wesentliche Details über das Verhalten von Quarks und den Aufbau des Protons – Wissen, das für die Experimente an heutigen Beschleunigern, wie dem Large Hadron Collider (LHC) am CERN, unerlässlich ist.

Fast zwei Jahrzehnte nach HERAs Abschaltung kommen immer noch neue Erkenntnisse dazu. Kürzlich haben sich zwei theoretische Physiker der Universitäten Indiana in den USA und Sussex in Großbritannien dem ZEUS-Team bei DESY angeschlossen, um die Rotations- und Lorentz-Invarianz und das Verhalten der Quarks zu untersuchen.

Anhand der Daten des HERA-Detektors ZEUS aus der Zeit zwischen 2003 und 2007 analysierten sie die Kollisionen erneut und suchten nach Anomalien bei den Quarks. Solche Anomalien wären ein Hinweis darauf, dass sich das Experiment – und damit der Raum um die Erde – durch ein noch unbekanntes Feld bewegt, das man sonst nicht sehen kann. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Rotations- und Lorentz-Invarianz für Quarks gültig sind. Solche Felder existieren also entweder gar nicht oder, falls doch, wechselwirken die Quarks nicht signifikant mit ihnen.

„Damit haben wir einige der weltweit besten Grenzen für die Verletzung dieser Invarianzen aufgestellt und wichtige Details zur Suche nach Physik jenseits des Standardmodells beigesteuert“, erklärt DESY-Wissenschaftler Achim Geiser aus dem Analyseteam.



An PETRA III fanden die Forschenden heraus, wie die Bestandteile von Eigelb dazu beitragen, dass sich beim Erhitzen dessen weichkörnige Mikrostruktur entwickelt.

Das Gelbe vom Ei

Röntgenquelle PETRA III enthüllt Phänomene in gelierendem Eigelb

Manche mögen ihr Ei hart, manche weich – das wissen wir nicht zuletzt aus dem Loriot-Klassiker „Das Frühstücksei“ (Zitat: „Das Ei ist hart!“). Wie das Eigelb beim Kochen seine Struktur verändert, hat eine Forschungsgruppe an DESYs Röntgenquelle PETRA III analysiert. Die Studie zeigt, wie verschiedene Bestandteile im Eigelb eines Hühnereis dazu beitragen, dass sich beim Erhitzen die typische weichkörnige Mikrostruktur entwickelt. Die Ergebnisse könnten für die Lebensmittelindustrie von Interesse sein und als Modell für die Physik hinter biologischen Prozessen dienen, die mit einer Reihe von schweren Krankheiten in Verbindung gebracht werden.

Bestimmende Faktoren: Temperatur und Geschwindigkeit

Erhitztes Eigelb wird zuhauf in unseren Küchen, in der Lebensmittelindustrie und in der Biotechnologie verwendet. Allerdings ist nur wenig über die Prozesse bekannt, die beim Kochen im Eigelb ablaufen. Was Proteine, Fettmoleküle – sogenannte LDLs (Low-Density-Lipoproteine) – und Eigelb-Granula zur Entwicklung der körnigen Gel-Mikrostruktur und zur mikroskopischen Dynamik während des Kochens beitragen, wollten die Fachleute mit kohärenter Synchrotronstrahlung aus PETRA III herausfinden.

Für die Experimente musste das Eigelb von ganz normalen Hühnereiern herhalten. Während der Erhitzung beobachteten die Forscherinnen und Forscher die Proben bei Temperaturen von 63 bis 100 Grad Celsius über Zeitintervalle von bis zu zwei Stunden mit einer zeitlichen Auflösung bis hinunter zu 10 Millisekunden. „Wir beobachten, dass der Mechanismus, der zur Bildung der körnigen Gel-Mikrostruktur führt, unabhängig von der Kochtemperatur ist, dass aber die Geschwindigkeit dieser Prozesse von der Temperatur abhängt“, erklärt Nimmi Das Anthuparambil von der Universität Siegen, die Hauptautorin der Studie.

Abgesehen von seinem lebensmitteltechnischen, biologischen und auch therapeutischen Wert machen die Vielfalt der Proteine und die hohe Konzentration an LDLs Eigelb auch zu einem idealen Kandidaten für die Untersuchung der Physik hinter biologisch relevanten Nichtgleichgewichtsprozessen. Zersetzung und Verklumpung von Proteinen sind in biologischen Systemen in der Regel unerwünscht und schädlich; sie stehen im Zusammenhang mit Krankheiten wie Alzheimer, Parkinson und Atherosklerose. Proteinbasierte Arzneimittel sind anfällig für Veränderungen in ihrer Umgebung, zum Beispiel Temperatur, pH-Wert oder Ionenstärke, was eine der größten Herausforderungen für die Pharmaindustrie darstellt. Ein gutes Verständnis der nanoskopischen Nichtgleichgewichtsprozesse ist also auch hier extrem vielversprechend.

Noch bessere Ergebnisse mit PETRA IV

„Diese Experimente nutzen in optimaler Weise den kohärenten Anteil der Röntgenstrahlung an PETRA III“, erläutert DESY-Forscher Fabian Westermeier. „Allerdings ist dieser Anteil begrenzt.“ DESYs Zukunftsprojekt PETRA IV wäre für die Untersuchung dieser Prozesse noch besser geeignet, so der Co-Autor der Studie. „PETRA IV wird einen hundertmal größeren kohärenten Strahlanteil haben und eine bis zu zehntausendfach bessere Zeitauflösung solcher Messungen ermöglichen – ideal für das Verständnis dieser Prozesse.“

> *„PETRA IV wird eine bis zu zehntausendfach bessere Zeitauflösung solcher Messungen ermöglichen“*
>
> ***Fabian Westermeier, DESY***

„Wir gehen davon aus, dass unsere Ergebnisse über den Bereich des Eigelbs hinaus relevant sind“, betont Christian Gutt von der Universität Siegen. Künftige Forschungsarbeiten werden abweichende Salz- und pH-Bedingungen untersuchen, was Aufschluss über geeignete Bedingungen für die Stabilisierung der Proteine geben könnte. Dies wiederum hätte Auswirkungen auf die Lagerungsbedingungen für künftige Arzneimittel auf Proteinbasis.

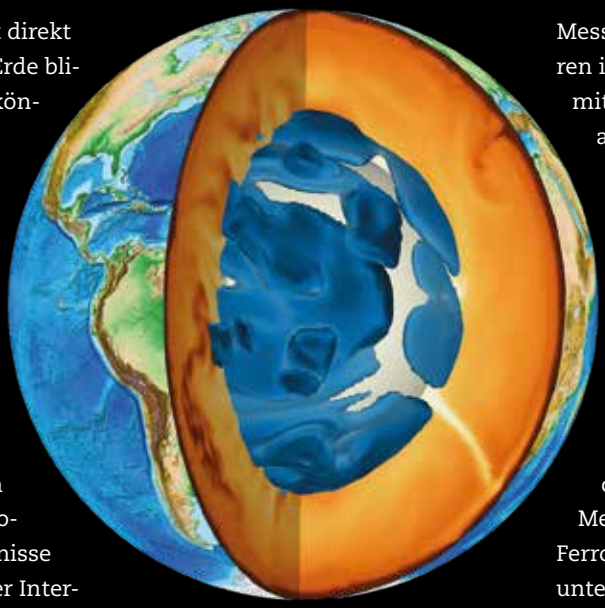
Nature Communications,
DOI: 10.1038/s41467-023-41202-z

Grafik: Universität Siegen, Marie Abhag Louise

Mit Hochdruck ins Innere der Erde geschaut

Hochdruckexperiment zeigt: Heißes Eisenoxid bremst Erdbebenwellen

Wir können nicht direkt ins Innere der Erde blicken, aber wir können mit ausgeklügelten Experimenten im Labor zumindest teilweise die Bedingungen im Erdinneren nachstellen. Das hat ein Forschungsteam mit einem Hochdruckexperiment an PETRA III getan und neue Einblicke in den unteren Erdmantel und das dort am zweithäufigsten vorkommende Mineral, Ferroperiklas, geliefert. Die Ergebnisse helfen unter anderem bei der Interpretation von Erdbebenwellen.



Modell der Erde mit Temperaturvariationen: Kaltes, absinkendes Material ist dunkel und heißes, aufsteigendes Material hell dargestellt. Die blaue Oberfläche zeigt, wo die Hälfte des Eisens im Ferroperiklas den Spin-Crossover durchgemacht hat – was die starke Temperaturabhängigkeit des Phänomens verdeutlicht.

Material wird unter Druck weicher

Ferroperiklas ist ein Magnesium-Eisen-Oxid. Gerät es unter hohen Druck, tritt ein ungewöhnliches Phänomen auf: Es wird vorübergehend weicher. Das hat direkten Einfluss auf die Geschwindigkeit von Erdbebenwellen, die von dem weicheren Mineral ausgebremst werden. Die Ursache für dieses Verhalten von Ferroperiklas liegt in seinen Atomen. Die Elektronen des Eisens organisieren sich neu und finden sich zu Paaren zusammen, in denen beide Elektronen einen gegensätzlichen Spin haben – das heißt, sie „drehen" sich in entgegengesetzte Richtungen. Durch diese Neuverteilung der Elektronen, den sogenannten Spin-Crossover, schrumpft der Durchmesser der Eisenatome.

Den Einfluss des Spin-Crossovers auf die Konsistenz von Ferroperiklas und damit auf die Erdbebenwellengeschwindigkeit hat das Team erstmals bei Temperaturen ähnlich denen im Erdmantel gemessen. Zentral für die Untersuchung war eine beheizbare Hochdruckzelle, in der die Fachleute Ferroperiklas auf knapp 1200 Grad Celsius erhitzten. An einer der Messstationen für Extremzustände von PETRA III durchleuchteten sie die Probe mit Röntgenstrahlung und konnten so messen, wie kompressibel sie ist.

„Der Spin-Crossover hängt sehr stark von der Temperatur ab", erklärt Hauptautorin Viktoria Trautner von der Universität Oxford. „Bei Raumtemperatur setzt der Spin-Crossover bereits etwa mit dem 400 000-fachen Atmosphärendruck ein", ergänzt Forschungsleiter Hauke Marquardt, ebenfalls von der Universität Oxford. „Bei 1000 Grad beginnt er dagegen erst mit dem rund 500 000-fachen Atmosphärendruck." Mit einem neuen Rechenmodell konnte das Team die Messergebnisse auf die Temperaturen im Erdmantel extrapolieren, die mit der Tiefe zunehmen und mehr als 3000 Grad Celsius erreichen.

Ferroperiklas in der Hochdruckzelle

Mit 3D-Modellierungen des Erdinneren simulierten die Forscherinnen und Forscher den Einfluss des Spin-Crossovers auf das Verhalten von Erdbebenwellen und verglichen diesen mit seismischen Messungen. Sie nehmen an, dass Ferroperiklas etwa 20 Prozent des unteren Erdmantels ausmacht, der von 660 Kilometern bis ungefähr 2900 Kilometern Tiefe reicht. „Es gibt keinen Weg, den unteren Erdmantel direkt zu erforschen. Untersuchungen wie unsere sind die einzige Möglichkeit, etwas über seine Eigenschaften zu erfahren", erläutert Co-Autor Hanns-Peter Liermann, der Leiter der Messstation, an der das Experiment durchgeführt wurde.

Das Verhalten von Erdbebenwellen gibt Aufschluss über die Struktur und Zusammensetzung des Erdmantels, die großen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften und die Dynamik des Erdinneren haben. Wissen über den unteren Erdmantel wiederum hilft bei der Interpretation von Erdbebenwellen. Die Forschenden hoffen, künftig über das Verhalten von Erdbebenwellen unter Einfluss des Spin-Crossovers sogar die Temperatur in bestimmten Tiefen messen zu können, allerdings brauchen sie dafür detailliertere seismische Messungen und Modelle als heute verfügbar.

Earth and Planetary Science Letters, DOI: 10.1016/j.epsl.2023.118296

Bild: University of Oxford, Paula Koelemeijer / GPlates

femtofinale

Cartoon: Nicolas 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
Kerstin Straub (v.i.S.d.P.)

Mit Beiträgen von
Frank Grotelüschen, Barbara Warmbein, Joseph Piergrossi,
Thomas Zoufal, Kerstin Straub, Till Mundzeck

Schlussredaktion
Ilka Flegel

Artdirektion und Produktion
Diana von Ilsemann

Layout und Gestaltung
Jutta Krüger, Cristina Lopez Gonzalez

Bildbearbeitung und Herstellung
EHS, Hamburg

Redaktionsschluss
Januar 2024

femto
Das DESY-Forschungsmagazin
Abonnieren Sie femto kostenlos!
www.desy.de/femto

FSC
www.fsc.org
MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C006225

EU Ecolabel
www.ecolabel.eu

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.

HELMHOLTZ

DESY.