

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 01/16



ZOOM

Röntgenlaser der Superlative

Durchbruch in
der Kristallographie

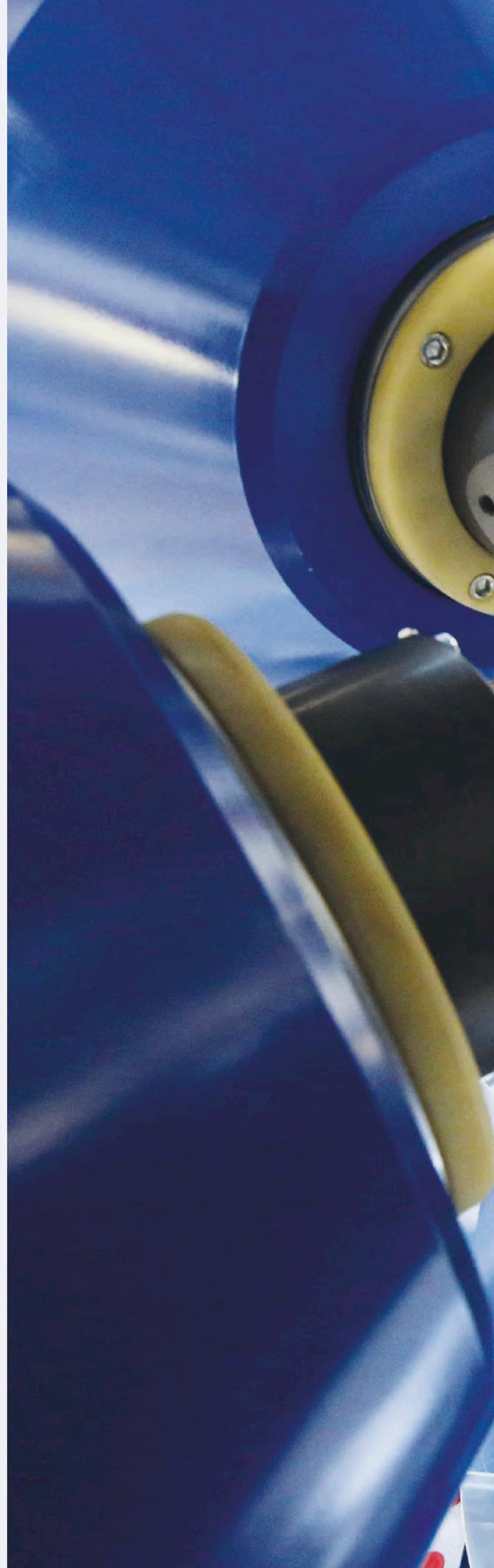
Nanostrukturen
bauen sich selbst

Warum van Goghs
Sonnenblumen welken



Der Planeten-Simulator

Eine neue Hochdruckpresse an DESYs Röntgenquelle PETRA III kann das Innere von Planeten simulieren und neue Materialien synthetisieren. Die sogenannte Riesenstempelzelle („Large Volume Press“, LVP), die in Zusammenarbeit mit der Universität Bayreuth installiert wurde, kann auf jeder ihrer drei Achsen einen Druck von 500 Tonnen ausüben, das entspricht dem 300 000-fachen atmosphärischen Druck oder den Druckverhältnissen 900 Kilometer tief unter dem Erdboden. Der Koloss ist 4,5 Meter hoch und wiegt 35 Tonnen. Je nach gewünschtem Druck können noch Proben mit einer Größe von bis zu einem Kubikzentimeter komprimiert werden, das ist ungefähr so groß wie ein normaler Würfel für Brettspiele und für Hochdruckexperimente enorm. Damit ist die Presse weltweit die größte an einem Synchrotron.





femtoskop

Inhalt

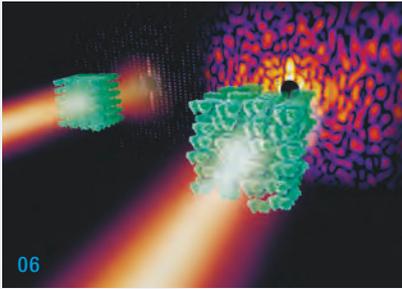


ZOOM

Röntgenlaser der Superlative

Seite 12–31

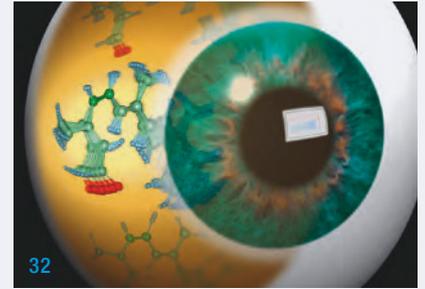
Er ist Hochgeschwindigkeitskamera, Supermikroskop und Planetensimulator zugleich: Mit seinen intensiven und ultrakurzen Röntgenlaserblitzen eröffnet der European XFEL von 2017 an Forschern aus Wissenschaft und Industrie völlig neue Einblicke in die Nanowelt: atomare Details von Viren, die molekulare Zusammensetzung neuartiger Werkstoffe, Filme von chemischen Reaktionen und die Eigenschaften von Materie unter Extrembedingungen. DESY ist Hauptgesellschafter dieser Entdeckermaschine.



06



20



32

CAMPUS

- 06** **Perfektion ist nicht das Maß aller Dinge**
Durchbruch in der Kristallographie
- 10** **Nanostrukturen bauen sich selbst**
Neue Technik für die Herstellung metallischer Nanosysteme
- 34** **Lizenz zum Messen**
Ein neuer Elektronik-Standard erobert den Markt
- 36** **Unbekannte Sauerstoffquelle im Erdmantel**
Hinweise aus der Entdeckung neuer Eisenoxide
- 38** **Teilchenbeschleuniger auf Mikrochip**
Moore-Stiftung fördert innovative Technologie
- 39** **Warum van Goghs Sonnenblumen welken**
Röntgenuntersuchung zeigt, wie Chromgelb nachdunkelt

ZOOM

- 14** **Licht für die Zukunft**
Der European XFEL
- 17** **„Licht am Ende des Tunnels“**
Massimo Altarelli über den weltgrößten Röntgenlaser
- 18** **Experimente am European XFEL**
Neue Forschungsmöglichkeiten für viele Naturwissenschaften
- 20** **Maßarbeit vom Fließband**
Herausforderungen beim Beschleunigerbau
- 25** **„Triumph für DESY“**
Drei Fragen an Helmut Dosch
- 26** **Europäische Partner**
Elf Länder beteiligen sich am Bau des European XFEL
- 28** **Per Rad durch den Röntgenlaser**
Zwei Schüler erkunden den European XFEL

SPEKTRUM

- 30** **Forschung kurz gefasst**
 - Fußbälle ohne Widerstand
 - Explodierende Nanopartikel
 - Forscher röntgen Proteinkristalle direkt in der Zelle
 - Neues Nanomaterial
 - Molekularer Breakdance
 - Optischer Trichter für Nanopartikel
 - Ein Gen, zwei Proteine, ein Komplex

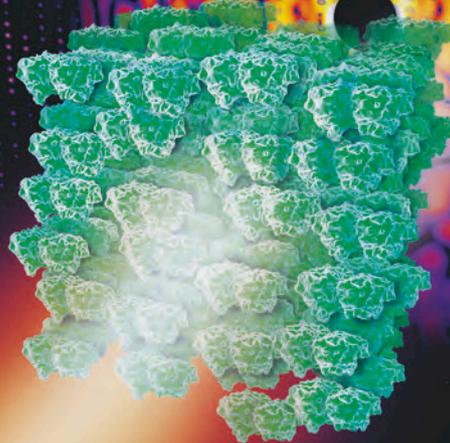
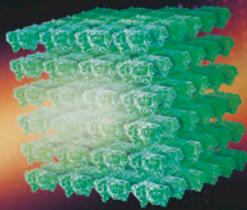


RUBRIKEN

- 02** **femtoskop**
Der Planeten-Simulator
- 09** **femtopolis**
Entchen marsch!
- 33** **femtomenal**
16 288 Meter Tunnel
- 40** **femtocartoon**
Sind Laserschwerter die besseren Argumente?

Perfektion ist nicht das Maß aller Dinge

Eine Dosis Unordnung sorgt für einen Durchbruch in der Kristallographie



Leicht „unordentliche“ Kristalle (rechts) aus komplexen Biomolekülen wie dem hier abgebildeten Photosystem II erzeugen im Röntgenlicht ein kontinuierliches Streubild, aus dem sich mehr Informationen gewinnen lassen als aus den sogenannten Bragg-Peaks eines stärker geordneten Kristalls (links).

In der Wissenschaft ist es wie im echten Leben: Perfekt zu sein, ist nicht immer die beste Wahl. Gerade in kleinen Macken offenbart sich manchmal das wirklich Interessante. Menschlich gesehen ist das keine neue Wahrheit. Kleine Eigenheiten im Charakter, individuelle Abweichungen von der Norm eines perfekten Körpers gelten zumeist nicht als störend, sondern machen einen Menschen liebenswert und interessant. Für eine exakte Wissenschaft wie die Kristallographie hingegen, die auf physikalischen Messmethoden und mathematischen Analysen fußt, bedeutet das einen echten Paradigmenwechsel.

Bestrahlt man einen Kristall mit Röntgenlicht, entsteht auf dem Detektor ein charakteristisches Muster aus hellen Punkten, den sogenannten Bragg-Peaks. Aus solchen Streubildern können die Experten den räumlichen Aufbau eines Kristalls rekonstruieren, bis hinunter zur atomgenauen Struktur der Moleküle, aus denen so ein Kristall besteht. Dabei galt bisher: Je perfekter die Moleküle im Kristall angeordnet sind, desto besser das Abbild des Moleküls. Doch für die besonders komplexen Biomoleküle, die sich extrem schwer kristallisieren lassen, ist Perfektion nicht das Maß aller Dinge. Gerade die kleinen Fehler etwas „unordentlicher“ Kristalle, in denen einzelne Moleküle leicht verschoben sind, können entscheidende Informationen für die Strukturaufklärung beisteuern – verborgen in dem schwachen, kontinuierlichen Streubild, das bislang im Wesentlichen als störender Hintergrund galt und nicht weiter beachtet wurde.

„Diese Entdeckung besitzt das Potenzial, eine echte Revolution in der Kristallographie komplexer Materie zu werden“

Helmut Dosch, DESY

Diese Entdeckung gelang einem Team unter Leitung von DESY-Forscher Henry Chapman vom Hamburger Center for Free-Electron Laser Science CFEL. Die Forscher entwickelten eine neue Methode, um die räumlichen Strukturen von Proteinen und anderen Biomolekülen zu bestimmen, die über bisherige Verfahren in vielen Fällen nicht zugänglich waren. „Unsere Entdeckung erlaubt uns, atomare Details von großen

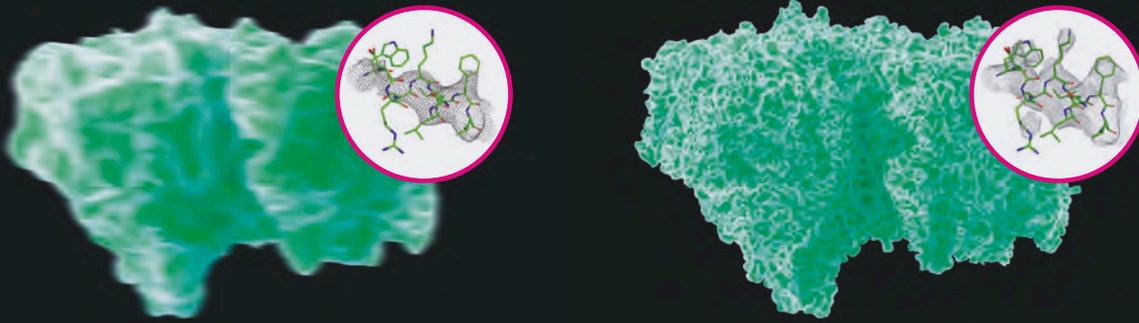


Henry Chapman leitet die Abteilung Kohärente Röntgenbildgebung am Center for Free-Electron Laser Science bei DESY.

Proteinkomplexen genau abzubilden“, erläutert Chapman, der auch Professor an der Universität Hamburg und Mitglied des Hamburg Centre for Ultrafast Imaging CUI ist. Die neue Methode kann mit weniger geordneten Kristallen arbeiten und kommt ohne die sonst benötigten Zusatzinformationen und chemisches Vorwissen aus. „Diese Entdeckung besitzt das Potenzial, eine echte Revolution in der Kristallographie komplexer Materie zu werden“, betont der Vorsitzende des DESY-Direktoriums, Helmut Dosch. Die Forscher bekommen Zugang zu den Bauplänen von tausenden medizinisch und biologisch bedeutenden Biomolekülen. Die räumliche Struktur liefert wichtige Informationen über die Funktionsweise eines Biomoleküls und kann damit beispielsweise als Basis zur Entwicklung eines Medikaments dienen.

„Extrem-Sudoku in drei Dimensionen“

Selbst mit einem perfekten Kristall lässt sich eine völlig unbekannte Proteinstruktur nicht allein aus den Bragg-Peaks bestimmen. „Diese Aufgabe ist wie Extrem-Sudoku in drei Dimensionen mit Millionen Kästchen aber nur der Hälfte der nötigen Tipps“, erläutert Chapman. In der Kristallographie wird dieses komplizierte Puzzle als Phasenproblem bezeichnet. Der Begriff beschreibt die Tatsache, dass die Phasen der gestreuten Lichtwellen bekannt sein müssen, um die Struktur des Moleküls zu berechnen. Die Phase einer Lichtwelle gibt an, wie sehr ihr Wellenberg dem einer anderen Welle vorauslief oder hinterherläuft. Die Phasen der einzelnen Wellen lassen sich jedoch nicht messen. Um das Rätsel zu knacken, sind daher weitere Hinweise nötig. Diese lassen sich unter Umständen aus der bereits bekannten Struktur eines chemisch eng verwandten Moleküls gewinnen oder aus dem Vergleich mit Streubildern von Kristallen chemisch leicht veränderter Moleküle. >>



Die Analyse der Bragg-Peaks alleine (links) liefert deutlich weniger Details des untersuchten Moleküls als die zusätzliche Analyse des kontinuierlichen Streubilds (rechts). Die Lupen zeigen Originaldaten aus der Untersuchung.



Auch diese Hürde erschwert insbesondere bei großen Molekülkomplexen wie etwa Membranproteinen die Strukturbestimmung.

Chapman entdeckte, dass das Phasenproblem und das Problem der nicht perfekten Kristalle miteinander verbunden sind. Der Schlüssel liegt in dem schwachen, kontinuierlichen Streubild, das bei „unordentlichen“ Kristallen entsteht, dem vermeintlich störenden Hintergrund. Daraus lassen sich zwar Einblicke in die Vibrationen und andere Dynamiken der Moleküle gewinnen, für die Strukturanalyse wird es jedoch normalerweise nicht berücksichtigt. Doch wenn die Unordnung im Kristall einzig daher rührt, dass die einzelnen Moleküle leicht von ihrer Idealposition im Kristall verschoben sind, enthält dieser „Hintergrund“ das komplette kontinuierliche Streubild der Einzelmoleküle im Kristall.

„Würde man ein einzelnes Molekül mit Röntgenstrahlen beleuchten, würde es ein kontinuierliches Streubild ohne irgendeinen Bragg-Peak erzeugen“, erläutert Erstautor Kartik Ayyer aus Chapmans CFEL-Gruppe. „Das Muster wäre allerdings extrem schwach und sehr schwer zu messen. Aber der ‚Hintergrund‘ in unserer Analyse ist wie eine Aufsummierung zahlreicher Einzelaufnahmen individueller Moleküle. Wir benutzen den Kristall quasi nur, um eine Vielzahl gleich ausgerichteter Moleküle gemeinsam in den Strahl zu befördern.“ Das kontinuierliche Streubild liefert ausreichend Informationen, um das Phasenproblem direkt zu lösen, ohne dass irgend etwas über das untersuchte Molekül bekannt sein muss. In Analogie zum Sudoku-Puzzle ergeben die Messungen nun genug Hinweise, um stets die richtige Antwort zu finden.

Die besten Kristalle sind nicht perfekte Kristalle

Dieses Konzept führt zu einem Paradigmenwechsel in der Kristallographie: Die am besten geordneten Kristalle sind bei dem neuen Verfahren nicht mehr die besten für die Analyse. Am besten eignen sich leicht ungeordnete Kristalle, betont Chapman. „Erstmals haben wir Zugang zu Streubildern einzelner Moleküle – das gab es zuvor in der Kristallographie noch nie. Dabei wissen wir seit langem, wie sich das Streubild einzelner Moleküle analysieren lässt, wenn man es denn messen kann.“ Die Technik der sogenannten kohärenten Röntgenbeugung mit Hilfe von Freie-Elektronen-Lasern hat hierzu sehr leistungsfähige Algorithmen geliefert. „Man muss nicht einmal die Chemie kennen“, erläutert Chapman. „Aber man kann sie direkt aus den dreidimensionalen Bildern erkennen, die man bekommt.“

„Erstmals haben wir Zugang zu Streubildern einzelner Moleküle – das gab es zuvor in der Kristallographie noch nie“

Henry Chapman, DESY

Um ihre neue Technik experimentell zu testen, tat sich Chapmans Gruppe mit dem Team von Petra Fromme und weiteren Forschern von der Arizona State University, der Universität von Wisconsin, der griechischen Stiftung für »



Entchen marsch!

Aus der Badewanne an die Forschungsfront

Das kleine gelbe Quietsch-Entchen liegt gut in der Hand, schwimmt immer oben und ist unser liebster Badegast in der heimischen Wanne. Doch auch die Forscher haben die Gummitiere für sich entdeckt: Eher unbeabsichtigt geriet eine Containerladung Plastikspielzeug, die ein Frachter aus Hongkong im Januar 1992 im Ostpazifik verlor, zu einem Großexperiment über die Verbreitung von Plastikmüll im Meer. Knapp 29 000 Badewannenentchen und Co. trieben mit den Strömungen über die Ozeane und landeten in

aller Welt. Ein trauriges Beispiel für die globalen Stoffkreisläufe.

Vergnüglicher ist der Enten-Einsatz bei den Kristallographen, die mit Hilfe von intensivem Röntgenlicht die räumliche Struktur komplexer Biomoleküle entschlüsseln. Das funktioniert nur mit komplizierten Berechnungen, sogenannten Fourier-Transformationen, und hier kommt die Ente ins Spiel: Sie ersetzt in den Rechenmodellen die Biomoleküle, fungiert also als Testobjekt, dessen Form bekannt, nicht zu kompliziert, aber auch nicht zu simpel ist. Sitzen viele Enten in einem Gitter, symbolisiert das den Kristall, den die Forscher mühsam aus den Biomolekülen gezüchtet haben, um ihn mit Röntgenlicht zu bestrahlen und aus dem entstehenden Streubild auf die Struktur rückzuschließen. Nur wenn die Rechenmodelle es schaffen, aus dem Streubild die Ente zu rekonstruieren, taugen sie auch dazu, die unbekannte Struktur eines Bio-

moleküls aus den entsprechenden Streubildern zu ermitteln.

Zum ersten Mal tauchte die „Fourier-Ente“ in einem Buch über optische Transformationen der britischen Kristallographen Charles Alfred Taylor und Henry Solomon Lipson aus dem Jahr 1964 auf. Heute hat sie sich im Unterrichtsmaterial weit verbreitet und begegnet so gut wie jedem Studenten, der eine Einführung in das Fach bekommt.

Jahrzehntelang galt dabei die Devise: Je ordentlicher die Enten auf ihren Gitterpunkten sitzen, desto besser. Doch die Natur ist nicht immer präzise. Überraschenderweise lässt sich über die Enten – oder genauer: über die Moleküle, die sie repräsentieren – viel mehr lernen, wenn sie nicht allzu perfekt in Reihe und Glied stehen. Ein Paradigmenwechsel für die Kristallographen – und mehr Freiheit für die Entchen, die jetzt um ihren Gitterpunkt auch mal herumschwimmen dürfen.



Forschung und Technology – Hellas FORTH sowie dem US-Beschleunigerzentrum SLAC zusammen. Die Wissenschaftler nutzten den weltstärksten Röntgenlaser LCLS am SLAC, um „unordentliche“ Kristalle eines Membranproteinkomplexes namens Photosystem II zu untersuchen, der Teil der Photosynthese-Maschinerie in grünen Pflanzen ist.

Die Analyse des kontinuierlichen Streubilds verbesserte in dem Versuch die Detailgenauigkeit gegenüber der reinen Auswertung der Bragg-Peaks unmittelbar um etwa ein Viertel von 4,5 auf 3,5 Ångström. Ein Ångström ist ein Zehntel Nanometer (milliardstel Meter) und entspricht in etwa dem Durchmesser eines Wasserstoffatoms. Das resultierende Bild zeigt dadurch Details des Moleküls, die sonst nur durch die rechnerische Anpassung an ein chemisches Modell sichtbar werden. „Das ist ein ziemlich großer Schritt bei der Untersuchung von Biomolekülen“, betont Ko-Autor Anton Barty von DESY. „Und wir können die räumliche Auflösung weiter verbessern, wenn wir mehr Bilder aufnehmen.“ Das Team hatte für diese ersten Versuche nur ein paar Stunden Messzeit zur Verfügung, während eine normale Messkampagne oft einige Tage dauert.

Die Wissenschaftler hoffen nun, noch detailreichere Bilder vom Photosystem II und vielen anderen Makromolekülen mit ihrer neuen Technik gewinnen zu können. „Diese Form der kontinuierlichen Röntgenbeugung hat man tatsächlich schon seit langem bei vielen schlecht streuenden Kristallen beobachtet“, erläutert Chapman. „Man hatte allerdings noch nicht verstanden, dass sich daraus Strukturinformationen gewinnen lassen, daher wurde sie bei der Analyse gewöhnlich unterdrückt. Wir werden jetzt viel damit zu tun haben zu prüfen, ob wir aus alten, ursprünglich verworfenen Daten weitere Molekülstrukturen gewinnen können.“

.....
Nature, 2016; DOI: 10.1038/nature16949

Nanostrukturen bauen sich selbst

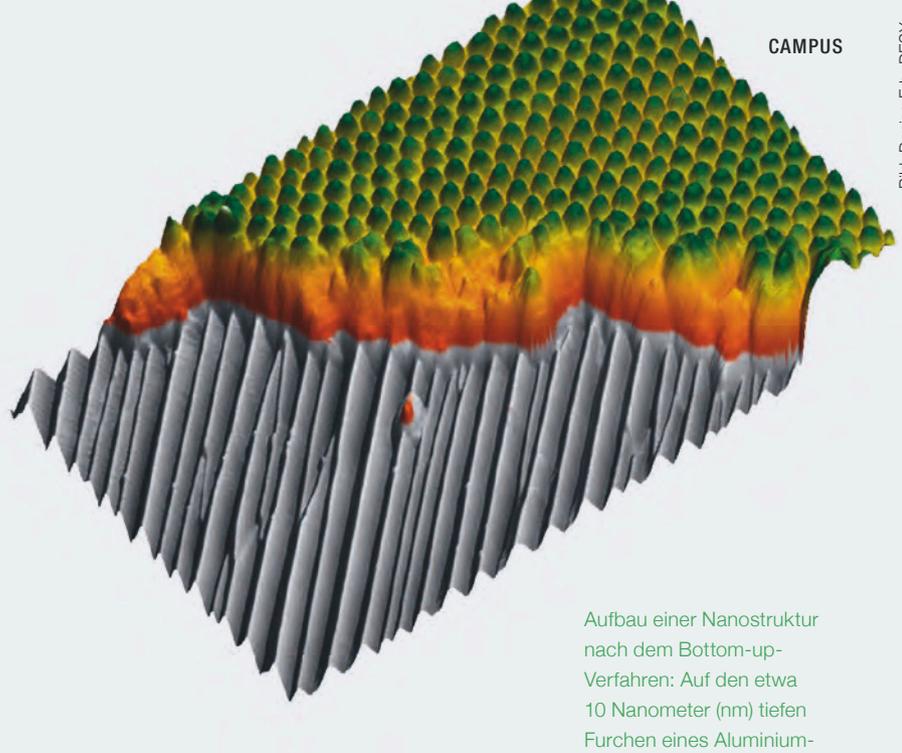
Neue Technik für die Herstellung metallischer Nanosysteme

DESY-Forscher haben ein neues Verfahren entwickelt, mit dem sich metallische Nanostrukturen selbst bauen und ordnen. Dieser sogenannte Bottom-up-Ansatz bietet eine schnelle und einfache Alternative zu bisherigen Verfahren und ist damit auch für die Wirtschaft interessant, die immer häufiger Nanostrukturen nutzt. „Vor allem erlaubt die Methode, ausgesprochen gleichförmige Nanostrukturen in sehr regelmäßigen Anordnungen mit verhältnismäßig geringem Aufwand herzustellen“, erläutert die Hauptautorin des Fachartikels, Denise Erb. Mit einem von DESY-Wissenschaftler Kai Schlage entwickelten Spezialaufbau konnten die Forscher an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III den Nanostrukturen beim Wachsen zusehen.

Nanostrukturen sind winzige Objekte, die kleiner als ein tausendstel Millimeter sind. Ein Nanometer (nm) ist ein millionstel Millimeter. Im Vergleich dazu ist die Dicke eines menschlichen Haars mit fast 40 000 Nanometern riesig. Für viele wissenschaftliche Fragestellungen und technische Anwendungen ist es wichtig, dass die Nanostrukturen sich in einem geordneten Muster wiederholen. Größen und Abstände der einzelnen Musterelemente liegen dabei zwischen einigen wenigen und mehreren hundert Nanometern. Nanostrukturen begegnen uns immer häufiger im Alltag. „Durch Nanostrukturen können bessere oder neue Funktionalitäten erzielt werden. Zum Beispiel bei Katalysatoren, Datenspeichern oder Sensoren“, sagt Erb. „Produkte, mit denen wir in unserem täglichen Leben umgehen, haben aber in der Regel Abmessungen von Zentimetern oder mehr. Also möchte man nanostrukturierte Materialien in dieser Größenordnung herstellen. Und

das möglichst schnell und billig.“ Allerdings ist es oft eine große Herausforderung, Nanostrukturen sowohl auf großer Fläche als auch mit regelmäßiger Anordnung herzustellen. Hierbei kann das neue Verfahren seine Stärke ausspielen.

Die traditionelle Herangehensweise an dieses Problem, das sogenannte Top-Down-Verfahren, lässt sich mit Bildhauerei vergleichen: Es wird zunächst eine Fläche mit dem gewünschten Material beschichtet. Aus dieser Schicht wird dann das Muster durch Entfernen bestimmter Bereiche herausgearbeitet. Dies geschieht Stück für Stück, so dass die Produktionsdauer direkt von der Größe der gewünschten Fläche abhängt. Der Vorteil ist, dass sich nahezu jedes gewünschte Muster auf diese Weise herstellen lässt.



Aufbau einer Nanostruktur nach dem Bottom-up-Verfahren: Auf den etwa 10 Nanometer (nm) tiefen Furchen eines Aluminiumoxid-Kristalls (grau) wächst eine 40nm dicke Copolymer-Schicht (braun). Darauf lagern sich rund 10nm hohe Quantenpunkte aus Metall ab (grün). Die gezeigte Fläche ist 3000nm mal 1800nm groß.

„Durch Nanostrukturen können bessere oder neue Funktionalitäten erzielt werden. Zum Beispiel bei Katalysatoren, Datenspeichern oder Sensoren“

Denise Erb, DESY

Die Methode der DESY Forscher dagegen fußt auf dem sogenannten Bottom-up-Ansatz. Dieser nutzt aus, dass bestimmte Materialien von sich aus dazu neigen, Nanostrukturen zu bilden. „Bei Bottom-up-Methoden, auch selbstorganisierende Methoden genannt, zwingen wir das Material nicht in ein bestimmtes Muster wie bei Top-down-Verfahren“, erläutert Erb. „Stattdessen schaffen wir Bedingungen, die es dem Material erlauben, sich selbst zu ordnen und Nanostrukturen auszubilden. Die Form der Nanostrukturen können wir dabei nicht so beliebig festlegen, wie bei Top-down-Methoden – sie sind durch die Materialeigenschaften vorgegeben. Nichtsdestotrotz sind die entstehenden Nanostrukturen für uns sehr interessant und nützlich.“ Der große Vorteil liegt darin, dass die Bildung der Nanostrukturen auf der gesamten Fläche gleichzeitig geschieht, so dass die Dauer der Herstellung nicht mehr von der Größe der Fläche abhängt.

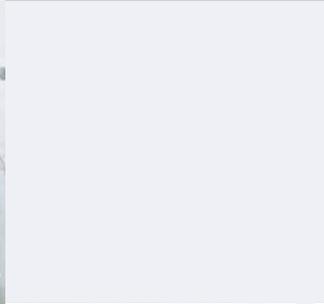
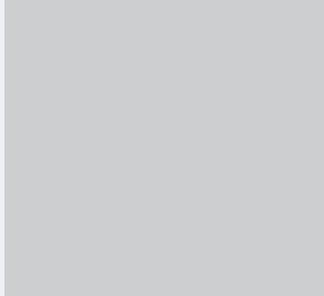
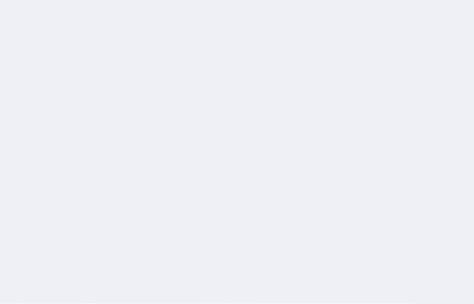
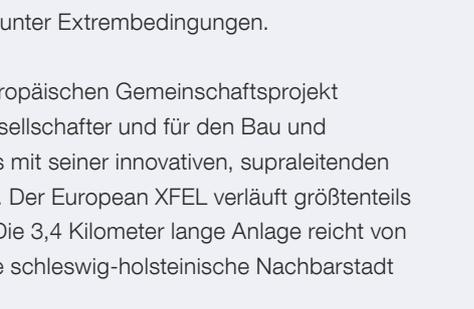
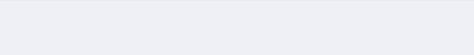
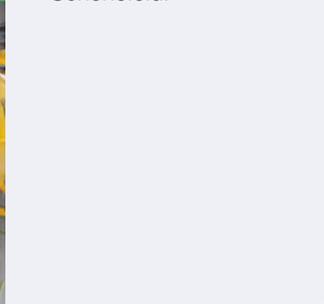
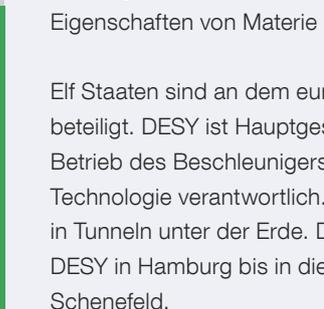
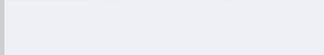
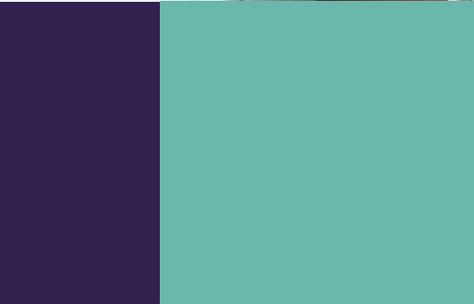
Um die gewünschten Nanostrukturen per Bottom-up-Verfahren zu erhalten, können auch mehrere verschiedene selbstorganisierende Materialien miteinander kombiniert werden. Der Aufbau der Nanostrukturen geschieht dann schrittweise, so dass die Ordnung der ersten

Struktur die Bildung der zweiten Struktur beeinflusst. Durch eine solche Kombination entstehen besonders gleichmäßige Muster. Erb und ihre Kollegen kombinieren auf diese Weise Kristalle, Polymere und Metalle.

„Für Wissenschaftler dürfte besonders spannend sein, dass man mit Röntgenstreuung live dabei zusehen kann, wie sich die Nanostrukturen bilden und wie sich dabei ihre physikalischen Eigenschaften entwickeln“, sagt der Leiter der DESY-Forschungsgruppe, Ralf Röhlsberger. An der Forschungslichtquelle PETRA III waren die DESY-Forscher live dabei: In einer speziellen Anlage haben sie die Metall-Nanostrukturen unter verschiedenen Bedingungen direkt im Röntgenstrahl wachsen lassen.

Mit Hilfe des Röntgenlichts können die Forscher zum Beispiel erkennen, wie sich die Form und die magnetischen Eigenschaften der Nanostrukturen entwickeln. Sie können also nicht nur das Endergebnis ihrer Arbeit begutachten, sondern auch die Zwischenstadien genauer studieren. Wie beim Fußball sind die Forscher nicht nur am Endergebnis des Spiels interessiert, sondern auch am Verlauf. Die Forscher möchten etwa wissen, welche Parameter eine wichtige Rolle gespielt haben. „Eine Methode zu etablieren, die Nanostrukturen einfacher und schneller entstehen lässt, ist genauso Ziel unserer Forschung, wie besser zu verstehen, wieso sich diese winzigen Strukturen magnetisch, chemisch oder optisch so verhalten, wie sie es tun“, fasst Erb zusammen.

Science Advances, 2015; DOI: 10.1126/sciadv.1500751

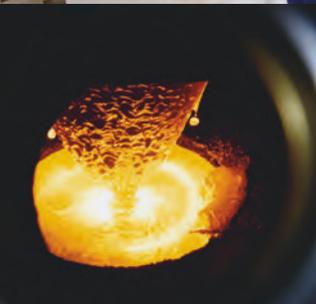
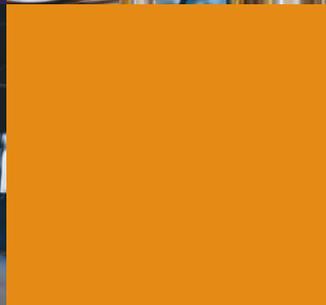
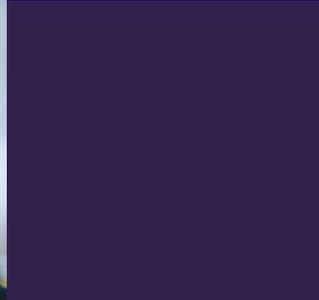
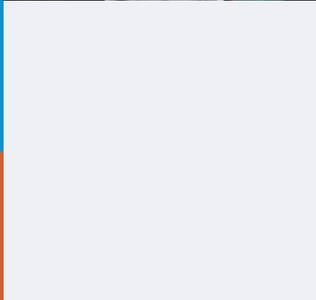
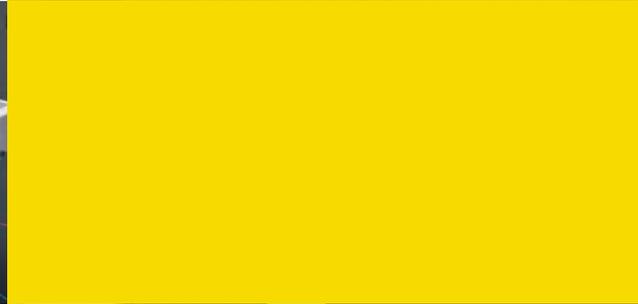
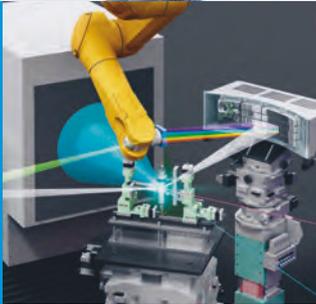


ZOOM

Röntgenlaser der Superlative

Er ist Hochgeschwindigkeitskamera, Supermikroskop und Planetensimulator zugleich: Mit seinen intensiven und ultrakurzen Röntgenlaserblitzen eröffnet der European XFEL von 2017 an Forschern aus Wissenschaft und Industrie völlig neue Einblicke in die Nanowelt – atomare Details von Viren, die molekulare Zusammensetzung neuartiger Werkstoffe, Filme von chemischen Reaktionen und die Eigenschaften von Materie unter Extrembedingungen.

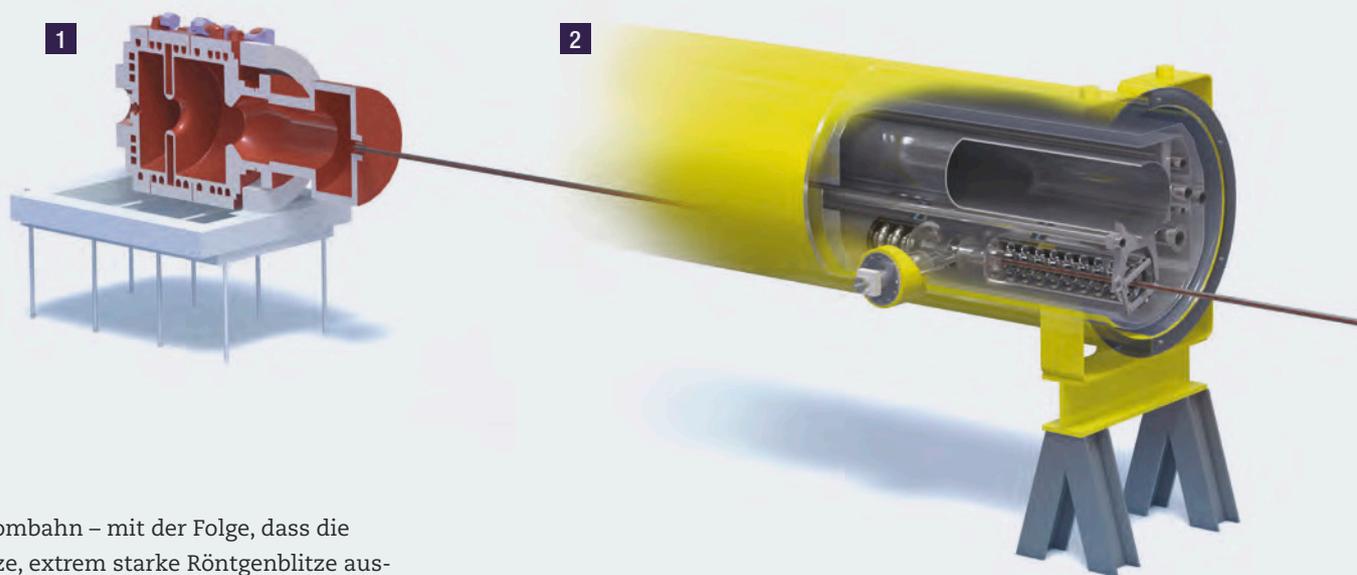
Elf Staaten sind an dem europäischen Gemeinschaftsprojekt beteiligt. DESY ist Hauptgesellschafter und für den Bau und Betrieb des Beschleunigers mit seiner innovativen, supraleitenden Technologie verantwortlich. Der European XFEL verläuft größtenteils in Tunneln unter der Erde. Die 3,4 Kilometer lange Anlage reicht von DESY in Hamburg bis in die schleswig-holsteinische Nachbarstadt Schenefeld.



Licht für die Zukunft

Der European XFEL in Hamburg wird die stärksten Röntgenlaserblitze der Welt produzieren

Dreieinhalb Kilometer erstreckt sich der European XFEL von Hamburg-Bahrenfeld bis ins schleswig-holsteinische Schenefeld. Der leistungsstärkste Röntgenlaser der Welt ist zugleich eine der größten Wissenschaftsmaschinen Europas. Seine Basis ist ein knapp zwei Kilometer langer Teilchenbeschleuniger. Er bringt Elektronen fast auf Lichtgeschwindigkeit. Spezielle Magnetstrukturen, sogenannte Undulatoren, zwingen die schnellen Elektronen



auf eine Slalombahn – mit der Folge, dass die Teilchen kurze, extrem starke Röntgenblitze aussenden, die noch dazu Lasereigenschaften haben.

Die Röntgenblitze machen Aufnahmen ultraschneller Vorgänge möglich, weil jeder einzelne Blitz weniger als 100 billionstel Sekunden kurz und ausreichend lichtstark für Momentaufnahmen ist. So lassen sich molekulare Reaktionen quasi filmen und damit Prozesse verstehen, die für chemische Produktionsverfahren in der Industrie oder medizinische Wirkmechanismen grundlegend sind. Außerdem können die kurzwelligen Laserblitze sichtbar machen, wie Nanowerkstoffe oder komplexe Biomoleküle auf atomarer Ebene zusammengesetzt sind – auf dieser Wissensbasis lassen sich neue maßgeschneiderte Materialien und Medikamente entwickeln. Auch extreme

In der **Elektronenquelle [1]** schlägt ein starker Laser jeweils mehrere Milliarden Elektronen aus einer Cäsiumtellurid-Elektrode, die anschließend zu feinen Paketen gebündelt werden. Den richtigen Schub geben diesen Paketen die **Beschleunigermodule [2]**. In diese werden starke Radiowellen eingespeist, auf denen die Elektronen dann „reiten“ wie Surfer

Zustände von Materie lassen sich mit dem Röntgenlaser erzeugen und analysieren: hohe Drücke und Temperaturen, wie sie im Inneren von Planeten vorkommen, und unter denen sich Materie ganz anders verhält als unter irdischen „Normalbedingungen“.

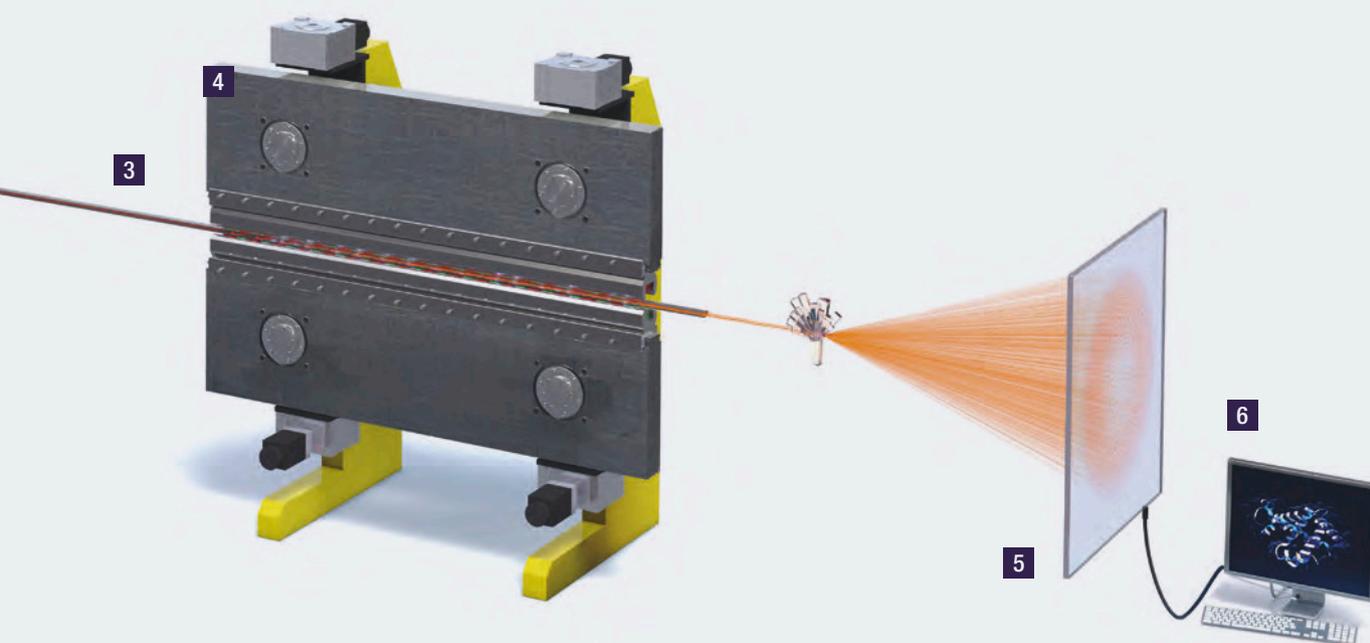
„Der European XFEL wird Wissenschaftlern aus Forschung und Industrie ganz neue Möglichkeiten eröffnen“, betont Massimo Altarelli, Vorsitzender der Geschäftsführung des European XFEL. „Vieles wird Grundlagenforschung sein, die ihre größte Wirkung meist nicht kurzfristig und auch nicht immer auf dem beabsichtigten Gebiet entfaltet. Aber ohne solche Grundlagenforschung wäre unser heutiges Leben nicht vorstellbar.“

Rennmaschine für Elektronen

Elf Staaten sind an dem europäischen Gemeinschaftsprojekt beteiligt. DESY ist Hauptgesellschafter und verantwortet den Bau und Betrieb des Beschleunigers mit seiner innovativen, supraleitenden Technologie, die bereits bei DESYs Röntgenlaser-Pionier FLASH erprobt wurde. Die Beschleunigermodule sind gelbe, wuchtige Röhren, zwölf Meter lang und einen knappen Meter dick. Ein Blick ins Innere eines solchen Moduls

offenbart einen komplexen Aufbau. Die Elektronen flitzen durch ein dünnes, luftleer gepumptes Rohr. Die meisten Komponenten dienen der Wärmeisolierung und der Kühlung – diverse Leitungen, durch die Flüssighelium gespült wird, was das Innere der Röhre auf minus 271 Grad Celsius bringt.

Der Aufwand ist nötig, damit die Kernkomponenten funktionieren können – die Resonatoren. Diese silbrig glänzenden Bauteile sorgen für die eigentliche Beschleunigung. Mit Hilfe starker Radiowellen bringen sie die winzigen Elektronenpakete nahezu auf Lichtgeschwindigkeit. Jedes Modul enthält acht Resonatoren bestehend aus dem supraleitenden Metall Niob. Supraleitend heißt, dass das Metall jeden elektrischen Widerstand verliert und Strom verlustfrei leitet – allerdings erst bei klirrender Kälte. Der Vorteil: So können pro Sekunde deutlich mehr Elektronenpakete auf Touren gebracht und entsprechend mehr Röntgenblitze erzeugt werden als durch die konventionelle, normalleitende Beschleunigertechnik. Insgesamt 101 supraleitende Module werden die Teilchen in dem zwei Kilometer langen Beschleunigertunnel auf Trab bringen. Gelegentlich sind sie durch „warme“, also ungekühlte Abschnitte >>



auf einer Wasserwelle. Damit die rasenden Teilchen nicht durch Luft abgebremst werden, fliegen sie in **Vakuurröhren [3]**. Haben die Elektronen ihre Maximalenergie erreicht, durchlaufen sie spezielle Magnetstrukturen, die **Undulatoren [4]**. Diese zwingen die Elektronen auf einen Slalomkurs und bringen sie dazu, Röntgenblitze auszusenden. Am Ende der Undulatorstrecke sind

extrem intensive, ultrakurze Röntgenlaserblitze entstanden, die Forscher nutzen, um an **Messplätzen [5]** die unterschiedlichsten Proben zu durchleuchten. Das Prinzip: Die Atome der Probe lenken das Röntgenlicht ab, Detektoren fangen die abgelenkte Strahlung auf. Am **Computer [6]** lässt sich daraus beispielsweise die räumliche Struktur der Probe atomgenau berechnen.

Weltweit werden Freielektronen-Röntgenlaser gebaut. Etwa die Hälfte der Anlagen ist bereits in Betrieb.



unterbrochen. In ihnen sind unter anderem Magnete zum Bündeln der Elektronenpakete montiert. Am Ende des Beschleunigers verzweigt sich der Tunnel in zwei Röhren. Beide enthalten eine weitere Kernkomponente der Maschine – die Undulatoren. Über und unter dem Elektronenstrahlrohr sind Permanentmagnete montiert, alle vier Zentimeter wechseln sich Nord- und Südpol ab. Die Elektronen werden dadurch auf Slalomkurs gebracht.

Auf Slalomkurs

In den Kurven strahlen die fast lichtschnellen Elektronen starkes Röntgenlicht ab. Das Besondere an dem Freielektronen-Laser: Er besitzt nicht nur einen Undulator, sondern 35, hintereinandergeschaltet auf einer Strecke von mehr als 200 Metern. „Wenn das Röntgenlicht eines Undulators mit dem Licht des nächsten im Takt schwingt, findet eine Verstärkung statt“, erläutert Tobias Haas, Technischer Koordinator beim European XFEL. „Nur dadurch erreiche ich den Verstärkungseffekt, den ich für einen Laser brauche.“ Um den Lasereffekt optimal einstellen zu können, ist zwischen jedem der fünf Meter langen Undulatoren ein Zwischenstück eingesetzt, ein sogenannter Phasenschieber.

Nach der Undulatorstrecke teilt sich die dünne, luftleer gepumpte Röhre in zwei Röhren auf: Die eine ist für die Elektronenpakete gedacht, die andere für die in den Undulatoren entstandenen Röntgenlaserblitze. Um beide voneinander zu

trennen, lenken Biegemagnete den Elektronenstrahl sanft nach rechts ab, in einen anderen Tunnel. Die Röntgenblitze dagegen laufen strikt geradeaus, bis sie in einem flachen Winkel auf einen Spezialspiegel treffen. Dieser ist mit Nanometerpräzision geschliffen und fungiert als Verteilstation: Entweder lässt er die Röntgenblitze in ein Rohr geradeaus passieren, oder er lenkt sie um ein Zehntelgrad ab in ein anderes Rohr. 600 Meter laufen beide Röhren nebeneinander her, wobei sie sich allmählich immer weiter voneinander entfernen. Am Ende des Tunnels, nach 3,4 Kilometern, treten sie in einem Abstand von 1,40 Metern durch eine dicke Betonwand. Direkt dahinter liegt die große Experimentierhalle mit Messhütten, deren Wände Blei zur Abschirmung der Röntgenstrahlung enthalten. In diesen Hütten sollen 2017 die ersten Experimente stattfinden: Die Röntgenblitze werden auf die verschiedensten Proben treffen und deren innerste Strukturen und Prozesse enträtseln.

„Wir haben viele Jahre gearbeitet, um diese Anlage zu bauen“, sagt Haas. „Jetzt fühlen wir uns, als hätten wir bei einem Marathonlauf endlich die Zielfahne im Blick.“ Zunächst wird der europäische Röntgenlaser sechs Messplätze beinhalten. Doch zwei weitere Tunnel sind bereits gegraben und können bei Bedarf mit zusätzlichen Undulatoren bestückt werden. Im Endausbau könnten die Forscher in der Experimentierhalle bis zu fünfzehn Messstationen nutzen.

„Licht am Ende des Tunnels“

Massimo Altarelli, Vorsitzender der Geschäftsführung der European XFEL GmbH, freut sich auf die ersten Experimente am weltgrößten Röntgenlaser

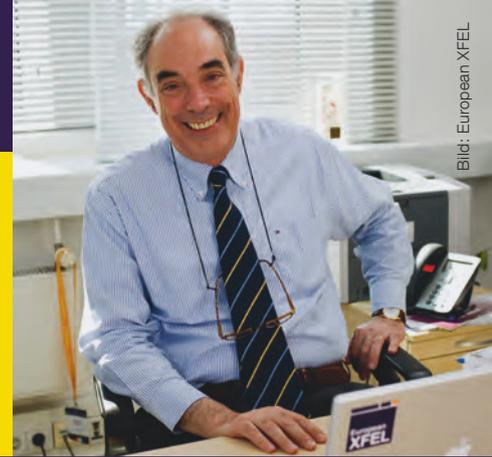


Bild: European XFEL

femto: Sechs Jahre Bauzeit liegen hinter Ihnen, wann geht es los mit der Forschung am European XFEL?

Altarelli: Ich hoffe, dass wir im Februar oder März 2017 die ersten Röntgenlaserblitze sehen werden. In der Experimentierhalle entstehen derzeit die Messplätze, und zwischen Frühjahr und Sommer 2017 werden die beiden ersten Experimentierstationen an den Start gehen. Bis Mitte 2018 sollten dann alle drei Undulatorstrecken und sechs Messplätze in Betrieb sein.

femto: Welche neuen Einblicke ermöglicht die Anlage den Forschern?

Altarelli: Gegenüber den existierenden Röntgenquellen hat der European XFEL einige wesentliche Vorteile. Unter anderem sind seine Pulse deutlich kürzer, nur etwa zehn Femtosekunden lang. Damit wird es möglich sein, Filme von molekularen Prozessen und chemischen Reaktionen aufzunehmen – man kann die 'Action' buchstäblich sehen, wie in einem Actionfilm. Außerdem besitzen die Blitze Lasereigenschaften. Das wird uns erlauben, künftig auch Proben bis ins atomare Detail zu analysieren, die sich nicht kristallisieren lassen. Sollte es gelingen, den Aufbau solcher einzelnen Proteinmoleküle zu enträtseln, die für die Pharmakologie interessant sind, wäre das fantastisch! Allen Methoden gemeinsam ist, dass sie einen Blick auf bisher verborgene Details und Abläufe im Nanokosmos ermöglichen.

femto: Wie profitiert die Gesellschaft davon?

Altarelli: Der European XFEL wird den Wissenschaftlern aus Forschung und Industrie ganz neue Möglichkeiten eröffnen. Vieles wird Grundlagenforschung sein, die ihre größte Wirkung meist nicht kurzfristig und auch nicht immer auf dem beabsichtigten Gebiet entfaltet. Aber ohne solche Grundlagenforschung wäre unser heutiges Leben nicht vorstellbar. Mittel- und langfristig sehe ich zum Beispiel große Chancen für die medizinische Forschung, beispielsweise in der Entwicklung von Arzneimitteln und Therapien, auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien und bei Materialien für neue Technologien. Nicht unterschätzen sollte man aber auch, dass bei uns junge Wissenschaftler an einer weltweit führenden Forschungseinrichtung Erfahrung sammeln werden, die sie später in Wissenschaft und Industrie zur Entwicklung neuer Verfahren und Produkte einsetzen können.

femto: Schon 2003 hatte die Bundesregierung grünes Licht für den europäischen Röntgenlaser gegeben. Warum hat es so lange gedauert, bis der Bau beginnen konnte?

Altarelli: Der European XFEL wäre für ein einzelnes Land zu groß und zu teuer gewesen, deshalb war er von Anfang an als ein internationales Projekt angelegt. Die Wissenschaftler aus anderen Ländern zu begeistern, war einfach. Schwieriger war es, die Zustimmung von Politikern

und Geldgebern zu erhalten und sich auf eine gemeinsame Rechtsform zu einigen. Im September 2009 wurde das internationale Abkommen schließlich unterzeichnet. Damit konnte der Bau beginnen.

femto: Hat der Bau wie geplant funktioniert?

Altarelli: Manchmal hätte ich mir natürlich gewünscht, es hätte sich schneller machen lassen. Aber immerhin haben wir es mit einer neuen Technologie an der Grenze des Machbaren zu tun, die wir in eine Serienproduktion überführen mussten. Das war eine große Herausforderung. Alles in allem haben sich die Verzögerungen in Grenzen gehalten, und wir können sehr zufrieden sein!

femto: Die Gemütslage bei Ihnen und Ihren 280 Mitarbeitern?

Altarelli: Sehr gut. Nach einer langen und anspruchsvollen Bau- und Planungsphase sehen wir nun buchstäblich das Licht am Ende des Tunnels – und zwar nicht nur in unserem Team, sondern bei Forschern in ganz Europa. Zum jährlichen Nutzertreffen kommen schon jetzt jeweils hunderte Experten nach Hamburg. Das zeigt das große Interesse und die Aufbruchsstimmung, die gerade unter den Wissenschaftlern herrscht.

Experimente am European XFEL

Atomgenaue Bilder von Viren und Biomolekülen, Superzeitlupe für chemische Reaktionen oder die Untersuchung von Materie bei Extrembedingungen wie sie etwa tief im Inneren gigantischer Gasplaneten herrschen – mit seinen außergewöhnlich hellen, energiereichen und intensiven Röntgenblitzen soll der European XFEL neue Erkenntnisse in vielen Forschungsdisziplinen ermöglichen. Die zahlreichen Anwendungen erstrecken sich über Biologie, Medizin, Chemie, Physik, Materialwissenschaften, Elektronik, Nanotechnik und eine Reihe weiterer Fachgebiete. Sechs Experimentierstationen bieten dabei eine Vielzahl von Untersuchungsmöglichkeiten. Unter anderem im Rahmen sogenannter Nutzer-Konsortien tragen zahlreiche Institutionen zu verschiedenen Aspekten des Experimentierbetriebs am European XFEL bei. Auch DESY ist – zum Teil führend – an solchen Konsortien beteiligt.

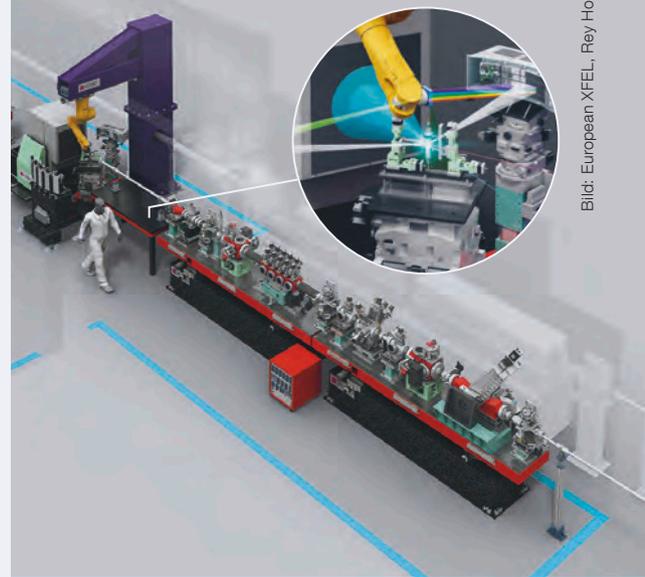


Bild: European XFEL, Rey Hor

Geplanter Aufbau
der Messstation FXE

Dynamik in der Nanowelt

Nanosysteme kommen immer häufiger auch in unserem Alltag vor. Ein Beispiel sind metallische Nanopartikel in Katalysatoren, etwa im Auto. Die Untersuchung der Eigenschaften und des dynamischen Verhaltens solcher Systeme dient nicht nur einem besseren grundlegenden Verständnis, sondern auch der Optimierung von alltäglichen Produkten mit Nanopartikeln. Die Messstation **MID** (Materials Imaging and Dynamics) widmet sich solchen Untersuchungen. Doch

nicht nur klassische Festkörper wie Metalle lassen sich an der Experimentierstation untersuchen, auch weiche Materialien wie Polymere und Gele und sogar biologische Proben können auf ihre Nanostruktur und ihre Dynamik hin analysiert werden. Für ein breites Spektrum unterschiedlicher Probenarten stehen verschiedene Analysemethoden zur Verfügung, welche die Lasereigenschaften der XFEL-Strahlung, ihre kurze Pulslänge und hohe Intensität gleichermaßen nutzen.

4D-Supermikroskop in Raum und Zeit

Biomoleküle, Nanokristalle, Viruspartikel, Zellorganellen und Atomcluster – das sind die zentralen Forschungsobjekte an der Messstation **SPB/SFX** (Single Particles, Clusters and Biomolecules and Serial Femtosecond Crystallography). Dabei geht es in der Regel darum, zwei- und dreidimensionale Strukturen der Untersuchungsobjekte aufzuklären, und zwar mit atomgenauer Auflösung von besser als einem Nanometer (millionstel Millimeter). Das 3D-Mikroskop ist dabei eigentlich ein 4D-Supermikroskop, berücksichtigt man auch die hohe mögliche Zeitauflösung.

Die Proben werden quer durch den Röntgenstrahl gejagt. Trifft ein intensiver Blitz beispielsweise einen Kristall aus Biomolekülen, entsteht ein charakteristisches Röntgenstreubild, aus dem sich die Struktur des Biomoleküls rechnerisch rekonstruieren lässt. Der räumliche Aufbau eines Biomoleküls verrät Forschern etwas über seine Funktionsweise und kann Ansatzpunkte für die Entwicklung von Medikamenten liefern. Aber nicht nur die Struktur- und Zellbiologie werden von den Untersuchungsmethoden dieser Messstation profitieren, auch Materialwissenschaften, Nanotechnik und viele andere Disziplinen.

Der Exoplaneten-Simulator

Die „Normalbedingungen“ auf der Erdoberfläche sind im Universum die absolute Ausnahme: Ein Großteil der Materie existiert bei viel höheren Drücken, Temperaturen und stärkeren elektromagnetischen Feldern. In der Experimentierstation **HED** (High Energy Density Science) lassen sich Extrembedingungen simulieren, wie sie beispielsweise im Inneren gigantischer Gasplaneten anderer Sonnensys-

teme (Exoplaneten) herrschen. Zur Erzeugung solcher Extrembedingungen dienen verschiedene Mittel wie beispielsweise optische Hochleistungslaser, Diamantstempelzellen und starke gepulste Magnete. Die Untersuchung von Materie unter Extrembedingungen führt zu einem vollständigeren Bild ihrer Materialeigenschaften, auch abseits des schmalen Bereichs, den wir Normalbedingungen nennen.

Ultraschnelle Quantenfilmkamera

Dynamische Prozesse im Nanokosmos laufen meist auf unvorstellbar kurzen Zeitskalen von milliardstel Sekunden (Femtosekunden) ab. Die Messstation **FXE** (Femtosecond X-ray Experiments) macht sich die extrem kurzen Röntgenblitze des European XFEL zunutze, mit denen sich solche schnellen Prozesse in festen Stoffen, Flüssigkeiten und Gasen scharf abbilden lassen. Beispiele sind sich ausbreitende Schockwellen, explodierende Nanopartikel sowie fast alle chemischen Reaktionen.

So lässt sich mithilfe der ultrakurzen Belichtungszeiten etwa das komplizierte Wechselspiel der Moleküle während einer chemischen Reaktion beobachten, und der Röntgenlaser liefert bisher nicht verfügbare Informationen über die detaillierten Schritte. Dafür wird der zu untersuchende Prozess mit einem Laserblitz gestartet und nach einer genau definierten Zeit mit einem Röntgenlaserblitz abgebildet. Das Experiment wird sehr oft wiederholt und dabei jeweils zu einem etwas späteren Zeitpunkt abgelichtet. So entsteht eine Serie von Standbildern, die sich zu einem Film des beobachteten Prozesses montieren lassen.

Zoom in die Quantenwelt

Im Reich der Atome und Moleküle gibt es noch viele ungeklärte Fragen. Dem Verhalten kleiner Quantensysteme, die aus einem bis einigen zehntausend Atomen bestehen, spürt die Experimentierstation **SQS** (Small Quantum Systems) nach. Insbesondere die Wechselwirkung von diesen kleinsten Struktureinheiten mit den ultra-intensiven Blitzen des Röntgenlasers hat die Mehrphotonenkamera dabei im Visier. Bei Mehrphotonenprozessen entstehen häufig viele Elektronen und hochgeladene Ionen, Moleküle zerbrechen dabei vollstän-

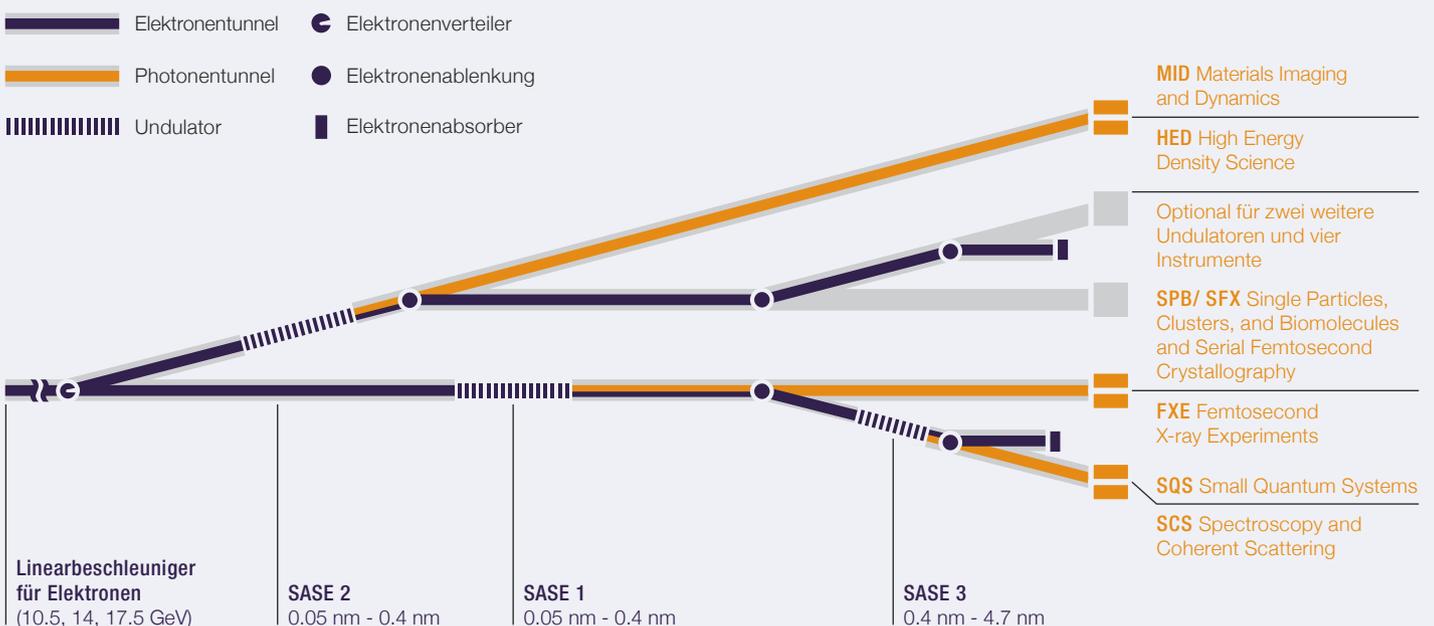
dig in viele geladene Teile. SQS bietet den Forschern verschiedene Techniken, diese Bruchstücke detailliert zu analysieren.

Die Ermittlung exakter atomarer Daten ist dabei nicht nur wesentlich für die Entwicklung neuer theoretischer Modelle, sondern auch für viele andere experimentelle Methoden. Denn um ihre Ergebnisse begründen und quantifizieren zu können, brauchen Wissenschaftler verlässliche Daten, die jedoch selbst für eher einfache Systeme oft fehlen. Dabei ist es notwendig, die Mitspieler – die Atome – zu kennen, um das gesamte Schauspiel zu verstehen.

Struktur und Dynamik komplexer Materialien

Die elektronische und atomare Struktur und Dynamik von funktionalen und komplexen Materialien untersuchen Forscher an der Experimentierstation **SCS** (Spectroscopy and Coherent Scattering) mit sogenannter weicher Röntgenstrahlung. Weiche Röntgenstrahlung besitzt weniger Energie und eine größere Wellenlänge als harte

Röntgenstrahlung. Sie ist unter anderem optimal geeignet für die Untersuchung nanostrukturierter Materialien und ultraschneller Magnetisierungsprozesse. Anwendungspotenziale liegen in den Forschungsfeldern Materialwissenschaften, Oberflächenchemie und Katalyse, Nanotechnik und Dynamik kondensierter Materie.



Maßarbeit vom Fließband

Die Fertigung der supraleitenden Beschleunigermodule war eine große Herausforderung beim Bau des European XFEL

Röntgenlaser auf Beschleunigerbasis gibt es mittlerweile mehrere auf der Welt: Der Pionier FLASH ging im Jahr 2000 bei DESY in Betrieb. Seit einigen Jahren liefern etwa LCLS in Kalifornien und SACLA in Japan hochintensive Röntgenblitze. Beide Anlagen haben – unter anderem durch zahlreiche Veröffentlichungen in den renommierten Fachzeitschriften „Nature“ und „Science“ – eindrucksvoll bewiesen, welchen Wert die neuen Lichtquellen für die Forschung haben. Ende 2016 soll der SwissFEL am Paul-Scherrer-Institut in der Schweiz dazukommen. Gegenüber diesen Projekten besitzt der European XFEL einen Vorteil: Er basiert auf supraleitender Technologie und kann deshalb deutlich mehr Röntgenblitze pro Sekunde abfeuern als normaleitende Anlagen – ein wesentliches Plus für viele Experimente.

Konventionelle Beschleuniger bringen die Elektronen in wassergekühlten Resonatoren aus Kupfer auf Trab. „Wegen seines elektrischen Widerstands erhitzt sich das Kupfer“, erläutert Reinhard Brinkmann, Direktor des Beschleunigerbereichs bei DESY. „Deshalb darf man die Radiowellen immer nur für einen winzigen Sekundenbruchteil in den Resonator leiten, sonst würde das Material schmelzen.“ Das bedeutet: Man muss einen kurzen Augenblick warten, damit sich das erhitzte Kupfer wieder abkühlen kann – erst dann kann der nächste Radiowellen-Puls kommen. Das begrenzt die Rate, mit der die Anlage Röntgenblitze abfeuern kann. Bei den bisherigen Freie-Elektronen-Lasern sind es maximal 120 pro Sekunde.

Blitzlichtgewitter dank Supraleitung

Um diese Beschränkung zu umgehen, entschied man sich bei DESY für einen anderen Weg – die supraleitende Technologie. Ein Supraleiter hat keinen elektrischen Widerstand. Die Folge: „Der Resonator heizt sich durch die Radiowellen



Reinhard Brinkmann ist Direktor des Beschleunigerbereichs bei DESY.

kaum noch auf“, erklärt Brinkmann. „Deshalb kann man ihn über einen viel längeren Zeitraum einschalten als einen Kupfer-Resonator.“ Dank dieser Technik wird der European XFEL sehr viel mehr Röntgenblitze produzieren können als die anderen Anlagen – 27 000 pro Sekunde, also mehr als 200-mal so viel.

Die Vorteile: Manche Versuche, die an anderen Röntgenlasern Stunden dauern, werden sich in Hamburg in Minutenschnelle erledigen lassen. Dadurch sind mehr Experimente möglich. Und für Projekte, bei denen die Forscher chemische Reaktionen möglichst detailliert verfolgen möchten, erlaubt die schnellere Abfolge der Röntgenpulse eine höhere zeitliche Auflösung.

Allerdings hat die supraleitende Beschleunigertechnologie auch einen Nachteil: Sie ist teuer und wesentlich aufwendiger. So müssen die Kernkomponenten mit flüssigem Helium auf rund minus 271 Grad Celsius gekühlt werden. „Hierfür konnten wir große Teile der Helium-Verflüssigungsanlage des ehemaligen Großbeschleunigers HERA verwenden“, sagt DESY-Wissenschaftler Hans Weise, Koordinator des European-XFEL-Beschleunigerkonsortiums. „Wir mussten also nicht alles komplett neu bauen.“

Die größte Herausforderung jedoch waren Entwicklung und industrielle Fertigung der supraleitenden Resonatoren. Statt aus Kupfer bestehen sie aus dem Metall Niob. Gemeinsam mit zahlreichen in- und ausländischen Partnern fertigte DESY die ersten Prototypen – ein Durchbruch. Doch in den rund drei Kilometer langen Freie-Elektronen-Laser European XFEL sollten mehr als 800 dieser supraleitenden Resonatoren eingebaut werden – eine Stückzahl, die nur mit einer Serienfertigung zu schaffen war.

Reinheitsgebot für Resonatoren

Also entwickelten die Experten eine komplexe, industrietaugliche Verfahrenskette, sie umfasst zahlreiche Mitspieler aus dem In- und Ausland. Allein die Herstellung des Rohmaterials ist aufwendig. Das Niob muss hochrein sein, weshalb es in speziellen Öfen bis zu achtmal umgeschmolzen werden muss. Bei jedem Schmelzschritt sinkt die Menge an Verunreinigungen. Am Ende stehen Nioblöcke von höchster Reinheit, die anschließend zu Blechen gewalzt werden. Dennoch können geringe Verunreinigungen im Material verbleiben – weshalb die Forscher bei DESY jedes einzelne Blech mit einem speziellen Wirbelstrom-

verfahren auf Herz und Nieren durchcheckten. „Wir haben alle 16 000 Niobleche gescannt“, erzählt Brinkmann. „Aussortieren mussten wir nur ein paar Prozent.“

„Wir haben alle 16 000 Niobleche gescannt, aussortieren mussten wir nur ein paar Prozent“

Reinhard Brinkmann, DESY

Jene Bleche, die den Test bestanden, wurden zugeschnitten und gestanzt, um sie anschließend zu einem Resonator zusammenzuschweißen – einer meterlangen, silbrig glänzenden Röhre von der Form eines Baumkuchens. „Der Herstellungsprozess erfordert eine extrem hohe Reinheit“, erläutert Brinkmann. „Schon ein Staubkorn kann genügen, und ein Resonator funktioniert nicht wie gewünscht.“ Um die Anforderungen zu erfüllen, spielten sich manche der Prozessschritte in Reinräumen ab. Deren Luft ist extrem gefiltert, Partikelzähler überwachen die Luftqualität. Um die Komponenten nicht zu verschmutzen, trug das Personal eine regelrechte Chirurgenkluft – inklusive Mundschutz, Haarnetz und Handschuhen.

Das Verschweißen der Niobleche geschah per Elektronenstrahl. Nach dem Verschweißen folgten komplexe Reinigungsprozeduren: Die Resonatoren erhielten ein elektrochemisches »



Das Niob (oben) wird mehrfach aufgeschmolzen (oben links) und die gewalzten Bleche genau vermessen (links).



Supraleitende Resonatoren im Reinraum

Säurebad, wurden unter Hochdruck mit besonders gereinigtem Wasser gespült und schließlich stundenlang bei 120 Grad gebacken. „Teilweise sind das Prozesse, deren Wirkmechanismus wir noch gar nicht in allen Details kennen“, erläutert Brinkmann. „Man könnte fast sagen, da steckt ein kleines bisschen Alchemie drin.“

Viele der Techniken wurden bei DESY erprobt, anschließend in die Industrie exportiert und dann gemeinsam weiterentwickelt. „Es hat eine Weile gedauert, bis wir eine zuverlässige Serienfertigung hinbekommen haben, vieles war ein mühsamer Prozess des Lernens und Einübens“, sagt Brinkmann. „Doch am Ende hat der gesamte industrielle Fertigungsprozess sehr gut funktioniert – vom Blech bis zu den fertigen Resonatoren.“ Geliefert hatten sie eine italienische und eine deutsche Firma. Anfang 2016 lief das letzte Exemplar vom Band. Der Ausschuss: gering. Kaum mehr als ein Dutzend der mehr als 800 Niob-Röhren musste chemisch nachbehandelt werden, und das durchschnittlich erzielte Beschleunigungsfeld liegt deutlich über der ursprünglichen Spezifikation.

„Der industrielle Fertigungsprozess hat sehr gut funktioniert – vom Blech bis zu den fertigen Resonatoren“

Reinhard Brinkmann, DESY

Nach der Fertigung kamen sämtliche Resonatoren nach Saclay bei Paris. Hier wurden je acht von ihnen in ein gelb lackiertes Modul montiert – eine Art riesige Thermoskanne mit integrierter Helium-Kühltechnik. Nach und nach wanderten die insgesamt 101 fertigmontierten Röhren zurück nach Hamburg, um in einer großen Halle auf Herz und Nieren geprüft zu werden. Erst dann konnten sie die Experten in den Tunnel des European XFEL einsetzen.

Der Bau des Beschleunigers bildete nicht nur eine technische, sondern auch eine organisatorische Herausforderung – immerhin waren acht Länder daran beteiligt. „Einige Partner steuern vor allem Geld bei, andere liefern im Wesentlichen Komponenten“, sagt Riko Wichmann, Leiter des XFEL-Projektbüros bei DESY. „Insbesondere die Koordination der Sachbeiträge war nicht einfach, da ist deutlich mehr Aufwand angefallen als gedacht.“ An den Beschleunigermodulen

Montage eines Beschleunigermoduls (rechts), Anschluss der Hochfrequenz-Koppler an Resonatoren im Reinraum (unten)



bauten zahlreiche Institute und Firmen mit. Das DESY-XFEL-Projektteam musste sicherstellen, dass alle Partner ihre Komponenten möglichst pünktlich zur Verfügung stellten. „Kam irgendein Bauteil zu spät, war die ganze Kette dahinter betroffen, und es drohte ein regelrechter Stau.“ Die enge Zusammenarbeit zwischen DESY als Führer des Beschleunigerkonsortiums und der European XFEL GmbH, bei der die Gesamtleitung des Projekts liegt, bildete eine wichtige Grundlage für das Gelingen des Unternehmens.

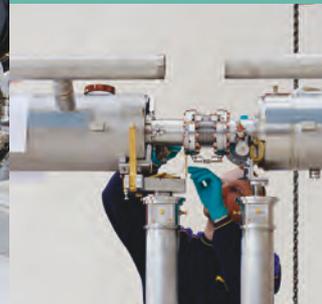
Pakete aus Milliarden Elektronen

Eine Kernkomponente der Anlage ist der Injektor: Das 50 Meter lange Gerät erzeugt jene Elektronenpakete, die der Beschleuniger des European XFEL dann auf einer Strecke von 1,8 Kilometern auf Touren bringt. Das Funktionsprinzip des Injektors: 27 000 Mal pro Sekunde feuert ein Laser starke Lichtblitze auf ein pillenförmiges Metallstückchen. Jeder Blitz löst einen Pulk von rund zehn Milliarden Elektronen heraus. Zwei supraleitende Module beschleunigen diesen Pulk vor und formen ihn zu maßgeschneiderten Paketen. Anfangs sind diese Elektronenpäckchen rund drei Millimeter lang und einen Millimeter dick. Im Laufe des Beschleunigungsprozesses werden sie dann mittels raffinierter Technik weiter zusammengequetscht – auf rund ein Tausendstel ihres Volumens. Der Grund: „Nur wenn die Elektronen auf kleinstem Raum konzentriert sind, lassen sich extrem starke Röntgenblitze erzeugen“, erläutert Hans Weise.



Hans Weise ist Leitender Wissenschaftler bei DESY und Koordinator des European-XFEL-Beschleunigerkonsortiums.

Höchst ausgefeilt ist auch eine andere Technik, die beim europäischen Röntgenlaser zum Einsatz kommt – die präzise Synchronisation der ultrakurzen Elektronenpakete und Röntgenblitze. Sie ist unter anderem nötig, um chemische Reaktionen filmen zu können. Dazu löst ein gewöhnlicher, optischer Laserblitz die Reaktion aus. Einen kurzen, definierten Augenblick später hält der Röntgenblitz aus dem European XFEL das Geschehen im Bild fest. Allerdings funktioniert die Methode nur, wenn optischer Laser und XFEL präzise aufeinander abgestimmt sind. Genau das gewährleistet eine spezielle Synchronisationstechnik. Sie basiert auf einer „Laseruhr“, die in einer



Test eines Beschleunigermoduls

„Nur wenn die Elektronen auf kleinstem Raum konzentriert sind, lassen sich extrem starke Röntgenblitze erzeugen“

Hans Weise, DESY

Glasfaser im Beschleunigertunnel „tickt“. Unter anderem misst das System den genauen Abstand zwischen den Elektronenpaketen sowie den Röntgenblitzen – eine wichtige Information für die Experimentatoren.

Erprobt wurde die Methode bereits bei FLASH. Dieser rund 300 Meter lange Freie-Elektronen-Röntgenlaser bei DESY basiert auf denselben supraleitenden Beschleunigermodulen wie der große European XFEL, erzeugt jedoch Lichtblitze im weichen Röntgen- und UV-Bereich. „Wenn man so will, ist FLASH ein 1:10-Modell für den European XFEL“, sagt Reinhard Brinkmann. „Im Laufe der Jahre hat uns FLASH zahllose wertvolle Erkenntnisse geliefert, wie man die große Anlage planen und bauen muss.“ Bereits seit einem Jahrzehnt dient FLASH als Nutzeranlage für Wissenschaftler aus aller Welt. Das Interesse der Forscher an FLASH ist so groß, dass DESY die Experimentierkapazität der Anlage derzeit verdoppelt. >>

> Auch andere Forschungseinrichtungen wollen die supraleitende Technologie künftig nutzen – konkret das US-Zentrum SLAC in Kalifornien. Seit 2009 betreibt es erfolgreich die „Linac Coherent Light Source“ (LCLS), einen Röntgenlaser basierend auf einem normalleitenden Beschleuniger. Derzeit planen die US-Forscher eine zweite Maschine, eingebaut in denselben Tunnel: LCLS-II wird auf einer Länge von 700 Metern mit 280 supraleitenden Resonatoren bestückt sein. Sie gleichen im Wesentlichen denen des European XFEL.

Das ehrgeizige Ziel: Ab 2019 soll der neue US-Laser eine Million Blitze pro Sekunde abfeuern – allerdings bei längeren Wellenlängen und damit geringerer Bildschärfe als das Vorbild in Hamburg. „Bei unseren Planungen haben wir viel Unterstützung von DESY bekommen“, sagt Projektleiter John Galayda. „Wir sind nur deshalb so schnell vorangekommen, weil wir das Wissen

„Wir sind nur deshalb so schnell vorangekommen, weil wir das Wissen und die Erfahrung von DESY nutzen konnten“

John Galayda, SLAC

und die Erfahrung von DESY nutzen konnten.“ Das galt vor allem für das Design der hochkomplexen Beschleunigermodule, aber auch für die supraleitenden Niob-Resonatoren. „Wir kaufen sie bei denselben beiden Firmen ein, die auch den European XFEL beliefert haben“, erklärt Galayda. „Es ist ein enormer Vorteil für uns, dass es bereits Hersteller gibt, die große Erfahrung beim Bau dieser Resonatoren haben.“



Bild: European XFEL



Mit Hilfe des Elektro-Spezialfahrzeugs „Mullewupp“ (unten links) wurden die Beschleunigermodule im Tunnel transportiert und montiert

„Ein Triumph für DESY“



DESY ist der Hauptgesellschafter des European XFEL. Welche Erwartungen das Forschungszentrum mit dem europäischen Röntgenlaser verbindet, erläutert der Vorsitzende des DESY-Direktoriums, Helmut Dosch.

femto: Was bedeutet der European XFEL für DESY?

Dosch: Der European XFEL ist eines der revolutionärsten Großforschungsprojekte weltweit: Es verbindet eine völlig neuartige, von DESY entwickelte Beschleunigertechnologie mit dem enormen Entdeckungspotenzial, das die einzigartigen Experimentiermöglichkeiten Wissenschaftlern aus aller Welt bieten werden. DESY hat dieses Großgerät konzipiert und die theoretischen und technischen Grundlagen für dessen Realisierung geschaffen. Und nicht zuletzt hat DESY mit FLASH die Pionieranlage für derartige Röntgenlaser gebaut. Ich bin deshalb überzeugt, dass der European XFEL zu einem großen Triumph für DESY werden wird.

femto: Welche Perspektiven ergeben sich für die Wissenschaftsregion Hamburg?

Dosch: Mit dem europäischen Röntgenlaser entsteht in der Metropolregion Hamburg – zusammen mit den bereits existierenden herausragenden Röntgenlichtquellen PETRA III und FLASH bei DESY – eine weltweit einzigartige Forschungsinfrastruktur. Im Umfeld dieser Anlagen sind in den letzten Jahren bereits richtungsweisende interdisziplinäre Forschungsk Kooperationen entstanden, wie beispielsweise das Center for Free-Electron Laser Science CFEL und das im Bau befindliche Strukturbiologiezentrum CSSB. Diese Entwicklung lockt zum einen die

besten Köpfe an die Elbe und liefert zum anderen ein hochattraktives Umfeld für Hightech-Firmen, welche hier neue Ideen und Technologien entwickeln können, die weit über die Forschung hinaus wirken. Damit liefert DESY mit seinen Kooperationspartnern einen nachhaltigen Beitrag zu einer neuen Innovationskultur in der Metropolregion.

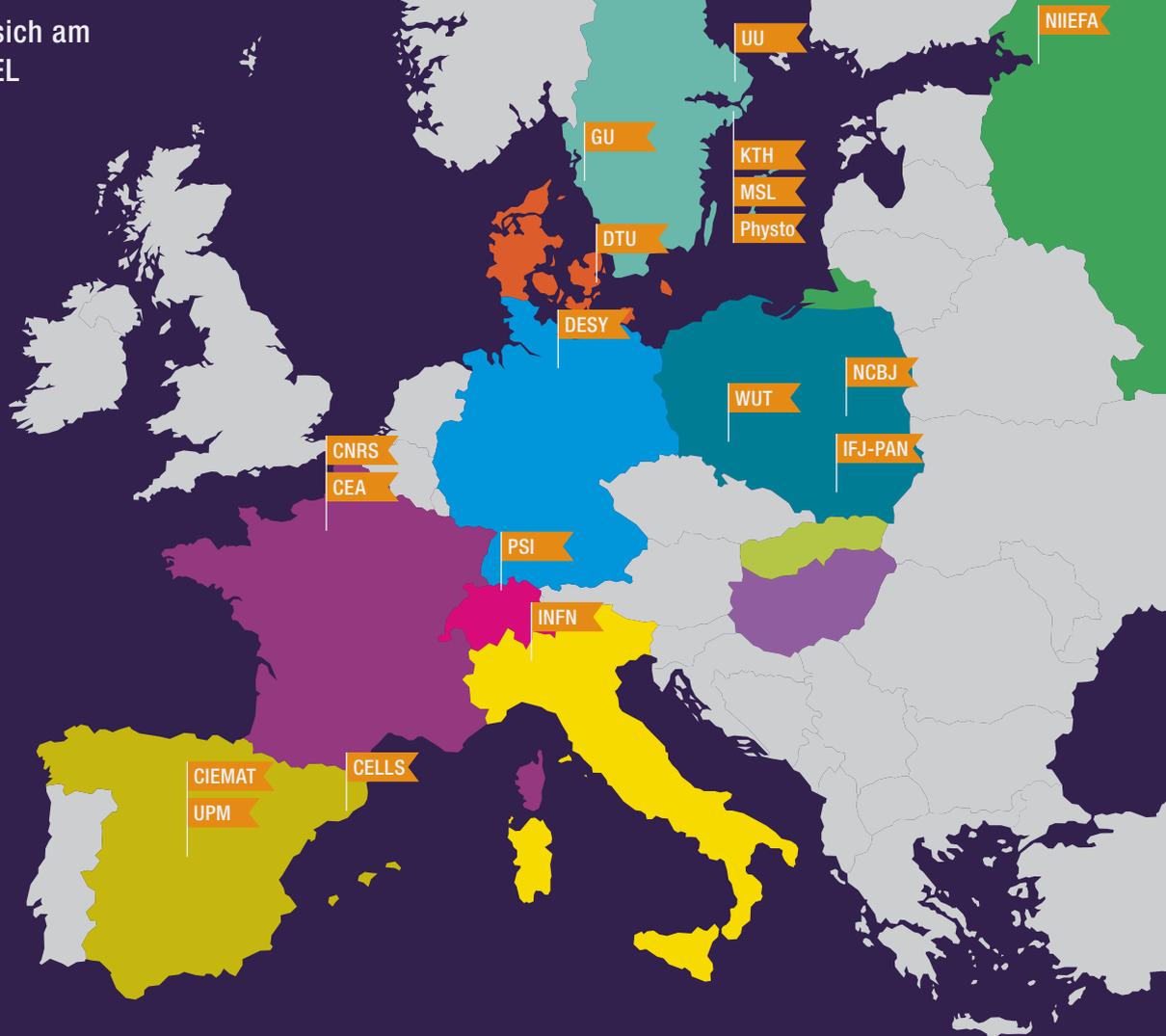
femto: Was zeichnet den European XFEL neben der Wissenschaft aus?

Dosch: Der europäische Röntgenlaser ist bereits heute ein Leuchtturm für ein hochprofessionelles Projektmanagement. Nach jetzigem Kenntnisstand wird der European XFEL alle Design-Parameter erfüllen, inklusive der Projektkosten. Dies zeigt einmal mehr die Kompetenz von DESY in der Konzeption und im Bau hochkomplexer Beschleunigeranlagen. Die im European XFEL eingesetzten Technologien haben bereits heute die Grenzen des technisch Machbaren verschoben, dies gilt insbesondere für den zwei Kilometer langen supraleitenden Beschleuniger, eine DESY-Technologie. Damit der European XFEL auch zu einem Leuchtturm der Wissenschaft wird, müssen in den kommenden Jahren die bahnbrechenden wissenschaftlichen Entdeckungen passieren. Ich habe da keinerlei Zweifel, unsere Top-Wissenschaftler stehen schon in den Startlöchern.



Europäische Partner

Elf Länder beteiligen sich am Bau des European XFEL



Institutionen und ausgewählte Sachbeiträge

DTU Dänische Technische Universität, Kopenhagen (Dänemark)

- Hightech-Komponenten für wissenschaftliche Instrumente

CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, Orsay (Frankreich)

- Produktion von Radiofrequenz-Kopplern für den supraleitenden Linearbeschleuniger

CEA Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, Saclay (Frankreich)

- Montage von Baugruppen aus je acht supraleitenden Resonatoren
- Zusammenbau der 103 Beschleunigermodule (einschließlich zweier Prototypen)

DESY Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg (Deutschland)

- Design, Fertigungsbetreuung und Test der supraleitenden Resonatoren
- Design, Fertigungsbetreuung und Test der Beschleunigermodule
- Kältetechnik
- Hochfrequenzversorgung
- Bau und Betrieb des Injektors
- Bau und Betrieb des Hauptbeschleunigers
- Bau und Betrieb der Strahlführungen
- Sicherheitsüberwachung
- Allgemeine Anlagen- und IT-Infrastruktur
- Koordinierung der Gesamtanlage
- Auftragsvergabe und -überwachung

INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Mailand (Italien)

- Produktion, Test und Auslieferung von supraleitenden Resonatoren

- 42 Kryostate
- 3.9-GHz Beschleunigermodul für den Injektor

NCBJ Polnisches Zentrum für Kernforschung, Świerk (Polen)

- Produktion, Test und Auslieferung von HOM-Kopplern und -Absorbern für den Beschleuniger
- Programmierbare Logic Controller für wissenschaftliche Experimente

WUT Technische Universität Wrocław, Wrocław (Polen)

- Produktion, Test und Installation von vertikalen Testständen für den Resonator-Test
- Produktion, Test und Installation der Transferlinie XATL1
- Vertikale Kryostate

JINR

INR

IHEP

BINP

IFJ-PAN Henryk-Niewodniczański-Institut für Kernphysik der Polnischen Akademie für Wissenschaften, Krakau (Polen)

- Tests aller supraleitenden Resonatoren, Magnete und Beschleunigermodule

JINR Institut für Kernforschung, Dubna (Russland)

- Design, Produktion, Test und Auslieferung von drei MCP-basierten Detektoren

IHEP Institut für Hochenergiephysik, Protvino (Russland)

- Design, Produktion und Installation von Kühlanlagen für den Linearbeschleuniger
- Design, Produktion und Installation der Strahlfänger

NIIEFA D.V.-Efremov-Institut für Elektrophysikalische Anlagen, St. Petersburg (Russland)

- Design, Produktion und Auslieferung normalleitender Magnete

BINP Budker-Institut für Kernphysik, Nowosibirsk (Russland)

- Design, Produktion und Test von Magneten, Vakuumkomponenten und Stromversorgung
- Design, Produktion und Aufbau von Testständen für supraleitende Beschleunigermodule
- Kryogenik
- Stromversorgung

INR Institut für Kernforschung an der Russischen Akademie der Wissenschaften, Moskau (Russland)

- Design, Produktion und Lieferung von Transversal-Ablenkstrukturen sowie Elektronenstrahldiagnostik

CELLS Konsortium für Bau, Ausrüstung und Nutzung von Synchrotronlichtquellen, Barcelona (Spanien)

- Sieben mechanische Aufhängungen für Undulatoren

CIEMAT Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid (Spanien)

- Design, Produktion, Test und Auslieferung von Undulatorintersektionen
- Design und Produktion von supraleitenden Strahlführungsmagneten

UPM Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (Spanien)

- Design, Produktion, Test und Auslieferung der Stromversorgung für supraleitende Magnete

KTH Königliches Institut für Technologie, Stockholm (Schweden)

- Untersuchung von Röntgenlinsen und Kühlsystemen

GU Universität Göteborg, Göteborg (Schweden)

- Magnetic-Bottle-Elektronenspektrometer

MSL Manne-Siegbahn-Labor der Universität Stockholm, Stockholm (Schweden)

- Vermessung von Magneten
- Entwurf, Bau und Auslieferung von Temperatursensoren für die Undulatoren

Physto Fachbereich Physik der Universität Stockholm, Stockholm (Schweden)

- Konfigurierung, Validierung und Auslieferung des Zeitsteuerungs- und Synchronisierungssystems

UU Universität Uppsala, Uppsala (Schweden)

- Design, Produktion und Auslieferung eines laserkontrollierten Proben-Injektors inklusive Laserheizung
- Abordnung von Physikern für die Ausrüstung der Strukturbiologie-Messstation

PSI Paul Scherrer Institut, Villigen (Schweiz)

- Design, Produktion und Installation von Strahlpositionsmonitoren und Intra-Bunchtrain-Feedbacksystemen

Vollständige Liste unter:
http://www.xfel.eu/project/in_kind_contributions/

Per Rad durch den Röntgenlaser

Zwei Schüler erkunden den European XFEL



Freitag, der 19. Februar, ist ein grauer Tag. Immerhin regnet es nicht, als wir uns auf den Weg von Hamburg-Sülldorf nach Bahrenfeld machen. Auf dem Fahrrad immer geradeaus entlang der Osdorfer Landstraße. Unser Ziel ist ein langer Tunnel, ein Forschungsgerät, das künftig 27 000 Röntgenblitze pro Sekunde erzeugen soll. Vorstellen können wir uns das noch nicht so richtig. Wir sind gespannt, ein bisschen aufgeregt, aber auch platt von der Schulwoche, die mit Mathe in der fünften und sechsten Stunde endete...

Wir fahren die Notkestraße hoch und kommen zur Trabrennbahn. Hier, am Albert-Einstein-Ring, sind die Bürogebäude der European XFEL GmbH, und hier sind wir mit Frank Poppe von der PR-Gruppe verabredet, der mit uns durch den Tunnel fahren und uns den Röntgenlaser erklären wird, der darin aufgebaut wird. Doch der Tunnel ist nicht in Sicht. Zuerst kriegen wir noch unsere Ausrüstung und eine Sicherheitsunterweisung: Eine Zugangskarte für jeden, außerdem Gummistiefel mit Eisenkappen,

denn am Ende des Tunnels ist noch Baustelle und da sind Sicherheitschuhe Pflicht. Helme brauchen wir auch, falls man sich an der vielen Technik im Tunnel den Kopf stößt oder einem etwas auf den Kopf fällt. Und noch was: Als wir beim Eingangsgebäude des Röntgenlasers auf dem DESY-Gelände angekommen sind, bekommt jeder von uns noch einen Selbstretter. Das ist eine Art Schnorchel an einer Tüte. Durch die bekommt man eine halbe Stunde Atemluft, falls ein Feuer im Tunnel ausbricht. Eine Schutzbrille gegen den Rauch ist auch dabei. Frank macht es vor. Ein bisschen wie die Stewardess, die im Flugzeug zeigt, wie man die Sauerstoffmasken benutzt.

Und endlich geht die Tour los. In der Eingangshalle ist ein großer Schacht, durch den wir fast 40 Meter tief nach unten blicken, natürlich gut gesichert durch ein Geländer. An der Decke hängt ein großer Hallenkran, der schwere Lasten in die Tiefe kranen kann. Und das ist sehr wichtig, denn alle Bauteile für den Teilchenbeschleuniger, der dort unten aufgebaut wird, müssen durch diesen Schacht in die Tiefe direkt auf ein Spezialfahrzeug geladen werden. Also auch die tonnenschweren gelben Röhren, in denen die eigentlichen Beschleunigerteile stecken. Das Fahrzeug sehen wir später im Tunnel. Es heißt Müllewupp (plattdeutsch für Maulwurf), sieht aus wie eine gelbe Bergwerkslokomotive und kann ganz schön viel: Mit



seinen 360-Grad-Reifen kann es aus dem Stand in jede Richtung fahren – wichtig, wenn es in dem engen Tunnel manövrieren muss. Außerdem kann es tonnenschwere Lasten nicht nur transportieren, sondern auch anheben, denn der Beschleuniger hängt unter der Tunneldecke. Dafür braucht Müllewupp ganz schön viel Kraft und hat riesige Batterien – ein Benzinmotor wäre im Tunnel zu gefährlich.

So, jetzt aber ab in den Tunnel. Mit unseren Zugangskarten kommen wir durch die Sicherheitssperre und schieben unsere Fahrräder in den Fahrstuhl, der uns sieben



Stockwerke nach unten befördert. Der Tunnel ist wie ein U-Bahn-Tunnel gebaut, eine runde Betonröhre mit Boden, schnurgerade, das Ende können wir nicht sehen. In der rechten Tunnelhälfte hängen schon gelbe Beschleunigermodule an der Decke. Hier könnten die Elektronen schon losfliegen, aber weit würden sie nicht kommen, denn der Bau ist noch in vollem Gange. Minus 271 Grad kalt ist es in den Modulen, damit der Strom ohne Widerstand fließen kann, außerdem fliegen die Elektronen im Vakuum, damit sie nirgends anstoßen und möglichst schnell beschleunigt werden. Sie fliegen fast mit Lichtgeschwindigkeit, also mit 300 000 Kilometern pro Sekunde. Kann man sich kaum vorstellen.

In der linken Tunnelhälfte ist ein Weg für den Müllewupp und für unsere Fahrräder. Wir müssen anpassen, dass wir wirklich geradeaus fahren und nirgends gegenstoßen. Es ist ungewohnt, durch den Tunnel zu fahren, spannend! Rechts neben uns die gelben Module und viele auffällig große Magnete. Sie helfen dabei, den Elektronenstrahl zu

bündeln, erklärt uns Frank. Zwei knallblaue „Dipol“-Magnete sind besonders groß. Sie kommen aus St. Petersburg, kosten 57 000 Euro pro Stück und gehören zu dem russischen Beitrag für den European XFEL. Die Partnerländer geben nicht nur Geld, um den Röntgenlaser zu bauen, sondern liefern auch wichtige Bauteile wie die Magnete. Unsere Fahrt endet vor einer Sperrholztür. Die ersten zwei Kilometer Beschleunigerstrecke liegen hinter uns. Wir sind jetzt direkt unter dem Osdorfer Born, in einem kahlen Betriebsgebäude. Ab hier verzweigt sich der Tunnel, und ab hier werden die Elektronen dafür benutzt, das Röntgenlaserlicht zu erzeugen, um das es den Forschern geht.

Wir radeln in den rechten der beiden Tunnel. Hier stehen schon einige der gelben Gestelle, in denen später das besondere Licht entsteht. Der Name ist schwer zu merken. Demulatoren? Odolatoren? Emulatoren? Undulatoren sind es, in denen die Elektronen von wechselnden Magneten auf Slalomkurs gebracht werden und dadurch Röntgenblitze aussenden. Es sind starke Magnete, die man nicht abstellen kann. Eine Uhr kann zum Beispiel daran hängen bleiben, wenn man zu dicht dran kommt.

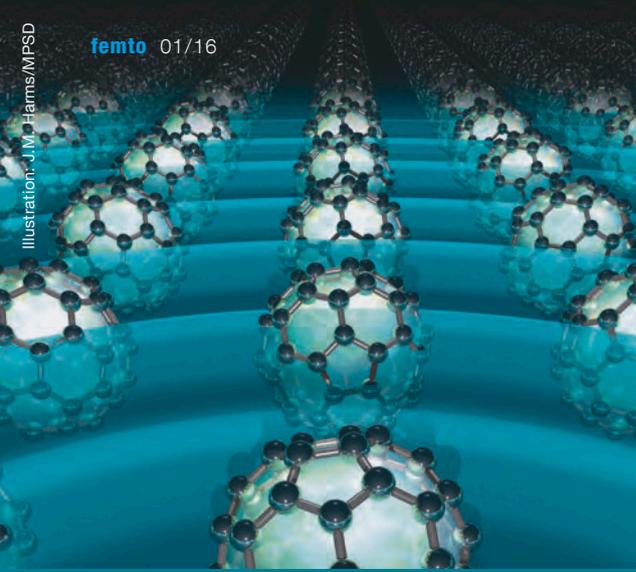
Die orange-gelben Undulatoren werden in Deutschland und Spanien gefertigt. Und dann kommt einer, der ist neongelbgrün und fällt ganz schön auf. Er ist aus China. Funktionieren tut er gut, aber irgendwie hat das mit der Farbabstimmung nicht hingehauen. Ganz schön schräg! Jetzt kommt noch eine Verzweigung. Die beiden Tunnel fächern sich in insgesamt fünf Tunnel auf, die zu verschiedenen Experimentierstationen führen. Unser Tunnel ist

jetzt ganz schön eng, es ist warm, und wir müssen vorsichtig fahren. Undulatoren gibt es keine mehr. Nur das Strahlrohr, durch das die Röntgenlaserstrahlung fliegt, ist rechts neben uns und ganz viele Prüfgeräte, die kontrollieren, ob das Licht auch allen Qualitätsanforderungen entspricht. Dann kommt das Ende. Wieder eine Tür, und wir schieben unsere Räder aus dem Tunnel in die unterirdische Experimentierhalle. Die ist so groß wie ein Fußballfeld. Mehrere Messhütten werden gerade aufgebaut. Hier sollen Atome beobachtet und chemische Reaktionen gefilmt werden. In einer Hütte mit dicken Betonwänden sollen Experimente unter extrem hohen Druck und großer Hitze stattfinden, also unter Bedingungen wie sie im Inneren von Planeten herrschen.

Dann schieben wir unsere Fahrräder in den Fahrstuhl und fahren nach oben, wo gerade Labore und Büroräume entstehen. Wir radeln zum Ausgang, geben Helme, Gummistiefel und Lebensretter wieder ab und stehen in Schenefeld, direkt neben einer großen Tennisanlage. Mittlerweile ist es dunkel geworden. Wir verabschieden uns von Frank und radeln nach Hause. Spannend war es, aber auch ganz schön anstrengend. Wir haben viel gesehen und gelernt. Und wir würden gerne nochmal in den Tunnel – aber diesmal mit dem Skateboard.

.....
Vincent van Beusekom und Louis Wild gehen in die 6. Klasse des Marion Dönhoff Gymnasiums in Hamburg-Blankenese. Wenn sie nicht gerade mit Fahrrad oder Longboard unterwegs sind, spielen sie gerne Minecraft. Aus dem Material von ihren GoPro-Kameras wollen sie noch einen Film über den Röntgenlaser machen.





Intensive Laserblitze können dem Alkali-Fullerid K_3C_{60} , das fußballähnliche Moleküle aus 60 Kohlenstoffatomen enthält, schon bei minus 170 Grad Celsius den elektrischen Widerstand nehmen.

Fußbälle ohne Widerstand

Hinweise auf lichtinduzierte Supraleitung in Buckminster-Fullerenen

Winzige, metallische Fußballmoleküle verlieren ihren elektrischen Widerstand bei vergleichsweise hohen Temperaturen, wenn man sie mit einem intensiven Infrarotlaser beschießt. Das haben Physiker um Daniele Nicoletti vom Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie auf dem DESY-Campus in Hamburg beobachtet. Die Experimente sollen helfen, das Phänomen der Supraleitung genauer zu verstehen.

Supraleiter dienen derzeit vor allem für Spezialanwendungen. Da selbst die besten dieser Materialien erst bei minus 70 Grad Celsius ihren elektrischen Widerstand verlieren, werden sie hauptsächlich in Magneten für Kernspintomographen oder Fusionsanlagen sowie in Teilchenbeschleunigern eingesetzt. Die Max-Planck-Physiker aus der Gruppe von Institutsdirektor Andrea Cavalleri untersuchten nun das Fullerid K_3C_{60} , ein Metall, das sich aus fußballförmigen, sogenannten

Buckminster-Fullerenen zusammensetzt, und normalerweise bei etwa minus 250 Grad supraleitend wird. Durch den Beschuss mit dem Infrarotlaser setzte die Supraleitung kurzzeitig jedoch schon bei minus 170 Grad ein.

Bereits 2013 war es Forschern des Instituts gelungen, eine bestimmte Keramik mit infraroten Laserpulsen für Bruchteile einer Sekunde sogar bei Raumtemperatur supraleitend zu machen. Weil Fullerene einen relativ einfachen chemischen Aufbau haben, hoffen die Wissenschaftler, das Phänomen der lichtinduzierten, kurzzeitigen Supraleitung bei vergleichsweise hohen Temperaturen durch die neuen Experimente besser verstehen zu können. Solche Einsichten könnten helfen, ein Material zu entwickeln, das Strom auch ohne optische Anregung bei Raumtemperatur verlustfrei leitet.

.....
Nature, 2016; DOI: 10.1038/nature16522

Explodierende Nanopartikel

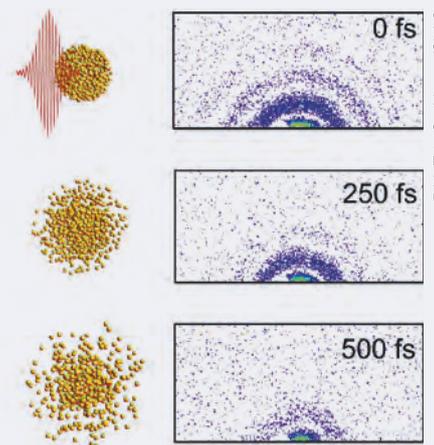
Forscher filmen Nanokosmos mit bisher unerreichter Detailschärfe und Schnelligkeit

Mit einem Superröntgenmikroskop hat ein deutsch-amerikanisches Forscherteam die Explosion einzelner Nanopartikel in Ultrazeitlupe gefilmt. Dabei konnten die Physiker um Tais Gorkhvoer von der Technischen Universität Berlin und Christoph Bostedt vom Argonne National Laboratory erstmals eine Detailschärfe von besser als acht Nanometern in Kombination mit einer zeitlichen Auflösung von 100 Femtosekunden erreichen. Ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter, eine Femtosekunde ist eine milliardstel Sekunde.

Für die Experimente untersuchte das Forscherteam explodierende Nanopartikel aus gefro-

renem Xenon mit dem Röntgenlaser LCLS am US-Beschleunigerzentrum SLAC in Kalifornien. Die winzigen Partikel hatten Durchmesser von etwa 40 Nanometern, das ist rund tausend Mal dünner als ein menschliches Haar. „Mit dem intensiven Licht eines Infrarotlasers wurden die Nanopartikel stark erhitzt und in der Vakuumkammer zum Explodieren gebracht,“ erklärt DESY-Forscher Jochen Küpper aus dem Team. Gezielt verzögerte Röntgenblitze hielten verschiedene Stadien der Explosion fest, das Experiment wurde dazu jeweils mit einem neuen Nanopartikel und etwas größerer Verzögerung des Röntgenblitzes wiederholt. Aus diesen zeitlich leicht versetzten Schnappschüssen entstand ein Film der Explosion.

.....
Nature Photonics, 2016; DOI: 10.1038/NPHOTON.2015.264



Drei Stufen der Explosion eines Xenon-Nanopartikels, die vom Röntgenlaser in Form eines Streubilds (rechts) aufgezeichnet wurden. Aus dem Streubild lässt sich der Zustand der Probe (links) rechnerisch rekonstruieren.

Bild: Tais Gorkhvoer/SLAC

Schematische Darstellung, wie der Strahl eines Röntgenlasers einen Proteinkristall im Peroxisom einer Hefezelle trifft.

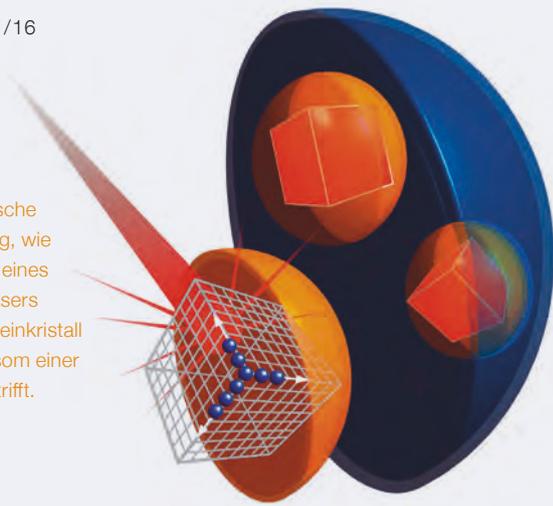


Bild: Thomas Seine, EMBL/CFEL

Neues Nanomaterial

Nanokomposit eignet sich für Medizintechnik und Produkte

Hamburger Forscher haben ein neues Nanomaterial entwickelt, das mehrere wünschenswerte Eigenschaften in sich vereint und damit neue Anwendungen in der Medizintechnik und Produktherstellung eröffnen kann. Der Aufbau des neuen Materials ähnelt auf kleinster Ebene natürlichem Hartgewebe wie Perlmutter oder Zahnschmelz. Seine Bausteine sind einheitlich große Eisenoxid-Nanopartikel, die mit einer Hülle aus organischer Ölsäure umgeben sind.

In bisherigen Arbeiten war die Verbindung zwischen den Ölsäuremolekülen sehr schwach und basierte auf sogenannten Van-der Waals-Bindungen. Den Wissenschaftlern ist es nun durch Trocknung, Heißpressen und einer kontrollierten Wärmebehandlung gelungen, die Ölsäuremoleküle viel stärker zu verbinden und damit das mechanische Verhalten dieses Nanokomposits entscheidend zu verbessern. Die neue Materialklasse kann sich beispielsweise für Zahnfüllungen oder auch die Herstellung von Uhrengehäusen eignen. Hierfür muss das Material hart und zugleich bruchfest sein.

Die Wissenschaftler der Technischen Universität Hamburg (TUHH), der Universität Hamburg, des Helmholtz-Zentrums Geesthacht und von DESY stellen das neuartige Nanokompositmaterial im Fachblatt „Nature Materials“ vor. Da auch andere Nanoteilchen sehr häufig in Kombination mit organischer Ölsäure verarbeitet werden, hat die verwendete Methode das Potenzial, auch bei einer Vielzahl anderer Nanokompositmaterialien die mechanischen Eigenschaften zu verbessern.

Nature Materials, 2016; DOI: 10.1038/NMAT4553

Das neue Material unter dem Rasterelektronenmikroskop. Seine Bausteine sind einheitlich große Eisenoxid-Nanopartikel.

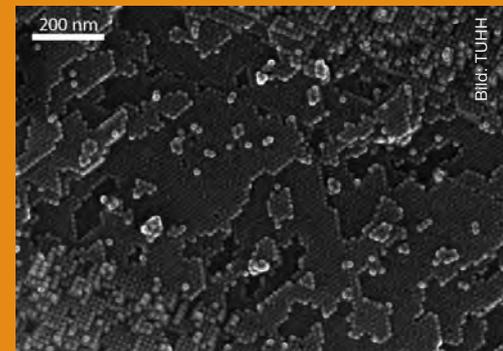


Bild: TUHH

Forscher röntgen Proteinkristalle direkt in der Zelle

Neuer Ansatz könnte Strukturbestimmung von Biomolekülen erleichtern

Wissenschaftler vom Europäischen Molekularbiologie-Laboratorium EMBL haben gemeinsam mit Forschern von DESY und vom US-Beschleunigerzentrum SLAC natürlich produzierte Proteinkristalle direkt in biologischen Zellen geröntgt. Die Untersuchung mit dem SLAC-Röntgenlaser LCLS in Kalifornien belegt, dass sich diese natürlichen Kristalle nutzen lassen, um die räumliche Struktur von Proteinen zu bestimmen.

Mit Hilfe der Kristallographie lässt sich die atomare Struktur von Proteinen untersuchen, aus den Biomolekülen muss jedoch zuvor ein Kristall gezüchtet werden. „Proteinkristalle für Kristallographie-Experimente im Labor zu züchten, ist nicht immer einfach“, betont EMBL-Forscher Daniel Passon. „Man stelle sich vor, wir könnten Zellen dies für uns tun lassen: eine kleine Kristallfabrik in einer Zelle!“

Zwar gehört die Kristallzucht zum täglich Brot von Strukturbiologen; dass manche Organismen natürlicherweise Proteinkristalle in ihren Zellen bilden, ist jedoch weniger bekannt. Tatsächlich konnten die Forscher auf diesem Weg die Struktur des Alkoholoxidase-Moleküls bestimmen, das vom sogenannten Peroxisom in bestimmten Hefezellen zu Kristallen gepackt wird. Dabei gab es sogar bessere Ergebnisse, wenn der Kristall in der Zelle blieb und nicht vor dem Röntgen herausgeholt wurde. Die Forscher hoffen nun, dass sie die Kristallproduktion des Peroxisoms für ihre Zwecke ausnutzen können, indem sie die Zell-Organelle auch Kristalle aus anderen Proteinen produzieren lassen.

International Union of Crystallography Journal, 2016; DOI: 10.1107/S2052252515022927

Optischer Trichter für Nanopartikel

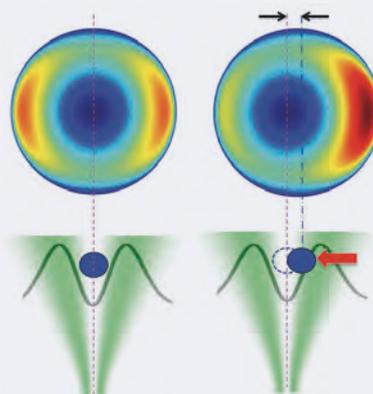
Neue Methode verspricht präzisere Platzierung von biologischen Proben im Strahl von Röntgenlasern

Forscher haben einen optischen Trichter konstruiert, der einen Strom von Proteinen, Viruspartikeln oder anderen Nano-Teilchen präzise zur Analyse in den feinen Strahl eines Röntgenlasers leiten kann. Der Trichter besteht aus einem speziell modifizierten Lichtstrahl mit einer schraubenförmigen Wellenfront. Dadurch entsteht im Zentrum des Strahls eine dunkle Region, in der die Lichtintensität auf null fällt. Eine optische Linse gibt dem Lichtstrahl die gewünschte Trichterform.

Im Gegensatz zu gewöhnlichen derartigen optischen Fallen nutzt der Trichter thermische Effekte, um die Partikel zu kontrollieren: Kommt ein Partikel der optischen Trichterwand zu nahe, wird es an dieser Seite aufgeheizt. Luftmoleküle, die auf der warmen Seite mit dem Partikel kollidieren, werden dann mit einem größeren Impuls abgestoßen als auf der kalten Seite. Diese Impulsdifferenz sorgt für eine sogenannte photophoretische Kraft, die das Objekt von der heißen zur kalten Seite schiebt und damit von der hellen zur dunklen Region.

Das Team um Andrei Rode von der Australischen Nationaluniversität in Canberra, zu dem auch DESY-Forscher vom Hamburger Center for Free-Electron Laser Science CFEL und dem Center for Ultrafast Imaging CUI gehören, testete seinen Trichter erfolgreich mit winzigen Graphitkügelchen von 12 bis 20 Mikrometern Durchmesser. Vorteil der Methode ist, dass die photophoretischen Kräfte viel stärker sein können als die direkten Lichtkräfte in gewöhnlichen optischen Fallen. Ein erwünschter Seiteneffekt dabei ist, dass die Partikel die meiste Zeit in der dunklen Region des Trichters verbringen, wodurch ein unter Umständen schädliches Aufheizen vermieden wird.

Physical Review Applied, 2015; DOI: 10.1103/PhysRevApplied.4.064001



Partikel im optischen Trichter werden an den Seiten aufgeheizt und so in den dunklen Zentralbereich geleitet.

temto 01/16

Künstlerische Darstellung der molekularen Bewegung des lichtempfindlichen Teils im Sehpurpur

Molekularer Breakdance

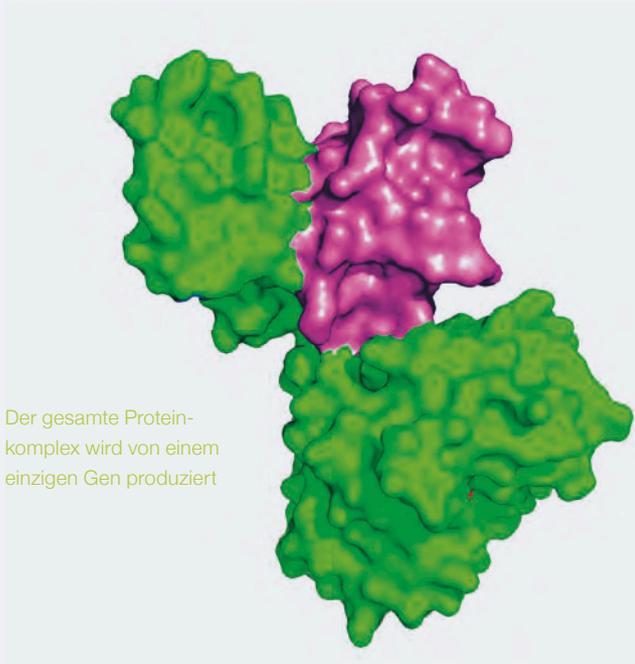
Der Sehsinn beruht auf exakt choreographierten, ultraschnellen Molekülbewegungen

Die Aufnahme von Licht durch Pigmente in der Netzhaut, die man Rhodopsin oder auch Sehpurpur nennt, ist die Grundlage unseres Sehens. Untersuchungen von Wissenschaftlern um R.J. Dwayne Miller vom Hamburger Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie und der Universität Toronto haben jetzt gezeigt, dass der erste photochemische Schritt dieses Prozesses noch viel schneller abläuft als bekannt.

Rhodopsin leitet seine Lichtempfindlichkeit aus einer Kette von einzeln und doppelt gebundenen Kohlenstoffatomen ab. Die Absorption eines Photons führt zu einer extrem kurzzeitigen Schwächung einer bestimmten Doppelbindung, wodurch eine Rotation um diese Bindung ausgelöst wird. Wie schnell diese sogenannte Isomerisierung tatsächlich erfolgt, konnte lange Zeit nicht genau beobachtet werden. Erst mit Femtosekunden-Lasern ließ sich zeigen, dass der Prozess innerhalb von maximal 200 Femtosekunden abläuft. Eine Femtosekunde ist eine milliardstel Sekunde.

Mit neuen Messungen an Rinder-Rhodopsin mithilfe einer hochempfindlichen Methode aus der Ultrakurzzeit-spektroskopie konnte das Team um Max-Planck-Direktor Miller und Oliver P. Ernst von der Universität Toronto nun zeigen, dass die Isomerisierung auf einer Zeitskala von 30 Femto-Sekunden erfolgt. „Es stellt sich heraus, dass der erste Schritt des Sehens beinahe zehnmals schneller ist als bisher angenommen“, sagt Miller. „Und die molekularen Bewegungen sind durch Rhodopsin perfekt choreographiert.“ Die Analyse der zeitaufgelösten experimentellen Daten enthüllt diesen molekularen Breakdance, der sich aus örtlich begrenzten Streck-, Wipp- und Drehbewegungen zusammensetzt.

Nature Chemistry, 2015; DOI: 10.1038/nchem.2398



Der gesamte Protein-komplex wird von einem einzigen Gen produziert

Ein Gen, zwei Proteine, ein Komplex

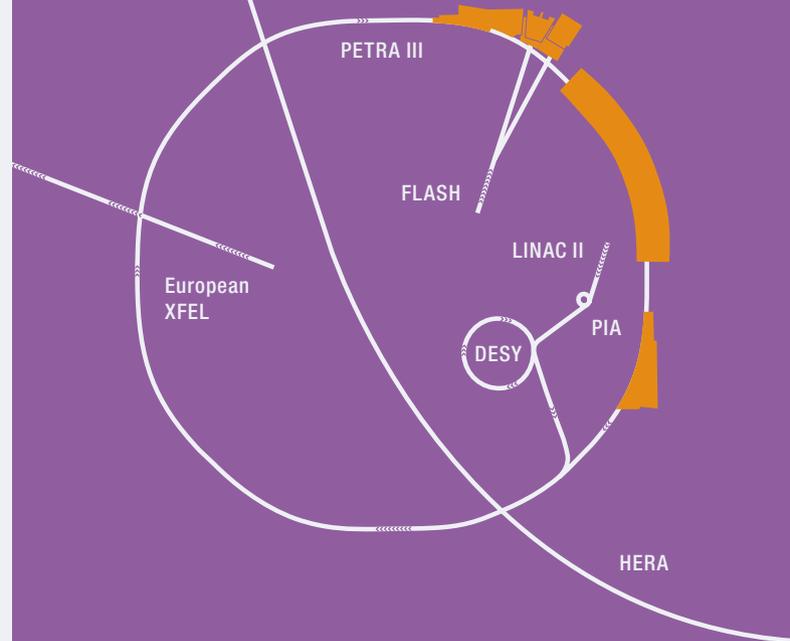
Ein Gen enthält normalerweise den Bauplan für genau ein Protein. Gelegentlich kann es auch die Blaupause für zwei Proteinvarianten liefern. Dass ein Gen jedoch zwei Proteine produziert, die dann zusammen einen Komplex bilden, sei einmalig, betont Rob Meijers, Gruppenleiter in der Hamburger Niederlassung des Europäischen Molekularbiologie-Laboratoriums EMBL auf dem DESY-Campus in Hamburg. Meijers und sein Team hatten die Enzyme von Viren untersucht, die Zellwände von Clostridium-Bakterien zerstören. Sie fanden eine kürzere und eine längere Variante des Enzyms, die beide vom gleichen Gen produziert werden. Der Grund: Das Gen hat verschiedene Startpunkte, kann also Proteine unterschiedlicher Länge aufbauen. „Diese Studie zeigt, wie zwei Proteine von dem gleichen Gen einen Komplex bilden, und wie das kürzere Protein das längere reguliert“, sagt Meijers. „Nach unserem Wissen wurde dies noch nie zuvor beobachtet.“

Das Zusammenwirken beider Proteinvarianten spielt eine wichtige Rolle dabei, wie die Enzyme der Viren, die sogenannten Endolysine, die Zellwand der Clostridium-Bakterien zerstören. Zu der Gattung der Clostridien gehören auch gefährliche Krankheitserreger. Daher bergen Viren, die Bakterien angreifen, die sogenannten Bakteriophagen, das Potenzial, Infektionen wirksam zu bekämpfen. Das rückt die Bakteriophagen und vor allem ihre Enzyme in den Fokus der Forscher.

Journal of Biological Chemistry, 2015; DOI: 10.1074/jbc.M115.671172

Bild: Rob Meijers, EMBL

femtomenal



16 288 Meter Tunnel

Genau 16 Kilometer und 288 Meter Beschleunigtunnel durchziehen den DESY-Campus und das angrenzende Gebiet. Viele davon sind in einem unterirdischen Geflecht verbunden, durch das die schnellen Teilchen mit höchster Präzision gesteuert werden müssen. Elektronen etwa, die für den Speicherring PETRA III bestimmt sind, durchlaufen eine Kaskade von drei Beschleunigern und müssen von einem zum nächsten mit einer Genauigkeit von 50 Pikosekunden übergeben werden – eine Pikosekunde ist ein millionstel einer millionstel Sekunde. Insgesamt legen die nahezu lichtschnellen Teilchen knapp 3,5 Kilometer zurück, bis sie den PETRA-III-Ring zum ersten Mal umrunden haben. Wozu ein ICE-Zug mit Tempo 230 rund 54 Sekunden bräuhete, schaffen die Elektronen über vier Millionen Mal schneller in knapp 12 Mikrosekunden (millionstel Sekunden).

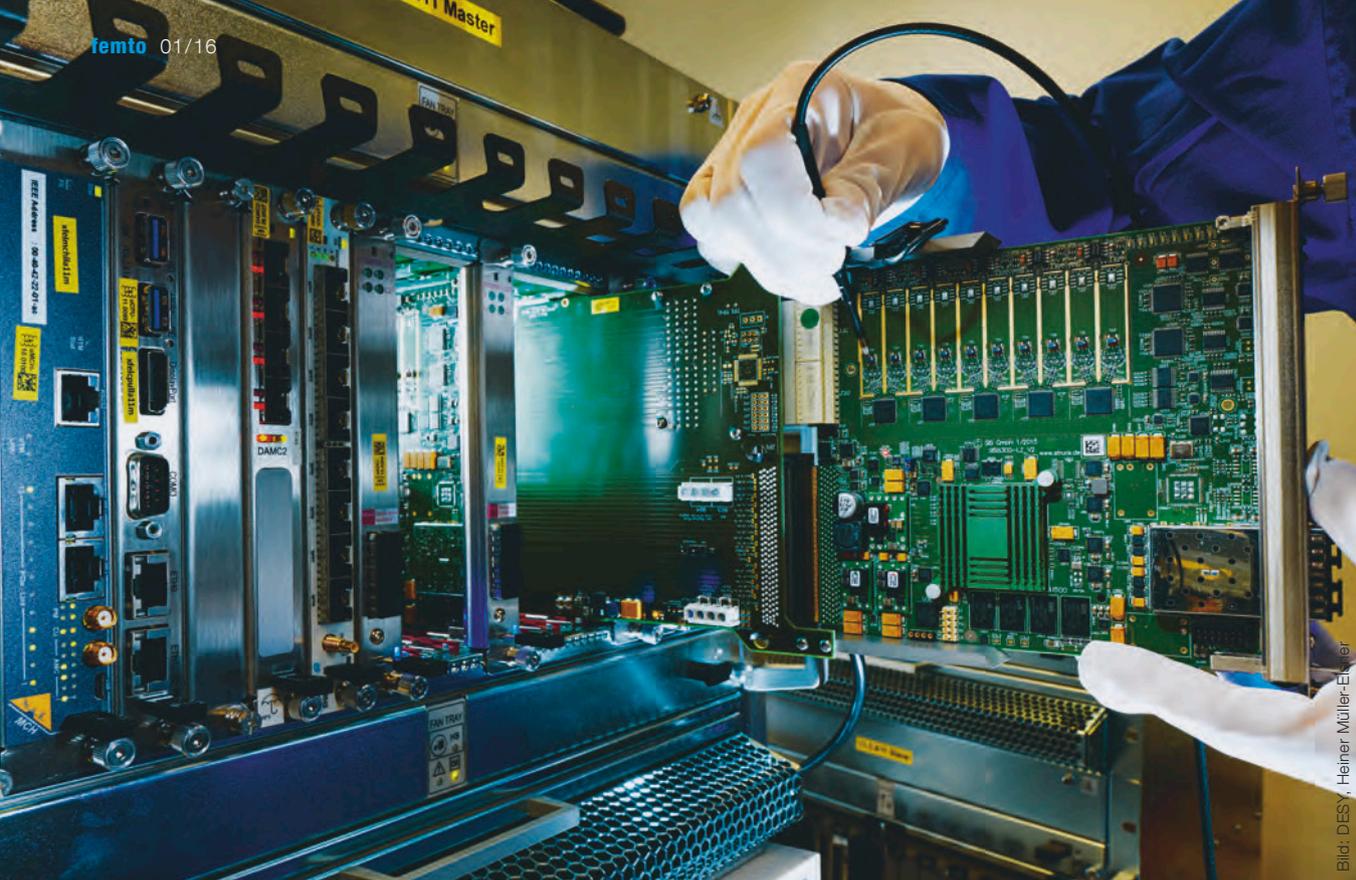


Bild: DESY, Heiner Müller-Eckler

Lizenz zum Messen

Ein neuer Elektronik-Standard erobert den Markt

Teilchenbeschleuniger sind hochkomplexe Maschinen, gespickt mit Hightech und manchmal mehrere Kilometer lang. Um solche Rennmaschinen zu steuern, ist eine hochpräzise und schnelle Technik erforderlich, die viele Datensätze parallel verarbeiten kann. Die Systeme müssen mindestens zehn Jahre lang, 24 Stunden am Tag störungsfrei laufen, und wenn ein Netzgerät ausfällt, muss trotzdem alles weitergehen. Um Systeme für solche Anforderungen zu wappnen, haben sich in den vergangenen Jahrzehnten bestimmte Elektronikstandards etabliert: einheitliche Beschreibungen, anhand derer sich solche Systeme konstruieren lassen – mit selbstgebaute, aber auch zukaufbaren Komponenten.

Drei der existierenden Standards wären grundsätzlich auch für den Betrieb eines Teilchenbeschleunigers geeignet gewesen, sagt DESY-Beschleunigerexperte Holger Schlarb. Es gab nur ein Problem: „Keiner der Standards war am Ende geeignet, um mit DESY in die Zukunft zu gehen.“ Die Zukunft ist für DESY unter anderem der 3,4 Kilometer lange europäische Röntgenlaser European XFEL, der derzeit im Hamburger Westen gebaut wird. Daher haben Schlarb und sein Team einen neuen Industriestandard mitentwickelt und gemeinsam mit dem DESY-Technologie-transfer zur Marktreife gebracht. Seit drei Jahren treiben Physiker und Technologietransfer die Kommerzialisierung und den Einsatz in der

Die schnelle DESY-Steuerungstechnik hat großes Potential für industrielle Anwendungen.

Industrie voran. Neuland nicht nur für die Forscher, sondern auch für DESY.

Um so weit zu kommen, nahmen sich die Forscher zunächst den Standard vor, der ihren Anforderungen am nächsten kam: MicroTCA (Micro Telecommunications Computing Architecture). „Dieser Industriestandard ist sehr weit verbreitet“, erläutert Schlarb. „Er kommt aus dem Telekommunikationsbereich und kann alles, was wir brauchen – bis auf eine Sache: feinste, analoge Daten erfassen.“ Das ist unerlässlich für die Forschung mit Teilchenbeschleunigern. Daher taten sich die DESY-Physiker mit anderen Instituten und Industriepartnern zusammen und erweiterten den Standard um die fehlende Funktion – die

Möglichkeit, analoge Messaufgaben durchzuführen.

Der neue Industriestandard MicroTCA.4 wurde etabliert, und auf seiner Basis entwickelten die DESY-Wissenschaftler ein System von Steuerungsplatinen, das analoge und digitale Signale verarbeiten kann. Mehr als 100 Kenngrößen können so in Echtzeit mehrere hundert Millionen Mal pro Sekunde ausgelesen werden. Durch ein integriertes Managementsystem kann alles aus der Ferne bedient und gewartet werden. Noch dazu lässt sich das System von kleinsten Einheiten bis zu hochkomplexen Großanlagen nutzen – es ist skalierbar, wie die Elektronikprofis sagen.

„Wir wollen MicroTCA.4 in der Wissenschaftscommunity und in industriellen Märkten etablieren“

Holger Schlarb, DESY

Diese Funktionen machen den neuen Standard nicht nur für die Wissenschaft interessant. Auch in der Industrie gibt es zahlreiche Einsatzmöglichkeiten: Von der Telekommunikation, der Online-Inspektion, Luftfahrt, Medizintechnik bis hin zur Präzisionsmesstechnik. Daher stellten die Helmholtz-Gemeinschaft, DESY und Partner aus der Industrie 2012 vier Millionen Euro bereit, um die Kommerzialisierung und den Einsatz in Industrieunternehmen voranzutreiben. Ungeohntes Terrain für die Forscher: Seither gehen sie auf Messen, halten Workshops, treten als Consultants auf. „Wir wollen MicroTCA.4 in der Wissenschaftscommunity und in industriellen Märkten etablieren“, sagt Schlarb. „Der neue Standard zeigt eindrucksvoll, wie sowohl

Wissenschaft als auch Industrie erheblich von der Innovationskraft der Forschung profitieren können“, ergänzt die Leiterin des DESY-Technologietransfers Katja Kroschewski.

Die Investition in den neuen Standard zahlt sich schon jetzt aus: Ein Patent und 18 Lizenzverträge basieren auf dieser Entwicklungsarbeit. „So generieren wir Einnahmen und Rückflüsse und haben die Möglichkeit, Dinge weiterzuentwickeln“, sagt Michael Fenner, Entwicklungsingenieur bei DESY. Und auch wenn es den Forschern selbst viel zu langsam geht, attestiert Branchenkenner Heiko Körte der Technik eine vielversprechende Zukunft. „MicroTCA.4 setzen wir als Basisstandard schon jetzt sehr erfolgreich in einer ganzen Reihe von Projekten ein“, sagt der Direktor Sales & Marketing vom Systemhersteller N.A.T. aus Bonn. Beispielsweise in der Verkehrsleittechnik und in diversen Funkanwendungen im Fest- und Mobilnetz. Auch in der Medizintechnik und im Katastrophenmanagement könnte die Technik zukünftig immer wichtiger werden.

„MicroTCA.4 setzen wir als Basisstandard schon jetzt sehr erfolgreich in einer Reihe von Projekten ein“

Heiko Körte, N.A.T.

„Wenn beispielsweise nach Erdbeben mobile Basisstationen für den Mobilfunk errichtet werden müssen, oder in infrastrukturschwachen Regionen der Welt Mobilfunkstationen aufgebaut werden sollen, ist dieser Standard der Richtige“, sagt Körte. „Der Standard MicroTCA hat in den vergangenen acht Jahren eine beachtliche Erfolgsgeschichte hinge-



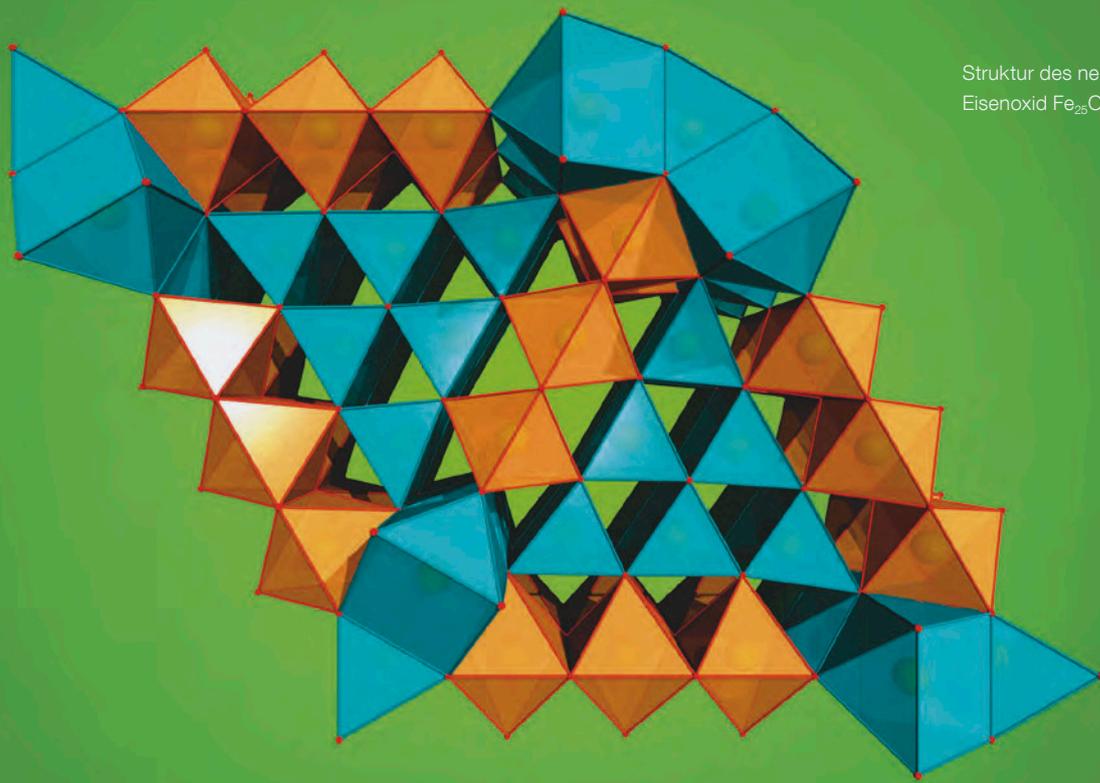
DESY-Wissenschaftler Holger Schlarb war maßgeblich an der Entwicklung von MicroTCA.4 beteiligt.

legt.“ Den Marktanteil von MicroTCA an neuen Anwendungen im direkten Vergleich mit den Standards VME, Compact PCI und VPX schätzt er mittlerweile auf 30 bis 35 Prozent. Eine Marktanalyse aus dem Jahr 2014 bezifferte das jährliche Wachstum auf 9 Prozent. MicroTCA.4 ist ein Teil davon.

N.A.T. war nicht nur ein maßgeblicher Industriepartner bei der Entwicklung von MicroTCA, das Bonner Unternehmen hat bereits zu 85 Prozent auf diesen Standard umgestellt, 12 Prozent davon sind Produkte auf der Basis von MicroTCA.4 – Tendenz steigend. Körte ist optimistisch, was die Etablierung des neuen Standards auf dem Markt angeht. Die Firmen bräuchten naturgemäß etwas Zeit um sich mit dem neuen Standard und seinen Anwendungsmöglichkeiten vertraut zu machen. „Das ist ein Übergangsprozess“, sagt er. „Das wird noch ein paar Jahre dauern, aber nicht mehr zehn.“

Unbekannte Sauerstoffquelle im Erdmantel

Hinweise aus der Entdeckung neuer Eisenoxide



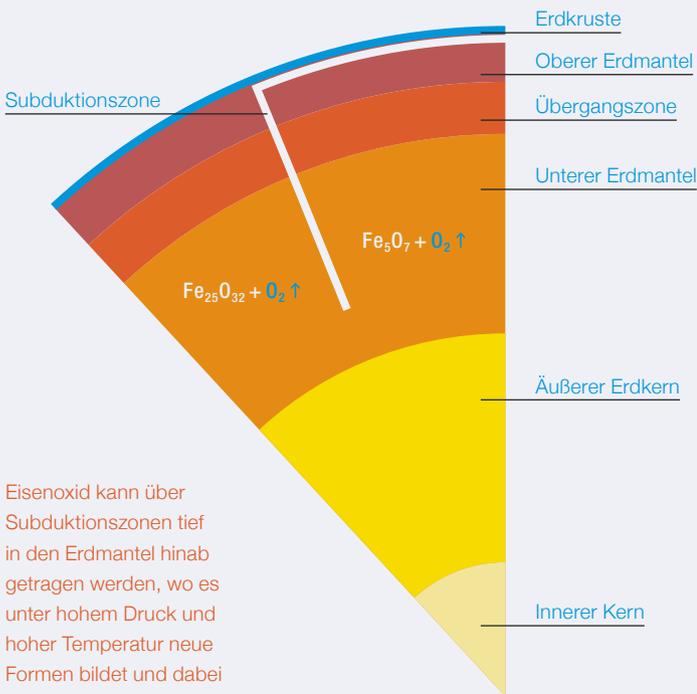
Struktur des neu entdeckten
Eisenoxid $\text{Fe}_{25}\text{O}_{32}$

Bild: Elena Bykova, Universität Bayreuth

Bei Versuchen mit speziellen Hochdruckzellen haben Forscher zwei neue Eisenoxide entdeckt. Der Fund von Elena Bykova von der Universität Bayreuth und ihrem Team weist auf die Existenz einer großen, bislang unbekannt Sauerstoffquelle im unteren Erdmantel hin und wirft damit spannende Fragen auf. Was passiert mit dem Sauerstoff? Reagiert er mit dem Gestein? Steigt er womöglich auf? Wie beeinflusst er geochemische Prozesse im Erdsystem?

Eisenoxid kommt in der Natur in unterschiedlichen Verbindungen vor. „Das häufigste Eisenoxid ist Hämatit, Fe_2O_3 , das ein Endprodukt

vieler geologischer Prozesse darstellt und die wichtigste Eisenquelle unserer Zivilisation ist“, erläutert Bykova. In den vergangenen fünf Jahren haben Forscher neue Eisenoxidverbindungen entdeckt, die sich bei hohem Druck und hohen Temperaturen bilden. Um das Verhalten von Hämatit und dem ebenfalls häufigen Magnetit (Fe_3O_4) unter Extrembedingungen weiter zu untersuchen, nutzte das Team um Bykova eine besondere Druckzelle an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III. „In dieser sogenannten Diamantstempelzelle können kleine Proben zwischen zwei Diamanten einem Druck von einigen hunderttausend Atmosphären ausgesetzt werden, wobei ein sorgfältig



Eisenoxid kann über Subduktionszonen tief in den Erdmantel hinab getragen werden, wo es unter hohem Druck und hoher Temperatur neue Formen bildet und dabei große Mengen Sauerstoff freisetzt. Was mit dem Sauerstoff geschieht, ist noch ungeklärt.

justierter Laser die Probe durch die transparenten Diamantstempel hindurch auf mehrere tausend Grad Celsius erhitzen kann“, beschreibt DESY-Experte Hanns-Peter Liermann. Dabei lassen sich mit dem außergewöhnlich hellen und feinen Röntgenstrahl von PETRA III Strukturänderungen in dem untersuchten Material verfolgen. Ähnliche Messungen fanden auch an der Europäischen Synchrotronquelle ESRF in Grenoble und an der US-Röntgenquelle APS in Chicago statt.

„In einer Diamantstempelzelle können kleine Proben zwischen zwei Diamanten einem Druck von einigen hunderttausend Atmosphären ausgesetzt werden“

Hanns-Peter Liermann, DESY

Bei einem Druck von mehr als 67 Gigapascal (das entspricht dem 670 000-fachen Atmosphärendruck) und einer Temperatur von rund 2400 Grad Celsius zerfiel das Hämatit und bildete ein neues Eisenoxid, Fe_5O_7 , das zuvor noch nie beobachtet worden war. Druck und Hitze entsprachen dabei in etwa den Bedingungen in 1500 Kilometern Tiefe unter der Erdoberfläche. Bei einem noch höheren Druck von rund 70 Gigapascal, entsprechend einer Tiefe von 1670 Kilometern, zerfiel

auch Magnetit, und es bildete sich das ebenfalls zuvor unbekannte Eisenoxid $\text{Fe}_{25}\text{O}_{32}$. Das Besondere daran: Die Bildung beider bisher unbekannt Eisenoxide setzt Sauerstoff frei.

Obwohl Eisenoxid normalerweise nicht im großen Maß im unteren Erdmantel auftritt, kann es über sogenannte Subduktionszonen dorthin befördert werden, wenn eine tektonische Platte unter eine andere gleitet. Hämatit und Magnetit sind Hauptbestandteile bestimmter urzeitlicher Eisenablagerungen, Bändererz und Eisenstein, die auf allen Kontinenten vorkommen. Diese Formationen können mehrere hundert Meter dick werden und Ausdehnungen von hunderten Kilometern aufweisen. Als zwei Milliarden Jahre alte Ablagerungen bilden sie weltweit einen Teil des Ozeanbodens. Über die Subduktion wird das Bändererz quasi im Erdinneren recycelt, wobei es in große Tiefen getragen werden kann, möglicherweise sogar bis zur Grenzregion von Erdmantel und Erdkern.

Unter Bedingungen, die dem unteren Erdmantel entsprechen, zerfallen Hämatit und Magnetit jedoch und setzen dabei große Mengen einer sauerstoffreichen Flüssigkeit frei (Sauerstoff ist unter solchen Bedingungen üblicherweise flüssig), wie das Team nun beobachtet hat. „Wir schätzen, dass diese Quelle bis heute Sauerstoff in einem Umfang freigesetzt hat, der der acht- bis zehnfachen Masse des Sauerstoffs in der Atmosphäre entspricht“, sagt Bykova. „Das ist überraschend, und es ist nicht klar, was mit dem Sauerstoff dort unten passiert.“

Die sauerstoffreiche Flüssigkeit könnte lokal das umgebende Gestein oxidieren oder zur Übergangszone oder sogar bis in den oberen Mantel aufsteigen. „Das bleibt zu untersuchen“, sagt Ko-Autor Maxim Bykov von der Universität Bayreuth. „Zurzeit können wir nur sagen, dass es dort eine riesige Sauerstoffquelle im Mantel gibt, die geochemische Prozesse wesentlich beeinflussen kann, indem sie Oxidationszustände ändert und Spurenelemente mobilisiert. Das wird ein großes neues Modellierungsfeld eröffnen.“

Die Entdeckung der neuen Eisenoxide trage daher nicht nur zum Wissen über die grundlegenden Eigenschaften dieser Substanzen bei, betont Bykov. „Unsere Arbeit zeigt, dass uns wesentliche Teile der Erdprozesse nach wie vor unbekannt sind. Abtauchende Platten können offensichtlich unerwartete Effekte bewirken. Die Auswirkungen auf die globalen Dynamiken der Erde, einschließlich Klimavariationen, müssen noch untersucht werden.“

Nature Communications, 2016; DOI: 10.1038/NCOMMS10661

Teilchen- beschleuniger auf Mikrochip

Innovative Entwicklung soll Zugang zu Beschleunigertechnologie erleichtern

Ein Teilchenbeschleuniger, der auf einen Mikrochip passt – kaum vorstellbar, aber die Entwicklung einer solchen Miniatur-Rennmaschine ist schon im Gange, gefördert mit 13,5 Millionen US-Dollar (12,6 Millionen Euro) von der Gordon-und-Betty-Moore-Stiftung. Auch DESY und die Universität Hamburg gehören zu den Partnern des internationalen Projekts, das von Robert Byer von der Universität Stanford (USA) und Peter Hommelhoff von der Universität Erlangen-Nürnberg geleitet wird. Innerhalb von fünf Jahren soll dabei ein funktionierender Prototyp eines „Accelerator-on-a-Chip“ (Beschleuniger auf einem Chip) entstehen.

„Das ‚Schrumpfen‘ von Beschleunigern ist ähnlich relevant wie die Evolution von Computern, die einst ganze Räume füllten und heute um das Handgelenk getragen werden können“, betont Hommelhoff. Für viele Zwecke bleiben die leistungsstarken, großen Anlagen

zwar vorerst unverzichtbar. Eine Miniaturisierung könnte den Einsatz von Teilchenbeschleunigern jedoch in Bereichen ermöglichen, in denen es bislang keinen Zugang zu derartigen Techniken gab.

„Der Prototyp kann den Weg für eine neue Generation von Labor-tisch-Beschleunigern bereiten und damit für unvorhergesehene Entdeckungen in der Biologie und der Materialwissenschaft sowie für mögliche Anwendungen in der Sicherheitstechnik, medizinischen Therapie und Röntgenbildgebung“, erläutert Byer.

Das Projekt fußt auf Entwicklungen der Nano-Photonik, der Herstellung und Nutzung von Nanostrukturen zur Erzeugung und Manipulation von Licht. Zur Beschleunigung der elektrisch geladenen Elementarteilchen wird dabei ein sichtbarer oder infraroter Laser verwendet statt der heute üblichen Hochfrequenz-Radiowellen. Die Wellenlänge dieser Strahlung ist rund zehn- bis hunderttausendmal kürzer als die Radiowellen. „Der Vorteil: Alles wird bis zu fünfzigmal kleiner“, erläutert DESY-Wissenschaftler Franz Kärtner, der auch Professor an der Universität Hamburg und am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den USA sowie Mitglied im Hamburger Exzellenzcluster Center for Ultrafast Imaging (CUI) ist.

„Die typische transversale Größe einer Beschleunigerzelle kann etwa von zehn Zentimetern auf einen Mikrometer reduziert werden“, ergänzt Ingmar Hartl, Leiter der Lasergruppe

im DESY-Forschungsbereich Forschung mit Photonen. Derzeit erste Wahl für das Material der Miniatur-Beschleunigermodule ist dabei Silizium. „Das hat den Vorteil, dass man auf die weit fortgeschrittene Fertigungstechnik für Silizium-Mikrochips zurückgreifen kann“, erläutert Hartl.

DESY bringt in das Projekt unter anderem sein weltweit führendes Laser-Know-how ein, das sich bereits in der Kooperation mit der Universität Erlangen-Nürnberg bewährt hat. Hommelhoffs Gruppe hatte für langsame Elektronen gezeigt, dass ein mikrostrukturiertes Beschleunigermodul einen höheren Beschleunigungsgradienten erreichen kann als die Radiowellentechnik. Unabhängig davon hatte die Gruppe um Byer dies für schnelle, sogenannte relativistische Elektronen demonstriert.

Der Weg von einem experimentellen Aufbau im Labor zu einem funktionierenden Prototyp ist allerdings noch weit. So müssen einzelne Komponenten des Systems neu entwickelt werden. DESY arbeitet unter anderem an einer hochpräzisen Elektronenquelle, mit der die Elementarteilchen in die Beschleunigermodule eingespeist werden, einem leistungsfähigen Laser zur Beschleunigung sowie einer Elektronen-Slalomstrecke zur Erzeugung von Röntgenlicht. Außerdem ist das Zusammenspiel der Miniatur-Komponenten noch keine Routine, insbesondere nicht die Kopplung mehrerer Beschleunigungsmodule.

Das im Aufbau befindliche Beschleuniger-Entwicklungslabor SINBAD („Short Innovative Bunches and Accelerators at DESY“) wird eine ideale Testumgebung für die Miniatur-Beschleunigermodule bieten. „Bei SINBAD lässt sich ein qualitativ hochwertiger Elektronenstrahl in die Module einspeisen, die Strahlqualität testen und eine effiziente Laser-Kopplung erarbeiten. DESY bietet hier einzigartige Möglichkeiten“, erläutert DESY-Beschleunigerexperte Ralph Aßmann.



Drei Miniatur-Beschleunigermodule aus Silizium auf einer durchsichtigen Basis.

Warum van Goghs Sonnenblumen welken

Röntgenuntersuchung zeigt, wie Chromgelb nachdunkelt

Van Goghs berühmte Sonnenblumen verändern mit der Zeit ihre Farbe. Ursache ist die Mischung der Pigmente, die der niederländische Meister für seine Gemälde verwendet hat. Das belegt eine aufwendige Röntgenuntersuchung der Sonnenblumen-Variante aus dem Van-Gogh-Museum Amsterdam. Forscher um Letizia Monico vom Institut für Molekularwissenschaften und -technologie (CNR-ISTM) in Perugia, von der Universität Perugia und der Universität Antwerpen haben dazu unter anderem winzige Farbpartikel des Gemäldes mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III durchleuchtet. Ihre Studie identifiziert Bereiche des Gemäldes, die besonders sorgfältig auf Veränderungen beobachtet werden sollten.

Vincent van Gogh (1853-1890) ist berühmt für seine leuchtend gelben Farben. Der Niederländer verwendete sogenanntes Chromgelb, eine Verbindung aus Blei, Chrom und Sauerstoff. „Das Pigment existiert in unterschiedlichen Schattierungen, und nicht alle davon sind dauerhaft lichtbeständig“, erläutert Monico. „Helleres Chromgelb mit einer Beimischung von Schwefel ist anfällig für eine chemische Veränderung unter Lichteinfluss, durch die das Pigment nachdunkelt.“

Die Forscher untersuchten die Sonnenblumen aus dem Jahr 1889 darauf, ob van Gogh darin verschiedene Chromgelb-Varianten verwendet hat. Der Niederländer hat das Bild drei Mal gemalt. Je eine Variante hängt in der National Gallery

in London, im Seji Togo Memorial Sampo Japan Nipponkoa Museum of Art in Tokio und im Van-Gogh-Museum Amsterdam. Zwei weniger als einen Millimeter kleine Farbpartikel aus dem Gemälde in Amsterdam wurden mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III durchleuchtet. „Die Analyse zeigt, dass orangegelbe Schattierungen vor allem die lichtbeständige Variante von Chromgelb enthalten, während sich in hellgelben Bereichen vor allem eine lichtempfindliche Chromgelb-Variante findet“, berichtet Gerald Falkenberg, Leiter der Messstation, an der die Röntgenbeugungsmessungen stattfanden.

„Die Studie hat weitreichende Konsequenzen dafür, wie die Farben anderer Kunstwerke einzuschätzen sind“

Koen Janssens, Universität Antwerpen

An der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble untersuchte das Forscherteam den chemischen Zustand der Farbproben. Wenn lichtempfindliches Chromgelb nachdunkelt, wird das Chrom von seinem höchsten Oxidationszustand Cr^{VI} in den Zustand Cr^{III} reduziert. Tatsächlich konnten die Wissenschaftler an der



Foto: Van Gogh Museum, Amsterdam (Vincent van Gogh Foundation)

Sonnenblumen, 1889,
Vincent van Gogh (1853-1890).

Oberfläche der Farbpartikel einen relativen Anteil von 35 Prozent Cr^{III} messen. „Zumindest an den beiden untersuchten Stellen, von denen die Farbproben stammen, ist in den Sonnenblumen eine Farbveränderung durch eine Chromgelb-Reduzierung eingetreten“, sagt Monico. Die Sonnenblumen haben ursprünglich also möglicherweise anders ausgesehen als heute.

Mit einem mobilen Scanner haben die Wissenschaftler Bereiche auf dem Amsterdamer Gemälde identifiziert, die künftig besonders genau auf Farbveränderungen hin beobachtet werden sollten. „Da Chromgelb-Pigmente bei den Malern des späten 19. Jahrhunderts weit verbreitet waren, hat diese Studie weitreichende Konsequenzen dafür, wie die Farben anderer Kunstwerke einzuschätzen sind“, betont Koen Janssens von der Universität Antwerpen, der an der Untersuchung maßgeblich beteiligt war.

.....
Angewandte Chemie, 2015; DOI: 10.1002/ange.201505840



MEINER IST GANZ KLAR TYCHO BRAHE.



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

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

An dieser Ausgabe hat mitgewirkt

Frank Grotelüschen, Kristin Hüttmann

Gestaltung und Produktion

Diana von Ilseman

Titelbild

DESY, Dirk Nölle

Bildbearbeitung und Herstellung

Heigener Europrint GmbH

Redaktionsschluss

März 2016

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

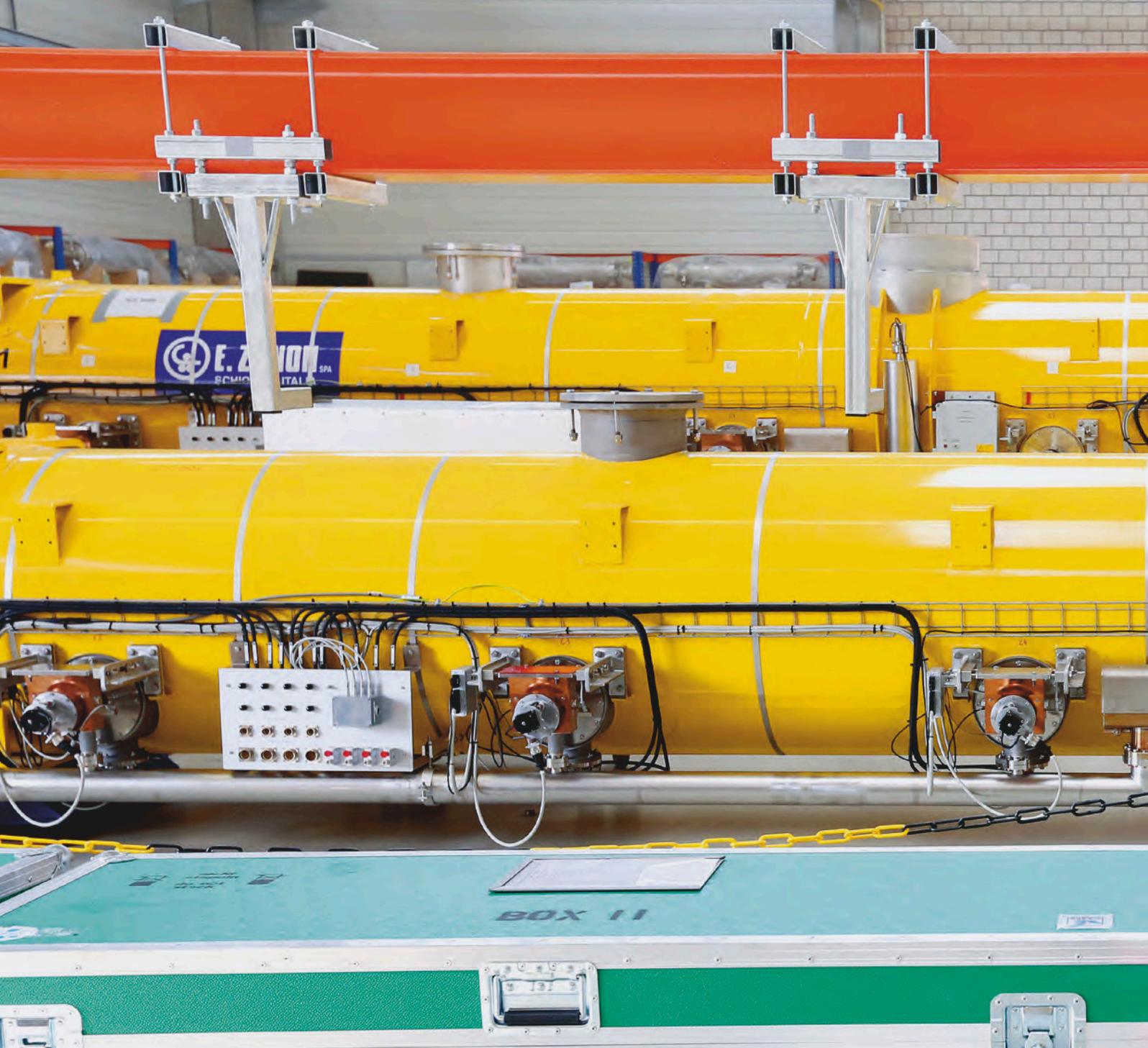
Abonnieren Sie
femto kostenlos!

www.desy.de/femto oder 040 8998-3613



Titelbild

In dem neuen Röntgenlaser European XFEL werden Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, um anschließend intensive ultrakurze Röntgenblitze zu erzeugen. Die Beschleunigerelemente stecken in zwölf Meter langen und einen knappen Meter dicken gelben Röhren. In einer Testhalle bei DESY werden die komplexen Bauteile auf Herz und Nieren geprüft, bevor sie in den Beschleunigertunnel des Röntgenlasers eingebaut werden.



Das Forschungszentrum DESY

DESY zählt zu den weltweit führenden Beschleunigerzentren. Mit den DESY-Großgeräten erkunden 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.