

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 01/19

Die perfekte **Welle**

Physiker forschen an der nächsten Generation von Teilchenbeschleunigern

Schwarzes Loch
Aktive Galaxie
schleudert energiereiche
Neutrinos ins Weltall

Seltsame Spiegelwelt
Korkenzieher-Laser
erzeugen gespiegelte
Moleküle

Blitzstart für Röntgenlaser
Erste Experimente
enthüllen Struktur von
Antibiotika-Killer







Bild: Ashley Jones

femtoskop

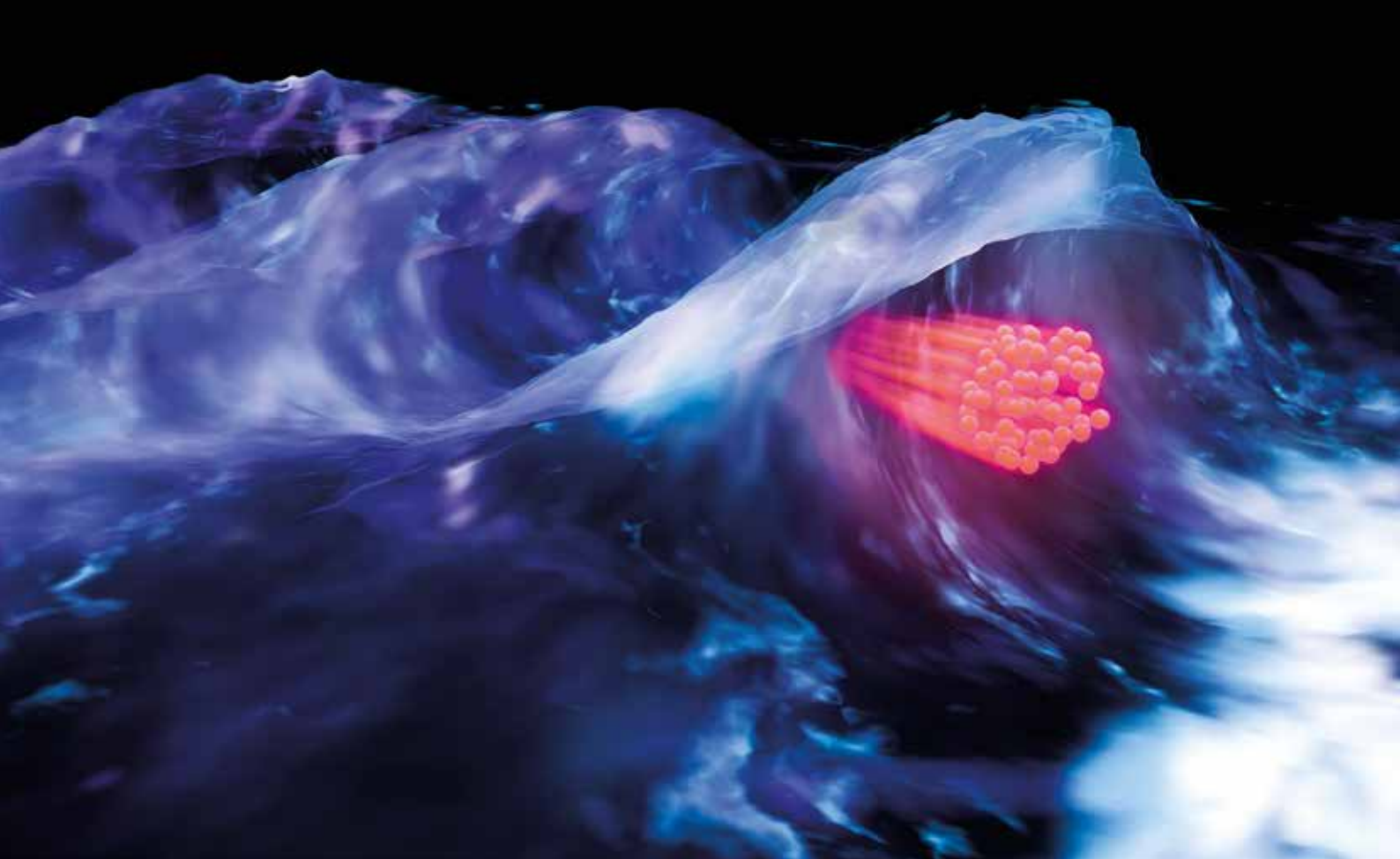
Astroparticle Immersive Synthesizer³ – AIS³ [aiskju:b]

Wissenschaft trifft Kunst: Für seine Licht- und Klanginstallation [aiskju:b] ließ sich der Konzeptkünstler Tim Otto Roth von dem Neutrino-Observatorium IceCube inspirieren, das im ewigen Eis der Antarktis nach energiereichen Elementarteilchen aus dem Weltall späht. DESY, der größte europäische Partner bei IceCube, hat Tim Otto Roth bei der Realisierung der Installation „Astroparticle Immersive Synthesizer³ – AIS³ [aiskju:b]“ unterstützt, die mehrere Wochen in der Berliner Kulturkirche St. Elisabeth zu besichtigen war.

[aiskju:b] ermöglicht, in die Geschehnisse am Südpol einzutauchen und beinahe in Echtzeit einen Neutrino-Aufprall in IceCube mitzerleben. „Mit diesem Projekt wird die Faszination für Wissenschaft auch an ein eher wissenschaftsfernes Publikum weitergegeben. Die unkonventionelle Annäherung an ein aktuelles Forschungsthema bietet damit eine sinnlich erfahrbare Ergänzung zu unserer klassischen Kommunikation von Forschung“, erläutert Christian Spiering, ehemaliger Leiter der IceCube-Gruppe bei DESY und Gründer des Global Neutrino Network.

Zwar rasen in jeder Sekunde Milliarden von Neutrinos durch uns hindurch, sie nachzuweisen ist jedoch extrem schwer, weil die leichten Elementarteilchen kaum jemals wechselwirken. Um einige der extrem seltenen Wechselwirkungen zu erwischen, haben die IceCube-Forscher 5160 Lichtsensoren über einen Kubikkilometer verteilt in langen Strängen in den antarktischen Eispanzer eingeschmolzen. Die Sensoren registrieren die winzigen Lichtblitze, die bei den seltenen Reaktionen von Neutrinos entstehen. Daraus lassen sich Richtung und Energie der Neutrinos bestimmen.

Inhalt

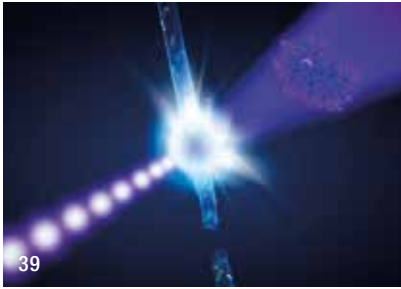


ZOOM

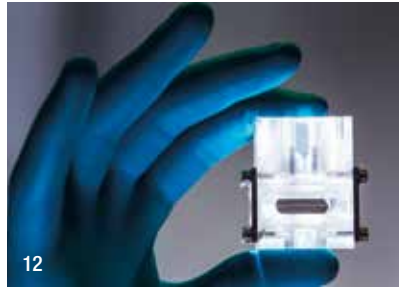
Die perfekte Welle

Physiker forschen an der nächsten Generation von Teilchenbeschleunigern

Teilchenbeschleuniger finden in verschiedensten Bereichen Verwendung, etwa bei der Materialbearbeitung oder der Krebsbehandlung. Auch für die Forschung sind sie ein wichtiges Werkzeug. Allerdings müssen diese Anlagen mit der bisher genutzten Technik sehr groß sein, manche messen mehrere Kilometer. Deshalb versuchen Physikerinnen und Physiker in aller Welt, sie deutlich kleiner und damit billiger zu machen. Manche setzen dabei auf ultrastarke Laser, andere auf kurzwellige Terahertz-Strahlung – und wieder andere entwickeln sogar einen Beschleuniger, der auf einen Mikrochip passt.



39



12



35

CAMPUS

- 06 Bote vom Schwarzen Loch**
Forscher verfolgen einzelnes Neutrino zurück zu Milliarden Lichtjahre entfernter Galaxie
- 12 Neuer Weg in die Spiegelwelt**
Experimentiertechnik für neuartige Spiegelmoleküle
- 38 Knoten im Kosmos**
Hamburger Preis für Theoretische Physik
- 39 Erste Experimente an neuem Röntgenlaser**
Unbekannte Struktur von Antibiotika-Killer enthüllt

ZOOM

- 16 Teilchenturbo im Kleinformat**
Wie Forscher Beschleuniger schrumpfen wollen
- 19 Vielversprechende Möglichkeiten**
Interview mit DESYs langjährigem Beschleunigerdirektor Reinhard Brinkmann
- 26 Terahertz-Trick**
Kürzere Wellenlänge verspricht hundertmal kleinere Beschleuniger
- 29 Der Chip-Beschleuniger**
Forscher arbeiten an Mini-Teilchenkanone auf Mikrochip

SPEKTRUM

- 32 Forschung kurzgefasst**
- Datenspeicher der Zukunft
 - „Quantenkocher“ für Atome
 - Erdbeben im Labor
 - Nanolöcher in Halbleitern
 - Nachwuchsförderprogramm für Data Science
 - Unerwartete Form von Gerüstprotein
 - Zerfall des Higgs-Teilchens
 - Google Maps für das Kleinhirn
 - Schwere Quarks


RUBRIKEN

02 femtoskop
AIS³ [aɪskjuːb]

11 femtopolis
Ko(s)mische Strahlung

37 femtomenal
42 Gramm Atomkerne pro Jahr

42 femtofinale
Lichtmaschinen-Quartett



Künstlerische Darstellung
des aktiven Galaxienkerns.
Das supermassive Schwarze
Loch im Zentrum der
Akkretionsscheibe schickt
einen energiereichen, scharf
gebündelten Teilchenstrahl
senkrecht ins All.

Kosmischer Teilchenbeschleuniger:

Bote vom **Schwarzen Loch**

Forscher verfolgen einzelnes Neutrino zurück zu Milliarden Lichtjahre entfernter Galaxie



Mit einer astronomischen Ringfahndung haben Forscherinnen und Forscher erstmals eine Quelle extrem energiereicher Neutrinos aus dem Kosmos geortet – geisterhafter Elementarteilchen, die Milliarden Lichtjahre durch das Weltall reisen und dabei mühelos Sterne, Planeten und ganze Galaxien durchqueren. Die gemeinsame Beobachtungskampagne wurde durch ein einzelnes Teilchen ausgelöst, das vom Neutrinoobservatorium IceCube am Südpol am

22. September 2017 aufgezeichnet wurde. Teleskope auf der Erde und im Weltraum konnten den Ursprung dieses exotischen Elementarteilchens zu einer rund vier Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie im Sternbild Orion zurückverfolgen, in der ein gigantisches Schwarzes Loch als natürlicher Teilchenbeschleuniger fungiert. Mit dem astronomischen Fahndungserfolg ist den Wissenschaftlern der insgesamt 18 beteiligten Observatorien ein entscheidender Schritt zu einem neuen Bild vom Kosmos gelungen. »



Die IceCube-
Beobachtungsstation
am Südpol

Durch die ewige Dunkelheit tief im antarktischen Eis zuckt ein kurzer blauer Blitz. Der schwache Lichtschauer ist die Spur eines sehr seltenen Ereignisses, das Wissenschaftler mit viel Aufwand aufgezeichnet haben: Ein extrem leichtes Elementarteilchen aus dem Weltall, ein Neutrino, ist in hunderten Metern Tiefe auf ein Wassermolekül geprallt. Neutrinos sind an sich keine Seltenheit: Pro Sekunde durchqueren rund 60 Milliarden dieser Teilchen jeden Quadratzentimeter – das ist ungefähr die Fläche eines Daumennagels –, ohne eine Spur zu hinterlassen. Selten ist, dass eines der zahlreichen Neutrinos mit einem Atom wechselwirkt und sich damit bemerkbar macht. Um diese seltenen Ereignisse zu beobachten, haben Forscher den größten Teilchendetektor der Welt kilometertief ins antarktische Eis eingeschmolzen: IceCube späht in einem Kubikkilometer Eis nach den Spuren der seltenen Neutrinokollisionen. Der Treffer, den das Neutrinoobservatorium am 22. September 2017 aufzeichnet, ist ein besonderer Glücksfall.

„Zuerst war es nur ein Alarm wie viele andere zuvor“, erzählt Marek Kowalski, Leiter der Neutrino-Astronomie bei DESY und Forscher an der Humboldt-Universität zu Berlin. Das IceCube-Team verschickt nach dem Einschlag ein astronomisches Telegramm, ein A-Tel – so tauschen sich Observatorien weltweit aus. Die Alarmmeldung geht an Dutzende andere astronomische Observatorien auf der ganzen Welt, die nun versuchen, in der Herkunftsrichtung des Neutrinos dessen Quelle aufzuspüren.

Nach einer Woche kommt eine Nachricht von „Fermi“, dem im All stationierten Gammastrahlungsteleskop. Es hat

ganz in der Nähe des errechneten Neutrino-Ursprungs einen sogenannten Flare wahrgenommen, einen Anstieg hochenergetischer Gammastrahlung. Auch das Teleskopsystem MAGIC auf der Kanareninsel La Palma meldet per A-Tel Gammastrahlung aus der Richtung des Neutrinos. Die Aufregung unter den Astronomen wächst. „Ein solches Neutrino sieht man einmal im Monat, einen Flare sieht man auch einmal im Monat, die Kombination beider gibt es nur einmal alle fünf- bis zehntausend Jahre“, betont Kowalski.

Ein gigantisches Schwarzes Loch

Nach dem A-Tel von MAGIC Ende September 2017 beginnt die astronomische Ringfahndung: Weitere Observatorien gehen den Hinweisen nach und entdecken an derselben Himmelsposition Strahlung von Radiowellen bis zum Röntgenbereich. Zum ersten Mal haben Astronomen die Quelle eines energiereichen, kosmischen Neutrinos weit jenseits unserer Heimatgalaxie geortet: „Wir haben eine aktive Galaxie gesehen, das ist eine große Galaxie mit einem riesigen Schwarzen Loch im Zentrum“, sagt Kowalski. Das Schwarze Loch verleibt sich große Mengen Materie ein. Ein Teil davon wird jedoch in scharf gebündelten Materiestrahlen, sogenannten Jets, wieder ins All hinausgeschleudert, statt in das Schwarze Loch zu fallen. Astrophysiker gehen davon aus, dass diese Jets mächtige natürliche Teilchenbeschleuniger sind.

Zeigt der Jet einer aktiven Galaxie direkt auf die Erde, bezeichnen Astrophysiker die aktive Galaxie als Blazar. Mittlerweile sind sich die Experten so gut wie sicher, dass das



„Die Wahrscheinlichkeit einer zufälligen Koinzidenz liegt bei 1 zu 1000“

Anna Franckowiak, DESY

Neutrino und die mit den anderen Teleskopen gemessene Strahlung aus ein und derselben Quelle stammen: dem Blazar TXS0506+056, Spitzname: Texasquelle, vier Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt im Sternbild Orion.

Um aber auszuschließen, dass das Zusammentreffen des Neutrinos mit den Gammabeobachtungen nur ein Zufall war, macht ein weltweites Team von Wissenschaftlern eine detaillierte statistische Analyse. „Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich lediglich um eine zufällige Koinzidenz handelt, haben wir auf ungefähr 1 zu 1000 bestimmt“, erklärt die Leiterin dieser Analyse, Anna Franckowiak von DESY. Das klingt wenig, ist aber noch nicht wenig genug, um der berufsmäßigen Skepsis von Physikern zu begegnen.

Das ändert eine zweite Analyse: Die IceCube-Forscher durchsuchen ihre Daten der vergangenen Jahre auf mögliche frühere Messungen von Neutrinos aus der Richtung des jetzt identifizierten Blazars. Tatsächlich finden sie für September 2014 bis März 2015 einen merklichen zeitweiligen Neutrino-Überschuss von mehr als einem Dutzend dieser Geisterteilchen aus der Richtung von TXS0506+056. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Überschuss lediglich ein statistischer Ausreißer ist, schätzen die Forscher auf nur 1 zu 5000.

Zusammen mit dem Einzelereignis von September 2017 liefern die IceCube-Daten nun den bislang besten experimentellen Beleg dafür, dass aktive Galaxien Quellen energiereicher kosmischer Neutrinos sind und damit auch zu den Beschleunigern der kosmischen Teilchenstrahlung gehören – für die Astronomen ein entscheidender Schritt zur Lösung des mehr als 100 Jahre alten Rätsels der Herkunft dieser energiereichen subatomaren Teilchen aus dem Weltall.

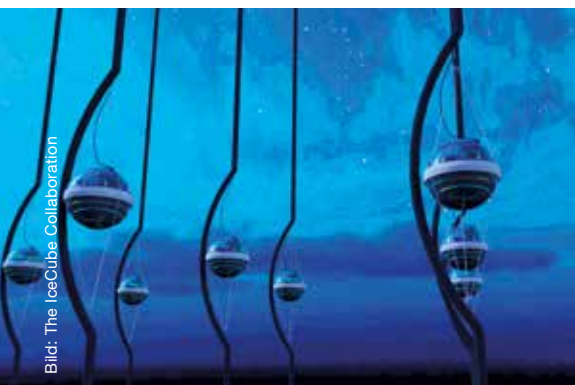


Bild: The IceCube Collaboration

Künstlerische Darstellung:
IceCube-Lichtsensoren (Photomultiplier) im Eis der Antarktis



femtopolis



Victor Franz Hess bei der Rückkehr von einer Ballonfahrt 1912

Ko(s)mische Strahlung

Aus dem Weltall trifft uns nicht nur die Sonnenstrahlung, die unsere Erde wärmt und unsere Haut bräunt. Aus dem Weltall kommt auch die sogenannte **kosmische Strahlung**, die der österreichische Physiker Victor Franz Hess im Jahr 1912 in 5300 Metern Höhe von einem Wasserstoffballon aus entdeckte. Mit seinen Ionisationsmessgeräten wies er die Existenz einer durchdringenden Höhenstrahlung nach. Erst viele Jahre später entpuppte sich die „Strahlung“ als Hagel energiereicher, elektrisch geladener Atomkerne und anderer Teilchen aus dem Kosmos. Der Name jedoch blieb, und die kosmische Strahlung erwies sich als äußerst gewinnbringend für die frühe Teilchenphysik.

Dringen die Teilchen aus dem Weltall in die irdische Atmosphäre ein, so erzeugen sie Kaskaden von Folgeteilchen, sogenannte **Luftschauer**. Diese hochenergetischen Teilchenlawinen standen zunächst im Fokus der Astroteilchenphysik, bevor ausgeklügelte Messmethoden und Observatorien weitere Botenteilchen aus dem Kosmos für die Forschung zugänglich machten. Neben unserer Sonne werden Sternexplosionen in der Milchstraße und aktive Galaxienkerne außerhalb der Milchstraße als mögliche Quellen der kosmischen Strahlung gehandelt. Der Ursprung insbesondere der energiereichsten Teilchen ist bislang aber noch nicht eindeutig geklärt.

Kurios: Die eigentliche kosmische Strahlung ist die (elektromagnetische) Gammastrahlung, die aber nicht zu der kosmischen (Teilchen-)Strahlung hinzugerechnet wird. Sie heißt stattdessen kosmische Gammastrahlung.

Bilder: Wikimedia Commons (2)

Intergalaktische Reise

Eine interaktive Website zeigt den Weg des Neutrinos von der aktiven Galaxie bis ins antarktische Eis. Nutzerinnen und Nutzer können dabei bis zum Schwarzen Loch vordringen, dass die Energie für den kosmischen Teilchenbeschleuniger liefert:

<https://multimessenger.desy.de>

Teilchenbeschleuniger

Die aktive Galaxie schießt einen Materiestrahls ins All, in dem Teilchen stark beschleunigt werden.



Intergalaktische Reise

Elektrisch geladene Teilchen werden auf dem Weg durchs All von Magnetfeldern abgelenkt.



Orbit

Satelliten wie „Fermi“ können Gammastrahlung aus der aktiven Galaxie direkt nachweisen.



Erdboden

Spezialteleskope beobachten die Teilchenkaskaden von kosmischen Gammaquanten in der Atmosphäre.



Südpol

Tief im antarktischen Eis späht IceCube nach energiereichen Neutrinos aus der aktiven Galaxie.



„Wir können auf einen Schlag viel über den **Kosmos** lernen“

Die Identifizierung der aktiven Galaxie als Quelle energiereicher Neutrinos ist nicht nur ein Durchbruch bei der Fahndung nach kosmischen Teilchenbeschleunigern. Der Erfolg ist auch ein entscheidender Schritt für die noch junge Disziplin der Multi-Messenger-Astronomie, wie der Leiter der Neutrino-Astronomie bei DESY, Marek Kowalski, erläutert.

femto: Die Beobachtung bestätigt die langgehegte Vermutung, dass sogenannte aktive Galaxienkerne natürliche Teilchenbeschleuniger sind. Warum haben die Ergebnisse Astrophysiker in so große Euphorie versetzt?

Kowalski: Seit über 100 Jahren wissen wir von der Existenz der kosmischen Strahlung, der Physiker Victor Hess hat sie 1912 entdeckt. Vermutungen über ihren Ursprung gibt es viele, nun konnten wir erstmals eine konkrete extragalaktische Quelle der energiereichen Teilchen orten. Das ist ein Riesenerfolg und auch ein entscheidender Schritt für die Multi-Messenger-Astronomie, kurz MMA.

femto: Was ist das, die Multi-Messenger-Astronomie?

Kowalski: MMA ist die Untersuchung des Kosmos mit Hilfe verschiedener Boten wie elektromagnetischer Strahlung, Gravitationswellen und Neutrinos. Sie können uns über die Natur kosmischer Phänomene und Prozesse Auskunft geben. Jeder Bote gibt uns dabei andere Informationen – erst durch die Verknüpfung entsteht ein Gesamtbild. So können wir auf einen Schlag sehr viel über den Kosmos lernen.

femto: Was macht die kosmischen Neutrinos so wichtig für die MMA?

Kowalski: Neutrinos haben die Eigenschaft, dass sie sehr selten wechselwirken. Als Forscher ist das für uns ein Riesenproblem: Wir brauchen

riesige Detektoren, um sie aufzuspüren. Gleichzeitig steigert das aber auch den Wert der Neutrinos: Weil sie so selten wechselwirken, können sie aus Regionen kommen, die für sichtbares Licht oder andere Photonen völlig intransparent sind, wie zum Beispiel aus dem Inneren von Sternexplosionen. Wir haben damit im Prinzip den ultimativen Röntgenblick.

femto: Sie wollen den Kosmos mit Neutrinos röntgen?

Kowalski: Im übertragenen Sinne, ja. Mit Röntgenstrahlen können wir den Körper durchleuchten. Wenn man aber einen Stern durchleuchten möchte, dann sind Röntgenstrahlen ungeeignet. Mit Neutrinos ist das möglich, wir können mit ihnen in das Innere von Sternen schauen und damit in eine Region im Kosmos blicken, die man mit elektromagnetischer Strahlung nicht sieht.

femto: Wieso können Neutrinos das?

Kowalski: Aus demselben Grund: weil sie so selten wechselwirken. Neutrinos werden auf dem Weg von der Quelle zu uns nicht absorbiert. Licht schon, insbesondere die elektromagnetische Strahlung bei den höchsten Energien, die Gammastrahlung. Gammastrahlung aus unserer eigenen Galaxie kann uns erreichen, aber bei Energien, bei denen wir kosmische Neutrinos beobachten, erreicht uns die Gammastrahlung aus anderen Galaxien nicht mehr. Das liegt nicht daran, dass es dort keine solche Strahlung

gibt. Sie wird ausgesendet, aber wieder absorbiert, vom Kosmos selbst.

femto: Was wollen Wissenschaftler mithilfe der MMA erforschen?

Kowalski: Wir würden gerne verstehen, wie Teilchen zu den höchsten Energien beschleunigt werden. Wir wissen, dass die kosmische Strahlung zu ganz hohen Energien reicht, zehn Millionen mal höheren Energien, als wir sie im größten irdischen Teilchenbeschleuniger erzeugen können, dem Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf. Und das ist ein Phänomen, dessen Mechanismus wir im Grunde nicht verstehen. Mit den Neutrinos können wir die kosmischen Beschleuniger identifizieren. Denn anders als die elektrisch geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung werden Neutrinos auf ihrem Weg durchs All nicht von Magnetfeldern abgelenkt und weisen damit genau auf ihren Ursprung zurück. Und sobald wir die Beschleuniger identifiziert

haben, ist der nächste Schritt, den Beschleunigungsmechanismus zu verstehen. Auch dabei helfen uns Neutrinos, denn sie liefern uns aus den oben geschilderten Gründen Informationen, die wir durch elektromagnetische Strahlung nicht bekommen.

femto: Welche weiteren offenen Fragen wollen Sie zukünftig beantworten?

Kowalski: Wir wollen beispielsweise verstehen, wie ein Stern explodiert. Bei der Explosion eines Sterns, einer Supernova, wird sehr viel kinetische Energie freigesetzt. Wir wollen wissen: Was ist die Dynamik bei solchen Explosionen?

femto: Sind die Ergebnisse ein ersehnter Durchbruch?

Kowalski: Ja, nach der Entdeckung der extragalaktischen kosmischen Neutrinos im Jahr 2013 ist das jetzt der nächste große Durchbruch. Es ist hoffentlich nicht der letzte.

Wir können noch nicht mit hundertprozentiger Sicherheit von einer Entdeckung sprechen. Aber es fühlt sich danach an, alles passt zusammen. Ich hoffe, dass wir bald eine Bestätigung dieser Ergebnisse bekommen, aber wir wollen auch noch weitere Quellklassen finden und ganz andere Phänomene aufspüren. Wir sehen das ganz klar als Anfang von etwas Neuem und sehr Wichtigem.

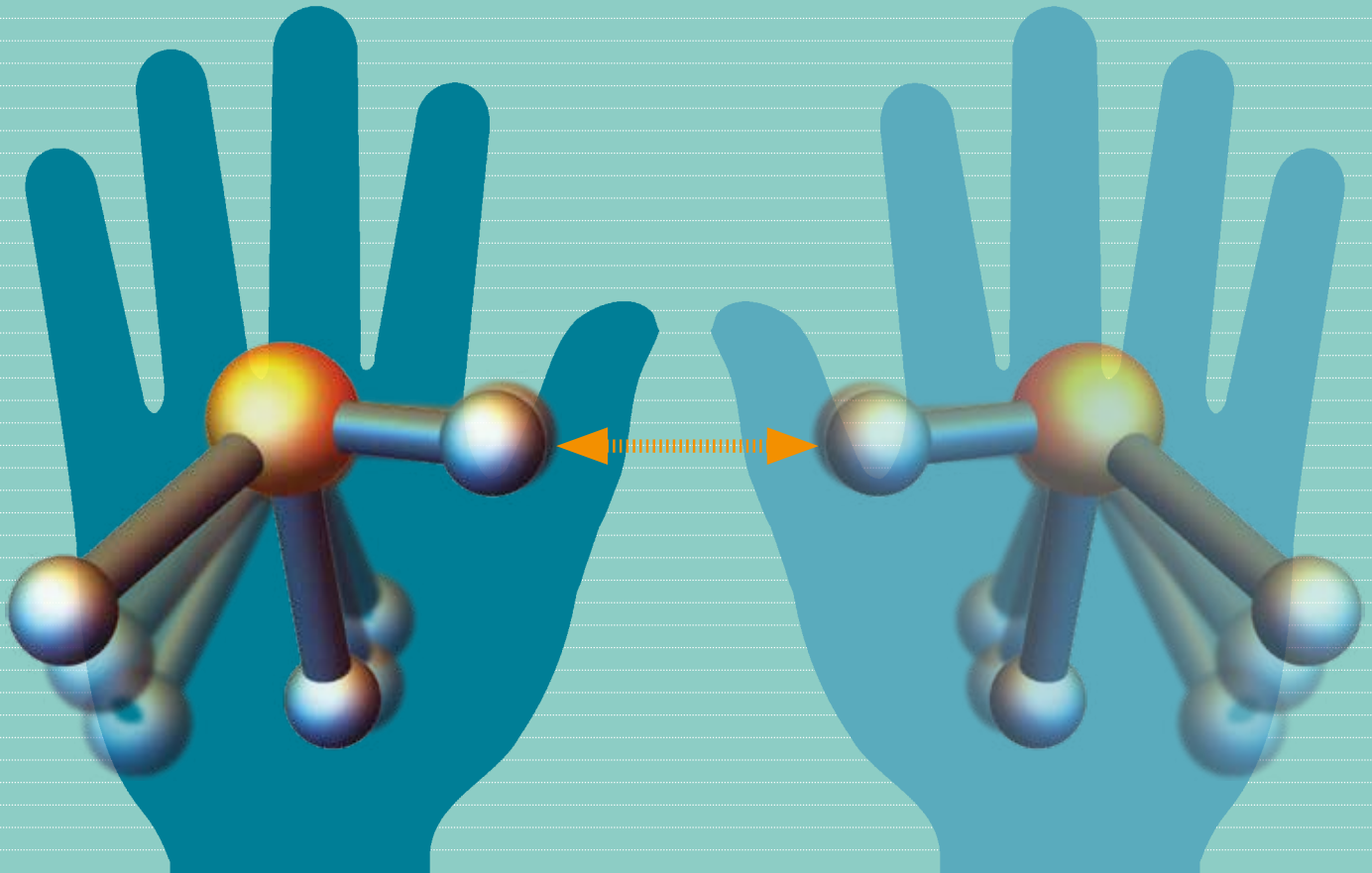


„Wir öffnen ein neues Fenster in das Hochenergieuniversum“

Marek Kowalski, DESY

Die Signale des Blazar-Neutrinos vom 22. September 2017, wie sie im IceCube-Detektor aufgezeichnet wurden. Die Farbe markiert die Zeit (von Rot über Grün nach Blau), die Größe die Helligkeit des Signals in den individuellen Sensoren (Photomultipliern).

Die **seltsame** Welt der Spiegel­moleküle



Als chiral werden Moleküle bezeichnet, die wie die rechte und die linke Hand in zwei spiegelbildlichen Formen existieren. Der Begriff Chiralität (Händigkeit) ist abgeleitet vom altgriechischen Wortstamm χείρ~ (cheir-) für „hand-“.

Zur Untersuchung des Phänomens der sogenannten molekularen Händigkeit in der Natur haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine neue Methode entwickelt, um maßgeschneiderte Spiegel­moleküle herzustellen. Die vorgeschlagene Technik kann normale Moleküle so schnell drehen lassen, dass diese ihre normale Symmetrie und Form verlieren und dabei zwei gespiegelte Varianten voneinander bilden. Ein Forscherteam von DESY, der Universität Hamburg und dem University College London um Gruppenleiter Jochen Küpper hat das innovative Verfahren entwickelt. Die Erforschung der Händigkeit, auch Chiralität genannt, führt nicht nur zu einem noch besseren Verständnis der Natur, sondern kann auch neuartigen Materialien und Methoden den Weg ebnen.

Viele Moleküle existieren in zwei Versionen, die Spiegel­bilder voneinander sind. „Aus unbekann­ten Gründen bevorzugt das Leben, wie wir es auf der Erde kennen, fast ausschließlich linkshändige Proteine, während die berühmte Doppelhelix des Erbguts rechtsherum gewunden ist“, erläutert Andrey Yachmenev, der diese theoretische Studie in Küppers Gruppe am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) geleitet hat. „Seit mehr als einem Jahrhundert enträtseln Forscher Stück für Stück die Geheimnisse dieser Händigkeit in der Natur, die nicht nur die belebte Welt betrifft: Spiegelversionen mancher Moleküle können auch chemische Reaktionen oder Materialeigenschaften verändern.“ So gibt die rechtsdrehende Form der organischen Verbindung Carvon dem Kümmel seinen charakteristischen Geschmack, die linksdrehende Form dagegen der Minze.

Rotierende Moleküle

Die Händigkeit tritt nur in einigen Molekülarten natürlich auf. „Sie lässt sich jedoch künstlich in sogenannten kreiselsymmetrischen Molekülen induzieren“, sagt Ko-Autor Alec Owens vom Center for Ultrafast Imaging (CUI). „Lässt man diese Moleküle schnell genug rotieren, verlieren sie ihre Symmetrie und bilden je nach Drehrichtung eine von zwei Spiegelformen. Über dieses Phänomen der Rotationschiralität ist bisher nur sehr wenig bekannt, da es kaum experimentell umsetzbare Verfahren gibt, sie zu erzeugen.“

Küppers Team hat nun rechnerisch einen Weg gefunden, diese rotationsinduzierte Chiralität mit realistischen Parametern im Labor zu erzeugen. Dabei kommen kornenzieherförmige Laserpulse zum Einsatz, die als optische Zentrifugen fungieren. Am Beispiel von Phosphin zeigen die quantenmechanischen Berechnungen, dass bei Drehraten von einigen Billionen Mal pro Sekunde diejenige Phosphor-Wasserstoff-Bindung, um die sich das Molekül dreht, kürzer wird als die beiden anderen Bindungen. Je nach Drehrichtung entstehen dabei zwei chirale Formen von Phosphin, sogenannte Enantiomere. „Mit einem starken statischen elektrischen Feld kann die links- oder rechtshändige Version des rotierenden Phosphins ausgewählt werden“, erläutert Yachmenev.

Diese Methode verspricht einen völlig neuen Weg in die Spiegelwelt, da sie im Prinzip auch mit anderen, schwereren Molekülen funktionieren würde. Um bei diesen eine Rotationschiralität zu induzieren, würden sogar schwächere Laserpulse und schwächere elektrische Felder genügen. Für

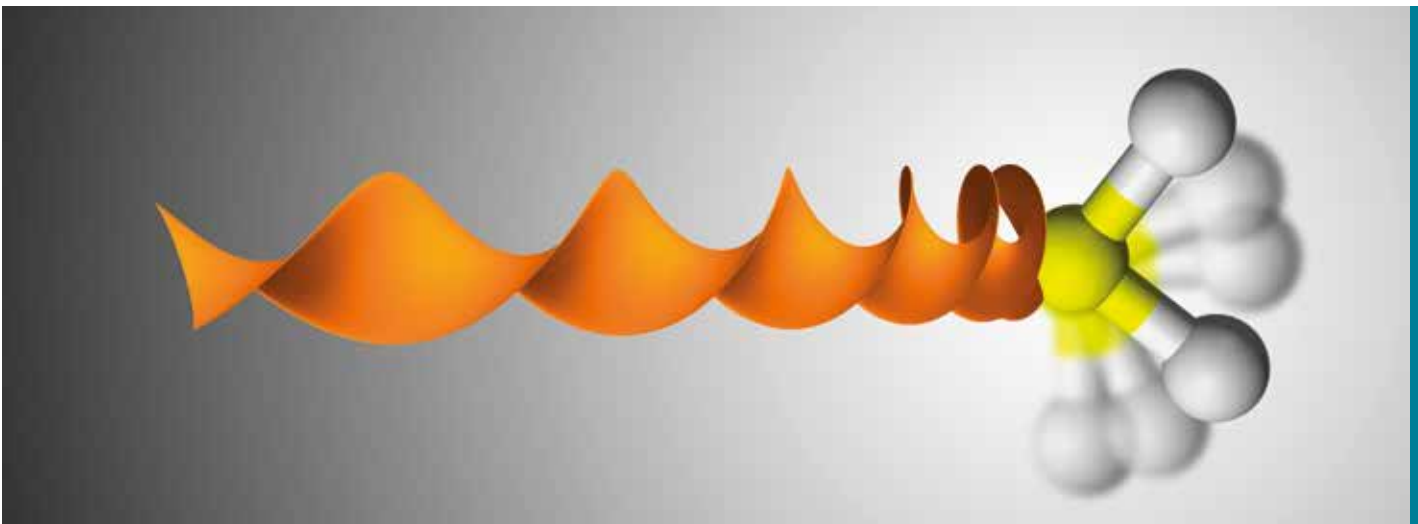
die erste Phase der Studie wählten die Forscher Phosphin, weil schwerere Moleküle zunächst noch zu komplex für die exakten quantenmechanischen Berechnungen waren. Da Phosphin sehr giftig ist, würden solche schwereren und auch langsameren Moleküle für Experimente jedoch bevorzugt werden.

Das vorgeschlagene Verfahren könnte maßgeschneiderte Spiegelmoleküle liefern. Die Untersuchung ihrer Wechselwirkungen mit der Umwelt, zum Beispiel mit polarisiertem Licht, kann helfen, die Geheimnisse der Händigkeit in der Natur weiter zu lüften und mögliche Anwendungen zu erforschen, wie Küpper betont, der auch Professor für Physik und Chemie an der Universität Hamburg ist: „Die so ermöglichte genauere Erforschung der Händigkeit kann zur Entwicklung maßgeschneiderter chiraler Moleküle und Materialien, zu neuen Materiezuständen und zu einer möglichen Nutzung der rotationsinduzierten Chiralität in neuartigen Metamaterialien oder optischen Geräten beitragen.“

Physical Review Letters, 2018;
DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.193201

„Aus unbekanntem Gründen bevorzugt das Leben, wie wir es auf der Erde kennen, fast ausschließlich linkshändige Proteine“

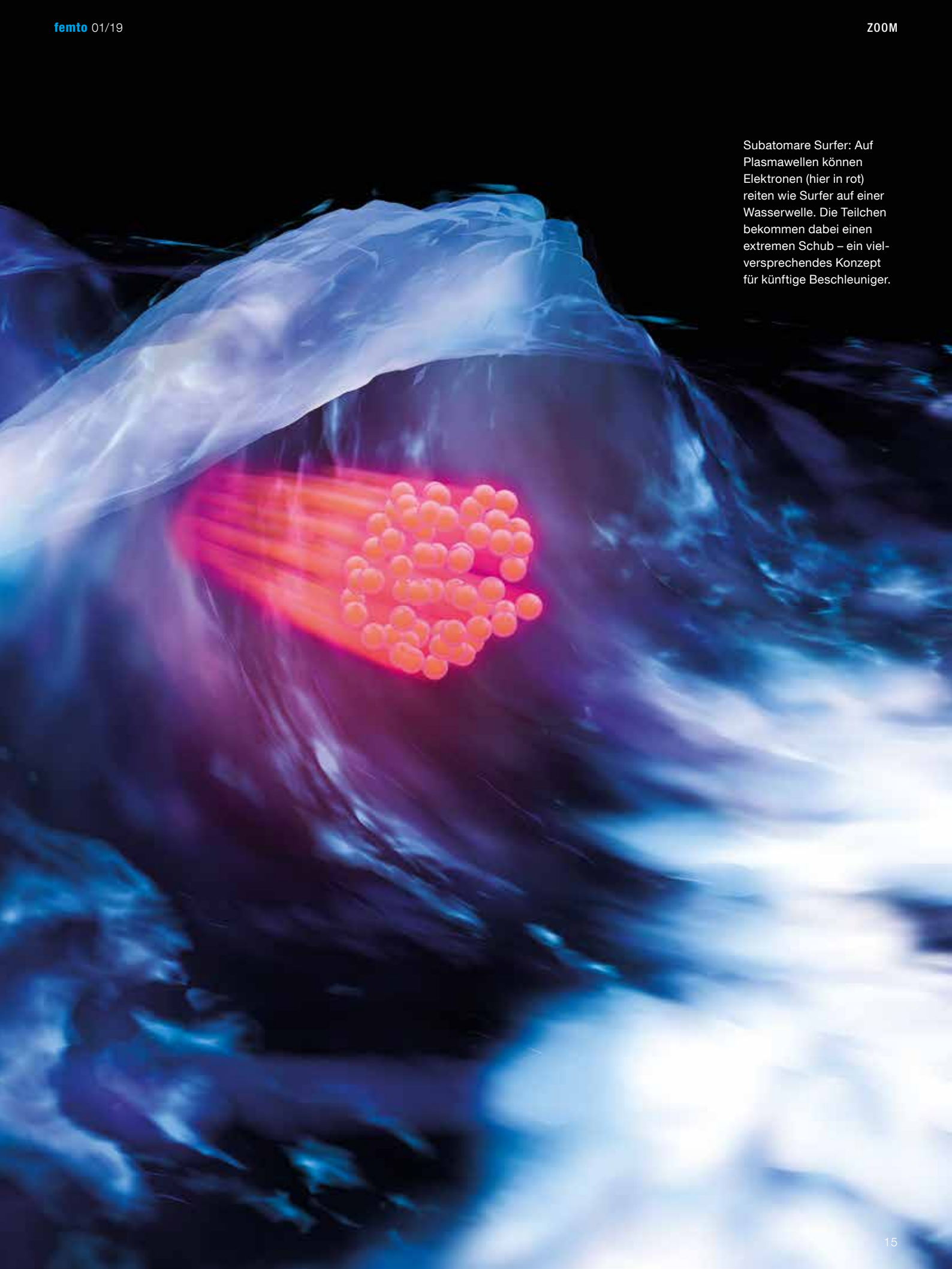
Andrey Yachmenev, CFEL



ZOOM

Die **perfekte** Welle

Teilchenbeschleuniger finden in verschiedensten Bereichen Verwendung, etwa bei der Materialbearbeitung oder der Krebsbehandlung. Auch für die Forschung sind sie ein wichtiges Werkzeug: Giganten wie der Large Hadron Collider (LHC) in Genf fahnden nach neuen Elementarteilchen, Anlagen wie der europäische Röntgenlaser European XFEL in Hamburg analysieren Materialproben bis in atomare Details. Allerdings müssen diese Anlagen mit der bisher genutzten Technik sehr groß sein, manche messen mehrere Kilometer. Deshalb versuchen Physikerinnen und Physiker in aller Welt, sie deutlich kleiner und damit billiger zu machen. Manche setzen dabei auf ultrastarke Laser, die Plasmawellen erzeugen, andere auf kurzwellige Terahertz-Strahlung – und wieder andere entwickeln sogar einen Beschleuniger, der auf einen Mikrochip passt.



Subatomare Surfer: Auf Plasmawellen können Elektronen (hier in rot) reiten wie Surfer auf einer Wasserwelle. Die Teilchen bekommen dabei einen extremen Schub – ein vielversprechendes Konzept für künftige Beschleuniger.

Mit Elektronenpaketen aus DESYs Linearbeschleuniger FLASH (rechts) erzeugt Jens Osterhoff Plasmawellen in Mini-Beschleunigerzellen.



Teilchenturbo im Kleinformat

Physiker tüfteln an Methoden für kleinere Beschleuniger

Auf dem DESY-Gelände in Hamburg ist Andreas Maier in eine Art Bunker gegangen. Von außen ein trister Betonbau, doch innen steckt er voller Hightech: Röhren aus Edelstahl, ein Kontrollraum voller Flachbildschirme und ein ultramoderner Laser. Dann streift sich Maier, Gruppenleiter an der Universität Hamburg, Kittel und Überschuhe über und setzt eine Haube auf. Der Sinn der Verkleidung: höchste Reinlichkeit. „Jedes Staubkorn auf den optischen Elementen kann Schäden verursachen“, sagt der Physiker und zeigt auf seinen

Hochleistungslaser ANGUS (A Next-Generation Ultrafast laSer), inoffiziell benannt nach dem Gitarristen Angus Young der Hardrock-Band AC/DC. Das Gerät füllt einen der Bunkerräume, besteht aus mehreren roten Boxen und erzeugt Lichtblitze, die deutlich kürzer sind als eine milliardstel Sekunde. „Seine Durchschnittsleistung liegt zwar nur bei 25 Watt, etwa soviel wie eine Glühbirne“, erklärt Maier. „Aber in den Momenten, in denen ANGUS feuert, erreichen wir enorme Strahlungsstärken, rund 200 Terawatt.“ Der Superlaser im Forschungsbunker ist ein



„Unser Ziel hier bei DESY sind 50 Gigavolt pro Meter – das 500-Fache des heutigen Spitzenwerts“

Ralph Aßmann, DESY

„Dieses Feld kann einige der Plasmaelektronen, die sich innerhalb dieser Welle befinden, enorm beschleunigen“, sagt Aßmann. „Alternativ dazu kann man unmittelbar nach dem Laserblitz auch einen Elektronenpuls in die Plasmazelle einschießen – auch er wird durch die Welle stark beschleunigt.“

Die ersten Ideen für diese Laser-Plasma-beschleunigung reichen bis Ende der 1970er Jahre zurück. An eine Umsetzung war jedoch erst zu denken, als die Kanadierin Donna Strickland und der Franzose Gérard Mourou Mitte der 1980er Jahre eine Methode entwickelten, mit der sich leistungsstarke Kurzzeitelaser bauen ließen – wofür beide 2018 mit dem Physiknobelpreis belohnt wurden. Allerdings dauerte es bis 2006, bis US-Forscher Elektronen per Laser-Plasma-beschleunigung erstmals auf eine bemerkens- >>

Kernelement einer neuen Technologie – der Plasmabeschleunigung. Bei einem konventionellen Teilchenbeschleuniger wie dem LHC am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN in Genf werden starke Radiowellen in besonders geformte Metallröhren eingeleitet, sogenannte Resonatoren. Auf den Radiowellen können die zu beschleunigenden Teilchen dann reiten wie Surfer auf einer Welle. Das Problem: Speist man zuviel Radiowellen in die Resonatoren ein, drohen elektrische Überschläge – kleine Blitze, die die Wände des Resonators schädigen würden. „Deshalb ist die Maximalspannung, mit der heutige Anlagen Teilchen beschleunigen können, auf Werte um die 50 bis 100 Megavolt pro Meter begrenzt“, erläutert Ralph Aßmann, leitender DESY-Wissenschaftler für Beschleunigerforschung. Die Folge: Um Teilchen auf höchste Energien zu bringen, muss man viele Resonatoren hintereinanderschalten – was die Beschleuniger lang werden lässt, mitunter kilometerlang.

Beschleunigung per Plasmawelle

Dagegen ließen sich per Plasmabeschleunigung deutlich höhere Spannungen erreichen. „Unser Ziel hier bei DESY sind 50 Gigavolt pro Meter – das 500-Fache des heutigen Spitzenwerts“, sagt Aßmann. Gelingt das Unterfangen, könnten Beschleuniger deutlich schrumpfen: Eine hundert Meter lange Anlage wie der DESY-Beschleuniger FLASH könnte künftig in einen gewöhnlichen Laborkeller passen.

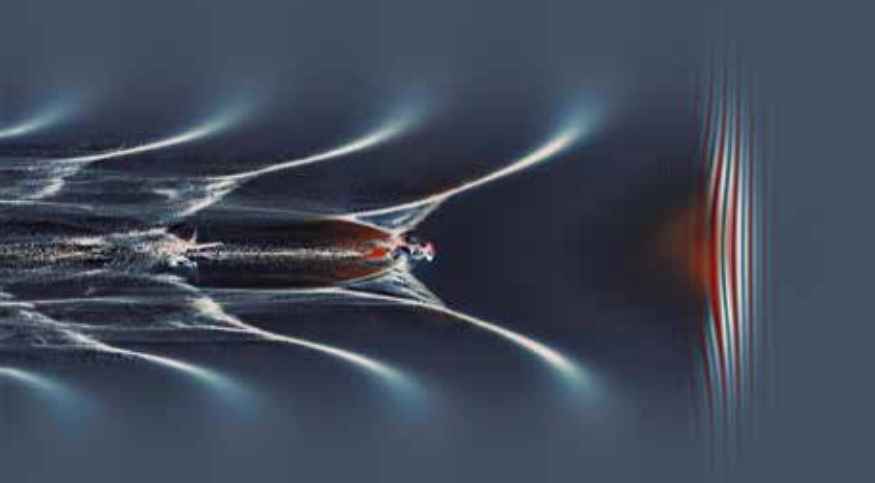
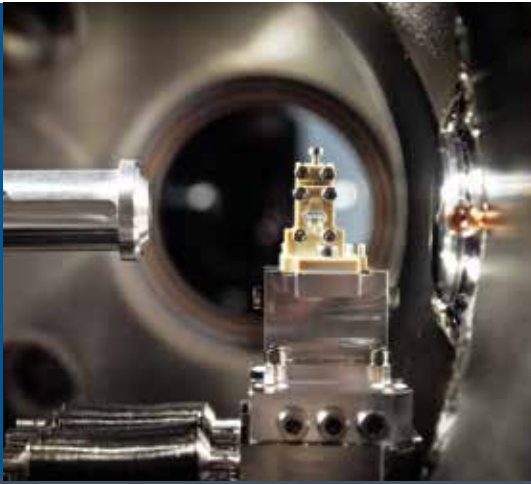
Das Prinzip der Laser-Plasmabeschleunigung: Ultrastarke, extrem kurze Laserblitze feuern in ein Plasma – eine Art Gas, beispielsweise aus Wasserstoff, das aber komplett ionisiert ist. Das heißt, die negativ geladenen Elektronen sind von den positiv geladenen Atomrümpfen, den sogenannten Ionen, getrennt. „Die Elektronen sind viel leichter als die Ionen und dadurch sehr mobil“, erklärt Aßmann. „Dagegen wollen die schweren Ionen gern an Ort und Stelle verharren.“ Schießt nun der starke Laserpuls ins Plasma, schiebt er die leichten Elektronen nach außen und erzeugt ähnlich einem Schiff eine Kielwelle.

Dadurch sammeln sich außen die negativen Ladungen, innen verbleiben die positiven – binnen kürzester Zeit entsteht eine enorme elektrische Spannung auf kleinstem Raum. Sofort schnellen die Elektronen wieder zur Mitte zurück und darüber hinaus – eine hochfrequente Schwingung von enormer Feldstärke setzt ein.



Supraleitende Resonatoren aus dem Metall Niob bringen Teilchen unter anderem in FLASH und im Röntgenlaser European XFEL auf Touren.

Mini-Beschleuniger: LUX nutzt einen 200 Terawatt starken Laser, der ultrakurze Blitze in eine dünne, gasgefüllte Kapillare schießt (rechts). Der Laser schafft fünf Blitze pro Sekunde und erzeugt starke Plasmawellen (Simulationsrechnung unten).



„Der Laserpuls schiebt die Elektronen wie ein Schneeflug zur Seite“

Andreas Maier, Universität Hamburg

werte Energie von einem Gigaelektronenvolt (GeV) bringen konnten. Mittlerweile liegt der Rekord bei 8 GeV über eine Beschleunigungsstrecke von gerade mal 20 Zentimetern – den rapiden Fortschritten der Lasertechnik sei Dank.

Wie das im Labor aussieht, ist im Bunker von Andreas Maier zu sehen. Der Physiker zeigt auf die Plasmazelle – ein kleiner Saphirkristall, in den ein winziger, nur 300 Mikrometer messender Kanal gefräst ist, gefüllt mit Wasserstoffgas. „Auf diesen Kanal zielen wir mit unseren hochintensiven Laserpulsen“, erklärt Maier. „Daraufhin wird der Wasserstoff darin zu einem Plasma, und dann schiebt der Laserpuls die Elektronen wie ein Schneeflug zur Seite.“ Die dadurch entstehende Plasmawelle lässt Elektronen dem Laserpuls hinterherjagen und bildlich gesprochen auf seiner Kielwelle surfen. Mit diesem Trick lassen sich die Teilchen auf kleinstem Raum auf Speed bringen.

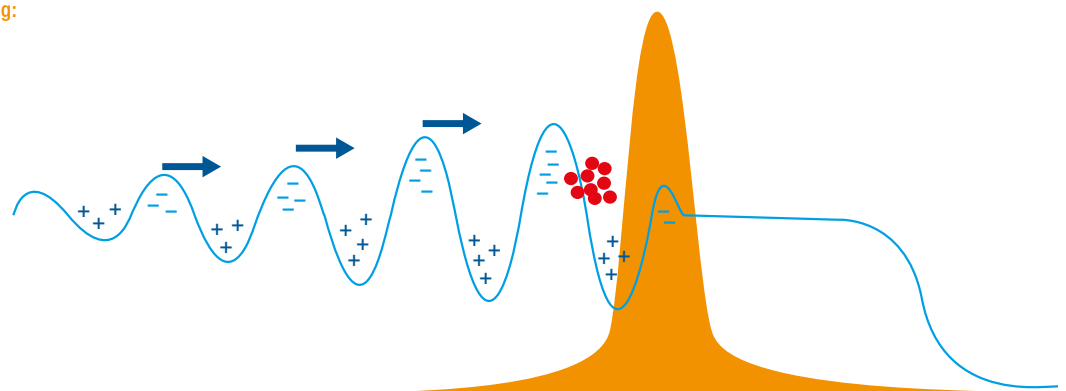
Aus Metern werden Millimeter

„2016 konnten wir Elektronen auf einer Strecke von nur vier Millimetern auf eine Energie von 400 Megaelektronenvolt bringen“, erzählt Maier. „Ein konventioneller Beschleuniger müsste dafür einige Dutzend Meter lang sein.“ Vor kurzem haben die Physiker sogar eine Art Dauerbetrieb hinbekommen und ihren Plasmabeschleuniger 24 Stunden lang durchlaufen lassen – ein Meilenstein für das Gemeinschaftsprojekt von DESY und der Universität Hamburg. Außerdem gelang es, die aus dem Plasmabeschleuniger kommenden Elektronen durch einen sogenannten Undulator zu schicken – einen Magnetparcours, der die schnellen Teilchen auf einen Slalomkurs zwingt und ihnen dadurch intensives Röntgenlicht entlockt.

Solche kompakten Röntgenquellen könnten eine der Hauptanwendungen der neuen Technologie sein, etwa für die Materialprüfung in der Industrie. „Interessant wäre das auch für die Röntgendurchleuchtung von Frachtcontainern“, »

Prinzip der Laser-Plasmabeschleunigung:

Ein starker Laserpuls (hier orange dargestellt) pflügt durch ein Gas, zum Beispiel Wasserstoff. Er entreibt den Wasserstoffmolekülen ihre Elektronen, die wie von einem Schneeflug zur Seite gefegt werden. Im Kielwasser des Blitzes sammeln sich die Elektronen (rot) und werden von der elektrisch positiv geladenen Plasmawelle beschleunigt – ähnlich wie ein Wakeboard-Surfer in der Heckwelle eines Schiffs.



Vielversprechende neue Möglichkeiten

In Forschung und Medizin eröffnen innovative Beschleunigertechniken interessante neue Anwendungen, erwartet DESYs langjähriger Beschleunigerdirektor Reinhard Brinkmann. Die etablierten Anlagen werden sie vorerst aber nicht ersetzen.

femto: Wie funktionieren die heutigen Beschleuniger bei DESY?

Reinhard Brinkmann: Heute arbeiten wir mit sogenannten Hochfrequenzresonatoren. Dabei werden elektromagnetische Wellen angelegt, die mit großen Feldstärken elektrisch geladene Teilchen beschleunigen. Das ist das Grundprinzip, das allen Beschleunigern seit vielen Jahren zugrunde liegt.

femto: Wie ausgereift ist die Technologie, wo liegen ihre Grenzen?

Reinhard Brinkmann: Da wir sie seit etlichen Jahrzehnten immer weiterentwickelt haben, lässt sich die Technologie heute als sehr ausgereift bezeichnen. Allerdings sind die maximalen Feldstärken, die man in diese Resonatoren einspeisen kann, begrenzt. Oberhalb einer gewissen Grenze bricht das Beschleunigungsfeld zusammen. Diese Grenze liegt derzeit bei etwa 100 Millionen Volt pro Meter. Ein anderer wichtiger Parameter ist die Zeitdauer, über die man das Beschleunigungsfeld aufrechterhalten kann. Die lässt sich durch eine Technologie drastisch verbessern, die wir bei DESY maßgeblich mitentwickelt haben: Wir haben die Resonatoren supraleitend gemacht. Dadurch entfallen unerwünschte Wärmeverluste in den Resonatoren. Allerdings bricht ab einer bestimmten Feldstärke die Supraleitung zusammen, so dass

auch diese Methode ihre Grenzen im maximalen Beschleunigungsfeld hat.

femto: Welche Wege gibt es, um zu noch höheren Beschleuniger-
spannungen zu kommen?

Reinhard Brinkmann: Momentan am höchsten gehandelt wird der sogenannte Plasmabeschleuniger. In ihm wird ein ionisiertes Gas etwa durch einen Laserpuls so anregt, dass das Plasma geladene Teilchen beschleunigen kann. Da es hier keine Wandlerverluste gibt, lassen sich im Prinzip beliebig hohe Beschleunigungsspannungen erreichen. Der Nachteil: Die Strecken, über die die Beschleunigung läuft, sind sehr kurz, typischerweise weniger als ein Zentimeter. Um auf eine hohe Gesamtspannung zu kommen, müsste man also viele dieser Strukturen zusammenschalten. Ein weiteres Problem: Bisher lassen sich damit viel weniger Teilchen beschleunigen als mit konventionellen Anlagen. Interessant sind aber auch Ansätze, bei denen man Teilchen mit Terahertz-Wellen beschleunigt – oder der „Beschleuniger auf dem Chip“, bei dem Teilchen direkt durch einen Laser auf Trab gebracht werden.

femto: Wo könnten die Anwendungen für solche neuen Beschleunigertechnologien liegen?

Reinhard Brinkmann: Ich denke nicht, dass die jetzigen Beschleuniger wie der supraleitende European XFEL hier in Hamburg durch diese neuen Technologien ersetzt werden – zumindest nicht in den nächsten 20 Jahren. Aber ich glaube, dass man sehr kompakte Beschleuniger bauen kann, die Strahlen von hoher Qualität erzeugen. Damit ließen sich zum Beispiel kostengünstige

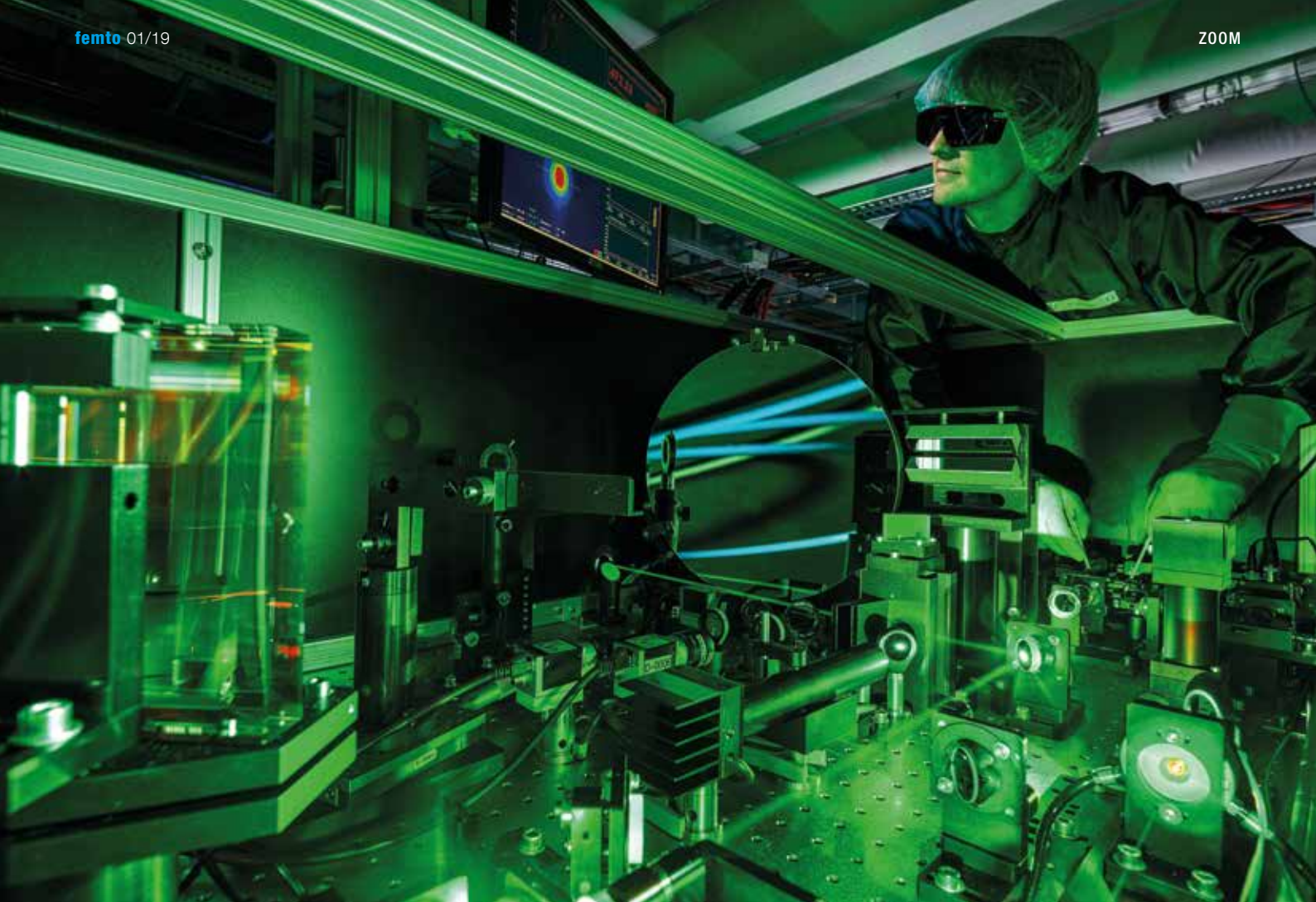


Reinhard Brinkmann, DESY

Röntgenquellen herstellen, die als Forschungswerkzeuge in Universitäten dienen können oder für die Strahlentherapie in Kliniken. Besonders spannend finde ich auch Ideen, wie man neue Technologien mit etablierten Konzepten kombinieren kann, um bestimmte Strahleigenschaften zu ermöglichen. In genau diese Richtungen zielen auch unsere Forschungsprogramme hier bei DESY.

femto: Und ein Superbeschleuniger für die Teilchenphysik? Ist der auf der Basis eines Plasmabeschleunigers denkbar?

Reinhard Brinkmann: Es gibt durchaus Experten, die darüber nachdenken, wie so eine Anlage aussehen könnte. Das ist aber noch Zukunftsmusik. Denn dafür müsste man viele Plasmabeschleuniger hintereinanderschalten und miteinander synchronisieren, was allein schon eine große Herausforderung ist. Selbst wenn das gelingt, wäre es ein großes Problem, eine hohe Strahlintensität zu erreichen, also ausreichend viele Teilchen zu beschleunigen. Beschleuniger für die Teilchenphysik müssen für die Experimente eine hohe Strahlintensität liefern, sonst würden sie nicht genug Teilchenkollisionen und damit Messdaten produzieren. Ob man das mit einem Plasmabeschleuniger schafft, ist aus meiner Sicht eine große Frage.



Der 200 Terawatt starke Speziallaser ANGUS erzeugt ultrakurze Blitze. Die Laserpulse dauern nur 30 billionstel Sekunden (30 Femtosekunden). Sie sind 0,01 Millimeter lang und 0,035 Millimeter hoch, ähneln also schmalen Scheiben. ANGUS liefert fünf dieser Blitze pro Sekunde.

sagt Ralph Aßmann. „Das wird heute mit konventionellen Beschleunigern gemacht, etwa im Hamburger Hafen.“ Bislang sind die Anlagen stationär, die Lkw müssen mit ihrer Ladung unter einer brückenartigen Konstruktion hindurchfahren. Auf der Basis von Plasmabeschleunigern könnte man die Anlagen kleiner bauen und womöglich sogar mobil auslegen – der Scanner käme zum Container statt wie bisher die Fracht zum Scanner. Solche mobilen und zugleich leistungsfähigen Röntgenquellen könnten auch für die Inspektion von Straßenbrücken taugen – ein durchaus drängendes Thema.

Ein weiteres potenzielles Einsatzfeld: die Medizin. Hier könnten Geräte auf Plasmabasis nicht nur herkömmliche Röntgenquellen ersetzen, sondern neue Diagnosemöglichkeiten eröffnen – etwa die sogenannte Röntgenfluoreszenz. Die Idee dahinter: Winzige Nanopartikel aus Gold werden mit biochemischen Methoden mit Antikörpern gespickt. „Eine Lösung mit diesen Nanopartikeln würde man einem Patienten injizie-

ren“, erläutert Florian Grüner, Physikprofessor an der Universität Hamburg. „Die Partikel wandern durch den Körper, wobei die Antikörper an eventuell vorhandenen Tumoren andocken.“ Scannt man die entsprechende Körperregion des Patienten dann mit einem haarfeinen Röntgenstrahl ab, fluoreszieren die Goldteilchen und senden charakteristische Röntgensignale aus, aufgenommen von einem speziellen Detektor. Dadurch könnte man – so die Hoffnung – kleinste Tumore aufspüren, die sich mit heutigen Methoden nicht finden lassen.

„Bei Brustkrebs werden Tumore häufig erst erkannt, wenn sie bereits größer als ein Zentimeter sind“, erläutert Grüner. „Unsere Methode hat das Potenzial, millimetergroße Tumoren zu entdecken, was die Heilungschancen stark erhöhen würde.“ Ein weiteres Anwendungsfeld der Methode könnte in der Medikamentenentwicklung liegen. Hier würde man die Nanoteilchen an neue potenzielle Wirkstoffe anhängen und anschließend per Röntgenfluoreszenz verfolgen,

wie sich das Medikament im Körper verteilt und ob es den gewünschten Wirkort erreicht. Dadurch ließen sich – so die Hoffnung – frühzeitiger als bislang aussichtsreiche von wirkungslosen Wirkstoffkandidaten unterscheiden.

Zwar ist die Idee der Röntgenfluoreszenz über 30 Jahre alt, ließ sich bislang aber beim Menschen nicht umsetzen. Der Grund: Die Röntgenstrahlung wird im Inneren des Körpers gestreut. Das führt zu einem störenden Untergrund, aus dem sich die eigentlichen Signale nur schwierig herauslesen lassen. „In dieses Thema hat sich mein Team eingegraben, und nun haben wir als erste Gruppe auf der Welt experimentell gezeigt, wie man dieses Problem lösen kann“, sagt Grüner. Dabei bestimmt ein Computer-Algorithmus aus der räumlichen Verteilung der gemessenen Röntgenspektren genau die Bereiche, deren Signale in der Summe besonders wenig Störuntergrund enthalten.

Einsatz für die Medizin

Erste Demonstrationsexperimente gelangen dem Team an einem etablierten Beschleuniger, DESYs kilometergroßer Röntgenlichtquelle PETRA III. Für den späteren Einsatz in einer Klinik setzen Grüner und seine Leute auf den Plasmabeschleuniger. Dieser wäre kompakt genug und sollte jene haarfeinen Röntgenstrahlen liefern können, die man für die neue Methode braucht. Hier allerdings besteht noch Forschungsbedarf: „Die Elektronenstrahlen aus einem Plasmabeschleuniger sind noch nicht so scharf gebündelt, wie es nötig wäre“, erläutert Grüner. Hinzu kommt: Die Prototypen laufen zu unstabil und schaffen nicht genug „Schüsse“: Die heutigen Laser, die die Plasmabeschleunigung treiben, liefern nur wenige Lichtblitze pro Sekunde. Wünschenswert wären Abertausende – ansonsten würden die Bildaufnahmen im klinischen Einsatz viel zu lange dauern.

„Die Qualität der Strahlen verbessert sich stetig, und heute ist man nah dran, nutzbare Plasmabeschleuniger zu bauen“, sagt Ralph Aßmann. „Aber an die Strahlqualität von konventionellen Beschleunigern reicht sie noch nicht heran, unter anderem haben die Elektronen aus den Prototypen eine recht unterschiedliche Energie.“ Um die Probleme zu lösen und die Technik voranzutreiben, schaffen Aßmann und seine Leute derzeit eine neue Forschungsinfrastruktur – die Mehrzweckanlage SINBAD (Short Innovative Bunches and Accelerators at DESY). „Hier werden wir verschiedene Ansätze für künftige Beschleunigertechnologie systematisch entwickeln und testen können“, sagt Aßmann.

Eingebaut wird SINBAD quasi an historischer Stelle – in der Halle von DORIS, dem 1974 fertiggestellten ersten Speicherring bei DESY, der inzwischen nicht mehr in Betrieb ist und abgebaut wurde. SINBAD-Projektleiter Ulrich Dorda geht in eines von insgesamt vier Tunnelsegmenten, zusammen ergeben sie einen Ringtunnel von der Form einer Rennbahn. Der weitgehend leere Tunnel füllt sich in diesen Tagen, eine erste SINBAD-Kernkomponente ist hinter den meterdicken Betonwänden schon fast fertig. Dorda zeigt auf einen Aufbau aus Edelstahlkammern und Vakuumröhren, die durch eine Abfolge aus zylindrischen, blau lackierten Magneten führen. „Das ist unser ARES-Beschleuniger“, erklärt der Physiker. „Er erzeugt ultrakurze, scharf definierte und sehr stabile Elektronenpakete.“ Diese Pakete wird man später nutzen, um sie per Laser möglichst effektiv weiterzubeschleunigen und dadurch die neue Technik gründlich zu testen.

Dazu wird in der Mitte der Halle ein neues Hochleistungslaserlabor entstehen, finanziert als Teil des ATHENA-Projekts – ein Gemeinschaftsprojekt von insgesamt sechs Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft. Neben DESY sind das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, das Karlsruher Institut für Technologie KIT, das Helmholtz-Zentrum Berlin HZB, das >>



„Unsere Methode hat das Potenzial, millimetergroße Tumoren zu entdecken, was die Heilungschancen stark erhöhen würde“

Florian Grüner, Universität Hamburg



Neue Beschleunigertechnologien

Bei DESY entsteht in internationaler Zusammenarbeit eine dedizierte Anlage für die Entwicklung neuer Beschleunigertechnologien: SINBAD (Short Innovative Bunches and Accelerators at DESY). Das ARES-Experiment (Accelerator Research Experiment at SINBAD) befindet sich im Aufbau. Daran sollen Beschleunigungsphysik und Technologie erprobt und zukünftige Beschleunigerkonzepte getestet werden. Ziel ist es, praxistaugliche Teilchenbeschleuniger zu entwickeln, die durch ihre kurzen Teilchenpulse und ihre kompakte Größe sowohl ökonomische Vorteile erzielen als auch neue Einsatzgebiete in Wissenschaft, Medizin und Gesellschaft erschließen.

Forschungszentrum Jülich FZJ und das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf HZDR beteiligt. Dorda zeigt auf eine noch leere Stelle im Tunnel. „Hier wird einmal die Plasmazelle stehen“, beschreibt er. „In das Plasma feuert der jetzt noch an anderer Stelle aufgebaute ANGUS-Laser Lichtblitze und erzeugt eine Art Blase. In diese Blase schießen wir dann mit dem richtigen Timing den Elektronenstrahl aus dem ARES-Beschleuniger hinein.“

Neue Beschleunigerkonzepte

Auch andere Tunnelsegmente von SINBAD sind schon verplant: In einem soll das Laser-Plasmaexperiment von Andreas Maier Platz finden, das

derzeit noch in dem beengten Forschungsbunker steckt. Ein anderes wird den von DESY-Forscher Franz Kärtner geleiteten experimentellen Teilchenbeschleuniger AXSIS aufnehmen, der durch die Verwendung sogenannter Terahertz-Strahlung mit deutlich kürzerer Wellenlänge deutlich kleinere Beschleunigerkomponenten möglich machen soll.

„Ein wesentliches Ziel von SINBAD ist zu zeigen, dass man mit einem Plasmabeschleuniger einen Freie-Elektronen-Laser betreiben kann“, betont Ralph Aßmann. „Das ist der Heilige Gral, nach dem Forscher auf unserem Feld suchen.“ Freie-Elektronen-Laser (FEL) sind die hellsten Röntgenquellen der Welt. Ihr Prinzip: Ein Beschleuniger schießt nahezu lichtschnelle, scharf gebündelte Elektronenpakete so durch einen Undulator, dass sie hochintensive Röntgenblitze von sich geben. Auf Basis der derzeitigen Technologie braucht man dafür lange Anlagen – der Beschleuniger des Röntgenlasers European XFEL in Hamburg misst stattliche 1,7 Kilometer. Ließe sich der konventionelle Beschleuniger durch eine Plasmavariante ersetzen, wären deutlich kompaktere und damit preisgünstigere FEL denkbar.

In diese Richtung zielt das europäische Projekt EuPRAXIA, das von DESY koordiniert wird. Beteiligt sind 40 Institute aus zwölf Ländern, neben diversen europäischen Staaten machen Japan, Israel, Russland, China und die USA mit. „Wir wollen herausfinden, wie man einen Plasmabeschleuniger bauen kann, der Elektronen auf eine Energie von 5 GeV bringt und per Undulator Röntgenstrahlung erzeugt“, erläutert Aßmann. „Diverse Pilotnutzer sollen die Technik dann erproben.“ Eine der Herausforderungen: ein Laser, der pro Sekunde 100 Lichtblitze mit einer Leistung von je einem Petawatt liefert. Im Herbst 2019 soll eine Designstudie fertig sein. Um das Jahr 2025 könnte der europäische Plasma-FEL seinen Betrieb aufnehmen – womöglich in Hamburg, hofft Aßmann.

Doch es gibt noch eine andere Variante der Plasmabeschleunigung. Hier dienen nicht starke Laserblitze als Treiber, sondern intensive Teilchenpakete. „Wir bündeln nahezu lichtschnelle Elektronenpakete auf einen Brennpunkt, ähnlich wie man Licht mit einer Linse bündelt“, erläutert DESY-Physiker Jens Osterhoff, Leiter des FLASHForward-Projekts. „Dann schicken wir die Teilchenpakete in eine Plasmazelle.“ Diese Zelle besitzt einen 1,5 Millimeter schmalen und drei Zentimeter langen Kanal, gefüllt mit Argon oder Helium. Ähnlich wie in einer Leuchtstoffröhre ionisiert eine Hochspannungsentladung die Gasatome – und zündet damit ein Plasma.

Rast nun der Teilchenpulk in die Zelle, schiebt er die Elektronen im Plasma zur Seite. Hinter ihm, quasi in seiner Kielwelle, befinden sich keine Elektronen mehr, nur noch positiv geladenen Ionen. Dadurch baut sich ein starkes elektrisches Wechselfeld auf – eine Plasmawelle. „Schickt man nun ein zweites Elektronenpaket hinterher, kann es auf dieser Welle surfen und enorm beschleunigen“, erläutert Osterhoff. Das Konzept basiert also auf zwei dicht aufeinanderfolgenden Elektronenpaketen: Erst kommt der Treiberstrahl, er deponiert Energie im Plasma. Dann folgt der beschleunigende Strahl, er zapft das Plasma an und gewinnt an Energie.

Schneller mit FLASHForward

2018 konnten Osterhoff und sein Team einen wichtigen Schritt der strahlgetriebenen Plasmabeschleunigung erstmals in Europa demonstrieren: Sie schickten die schnellen Elektronenpulse aus dem DESY-Beschleuniger FLASH in eine Plasmazelle und erreichten eine Beschleunigungsfeldstärke von 12 Gigavolt pro Meter – 500 Mal mehr als bei konventionellen Anlagen.

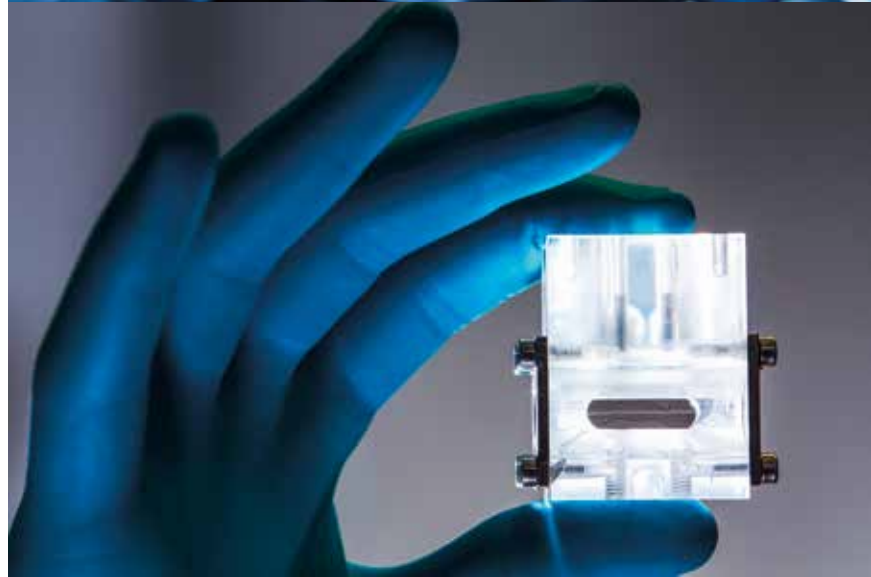
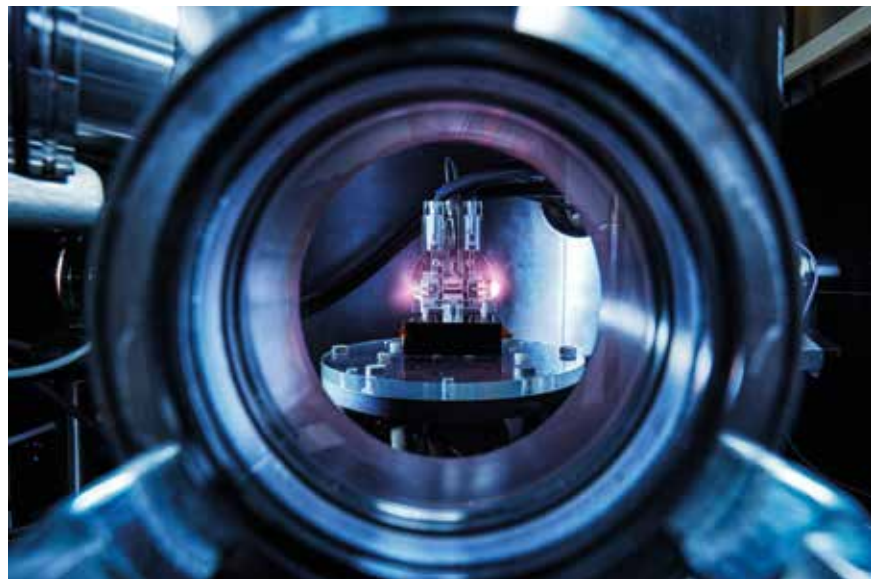
Gegenüber der lasergetriebenen Methode hat der Ansatz zwei Vorteile: „Die Teilchen lassen sich über längere Strecken beschleunigen, dadurch ist es einfacher, zu hohen Energien zu kommen“, sagt Osterhoff. „Und da man pro Sekunde deutlich mehr Elektronen beschleunigen kann, lassen sich hohe Strahlintensitäten erreichen – wichtig etwa für die Teilchenphysik.“ Mit Teilchenstrahlen nämlich sind Dauerleistungen im Megawatt-Bereich machbar. Laser dagegen schaffen derzeit kaum mehr als 100 Watt – nicht mehr als eine starke Glühbirne.

Allerdings benötigt die Methode einen konventionellen Beschleuniger als Treiber. Kompakte Anlagen wie beim Laserverfahren sind deshalb eher schwer vorstellbar. So gesehen scheinen beide Konzepte komplementär: Anlagen, die im Laborkeller Platz finden sollen, dürften auf dem Laser basieren. Für Beschleuniger, die hohe Energien und Strahlintensitäten liefern sollen, scheint der teilchengetriebene Ansatz überlegen.

Und wie könnte ein künftiger Beschleuniger für die Teilchenphysik aussehen? „Ein 500 Meter langer konventioneller Beschleuniger liefert Elektronenpakete von hoher Leistung und einer Energie von etwa einem GeV“, beschreibt Osterhoff. „Eine Plasmazelle fügt den Elektronen eine Energie von 10 GeV hinzu.“ Könnte man dann 50 dieser Zellen hintereinanderschalten, käme eine Gesamtenergie von 500 GeV heraus. Mit der heutigen Technik wäre dazu ein 15 Kilometer langer Beschleuniger nötig. Mit der Plasmatechnologie >>

„Im nächsten Schritt müssen wir zeigen, dass wir die Strahlqualität erhalten und die Teilchen wirklich effizient beschleunigen können“

Jens Osterhoff, DESY



Die Plasmazelle von FLASHforward besteht aus zwei Saphirblöcken, in die mit einem Laser jeweils eine halbrunde Kerbe gefräst wurde. Beide sind so zusammengesetzt, dass ein mehrere Zentimeter langer, kreisrunder Hohlraum entsteht, der nicht viel breiter ist als ein menschliches Haar. Dieser Hohlraum wird dann mit Wasserstoff gefüllt, aus dem das Plasma erzeugt wird.

„Mit PITZ konnten wir an Elektronenstrahlen erstmals nachweisen, dass es diese Selbstmodulation wirklich gibt“

Frank Stephan, DESY

wäre es im Prinzip mit einem Kilometer getan. Doch bevor man ernsthaft über diese Vision nachdenken kann, muss die Fachwelt noch diverse Grundlagen schaffen. „Im nächsten Schritt müssen wir zeigen, dass wir die Strahlqualität erhalten und die Teilchen wirklich effizient beschleunigen können“, sagt Jens Osterhoff. „Wir wollen demonstrieren, dass man den Großteil der Energie aus einem Treiberstrahl in die Plasmawelle stecken und anschließend in den zu beschleunigenden Strahl übertragen kann. Das wäre ein Meilenstein.“ Eine weitere Frage: Wie gut lassen sich mehrere Plasmazellen kaskadieren, also hintereinanderschalten? Für die Laser-Plasmabeschleunigung konnten das US-Forscher zumindest ansatzweise bereits zeigen. Für die teilchengetriebene Variante steht die Demonstration noch aus.

Unterstützung für die Entwicklung der teilchengetriebenen Plasmabeschleunigung kommt vom DESY-Standort Zeuthen nahe Berlin. Dort steht die Photo Injector Test Facility in Zeuthen, kurz PITZ. „Mit diesem Teststand optimieren wir zum einen Komponenten für vorhandene DESY-Beschleuniger wie FLASH und den European XFEL“, beschreibt PITZ-Leiter Frank Stephan. „Zusammen mit anderen machen wir Grundlagenexperimente für das Zukunftskonzept der Plasmabeschleunigung.“

Maßgeschneiderte Elektronenpakete

Dank eines ausgefeilten Lasersystems kann PITZ Elektronenpakete präzise maßschneidern. „Wir haben ein speziell geformtes Elektronenpaket als Treiberpuls in eine Plasmazelle geschickt“, beschreibt Stephan. „Es war ein kleiner Puls, direkt gefolgt von einem linear ansteigenden größeren Puls.“ Das Resultat: Ähnlich einem Schiff, das zwar leicht durchs Wasser gleitet, aber zugleich eine hohe Kielwelle erzeugt, konnte dieser maßgeschneiderte Treiberpuls wenig Energie verlieren, aber gleichzeitig eine hohe Plasmawelle generieren – und dadurch einen nachfolgenden Testpuls höchst effektiv beschleunigen. Im Prinzip ließe sich dadurch die Länge des Vorbeschleunigers einer künftigen Plasmaanlage deutlich verringern.

Bild: ZAB GmbH, Tilm Buddé



Die Anlage PITZ kann maßgeschneiderte Elektronenpakete erzeugen.



Im Experiment AWAKE am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf haben Forscher erstmals Plasma-beschleunigung mit Protonenstrahlen demonstriert.

Ein weiteres PITZ-Experiment ist für eine andere Variante der teilchengetriebenen Plasmabeschleunigung relevant, bei der Protonen, also die Kerne von Wasserstoffatomen, als Treiberstrahlen Verwendung finden. Das Problem: „Die Protonenstrahlen, die aus einem konventionellen Vorbeschleuniger kommen, sind mit einer Länge von zehn Zentimetern viel zu lang, um in einer Plasmazelle hohe Beschleunigungsfelder zu generieren“, erläutert Frank Stephan. „Man muss sie also in kleinere Pakete aufspalten, was sich mit der sogenannten Selbstmodulation machen lässt.“

Das Prinzip: Das lange Teilchenpaket passiert ein Plasma, so dass sich an seiner Vorderseite eine Plasmawelle ausbildet. Die dabei entstehenden elektromagnetischen Felder organisieren die Teilchen dann in mehrere kurze Pakete um. „Computersimulationen haben zwar nahegelegt, dass das funktionieren sollte“, sagt Stephan. „Aber mit PITZ konnten wir an Elektronenstrahlen nun erstmals nachweisen, dass es die Selbstmodulation wirklich gibt.“ Konkret beobachteten die Forscher, dass sich ein langes Elektronenpaket in drei kleinere Pulse aufspaltete. Die Messungen sind für ein weltweit einzigartiges Experiment relevant: Bei AWAKE am CERN gelang es einem Forscherteam im Mai 2018, Elektronen mit Hilfe eines Protonenstrahls zu beschleunigen.

Der Vorteil: „Protonen sind deutlich schwerer als Elektronen und lassen sich deshalb auf viel höhere Energien beschleunigen“, sagt Matthew Wing, Physikprofessor am University College London und Gastwissenschaftler bei DESY. „Durch können sie viel tiefer in ein Plasma eindringen.“ Die Folge: Man könnte sehr lange Plasmazellen bauen, die Elektronen in nur einer einzigen Stufe auf enorme Energien befördern. Beim Pionierexperiment im Mai war die Plasmazelle rund zehn Meter lang und brachte die Elektro-

nen, die mit einer Energie von 20 MeV in die Zelle hineinfliegen, auf den hundertfachen Wert – auf zwei GeV.

„Die größte Herausforderung war, drei verschiedene Strahlen aufeinander abzustimmen“, erklärt Wing. „Einen Laserstrahl, der das Plasma erzeugt, den Treiberstrahl aus Protonen sowie den zu beschleunigenden Elektronenstrahl.“ Als Quelle für die schnellen Protonen diente dabei der Großbeschleuniger SPS – ein Ring mit einem Durchmesser von sieben Kilometern, der ansonsten als Vorbeschleuniger für den LHC fungiert. In den nächsten Jahren werden die Fachleute versu-

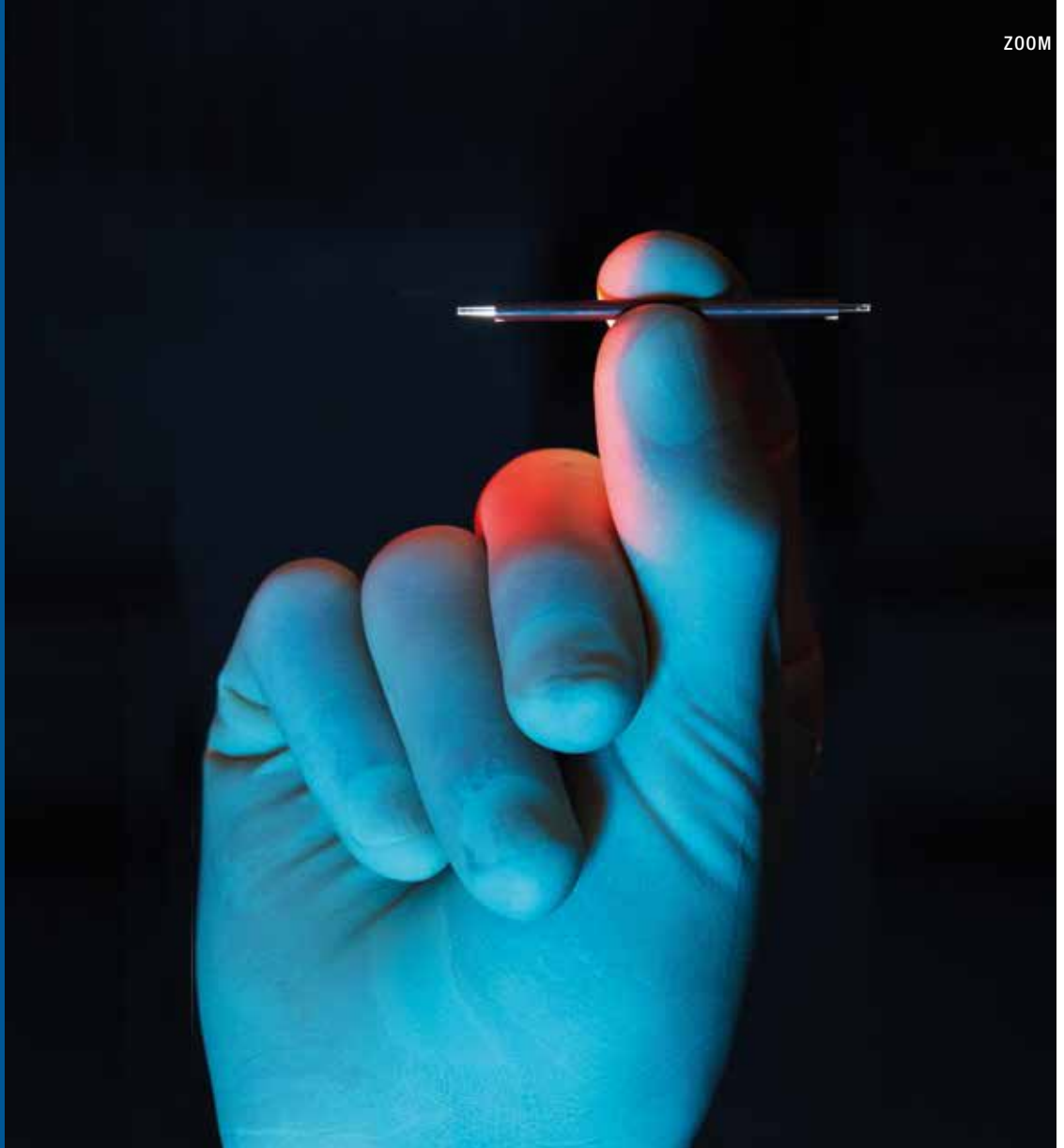
„Die Qualität der Strahlen verbessert sich stetig, und heute ist man nah dran, nutzbare Plasmabeschleuniger zu bauen“

Ralph Abmann, DESY

chen, ihre Verfahren zu optimieren – in der Hoffnung, bis 2025 zeigen zu können, dass das Prinzip als potenter Elektronenbeschleuniger taugt.

„So eine Anlage wäre vor allem für die Teilchenphysik interessant“, meint Wing. Denkbar ist ein Beschleuniger, der nach der ominösen dunklen Materie sucht – oder ein LHC-Nachfolger, bei dem hochenergetische Protonen mit schnellen, per Plasmabeschleuniger erzeugten Elektronen kollidieren. Klar scheint: Kompakt wäre eine solche protonengetriebene Anlage wohl kaum. Der Grund: „Schließlich benötigt man hochenergetische Protonen“, erklärt Matthew Wing. „Um sie zu erzeugen, dürfte es auch in Zukunft ziemlich große Vorbeschleuniger brauchen.“

Terahertz-Beschleunigermodule passen problemlos zwischen zwei Finger.



Der Terahertz-Trick

Kurze Wellenlänge verspricht hundertmal kleinere Beschleuniger

Franz Kärtner hält ein unscheinbares Kupferröhrchen hoch. Es hat den Durchmesser einer Kugelschreibermine, ist aber deutlich kürzer. „Hier sehen Sie eine der Kernkomponenten unseres Terahertz-Beschleunigers“, erklärt der Physiker vom Center for Free-Electron Laser Science (CFEL), einer Gemeinschaftseinrichtung von DESY, der Universität Hamburg und der Max-Planck-Gesellschaft. Kärtners Ziel: ein Beschleuniger, der deutlich kürzer ist als die heutigen Anlagen, aber Elektronen genauso viel Dampf machen kann.

Bei konventionellen Beschleunigern werden die Teilchen mit Hilfe von Radiowellen auf Trab

gebracht. Deren Wellenlängen liegen im Bereich von zehn Zentimetern. „Bei unserem Konzept gehen wir zu deutlich kürzeren Wellenlängen“, sagt Kärtner, leitender Wissenschaftler bei DESY. „Statt zehn Zentimeter nehmen wir einen Millimeter, also hundertmal weniger.“ Mit dieser sogenannten Terahertz-Strahlung lassen sich Teilchen effizienter beschleunigen. Auf derselben Strecke kann man ihnen deutlich mehr Energie mit auf den Weg geben – so das Kalkül.

Allerdings ist es nicht einfach, ausreichend starke Terahertz-Strahlung zu erzeugen. Das geschieht in Kärtners Labor auf einem wuchtigen, schwingungsgedämpften Tisch. Darauf ist ein



„Statt zehn Zentimeter nehmen wir einen Millimeter, also hundertmal weniger“

Franz Kärtner, DESY

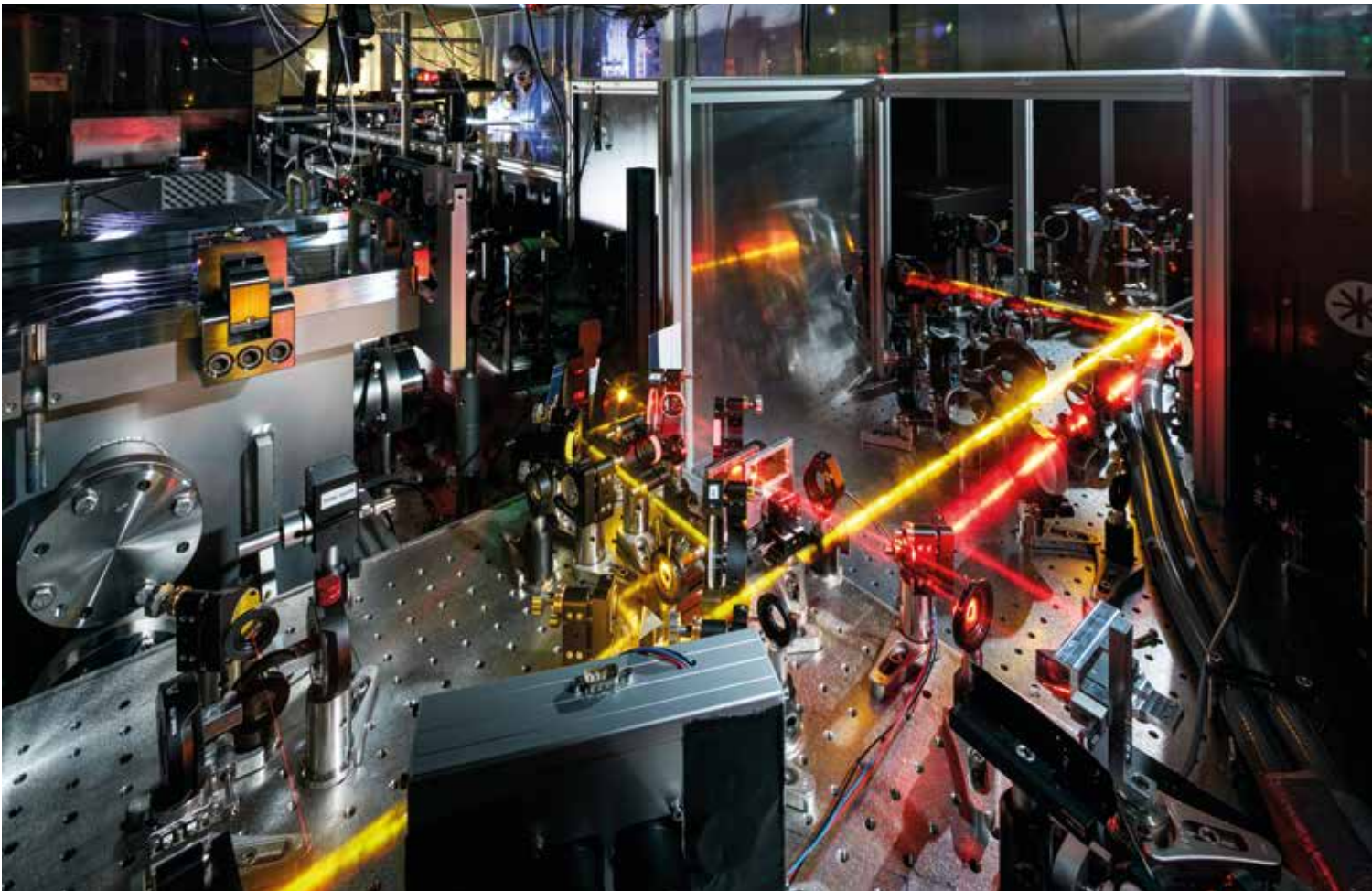
Laser montiert, der starke Lichtblitze auf einen kleinen Kristall feuert. Dessen Kristallgitter gerät daraufhin derart in Wallung, dass es Terahertz-Wellen aussendet. Ein Parabolspiegel fängt sie auf, um sie auf jenen kleinen Kupferstift zu konzentrieren – den eigentlichen Beschleuniger. In seinem Inneren steckt ein weiteres, noch kleineres Röhrchen aus Quarz. Genau hier geben die eingespeisten Terahertz-Wellen einem Pulk von Elektronen, den die Forscher durch das Röhrchen lenken, einen gehörigen Schub.

2015 brachten die CFEL-Fachleute ihren Prototyp erstmals zum Laufen. Damals erreichten sie eine Beschleunigungsspannung von fünf Megavolt pro Meter – nur etwa ein Fünftel der Beschleunigungsrohren beim Röntgenlaser European XFEL. Aber die Machbarkeit war damit bewiesen. Mittlerweile kann die Arbeitsgruppe deutlich stärkere Terahertz-Wellen aus ihrer

Anlage herauskitzeln und schafft eine Beschleunigungsspannung von bis zu 70 Megavolt pro Meter – das Dreifache der European-XFEL-Röhren.

Fast lichtschnelle Elektronen

Derzeit bauen Franz Kärtner und sein Team bei DESY ein größeres Experiment namens AXISIS auf, das durch einen sogenannten Synergy Grant vom Europäischen Forschungsrat ERC finanziert wird. >>



Laser verschiedener Wellenlängen spielen für neue Beschleunigertechnologien eine zentrale Rolle. Mit ihnen lassen sich unter anderem die schwer zu erzeugenden Terahertz-Wellen generieren.

„Im Prinzip könnte man einen 100 Meter langen Beschleuniger bis auf einen Meter schrumpfen“

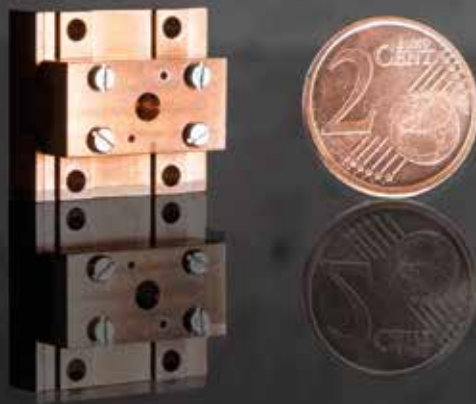
Franz Kärtner, DESY

„Hier wollen wir erstmals eine Röntgenquelle auf der Grundlage der Terahertz-Technologie realisieren“, erzählt der Physiker.

Der Plan: Eine Terahertz-basierte Elektronenkanone bringt die Teilchen auf eine Energie von knapp einem Megaelektronenvolt (MeV). Damit sind die Elektronen nahezu lichtschnell, was ihre Einkopplung in den Hauptbeschleuniger, den kleinen Kupferstift, erleichtert. Dieser soll – getrieben von 1000 ultrastarken Lichtblitzen pro Sekunde – die Teilchen um das Zwanzigfache ihrer Energie beschleunigen, auf 20 MeV. Diesen rasanten Elektronenpulk wollen die Forscher dann auf einen „optischen Undulator“ zulaufen lassen – ein Laserstrahl, der die Elektronen auf ihrer Flugbahn gezielt schlingern lässt und so zum Aussenden intensiver Röntgenstrahlung zwingt.

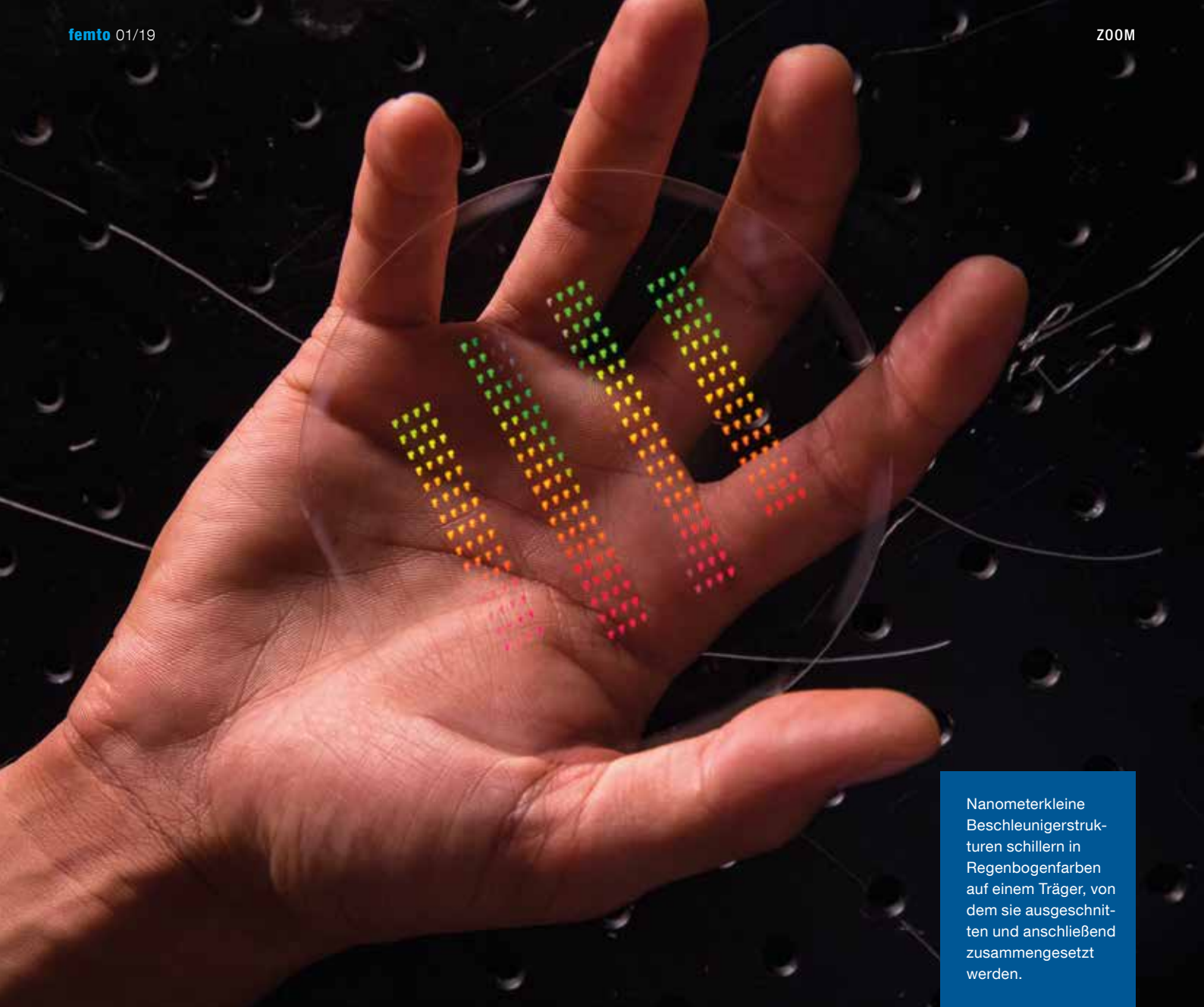
Der Laser scheint aber nicht die einzige Möglichkeit, Terahertz-Wellen für künftige Beschleuniger zu erzeugen. Das könnte auch durch sogenannte Gyrotrons passieren – in ihnen rasen schnelle Elektronen auf schraubenförmigen Bahnen durch ein Magnetfeld und geben dabei hochfrequente Strahlung ab. Für gewöhnlich fungieren solche Gyrotrons als eine Art Mikrowellenheizung für Kernfusionsexperimente wie den Internationalen Testreaktor ITER im südfranzösischen Cadarache. Kärtner und seine Kollegen wollen in den kommenden Jahren herausfinden, ob Gyrotrons sich auch als Treiber für ihren Beschleuniger eignen. „Womöglich lassen sich Terahertz-Wellen mit einem Gyrotron viel effizienter herstellen als per Laser“, sagt Kärtner. „Im Prinzip müsste man Beschleunigungsspannungen von 300 Megavolt pro Meter schaffen. Dann könnte man einen 100 Meter langen Beschleuniger bis auf einen Meter schrumpfen.“

Damit wären ultrakompakte Röntgenlaser denkbar, die in rascher Folge hochpräzise Röntgenblitze abfeuern, mit denen sich zum Beispiel lebenswichtige Proteine untersuchen ließen. Auch als Diagnosewerkzeug für die Medizin wäre ein Terahertz-Beschleuniger interessant: Als Alternative zur guten alten Röntgenröhre könnte er für Aufnahmen von enormer Bildschärfe sorgen und dabei gleichzeitig die Strahlungsbelastung für die Patienten senken.



Multitalent:

Der „Segmented Terahertz Electron Accelerator and Manipulator“ (STEAM) aus der Gruppe von Franz Kärtner ist eine Art Schweizer Taschenmesser für Elektronenstrahlen. STEAM wird mit Terahertz-Strahlung betrieben und kann Elektronenpakete beschleunigen, komprimieren, fokussieren und analysieren. Das experimentelle Gerät ist dabei kaum größer als eine Zwei-Cent-Münze. Seine aktive Struktur im Inneren ist sogar nur einige Millimeter groß.



Nanometerkleine Beschleunigerstrukturen schillern in Regenbogenfarben auf einem Träger, von dem sie ausgeschnitten und anschließend zusammengesetzt werden.

Der **Chip**-Beschleuniger

Forscher arbeiten an einer Mini-Teilchenkanone auf einem Mikrochip

Wenn Fachleute versuchen, Teilchenbeschleuniger zu schrumpfen, geht es meist darum, Anlagen von Turnhallenformat auf Laborkellergröße zu bringen. Die Vision von ACHIP klingt deutlich ehrgeiziger: Das internationale Forscherteam tüftelt an einem Beschleuniger, der auf einen Mikrochip passt. Die möglichen Anwendungen klingen spektakulär: Sie reichen vom ultrakompakten Röntgenlaser bis hin zu Mikrorobotern, die durch den Körper patrouillieren und Tumore zerstören.

Bob Byer nimmt ein kleines Plastischächtelchen in die Finger. Darin steckt ein zentimetergroßes Quarzglasstück mit mehreren Streifen, die man mit bloßem Auge kaum erkennen kann: Sie sind gerade mal einen halben Mikrometer breit. „Diesen Chip beleuchten wir mit ultrakurzen Laserblitzen und schicken gleichzeitig Elektronen hinein“, beschreibt der Physikprofessor der Stanford-Universität. „Als Folge davon werden die Elektronen enorm beschleunigt.“

Die Idee für einen solchen Beschleunigerchip stammt aus den 1960er Jahren. „Nur gab >>

es damals keine Laser, mit denen sich das in die Tat umsetzen ließ“, sagt Byer. Erst zu Beginn dieses Jahrzehnts machte sich die Fachwelt daran, den Traum mit Hilfe fortgeschrittener Lasertechnik zu realisieren: 2013 gelang es Byers Team zeitgleich mit einer deutschen Forschergruppe, Elektronen erstmals mit einem Quarzglas-Chip auf Trab zu bringen.

Wie bei einem herkömmlichen Beschleuniger, der mit Radiowellen funktioniert, reiten auch bei einem Chip die Elektronen auf einer elektromagnetischen Welle. Doch hier sind es Lichtwellen, erzeugt von einem starken Laser. Sie besitzen Wellenlängen, die etwa 100 000 Mal kürzer sind als die Radiowellen in einer konventionellen Anlage. Die Beschleunigungsstrecken sind winzig: Statt meterlangen Metallröhren sind es glasähnliche Materialien mit winzigen Strukturen – feinste Kanäle, erzeugt mit Lithographietechniken, wie sie auch Chiphersteller für die Massenfertigung von Prozessoren nutzen.

„Mit den Lichtpulsen aus leistungsstarken Femtosekunden-Lasern lassen sich sehr hohe Feldstärken erzeugen“

Peter Hommelhoff, Universität Erlangen-Nürnberg

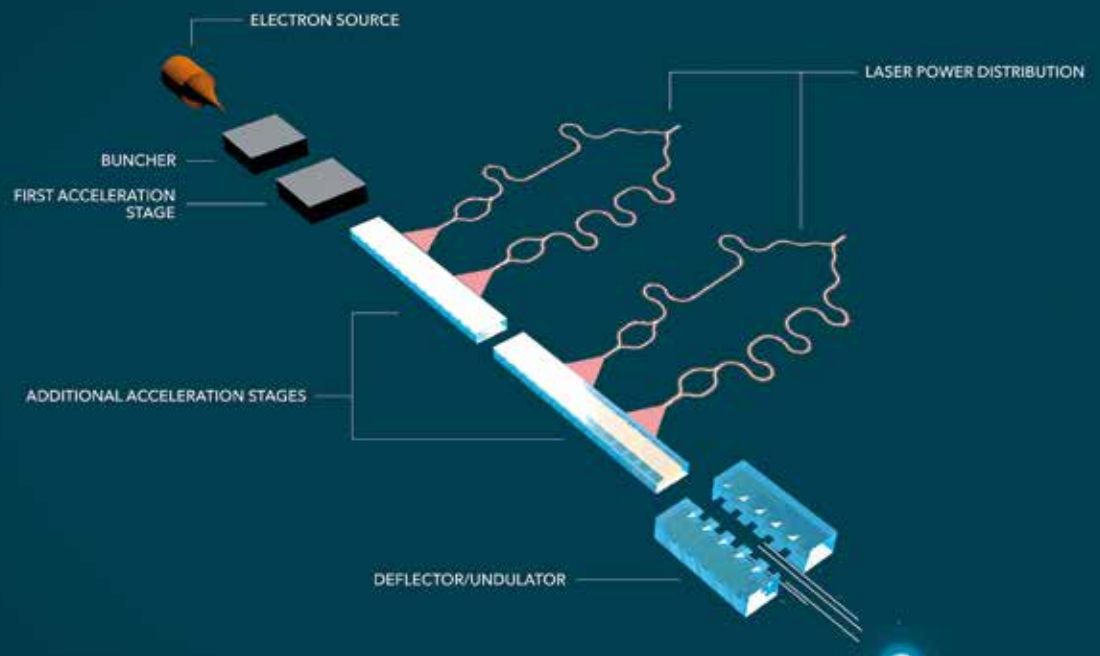


Drei Miniatur-Beschleunigermodule aus Silizium auf einer durchsichtigen Basis

„Mit den Lichtpulsen aus leistungsstarken Femtosekunden-Lasern lassen sich in diesen Kanälen sehr hohe Feldstärken erzeugen“, erklärt Peter Hommelhoff, Physikprofessor an der Universität Erlangen-Nürnberg. 2013 konnte sein Team zeitgleich mit den Stanford-Forschern einen ersten Prototyp eines Chip-Beschleunigers bauen. Heute, fünf Jahre später, lassen sich Elektronen auf Energien von rund 850 Megaelektronenvolt (MeV) bringen, dabei herrschen in den Chips Beschleunigungsspannungen von etwa einem Gigavolt pro Meter – rund 20 Mal mehr als bei den besten konventionellen Anlagen, die für dieselbe Teilchenenergie einige Dutzend Meter lang sein müssten, allerdings auch eine viel höhere Intensität erreichen, also deutlich mehr Teilchen auf einmal beschleunigen können.

So könnte ein Röntgenlaser für die Westentasche aufgebaut sein:

Eine Miniatur-Elektronenquelle (oben links) erzeugt Elektronen, die zunächst im Buncher zu Paketen gepackt und anschließend vorbeschleunigt werden. In den lasergetriebenen Beschleunigungselementen werden die Elektronenpakete richtig auf Trab gebracht und schließlich in einem Undulator auf einen Slalomkurs gezwungen, wodurch sie helle Röntgenlaserblitze aussenden.



Klein, kleiner, ACHIP

Um die Technologie voranzubringen, legten Byer und Hommelhoff vor einiger Zeit ACHIP auf – ein auf fünf Jahre angelegtes Forschungsprogramm. Das Ziel: ein Chip-Beschleuniger, mit dem sich Röntgenstrahlung herstellen lässt. Finanziert wird ACHIP von der Stiftung des Intel-Gründers Gordon Moore. Unter anderem geht es in dem Projekt darum, die Kernkomponenten möglichst platzsparend unterzubringen: „Der Chip, ein Lichtverteilungssystem sowie ein Vorbeschleuniger für Elektronen sollen sozusagen in zwei oder drei Schuhschachteln passen“, erläutert Hommelhoff. „Von außen kämen idealerweise nur noch ein Hochspannungskabel sowie eine Glasfaser für die Lichtpulse.“

Auf lange Sicht ist angedacht, auch die Laser auf einen Chip zu packen – genauso wie weitere Komponenten, die zu einem Beschleuniger gehören. Dazu zählen Elemente, die die jeweilige Position des Elektronenstrahls erfassen, ihn bündeln und gezielt durch die Kanäle steuern. „Hier gibt es bereits erste Tests, dass das auf einem Chip funktioniert“, sagt Hommelhoff. „Wichtig ist, dass dabei nicht allzu viele Elektronen verloren gehen, sonst wäre so ein Beschleuniger nicht besonders brauchbar.“

Eine weitere Herausforderung: Die Fachleute müssen Anzahl und Verlauf der feinen Kanäle auf dem Chip so entwerfen, dass die Beschleunigung möglichst effizient verläuft. Neuerdings helfen ihnen dabei Computersimulationen, bei denen ein Algorithmus nach optimalen Strukturen fahndet. „Unter dem Mikroskop sehen diese Strukturen dann zum Teil aus wie Kunst“, beschreibt Bob Byer. „Es sind hochkomplexe, ästhetische Muster.“ Die Chipstrukturen, die dabei herauskommen, können bald auch bei DESY getestet werden: Mit SINBAD (Short Innovative Bunches and Accelerators at DESY) entsteht eine Einrichtung, mit der sich neue Beschleunigerkonzepte detailliert prüfen lassen.

Und was könnte man mit der neuen Technologie eines Tages anfangen? „Wir haben da schon ein paar Ideen“, sagt Byer. „Mein Traum ist, dass man auf Basis eines Chip-Beschleunigers einen extrem kompakten Röntgenlaser für die Wissenschaft bauen kann.“ Idealerweise würde er in jedes Universitätslabor passen und für überschaubares Geld detaillierte Untersuchungen an Proteinen und Hightech-Materialien ermöglichen. Ebenso denkbar wären kompakte Elektronenmikroskope: Heute sind es mannshohe Gerätschaften, künftig könnten sie in die Westentasche passen.

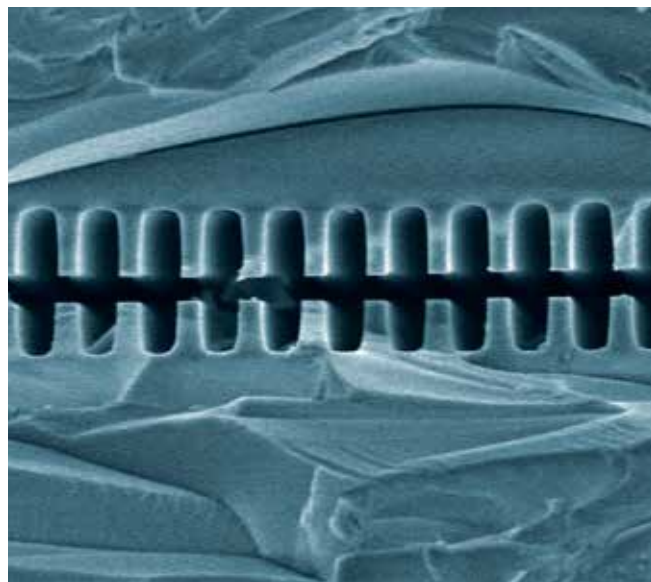
Auch Mediziner hätten Interesse: Sie können sich vorstellen, einen winzigen Elektronen-

„Mein Traum ist, dass man auf Basis eines Chip-Beschleunigers einen extrem kompakten Röntgenlaser bauen kann“

Bob Byer, Stanford Universität

beschleuniger in einen Katheter einzubauen. Damit ließen sich Tumore direkt und aus nächster Nähe bestrahlen, das umliegende gesunde Gewebe würde geschont – möglicherweise eine Alternative zur heutigen Strahlentherapie. In ferner Zukunft sind sogar winzige, autonome Bots vorstellbar, die durch den Körper patrouillieren und per Mikrobeschleuniger einem Tumor bereits im allerersten Frühstadium den Garaus bereiten.

Bleibt eine Schwierigkeit: „Wir müssen die Fachwelt noch davon überzeugen, dass die Elektronenstrahlen aus unseren Chips intensiv genug sind“, sagt Peter Hommelhoff. Der Grund: Die Kanäle in den Chips sind so klein, dass sie nur recht wenige Elektronen beschleunigen können. Doch auch für dieses Problem haben die Fachleute einen Lösungsansatz: Im Prinzip lassen sich auf einem Chip hunderte oder gar tausende Beschleuniger regelrecht stapeln und parallel schalten – wodurch sich auch die Zahl der beschleunigten Elektronen vertausendfachen würde.



Beispiele für Nanostrukturen, die für den Miniaturbeschleuniger untersucht werden.

Datenspeicher der Zukunft

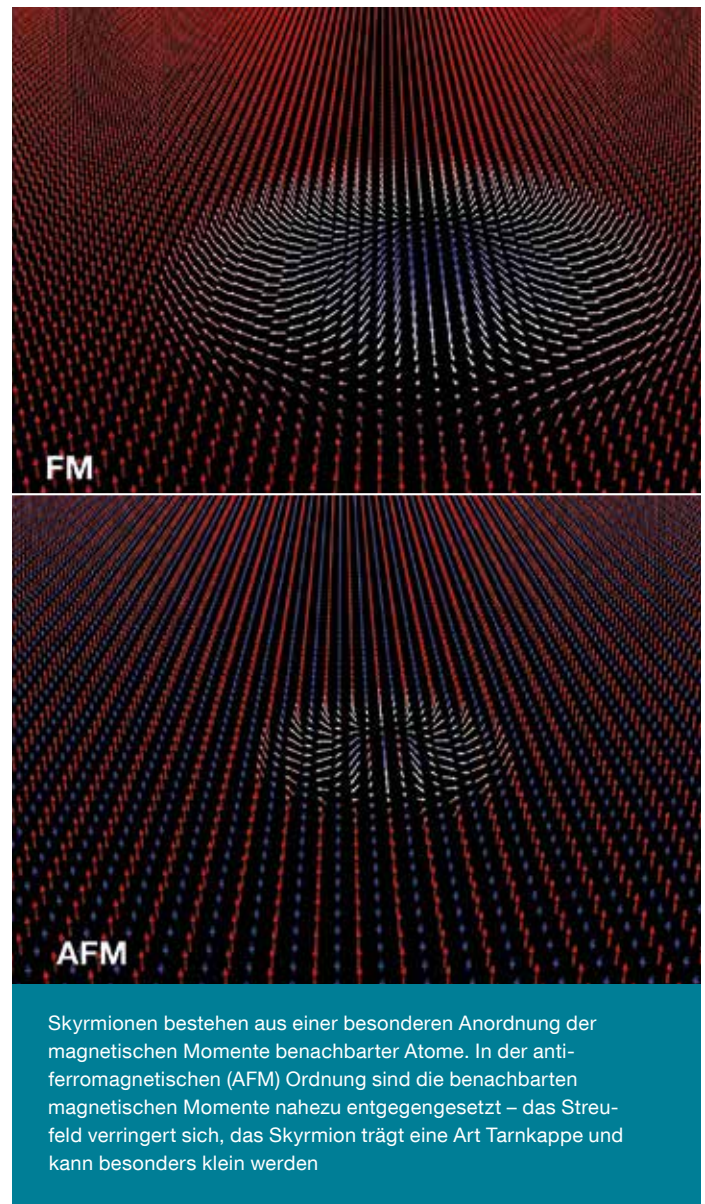
Neuartige Konzepte der magnetischen Datenspeicherung zielen darauf, besonders kleine magnetische Bits in einem Speicherchip hin- und herzuschicken, dicht gepackt abzuspeichern und später wieder auszulesen. Das magnetische Streufeld verhinderte bisher die Herstellung besonders kleiner Bits. Forscherinnen und Forschern des Max-Born-Instituts (MBI), des Massachusetts Institute of Technology (MIT) und von DESY ist es gelungen, den magnetischen Nanostrukturen eine „Tarnkappe“ aufzusetzen und zu beobachten, wie klein und schnell solche getarnten Bits sein können.

Dazu wurden Atomsorten mit entgegengesetztem Drehsinn der Elektronen und damit entgegengesetztem magnetischem Moment kombiniert. Auf diese Weise lässt sich das magnetische Streufeld reduzieren oder sogar völlig abschalten – die einzelnen Atome in der Nanostruktur haben dabei aber immer noch ein magnetisches Moment, sie tragen quasi nur eine Tarnkappe.

Dennoch war es den Forschern möglich, die kleinen Strukturen abzubilden. Sie bedienten sich dabei der Methode der Röntgenholografie, die es erlaubt, gezielt nur die magnetischen Momente einer einzigen Atomsorte sichtbar zu machen – so konnten an DESYs hochbrillanter Röntgenlichtquelle PETRA III die Strukturen ohne ihre Tarnkappe abgebildet werden.

Gelingt es, die Tarnkappe genau zu justieren, dann können die entstehenden magnetischen Nanostrukturen sowohl sehr klein sein als auch schnell bewegt werden – eine interessante Aussicht für neuartige Speichertechnologien auf der Basis magnetischer Nanostrukturen.

Nature Nanotechnology, 2018;
DOI: 10.1038/s41565-018-0255-3



Skyrmionen bestehen aus einer besonderen Anordnung der magnetischen Momente benachbarter Atome. In der anti-ferromagnetischen (AFM) Ordnung sind die benachbarten magnetischen Momente nahezu entgegengesetzt – das Streufeld verringert sich, das Skyrmion trägt eine Art Tarnkappe und kann besonders klein werden

„Quantenkocher“ für Atome

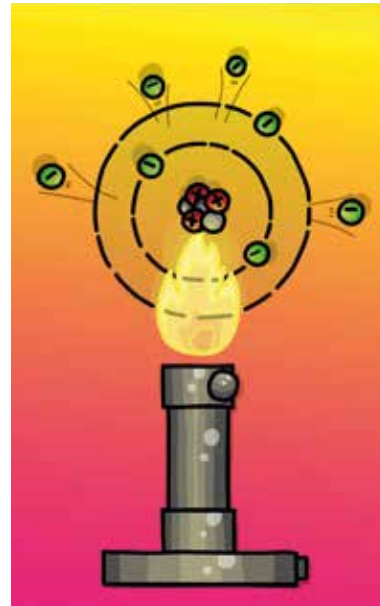
In einer Art „Quantenkocher“ haben Forscherinnen und Forscher Xenonatome mit intensiven Röntgenblitzen von den meisten ihrer Elektronen getrennt. Ein internationales Team um Sang-Kil Son und Robin Santra vom Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) bei DESY zeigte mit diesen Experimenten die Bedeutung von Albert Einsteins Spezieller Relativitätstheorie für die Quantenstruktur von Atomen.

„Das Verständnis der atomaren Struktur ist von grundlegender Bedeutung“, betont Son. „Die Quantenmechanik sagt uns, wo sich Elektronen in den Hüllen der verschiedenen Atome aufhalten.“ Die Struktur der Atomhülle wiederum ist die Grundlage für das Periodensystem und bestimmt die chemischen Eigenschaften der Elemente. „Elektronen in der äußeren Atomhülle bewegen sich typischerweise bereits mit etwa einem Prozent der Lichtgeschwindigkeit“,

ergänzt Santra. „Die Elektronen auf den inneren Schalen bewegen sich jedoch erheblich schneller, vor allem in schwereren Atomen. Dann muss die Quantenmechanik durch die Spezielle Relativitätstheorie ergänzt werden, um die Atomstruktur genau zu beschreiben.“

Energereiches Röntgenlicht kann Elektronen aus Atomen ähnlich „verdunsten“ lassen wie Wasser beim Kochen. Dieses Quantenkochen wird allerdings erst durch Freie-Elektronen-Laser ermöglicht, die die stärksten Röntgenblitze der Welt liefern. Sie erzeugen Bedingungen, die einer Temperatur von einigen hundert Millionen Grad Celsius entsprechen. Das Quantenkochen entblößt dann die inneren Schalen des Atoms und macht dabei relativistische Effekte auf neue Art sichtbar.

Nature Communications, 2018;
DOI: 10.1038/s41467-018-06745-6



Beim Quantenkochen verdampfen Elektronen ähnlich wie Wassermoleküle beim gewöhnlichen Kochen.

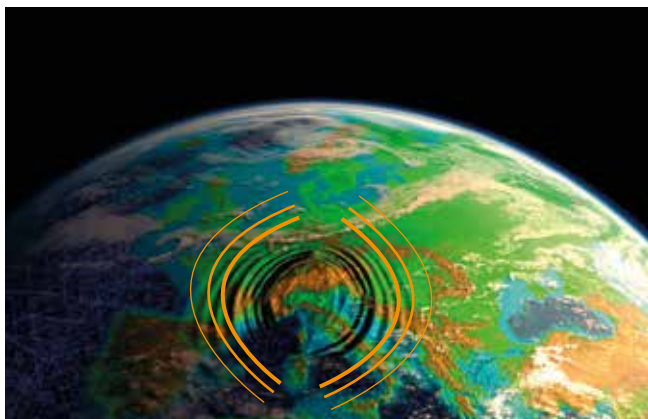
Erdbeben im Labor

Mit einem neuen experimentellen Ansatz haben Forscherinnen und Forscher bei DESY simuliert, wie sich eine Erdbebenwelle in einer Probe ausbreitet, und dabei die Veränderungen im Material genau beobachtet. Das Forscherteam um Hauke Marquardt von der Universität Oxford und dem Bayerischen Geoforschungsinstitut (BGI) der Universität Bayreuth konnte

zeigen, wie ein Prozess, der ab einem bestimmten Druck im Mineral Ferroperiklas auftritt, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen beeinflusst. Diese Erkenntnis könnte dabei helfen, die Zusammensetzung des Erdinneren genauer zu kartieren.

Das neue Untersuchungsverfahren ermöglicht es, Erdbebenwellen bei verschiedenen Druckbedingungen im Labor zu simulieren und die Auswirkungen auf Proben zeitlich hochaufgelöst zu messen. „Wir simulieren die Erdbebenwellen dadurch, dass wir die Probe kontrolliert zyklisch komprimieren und wieder entspannen, und zwar mit Frequenzen, die typisch sind für Erdbebenwellen. Gleichzeitig können wir mit Röntgenstrahlung sehr genau beobachten, wie sich das Volumen des untersuchten Materials währenddessen verändert“, sagt Hanns-Peter Liermann, der die Messstation an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III leitet, an der der neue Experimentieraufbau entwickelt und die Messung durchgeführt wurde.

Geophysical Research Letters, 2018;
DOI: 10.1029/2018GL077982



Simulation der Ausbreitung seismischer Wellen

Hamburger Nachwuchs- förderprogramm für Data Science

Hamburg bekommt eine neue Graduiertenschule für Datenwissenschaften. Die „Data Science in Hamburg – Helmholtz Graduate School for the Structure of Matter“, kurz DASHH, wird jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern eine interdisziplinäre und anwendungsorientierte Ausbildung in der Verarbeitung und Analyse großer Datenmengen bei der Erforschung der Materie bieten. Die Helmholtz-Gemeinschaft hat beschlossen, die Initiative von DESY, der Universität Hamburg und der Technischen Universität Hamburg sowie fünf weiterer norddeutscher Forschungseinrichtungen mit fast sechs Millionen Euro über die nächsten sechs Jahre zu fördern.

„Data Science ist eine Schlüsseltechnologie für aktuelle und zukünftige Naturwissenschaften. Gemeinsam mit den Universitäten möchten wir eine naturwissenschaftliche Informatik auf dem Campus Bahrenfeld etablieren und jungen Doktorandinnen und Doktoranden im Bereich Big Data sehr gute Forschungsbedingungen bieten“, sagt Helmut Dosch, Vorsitzender des DESY-Direktoriums.

Schwerpunkte der Anwendungen liegen in der Strukturbio-logie, den Materialwissenschaften, der Physik mit ultraschnellen Röntgenpulsen oder der Teilchenphysik. In der DASHH-Graduiertenschule sollen hochtalentierete junge Forschende aus der gesamten Welt promovieren. In den naturwissenschaftlichen Forschungsgruppen arbeiten sie an den Herausforderungen, die große Mengen hochkomplexer wissenschaftlicher Daten mit sich bringen.



An DESYs Forschungsanlagen werden riesige Mengen an Daten erzeugt. Ihre intelligente und effiziente Nutzung ist Thema der neuen Graduiertenschule.



Nanolöcher in Halbleitern

Ein deutsch-französisches Forscherteam hat überraschende Eigenschaften von Nanolöchern in Halbleitermaterialmaterialien identifiziert, die durch eine vielversprechende Technik hergestellt werden: Heiße Aluminiumtröpfchen haben in ihren Versuchen überraschend glatte Löcher in ein Substrat aus Aluminium-Galliumarsenid gefressen. Die Methode eignet sich unter anderem zur Produktion sogenannter Quantenpunkte, die etwa für Lichtquellen mit einer sehr scharf definierten Farbe oder für Speicherzellen in Quantencomputern verwendet werden können.

Das Team vom Center for Hybrid Nanostructures (CHyN) der Universität Hamburg, vom DESY-NanoLab und von der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF untersuchte ein typisches Halbleitermaterial aus Galliumarsenid, dem zweitwichtigsten Material in der Halbleiterindustrie nach Silizium. Für ihre Ätzversuche bedampften die Forscher das Halbleitermaterial mit Aluminium, das auf der Oberfläche Tröpfchen formt. Bei bis zu knapp 700 Grad Celsius fraßen sich die Aluminiumtröpfchen in das Halbleitermaterial hinein. Röntgenuntersuchungen an der ESRF machte die glatte, regelmäßige Form der Löcher sichtbar. Untersuchungen am CHyN und am DESY-Nanolab zeigten, dass die Löcher jeweils etwa 100 Nanometer breit und 60 Nanometer tief sind. Ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter. Solche Löcher könnten als Schablonen für Quantenpunkte mit maßgeschneiderten Eigenschaften dienen, indem sie mit einem neuen Material gefüllt werden. Mit weiteren Analysen wollen die Forscher nun herausfinden, wie sich die Form der Nanolöcher verstehen und kontrollieren lässt.

Physical Review Materials, 2018;

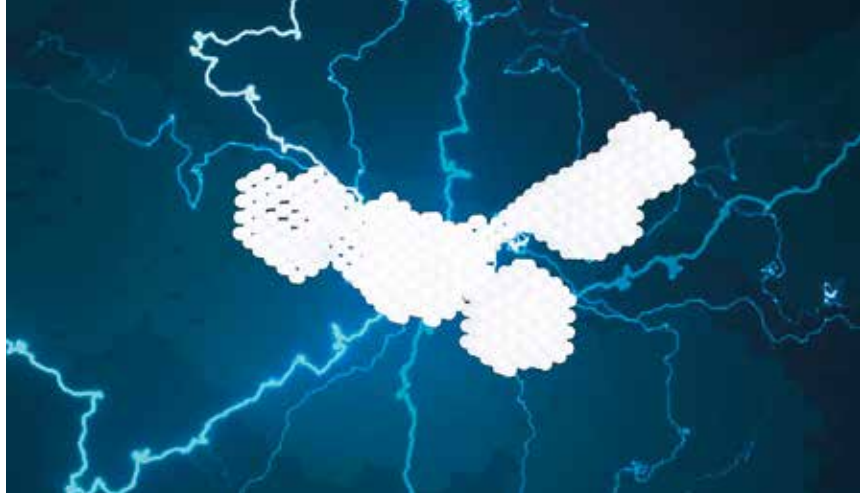
DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.2.106001

Unerwartete Form von Gerüstprotein

An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III haben Strukturbiologen eine überraschende Form eines sogenannten Gerüstproteins biologischer Zellen entdeckt. Das Gerüstprotein mit der Bezeichnung PDZK1 besteht aus vier PDZ-Domänen, drei Verbindern und einem C-terminalen Ende. Während Bioinformatik-Analysen nahelegen, dass die vier PDZ-Domänen wie Perlen auf einer Schnur angeordnet sind und sich sehr flexibel bewegen können, zeigen die Röntgenuntersuchungen nun dagegen, dass PDZK1 eine relativ fest definierte und nur wenig flexible L-Form besitzt. Das hat ein Team um Christian Löw vom Hamburger Strukturbiologiezentrum CSSB (Centre for Structural Systems Biology) und Dmitri Svergun von der Hamburger Niederlassung des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) herausgefunden. Löws Gruppe plant als nächstes, das Gerüstprotein zusammen mit Bindungspartnern in einem

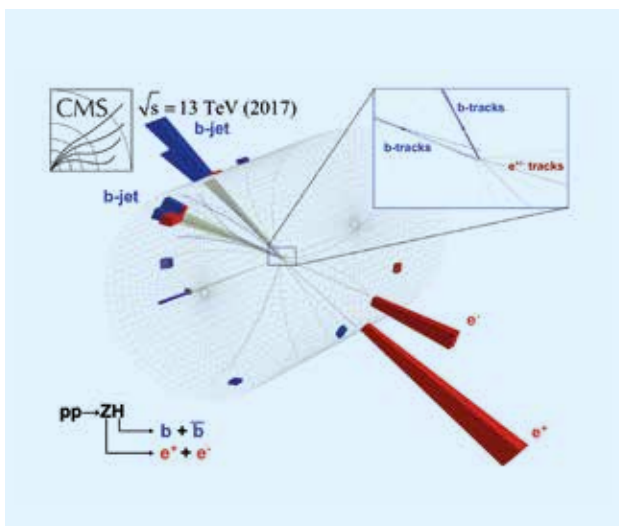
Elektronenmikroskop zu untersuchen. „Nur durch die Kombination einer Reihe von Methoden sowie in der Zusammenarbeit mit Kollegen werden wir komplexe Proteine wie PDZK1 vollständig verstehen können“, sagt Löw, der Gruppen sowohl am CSSB als auch beim EMBL leitet. So hat die Teamarbeit von Löws und Sverguns Forschungsgruppen nicht nur zu einem ersten Strukturmodell für PDZK1 geführt, sie zeigt auch die Bedeutung eines integrierten Forschungsansatzes für die Lösung komplexer Fragen in der Strukturbiologie.

Structure, 2018; DOI: 10.1016/j.str.2018.07.016



Künstlerische Darstellung der L-Form des Gerüstproteins PDZK1

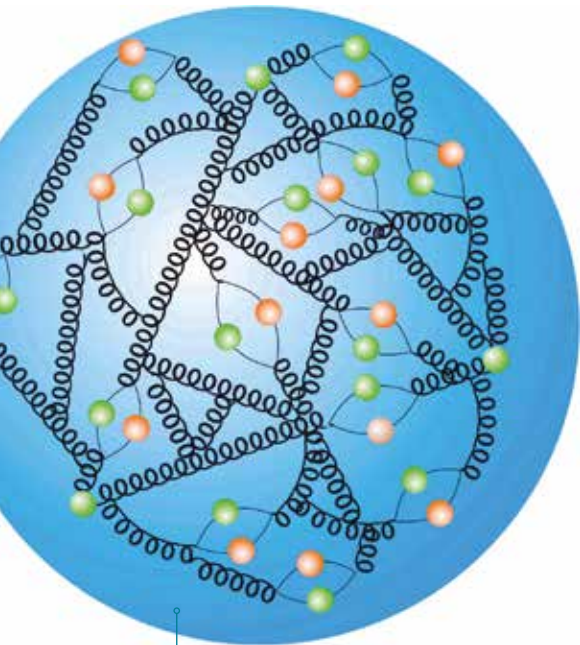
Zerfall des Higgs-Teilchens



Darstellung einer Kollision im Teilchendetektor CMS, bei der ein Higgs-Teilchen in zwei (blau dargestellte) b-Quarks zerfällt.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der beiden großen Teilchenphysikexperimente ATLAS und CMS am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf haben zum ersten Mal den Zerfall des Higgs-Teilchens in zwei sogenannte b-Quarks beobachtet. Laut Theorie zerfällt weit mehr als die Hälfte aller Higgs-Teilchen in diese beiden Quarks, allerdings ist es extrem schwierig, diesen Prozess aus den vielen anderen Dingen herauszufiltern, die bei den Kollisionen im weltgrößten Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider) am CERN passieren. Das Ergebnis ist eine weitere Bestätigung des Standardmodells der Teilchenphysik und ein weiterer Beweis, dass das Higgs-Teilchen tatsächlich allen Elementarteilchen ihre Masse verleiht. An der Suche waren Forscherinnen und Forscher von DESY maßgeblich beteiligt.

Quarks sind die fundamentalen Bausteine aller Atomkerne. Es gibt sie in sechs Sorten. Die uns vertraute Materie besteht aus u- und d-Quarks, daneben gibt es s-, c-, b- und t-Quarks, die unter anderem in Teilchenbeschleunigern entstehen können. Das 2012 am LHC erstmals nachgewiesene Higgs-Teilchen bildete den letzten, fehlenden Schlussstein des Standardmodells. Mit der genauen Untersuchung der Eigenschaften des nach dem britischen Theoretiker Peter Higgs benannten Teilchens hoffen Physiker besser zu verstehen, wie es anderen Elementarteilchen ihre Masse verleiht.



Die HERA-Experimente zeigten, dass das Proton ein sehr dynamisches Gebilde aus Quarks, Antiquarks und Gluonen ist.

Schwere Quarks

Die Forscherteams der beiden großen Detektoren H1 und ZEUS an DESYs ehemaligem Teilchenbeschleuniger HERA haben ihre Messungen zur Produktion schwerer Quarks in den HERA-Teilchenkollisionen kombiniert. Sie analysierten alle Kollisionen, in denen c- und b-Quarks erzeugt wurden – eine Zusammenfassung von über 20 Jahren Arbeit.

Von 1992 bis 2007 kollidierten in DESYs 6,3 Kilometer langem Speicherring HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage) Elektronen und Protonen, die bis fast an die Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wurden, um die Struktur des Protons zu untersuchen und aufzuklären. HERA zeigte, dass der Aufbau des Protons sehr kompliziert ist: eine brodelnde Suppe, in der Gluonen neue Gluonen produzieren und sich in Paare von Quarks und Antiquarks aufteilen können, die alle rasend schnell wieder miteinander interagieren.

Die detaillierte Analyse zur Produktion von schweren Quarks ermöglicht Präzisionstests der Theorie der starken Kraft, der Quantenchromodynamik (QCD), und Angaben zur Struktur der Materie. „Die HERA-Experimente haben einen einzigartigen Satz von Lepton-Proton-Kollisionen gesammelt und erzielen damit auch zehn Jahre nach dem Ende der Datennahme noch immer wertvolle Publikationen“, betont Joachim Mnich, DESYs Direktor für Teilchenphysik. „Diese Veröffentlichung ist auch ein deutlicher Beleg dafür, dass sich unsere Bemühungen, die HERA-Daten für spätere Analysen zu erhalten, auszahlen.“

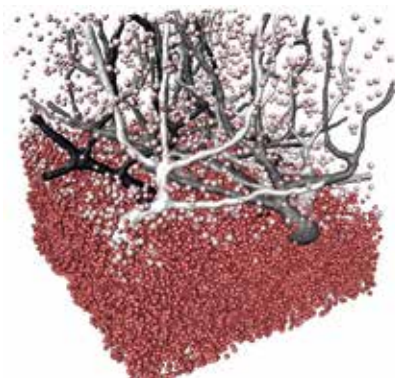
The European Physics Journal, 2018; DOI: 10.1140/epjc/s10052-018-5848-3

Google Maps für das Kleinhirn

Ein Göttinger Forscherteam hat eine besondere Variante der Röntgenbildgebung erfolgreich an Hirngewebe angewendet. Mit der Kombination von höchstauflösenden Messungen an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III und Aufnahmen einer Laborquelle konnte die Gruppe um Tim Salditt vom Institut für Röntgenphysik der Georg-August-Universität Göttingen etwa 1,8 Millionen Nervenzellen in der Kleinhirnrinde mit der sogenannten Phasenkontrasttomografie darstellen.

Das menschliche Kleinhirn beherbergt auf 10 Prozent des Gehirnvolumens etwa 80 Prozent aller Nervenzellen – auf einen Kubikmillimeter können also über eine Million Nervenzellen entfallen. Diese verarbeiten

Signale, die vor allem erlernte und unbewusste Bewegungsabläufe steuern. Ihre genauen Positionen und Nachbarschaftsbeziehungen sind aber bislang



Ergebnis der Phasenkontrasttomografie an DESYs Röntgenquelle PETRA III

weitgehend unbekannt. „Durch Tomografie im sogenannten Phasenkontrastmodus und der anschließenden automatisierten Bildbearbeitung können die Zellen in ihrer genauen Lage lokalisiert und dargestellt werden“, erklärt Mareike Töpferwien vom Institut für Röntgenphysik der Universität Göttingen, Hauptautorin der Veröffentlichung. Die Kombination von Aufnahmen unterschiedlicher Vergrößerungen ermöglichte dem Göttinger Team eine Kartierung des Kleinhirns über viele Größenordnungen. „In Zukunft möchten wir noch weiter in interessante Hirnregionen reinzoomen können, fast so wie bei Google Maps“, sagt Salditt.

PNAS, 2018; DOI: 10.1073/pnas.1801678115

0,000 001 27 Gramm Teilchenhagel pro Sekunde

1000

schnelle Atomkerne aus dem Kosmos
hageln pro Sekunde in jeden Quadratmeter
der Erdatmosphäre.

870

davon sind Kerne des leichtesten
chemischen Elements, Wasserstoff.

120

sind Heliumkerne.

10

sind Kerne schwererer Elemente.

500 000 000 000 000 000

Atomkerne sammelt die Erde durch
diesen kosmischen Hagel pro Sekunde
auf – eine halbe Trillion, das ist eine 5 mit
17 Nullen.

1,27

Mikrogramm
(millionstel Gramm) bringen sie
zusammen auf die Waage.

Zum Vergleich:

40

Tonnen
kosmischen Staub sammelt
die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne auf –
und zwar jeden Tag!

42

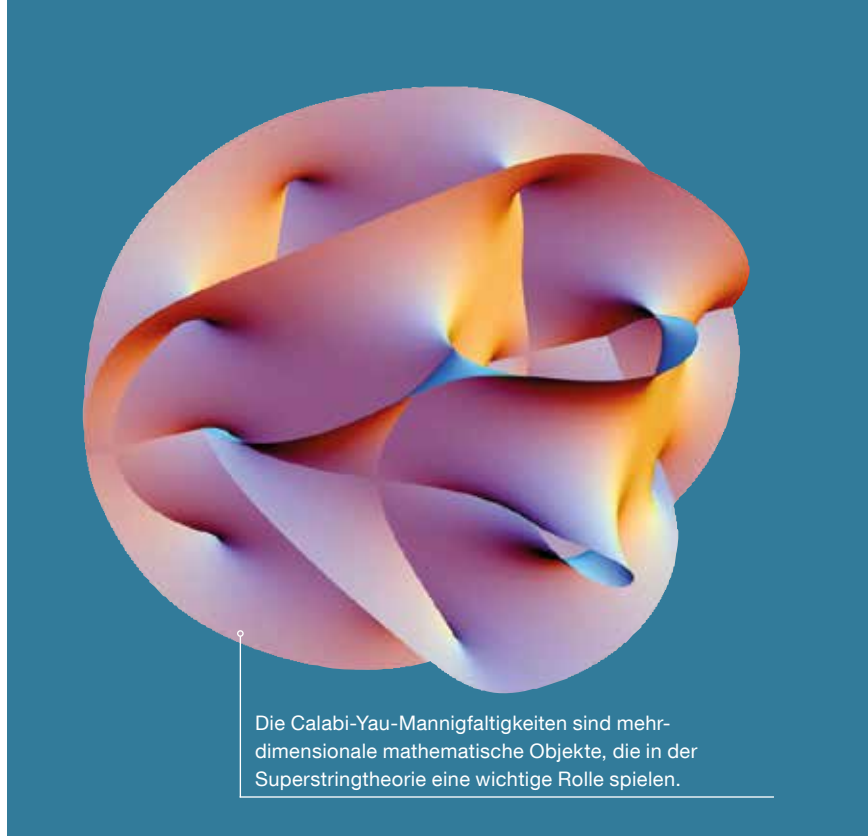
Gramm
nimmt unsere Erde durch diese
sogenannte kosmische Teilchenstrah-
lung im Jahr ungefähr zu.

Knoten im Kosmos

Hamburger Preis für Theoretische Physik an Hirosi Ooguri

Kleine schwingende Fäden in neun Raumdimensionen sollen die kleinsten Bausteine der Welt sein – das ist die Grundannahme der Stringtheorie. Einer der führenden Theoretiker auf diesem Feld ist Hirosi Ooguri, Professor am California Institute of Technology (Caltech) in den USA und in Tokio. Für seine herausragenden Beiträge zum mathematischen Umgang mit den Strings hat Ooguri den Hamburger Preis für Theoretische Physik 2018 erhalten. Mit dem Preisgeld wird der Wissenschaftler unter anderem zu einem Forschungsaufenthalt an das Wolfgang-Pauli-Centre für Theoretische Physik von DESY und der Universität Hamburg kommen.

Die Strings sind der Theorie zufolge in sechs Raumdimensionen aufgewickelt, so dass nur die drei uns bekannten Dimensionen übrigbleiben. Den sechsdimensionalen Knoten bilden dabei „Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten“. Deren mathe-



Die Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten sind mehrdimensionale mathematische Objekte, die in der Superstringtheorie eine wichtige Rolle spielen.

mathe Eigenschaften lassen sich auch auf andere Gebiete der Physik anwenden, etwa bei der Beschreibung des Quark-Gluon-Plasmas, wie es kurz nach dem Urknall den Kosmos ausfüllte. Hauptmotivation bei der Arbeit an der Stringtheorie ist allerdings die Suche nach einer allumfassenden Theorie, der „Theory of Everything“. Mit ihr sollen alle Eigenschaften der Elementarteilchen sowie die bisher noch außerhalb des Standardmodells der Teilchenphysik stehende Gravitation erfasst werden können.

„Wir freuen uns sehr darauf, unsere Forschungsarbeit im persönlichen Gespräch mit Hirosi Ooguri zu diskutieren. Daraus erhoffen wir uns Anregungen, die unsere Forschung in der String- und Quantenfeldtheorie gegenseitig befruchten werden“, sagt Volker Schomerus, Juryvorsitzender für die Preisvergabe und leitender Wissenschaftler bei DESY.

„Vernetzung und persönliche Gespräche sind gerade in einem so abstrakten Fach wie der theoretischen Physik sehr wichtig“, erläutert Eva Ackermann, Projektmanagerin bei der Joachim Herz Stiftung, die den Preis gemeinsam mit dem Hamburg Centre for Ultrafast Imaging

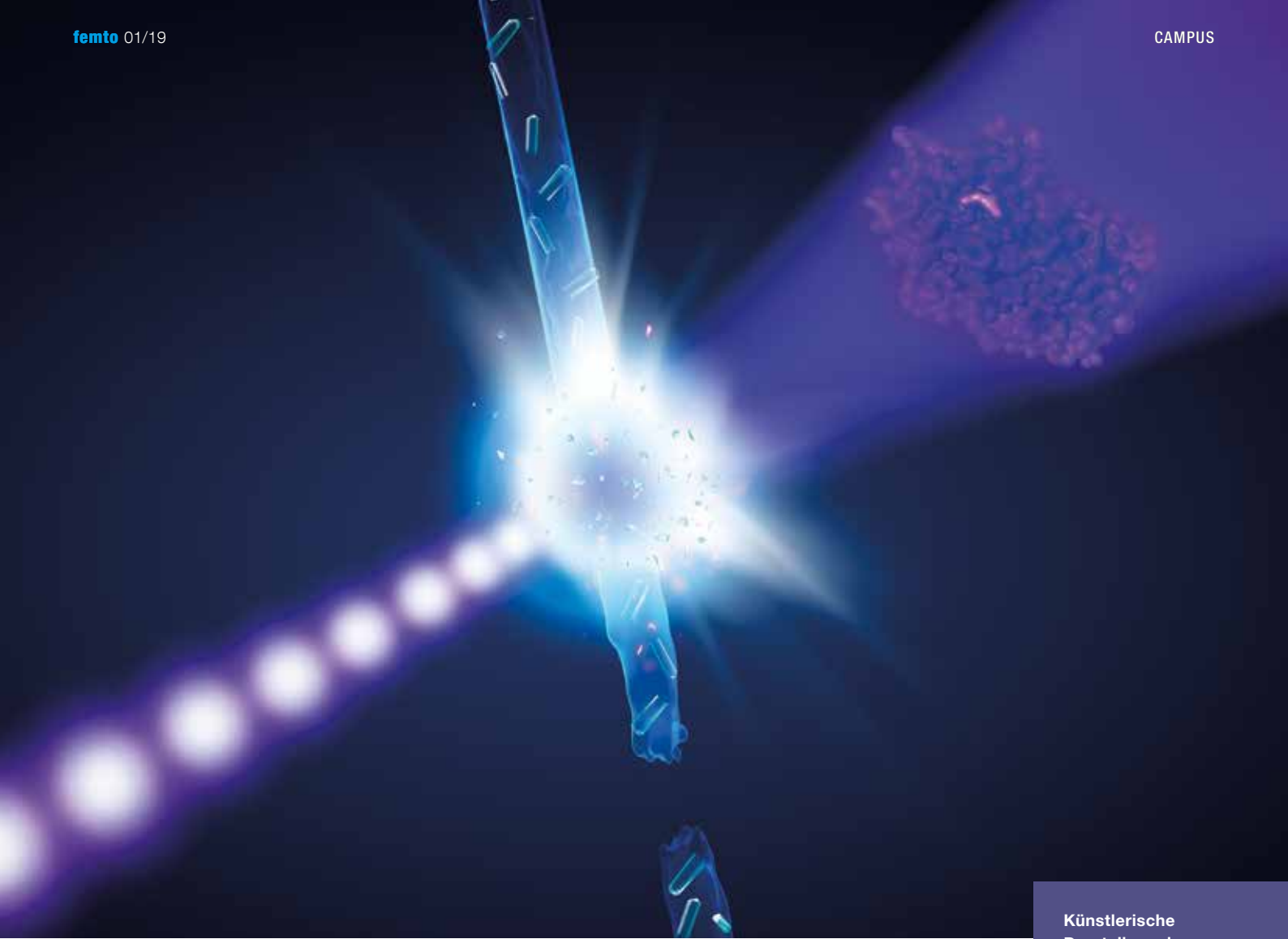
(CUI) und dem Wolfgang-Pauli-Centre vergibt. „In der Praxis zeigt sich häufig, dass es die gemeinsame Kaffeepause, eine Busfahrt oder das Essen in der Kantine einfacher machen, zusammen über zunächst abwegige Ideen nachzudenken, als der Austausch per E-Mail oder Videokonferenz. Daher legen wir großen Wert auf Forschungsaufenthalte des Preisträgers in Hamburg.“

137 036 EURO PREISGELD

Die gemeinnützige Hamburger Joachim Herz Stiftung ist in den Themenfeldern Naturwissenschaften, Wirtschaft sowie Persönlichkeitsbildung tätig. Der Hamburger Preis für Theoretische Physik wurde im Jahr 2010 ins Leben gerufen und ist mit 137 036 Euro dotiert. Die Höhe des Preisgelds ist eine Hommage an Wolfgang Paulis Doktorvater Arnold Sommerfeld, der 1916 die sogenannte Feinstrukturkonstante α einführte, um die Aufspaltung (Feinstruktur) der Spektrallinien des Wasserstoffatoms zu erklären. Das Preisgeld beträgt $1000 \text{ €}/\alpha$.



Hirosi Ooguri ist Direktor und Fred-Kavli-Professor am Caltech und Professor der Universität Tokio.



Blitzstart für Europas Röntgenlaser

Erste Experimente am European XFEL enthüllen unbekannte Struktur von Antibiotika-Killer

Eine internationale Forschergruppe hat die Ergebnisse der ersten wissenschaftlichen Experimente an Europas neuem Röntgenlaser European XFEL veröffentlicht.

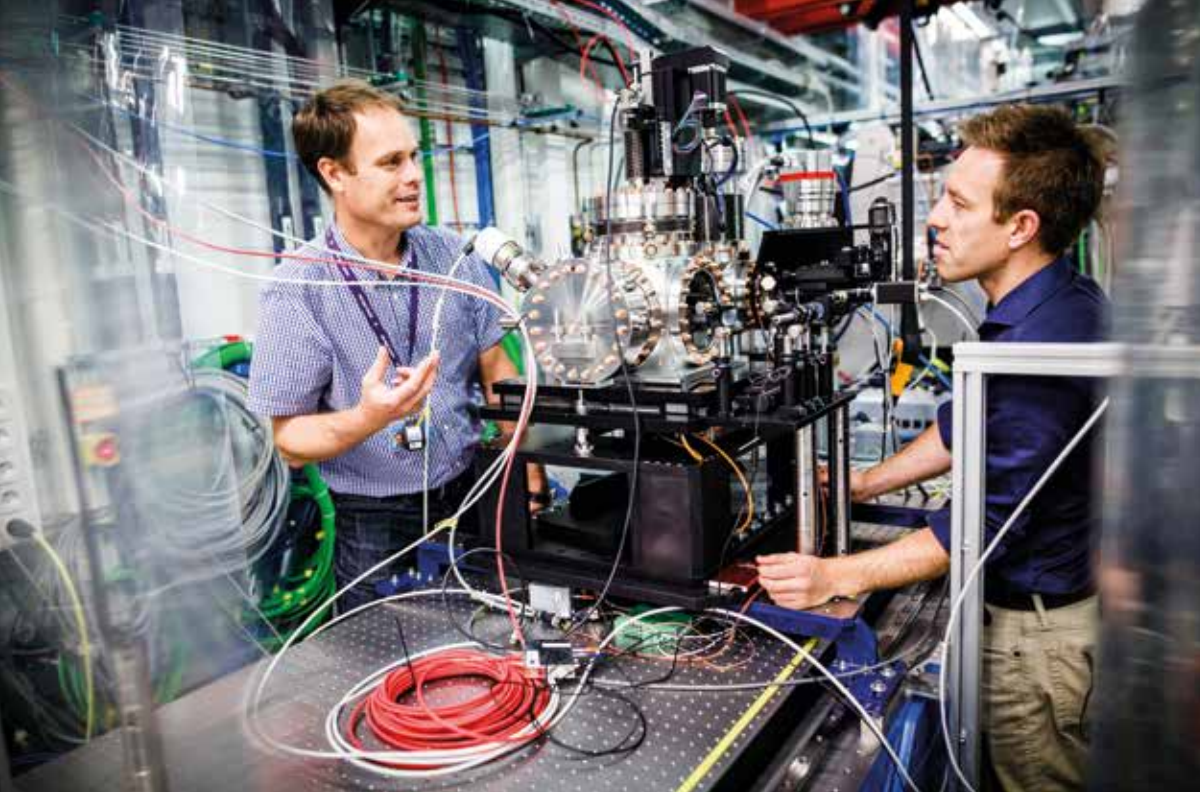
Die Pionierarbeit zeigt nicht nur, dass die neue Anlage Messungen um mehr als das Zehnfache beschleunigen kann, sie enthüllt auch eine bislang unbekannte Struktur eines Enzyms, das für Antibiotika-Resistenzen eine wichtige Rolle spielt. „Da wir als erste an einer völlig neuen Anlage gearbeitet haben, mussten wir zahlreiche Herausforderungen meistern, die zuvor noch niemand angegangen war“, betont DESY-Forscher Anton Barty vom Center for Free-Electron Laser Science (CFEL), der das Team von rund 125 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern geleitet hat. Der 3,4 Kilometer lange European XFEL ist so

konzipiert, dass er Röntgenblitze in sehr kurzem Abstand von nur 220 Nanosekunden liefern kann, das sind 0,000 000 220 Sekunden. Die Blitze können beispielsweise dazu benutzt werden, Biomoleküle zu durchleuchten, um ihre dreidimensionale Form zu bestimmen. Die räumliche Struktur von Proteinen und Enzymen verrät Wissenschaftlern etwas über die genaue Funktionsweise dieser Moleküle. Für die Untersuchung werden aus vielen identischen Biomolekülen zunächst kleine Kristalle gezüchtet, die dann mit dem Röntgenlicht durchleuchtet werden. Jeder Kristall erzeugt ein charakteristisches Beugungsbild aus dem Röntgenlicht, das mit einem Detektor aufgezeichnet wird. Lassen sich genug solcher Beugungsbilder von allen Seiten des Kristalls gewinnen, lässt sich daraus seine innere Struktur und >>

Künstlerische Darstellung des Experiments:

Treffen die ultrahellen Röntgenblitze (violett) die Enzymkristalle im Wasserstrahl (blau), lässt sich aus dieser Durchleuchtung die dreidimensionale Form des Enzyms (rechts) rekonstruieren.

Forschungsleiter Anton Barty (links) von DESY und European-XFEL-Forscher Richard Bean an der Messstation SPB/SFX



damit auch die seiner Bausteine, der Biomoleküle, in atomarer Auflösung berechnen.

Biomoleküle in 3D

Allerdings lässt sich jeder Kristall mit einem Röntgenlaser nur einmal durchleuchten, weil er durch den intensiven Blitz verdampft (nachdem er das Beugungsbild erzeugt hat). Um die komplette dreidimensionale Struktur des untersuchten Biomoleküls zu bestimmen, muss daher möglichst für jeden Blitz ein neuer Kristall in den Röntgenlaser geschossen werden. Der European XFEL kann mit seiner extrem schnellen Blitzfolge

Röntgenlasers gesprüht. Auch Wasser verdampft durch den Blitz, und somit muss sich ein intakter Wasserstrahl rechtzeitig vor dem nächsten Blitz wieder ausbilden. „Wir haben die Geschwindigkeit des Wasserstrahls, der die Proben transportiert, auf bis zu 100 Meter pro Sekunde beschleunigt – das entspricht ungefähr dem Geschwindigkeitsrekord in der Formel 1“, erläutert Max Wiedorn vom CFEL. Eine maßgeschneiderte Düse sorgte dabei für einen stabilen Wasserstrahl mit den nötigen Eigenschaften. Um die Beugungsbilder in schneller Folge aufzuzeichnen, hatte ein internationales Konsortium unter Leitung von DESY-Wissenschaftler Heinz Graafsma in jahrelanger Arbeit eine der schnellsten Röntgenkameras der Welt entworfen und gebaut, maßgeschneidert für den European XFEL.

„Solche Filme würden uns entscheidende Einblicke geben, die uns eines Tages helfen könnten, Antibiotika-Resistenzen zu reduzieren“

Christian Betzel, Universität Hamburg

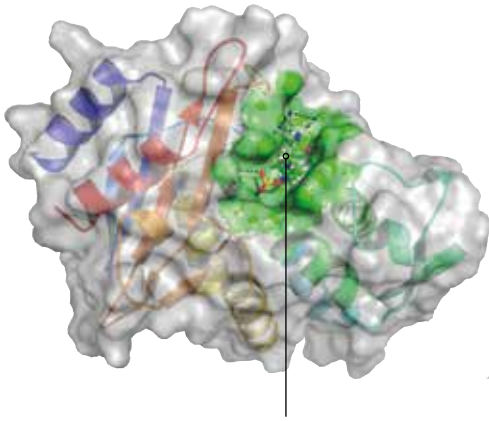
derartige Untersuchungen stark beschleunigen, allerdings hat zuvor noch niemand versucht, mit dieser Geschwindigkeit Proben in atomarer Auflösung zu röntgen. Die schnellste Pulsrate eines Röntgenlasers betrug bisher 120 Blitze pro Sekunde, das bedeutet einen zeitlichen Abstand von 0,008 Sekunden zwischen den Blitzen, also 8 000 000 Nanosekunden.

Die winzigen Kristalle werden üblicherweise in einem Wasserstrahl in den Pfad des

Antibiotika-Resistenzen verstehen

Als eine der Proben wählten die Forscher ein bakterielles Enzym, das eine wichtige Rolle bei Antibiotika-Resistenzen spielt. Das Molekül mit der Bezeichnung CTX-M-14- β -Laktamase isolierten die Wissenschaftler aus dem Bakterium *Klebsiella pneumoniae*. Von diesem Bakterium kursieren zum Teil mehrfach resistente Stämme in Krankenhäusern und stellen dort ein gravierendes Problem dar. Vor zwei Jahren wurde in den USA sogar ein Stamm identifiziert, der nach Angaben der US-Seuchenschutzbehörde CDC gegen alle 26 gewöhnlich verfügbaren Antibiotika resistent war.

Das Enzym CTX-M-14- β -Laktamase kommt in allen Stämmen des Bakteriums vor. Es funktioniert wie eine Art molekulare Schere und



Die in den Messungen bestimmte dreidimensionale Struktur des Enzyms CTX-M-14- β -Laktamase mit dem daran gebundenen Inhibitor Avibactam am aktiven Zentrum (grün)

zerschneidet die sogenannten Laktam-Ringe der Penizillin-Antibiotika, wodurch diese wirkungslos werden. Um dies zu vermeiden, werden Antibiotika häufig mit der Substanz Avibactam zusammen verabreicht. Avibactam legt sich gewissermaßen zwischen die Scherenblätter des Enzyms und blockiert so die Schneidefunktion. Durch Mutationen kann sich jedoch die Form der molekularen Schere ändern. „Manche Krankenhausstämme von *Klebsiella pneumoniae* können bereits speziell entwickelte Antibiotika der dritten Generation spalten“, berichtet Christian Betzel, Mitautor der Studie und Professor an der Universität Hamburg. „Wenn wir verstehen, wie das genau geschieht, könnte das eventuell dabei helfen, Antibiotika zu entwerfen, die dieses Problem umgehen.“

Die Messungen zeigen, dass sich mit dem European XFEL Strukturinformationen von hoher Qualität gewinnen lassen. Die Forscher sehen dies als einen ersten Schritt zur Aufzeichnung von Serien-Schnappschüssen von biochemischen Reaktionsabläufen zwischen Enzymen und ihren Substraten. Der Röntgenlaser lässt sich als eine Art Filmkamera einsetzen, um aus solchen Serienbildern einen Film der molekularen Dynamik von Enzym und Inhibitor zu erstellen. „Solche Filme würden uns entscheidende Einblicke in den biochemischen Prozess geben, die uns eines Tages helfen könnten, bessere Inhibitoren zu entwerfen und damit Antibiotika-Resistenzen zu reduzieren“, sagt Betzel.

Nature Communications, 2018; DOI: 10.1038/s41467-018-06156-7

Die schnellsten Röntgen-Serienbilder der Welt

Der Röntgenlaser European XFEL zeichnet sich durch seine extrem schnelle Blitzfolge aus: Bis zu 27 000 Mal pro Sekunde kann der Laser es blitzen lassen. Um dieses Super-Stroboskop sinnvoll nutzen zu können, müssen die Detektoren im selben Tempo Daten aufzeichnen. Der Detektor, der bei den ersten Experimenten zum Einsatz kam, ist daher von einem DESY-geführten Konsortium für die verwendete Messstation maßgeschneidert worden. Die Spezialkamera namens **AGIPD** kann Bilder im zeitlichen Abstand von jeweils nur 220 milliardstel Sekunden (220 Nanosekunden) aufnehmen – das sind die weltweit schnellsten Röntgen-Serienbilder, die derzeit möglich sind.

„Anders als eine gewöhnliche Digitalkamera besitzt jedes Pixel des Detektors 352 Speicherplätze, so dass **352 Aufnahmen** zwischengespeichert werden können, die dann in einem Zug ausgelesen werden“, sagt DESY-Forscher Heinz Graafsma, der die Entwicklung und Produktion des Detektors koordiniert hat. Das schafft der Detektor zehn Mal pro Sekunde. Eine Herausforderung ist dabei nicht nur, die hohe Bildfolge aufzunehmen, sondern auch, sie zu verarbeiten: Selbst bei seiner im Vergleich zu Fotokameras moderaten Auflösung von einem Megapixel erzeugt der Hochgeschwindigkeitsdetektor einen Datenstrom von rund acht Gigabyte pro Sekunde – das sind fast zwei volle DVDs jede Sekunde.

Aber die Spezialkamera muss noch wesentlich mehr können: Für die Analyse von Biomolekülen schießen Forscher das helle Röntgenlicht in der Regel auf kleine Kristalle aus den zu untersuchenden Molekülen. Die Kristalle streuen das Röntgenlicht, wobei das komplizierte Streumuster die Informationen über die Struktur des untersuchten Moleküls enthält. „Diese Röntgenstreubilder entstehen beim European XFEL nicht nur in extrem schneller Folge, sie haben auch einen sehr großen Helligkeitsumfang“, sagt Graafsma. Dabei ist jedes Detail wichtig, um die oft sehr komplizierten Proteinstrukturen zu entschlüsseln.

Während feine Details des Streubilds unter Umständen nur von einzelnen Lichtteilchen (Photonen) gezeichnet werden, gibt es auch sehr helle Reflexe, in denen viele Tausend Photonen zusammentreffen. „Bei dem neuen Detektor passt jedes Pixel abhängig von der Anzahl der ankommenden Lichtteilchen dynamisch seine Empfindlichkeit an, wodurch es möglich ist, im selben Bild Bereiche mit einzelnen und mehreren Tausend Lichtteilchen abzubilden“, erläutert Graafsma. AGIPD steht entsprechend für „Adaptive Gain Integrating Pixel Detector“, zu Deutsch etwa integrierender Pixel-detektor mit automatisch angepasster Verstärkung.



Der für den European XFEL maßgeschneiderte Adaptive Gain Integrating Pixel Detector (AGIPD) macht die schnellsten Röntgen-Serienbilder der Welt.

Trümpfe im Lichtquellen-Quartett

Die Röntgenlichtquellen, die DESY und seine Partner betreiben, liefern maßgeschneidertes Licht für die Forschung.



D1
A1

Röntgenlaser European XFEL



Größe	3400 Meter, weltweit größter Röntgenlaser
Geschwindigkeit	der beschleunigten Elektronen: 99.999 999 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit
Helligkeit	10 ¹⁴ Photonen pro Blitz
Nutzer	Jährlich etwa 1000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt
In Betrieb seit	2017

Der 3,4 Kilometer lange European XFEL produziert extrem intensive, ultrakurze Röntgenlaserblitze, die Gastforscher aus der ganzen Welt nutzen können. Die durch einen Teilchenbeschleuniger in einem unterirdischen Tunnelsystem erzeugten Röntgenblitze ermöglichen es, atomare Details von Viren zu erkennen, chemische Reaktionen zu filmen und Vorgänge wie im Inneren von Planeten zu untersuchen.

C2
A2

Röntgenlichtquelle PETRA III



Größe	2304 Meter langer Ringtunnel mit 3 Experimentierhallen
Geschwindigkeit	der beschleunigten Elektronen: 99.999 999 6 Prozent der Lichtgeschwindigkeit
Helligkeit	10 ¹¹ Photonen pro Puls
Nutzer	Jährlich etwa 2400 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt
In Betrieb seit	2009

DESY betreibt eine der hellsten Speicherring-Röntgenstrahlungsquellen der Welt: PETRA III bietet Wissenschaftlern exzellente Experimentiermöglichkeiten mit Röntgenstrahlung besonders hoher Brillanz. Davon profitieren vor allem Forscher, die sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzwelliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen – von der Medizinforschung bis zur Nanotechnologie.

B1

Röntgenlaser European XFEL



Größe	3400 Meter, weltweit größter Röntgenlaser
Geschwindigkeit	der beschleunigten Elektronen: 99.999 999 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit
Helligkeit	10 ¹⁴ Photonen pro Blitz
Nutzer	Jährlich etwa 1000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt
In Betrieb seit	2017

Der 3,4 Kilometer lange European XFEL produziert extrem intensive, ultrakurze Röntgenlaserblitze, die Gastforscher aus der ganzen Welt nutzen können. Die durch einen Teilchenbeschleuniger in einem unterirdischen Tunnelsystem erzeugten Röntgenblitze ermöglichen es, atomare Details von Viren zu erkennen, chemische Reaktionen zu filmen und Vorgänge wie im Inneren von Planeten zu untersuchen.

C2

Röntgenlichtquelle PETRA III



Größe	2304 Meter langer Ringtunnel mit 3 Experimentierhallen
Geschwindigkeit	der beschleunigten Elektronen: 99.999 999 6 Prozent der Lichtgeschwindigkeit
Helligkeit	10 ¹¹ Photonen pro Puls
Nutzer	Jährlich etwa 2400 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt
In Betrieb seit	2009

DESY betreibt eine der hellsten Speicherring-Röntgenstrahlungsquellen der Welt: PETRA III bietet Wissenschaftlern exzellente Experimentiermöglichkeiten mit Röntgenstrahlung besonders hoher Brillanz. Davon profitieren vor allem Forscher, die sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzwelliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen – von der Medizinforschung bis zur Nanotechnologie.

C3
A3

Freie-Elektronen-Laser FLASH



Größe	315 Meter langer Röntgenlaser mit 2 Experimentierhallen
Geschwindigkeit	der beschleunigten Elektronen: 99.999 986 Prozent der Lichtgeschwindigkeit
Helligkeit	10 ¹⁹ Photonen pro Blitz
Nutzer	Jährlich etwa 200 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt
In Betrieb seit	2005

Seit 2005 erzeugt FLASH, der weltweit erste Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich, bei DESY in Hamburg ein ganz besonderes Licht: extrem intensive, ultrakurz gepulste Röntgenlaserblitze. Forscher aus aller Welt verfolgen damit die Bewegungen von Atomen und Molekülen. FLASH ist die Pionieranlage, an der wichtige Grundlagen für Filme aus dem Nanokosmos erforscht wurden.

A4

Zentralgestirn Sonne



Größe	Durchmesser 1,4 Millionen Kilometer
Geschwindigkeit	der Photonen auf dem Weg vom ultradichten Sonnenkern zur Sonnenoberfläche: ca. 0,22 m/s oder 0,000 000 000 074 Prozent der Lichtgeschwindigkeit
Helligkeit	10 ⁴⁵ Photonen pro Sekunde
Nutzer	7 635 250 000 Menschen, ungezählte Tiere und Pflanzen auf der ganzen Welt
In Betrieb seit	ca. 4,5 Mrd. Jahren

Die Sonne ist ein riesiger Kernreaktor: In ihrem Inneren wird durch die Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium bei Temperaturen um 15 Millionen Grad Energie gewonnen. An ihrer Oberfläche herrschen immerhin noch Temperaturen von rund 5700 Grad Celsius. Von dieser Oberfläche, der Photosphäre, strömen Licht und Energie ins All und bilden die Basis für das vielfältige Leben auf der Erde.

Impressum

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

Redaktionsanschrift

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

Redaktion

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

An dieser Ausgabe hat mitgewirkt

Frank Grotelüschen, Jens Kube

Gestaltung und Produktion

Ulrike Darwisch

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

Dezember 2018

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie
femto kostenlos!

www.desy.de/femto



Das **Titelbild** wurde vom Fotografen Philip Thurston (www.thurstonphoto.com) vor der Südwestküste Westaustraliens aufgenommen, einer rauen und isolierten Küstenregion, die beständig von großen Wellen und starken Winden aus dem Indischen Ozean getroffen wird. Wenn die Gezeiten stimmen und die herbstlichen Passatwinde wehen, kommt vier bis sechs Meter hohe Dünung aus dem offenen Meer und läuft plötzlich auf das flache Riff. „Dabei entstehen extrem starke brechende Wellen, die besonders im frühen oder späten Sonnenlicht sehr fotogen sein können“, berichtet Thurston. „Ich habe mein ganzes Leben bereits brechende Wellen dokumentiert, keine zwei sind je gleich, was sie zu einem ständig wechselnden Thema macht und eine geradezu süchtig machende Leidenschaft auslöst.“ Auch in der Beschleunigerphysik spielen Wellen eine entscheidende Rolle: So können etwa Plasmawellen Elektronen ordentlich in Schwingung bringen.

Das Forschungszentrum DESY

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