

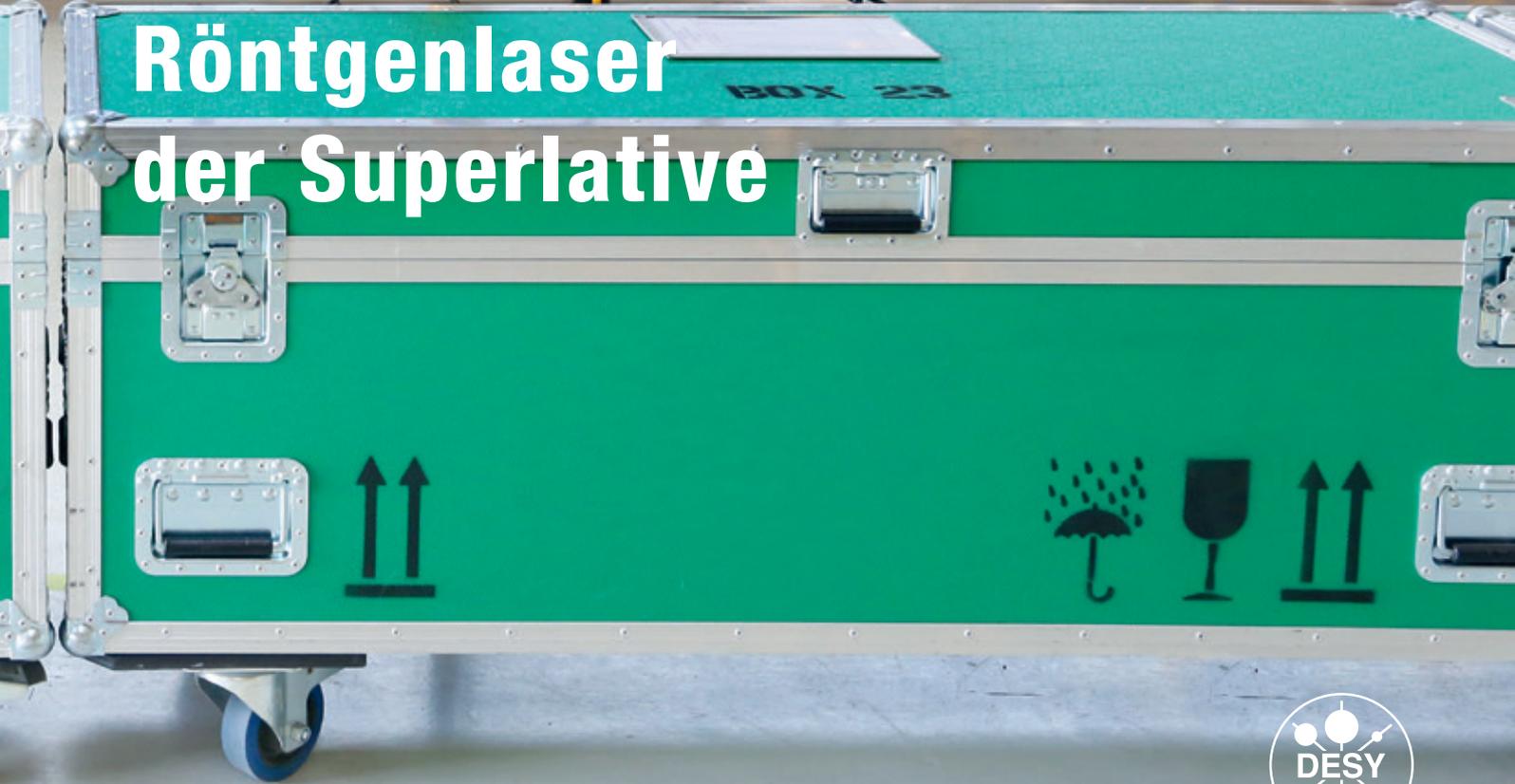
# femto

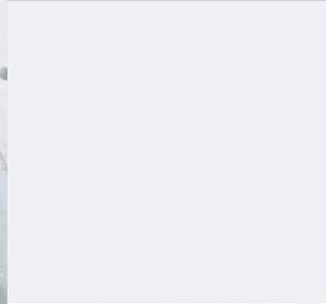
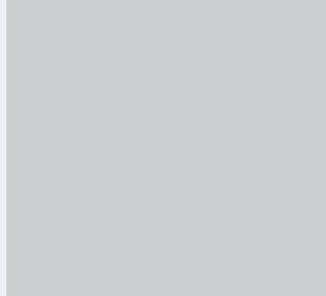
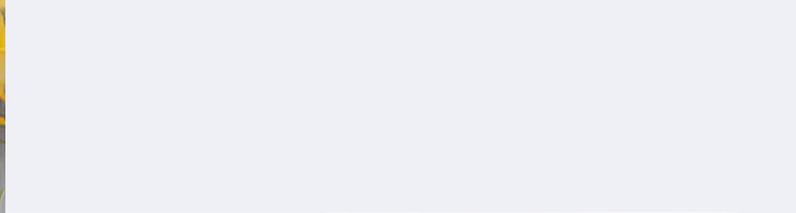
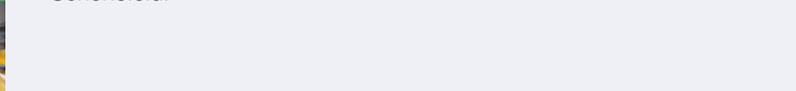
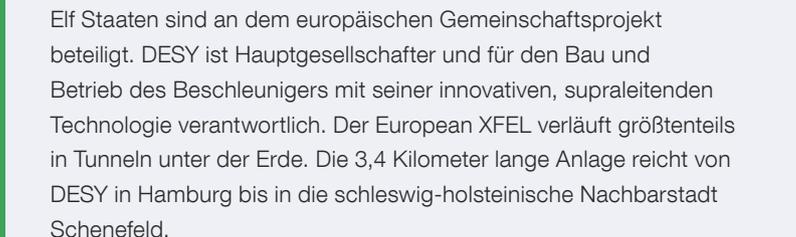
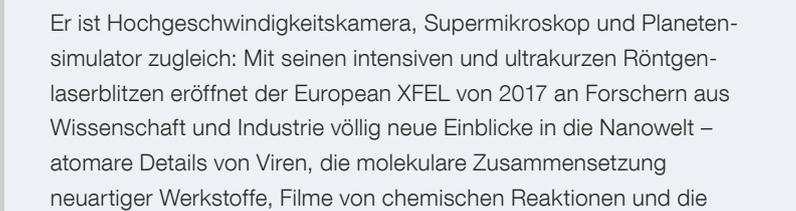
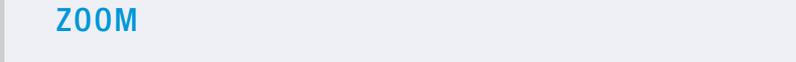
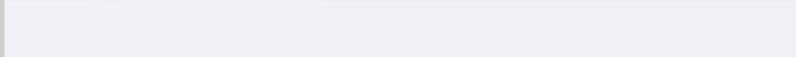
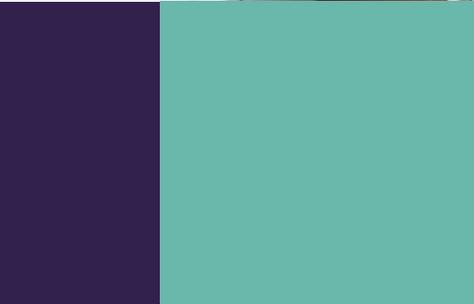
Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 01/16



ZOOM

## Röntgenlaser der Superlative



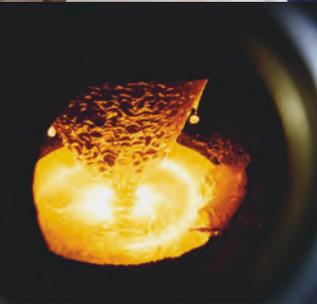
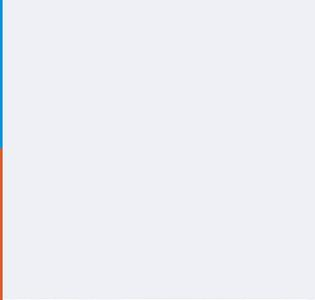
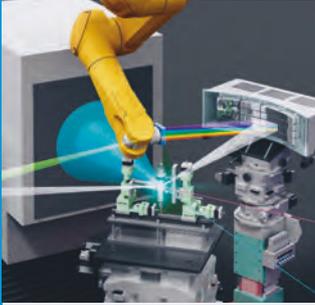


## ZOOM

# 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.

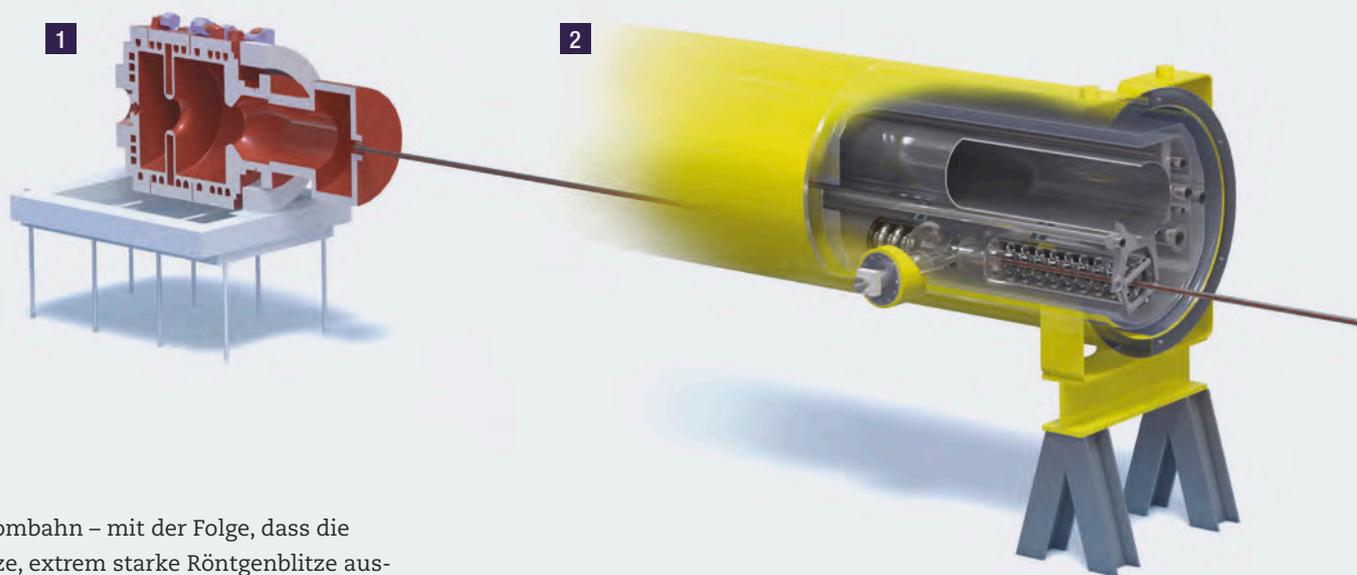
Elf Staaten sind an dem europäischen Gemeinschaftsprojekt beteiligt. DESY ist Hauptgesellschafter und für den Bau und Betrieb des Beschleunigers mit seiner innovativen, supraleitenden Technologie verantwortlich. Der European XFEL verläuft größtenteils in Tunneln unter der Erde. Die 3,4 Kilometer lange 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

**D**reieinhalb 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“.

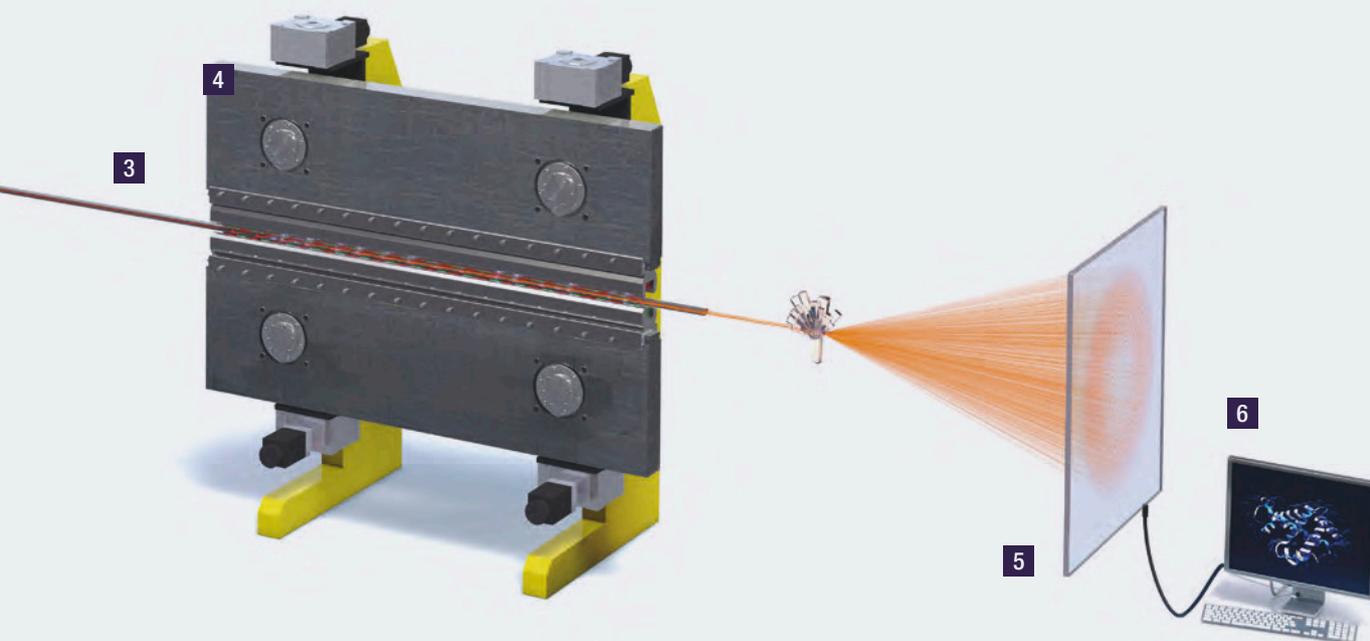
„Der European XFEL wird Wissenschaftlern aus Forschung und Industrie ganz neue Möglichkeiten eröffnen“, betont Massimo Altarelli, Vorsitzender der Geschäftsführung des European XFEL. „Vieles wird Grundlagenforschung sein, die ihre größte Wirkung meist nicht kurzfristig und auch nicht immer auf dem beabsichtigten 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.



# 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.

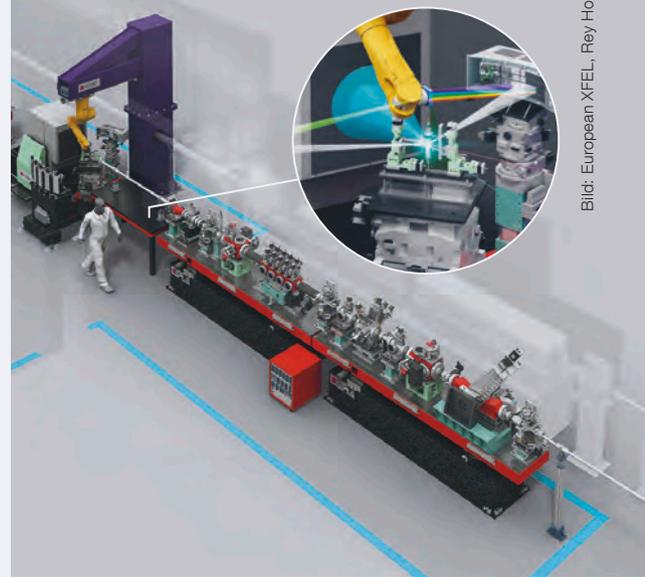


Bild: European XFEL, Rey Hor

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-

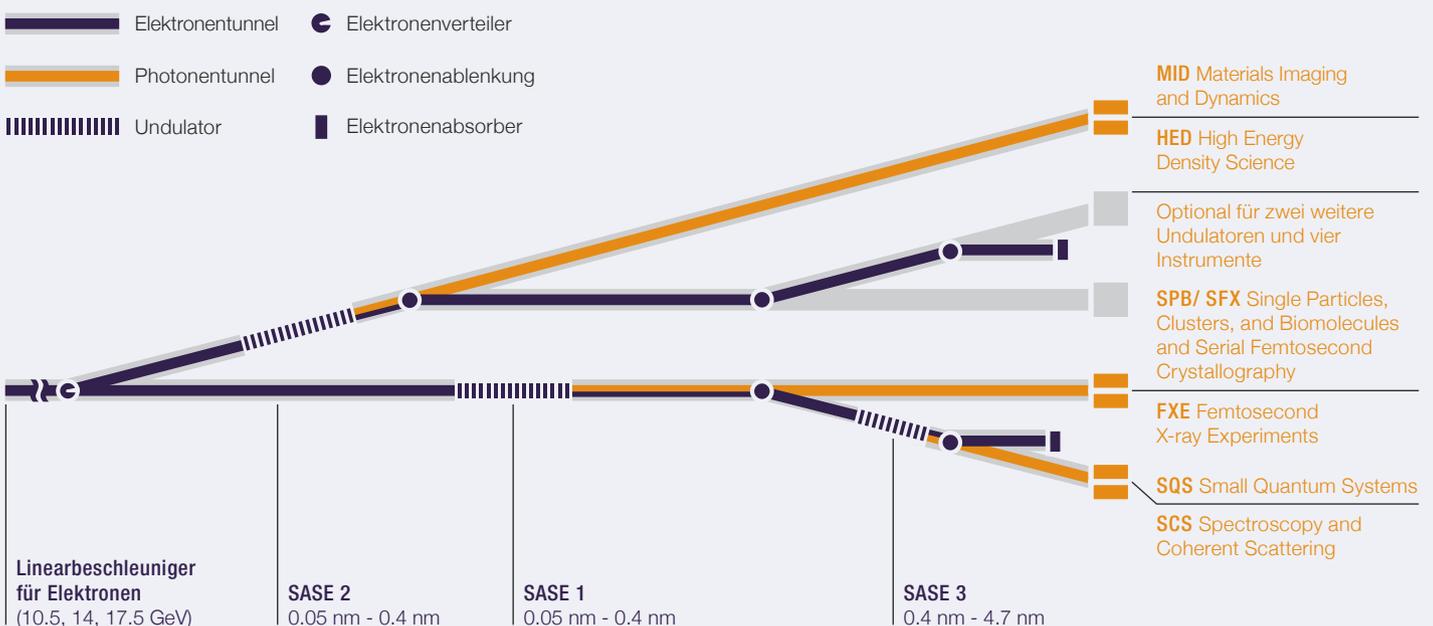
dig in viele geladene Teile. SQS bietet den Forschern verschiedene Techniken, diese Bruchstücke detailliert zu analysieren.

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**

**R**öntgenlaser 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 teurer 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.

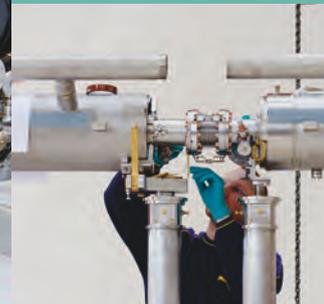
### Pakete aus Milliarden Elektronen

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.

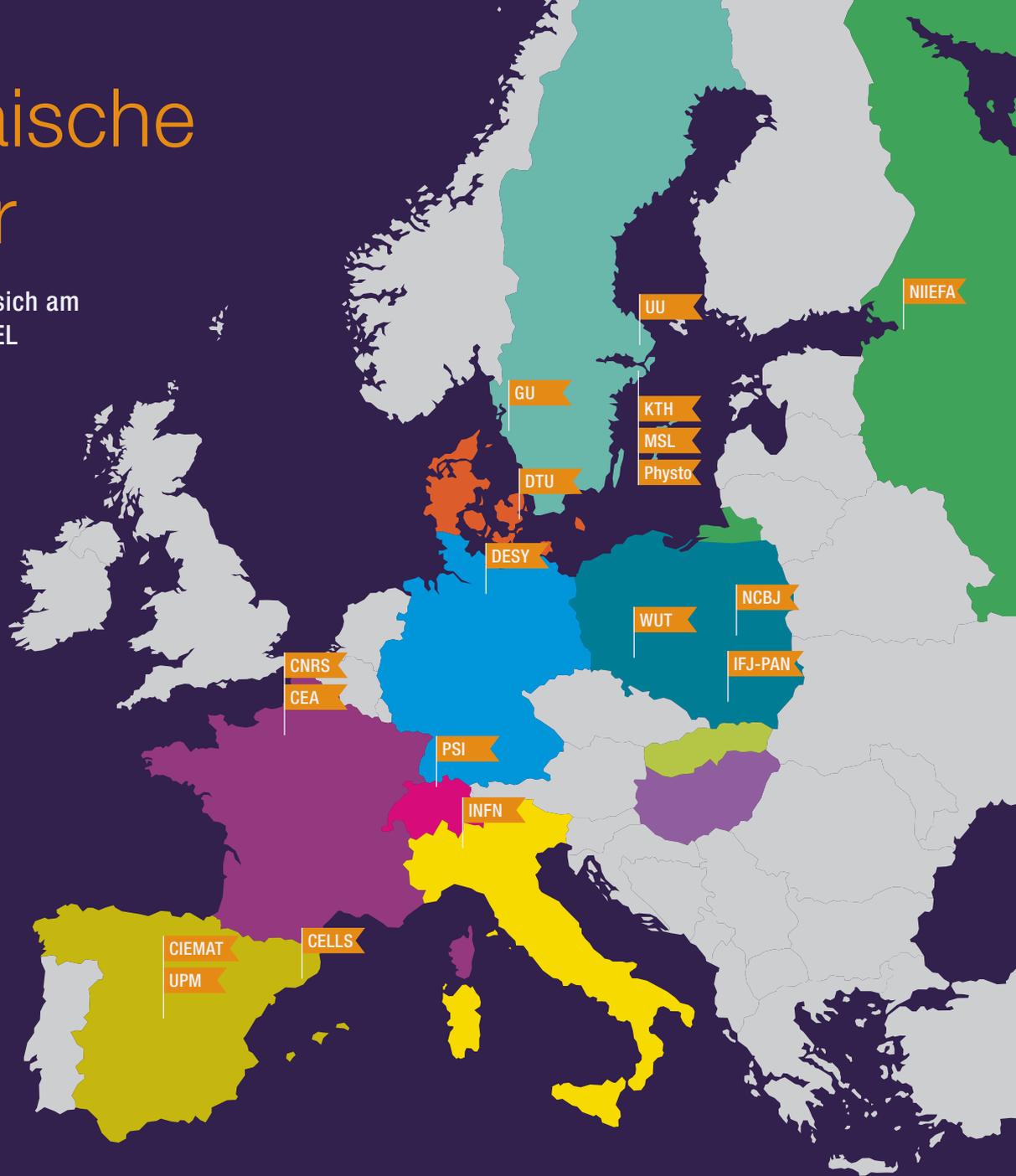
**femto:** Was zeichnet den European XFEL neben der Wissenschaft aus?

**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/](http://www.xfel.eu/project/in_kind_contributions/)

# Per Rad durch den Röntgenlaser

## Zwei Schüler erkunden den European XFEL



**F**reitag, 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.*

