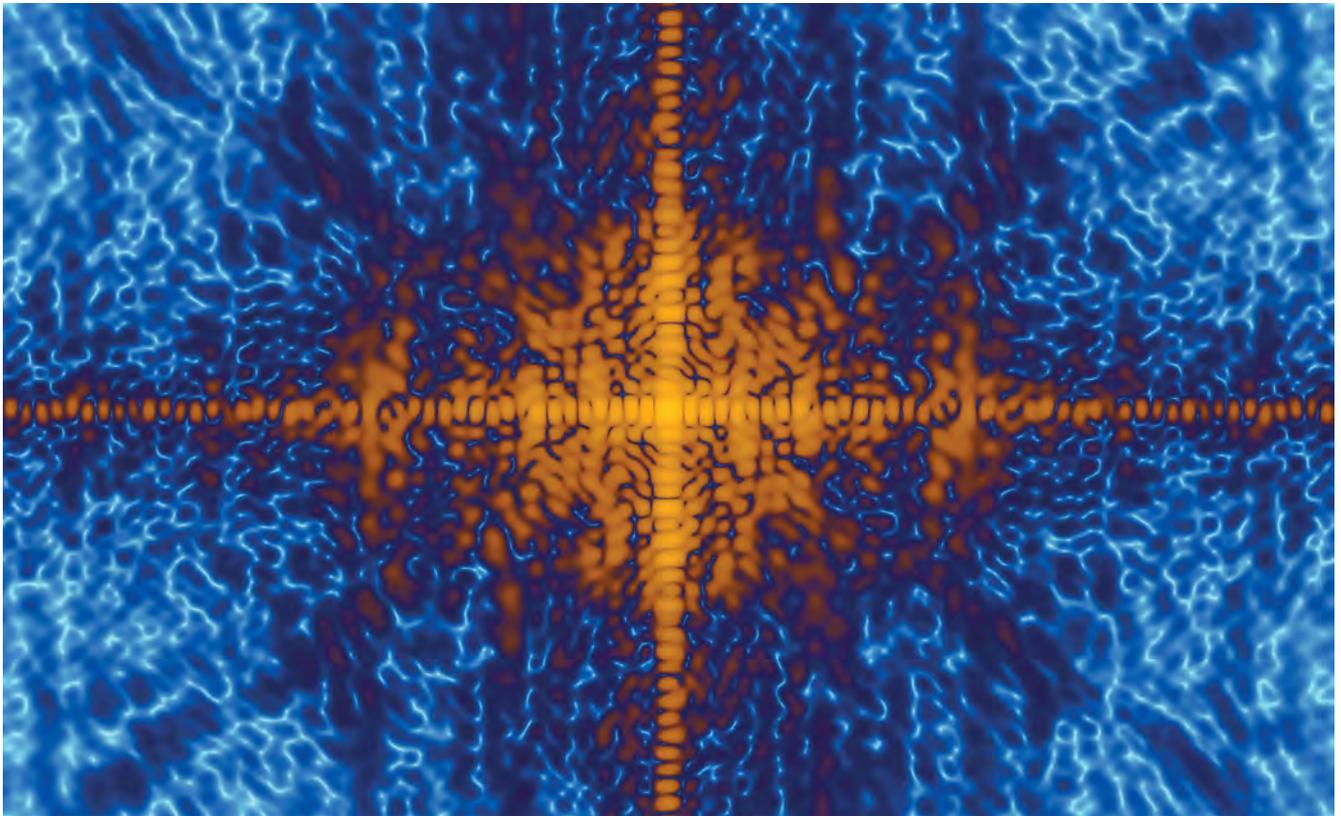


Licht der Zukunft



Inhalt

02	Vorwort
04	Auf einen Blick
08	Neue Forschungsgebiete
20	Im Vergleich
26	Funktionsweise
	■ 1. Der Beschleuniger: Elektronen auf hohe Energien bringen
	■ 2. Undulatoren: Elektronen als Lichtquelle
	■ 3. Wissenschaftliche Experimentierstationen: Röntgenblitze für die Forschung
	■ 4. Optische Laser, Detektoren und Datenaufnahme
48	Unternehmen
52	Internationale Zusammenarbeit
54	Forschungseinrichtung und Campus
58	Sicherheit und Umwelt
60	Daten und Fakten
61	Impressum



Vorwort

Willkommen bei European XFEL

Als European XFEL im September 2017 erstmals die Türen für Forscher aus aller Welt öffnete, war dies zugleich der End- und Höhepunkt von mehr als einem Jahrzehnt Planung und Bau. Wir freuen uns sehr, dass die Forschung begonnen hat und wir die Herausforderungen der Zukunft angehen können. Mit dieser Broschüre wollen wir unsere neue internationale Forschungseinrichtung vorstellen – ein Anziehungspunkt für Wissenschaftler aus aller Welt, die die Grenzen des Wissens erweitern wollen.

Die am European XFEL eingesetzte neue Beschleunigertechnologie ermöglicht es, sehr intensive und ultrakurze Röntgenblitze zu erzeugen. Dies macht unseren Röntgenlaser zu einem außerordentlich leistungsstarken Werkzeug für die Erforschung atomarer Strukturen und dynamischer Prozesse, das eine ganz neue Welt von Forschungsmöglichkeiten erschließt. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler werden beispielsweise die Entstehung neuer Materialien besser verstehen und beeinflussen können, oder die Struktur und Funktion von Biomolekülen aufklären und mit diesem Wissen Hinweise auf neue Arzneimittel erhalten. Sie werden Zustände im Labor untersuchen können, wie sie normalerweise nur im Inneren von Planeten oder Sternen vorkommen, oder nach Möglichkeiten zur Lösung der Energieprobleme suchen.

Gemeinsam mit unseren Kolleginnen und Kollegen in den zwölf Partnerländern und der Wissenschaftlergemeinschaft weltweit freuen wir uns auf die wissenschaftlichen und technologischen Fortschritte die der weltweit leistungsstärkste Röntgenlaser in den nächsten Jahren ermöglichen wird!

Ich möchte Sie dazu einladen, auf den nächsten Seiten mehr über European XFEL zu lesen und wünsche Ihnen eine interessante Lektüre.



Prof. Dr. Robert Feidenhans'l

Geschäftsführer und Vorsitzender
des European XFEL Management Boards



Der supraleitende Linearbeschleuniger des European XFEL, der längste weltweit, beschleunigt die Elektronen auf hohe Energien.

Auf einen Blick

Eine Forschungseinrichtung der Superlative

Der European XFEL ist eine internationale Forschungseinrichtung der Superlative: **27 000 Lichtblitze pro Sekunde mit einer Leuchtstärke, die milliardenfach höher ist als die der besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art, eröffnen vielfältige neue Forschungsmöglichkeiten.** Wissenschaftlerteams aus der ganzen Welt untersuchen am European XFEL Strukturen im Nanobereich, ultraschnelle Prozesse und extreme Materiezustände, nehmen dreidimensionale Bilder von Viren und Proteinen auf und filmen chemischen Reaktionen. Die neue Forschungseinrichtung wird von der European XFEL GmbH betrieben, einer gemeinnützigen Gesellschaft, die eng mit ihrem Hauptgesellschafter, dem Forschungszentrum DESY und weiteren wissenschaftlichen Einrichtungen weltweit kooperiert. Mehr als 350 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiten direkt für European XFEL, hinzukommen etwa 240 DESY-Kollegen, die den Linearbeschleuniger für European XFEL betreiben.

Mit Kosten von 1,25 Milliarden Euro (Preisniveau von 2005) und einer Länge von 3,4 Kilometern zählt der European XFEL zu den größten und ambitioniertesten neuen Forschungseinrichtungen in Europa. Derzeit beteiligen sich zwölf europäische Länder: Dänemark, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Polen, Russland, Schweden, die Schweiz, die Slowakei, Spanien und Ungarn. Deutschland trägt mehr als die Hälfte der Kosten, Russland über ein Viertel und die anderen Gesellschafter jeweils zwischen einem und drei Prozent. In den ersten fünf Jahren werden die Gesellschafter die Betriebskosten im gleichen Verhältnis tragen wie beim Bau der Anlage.

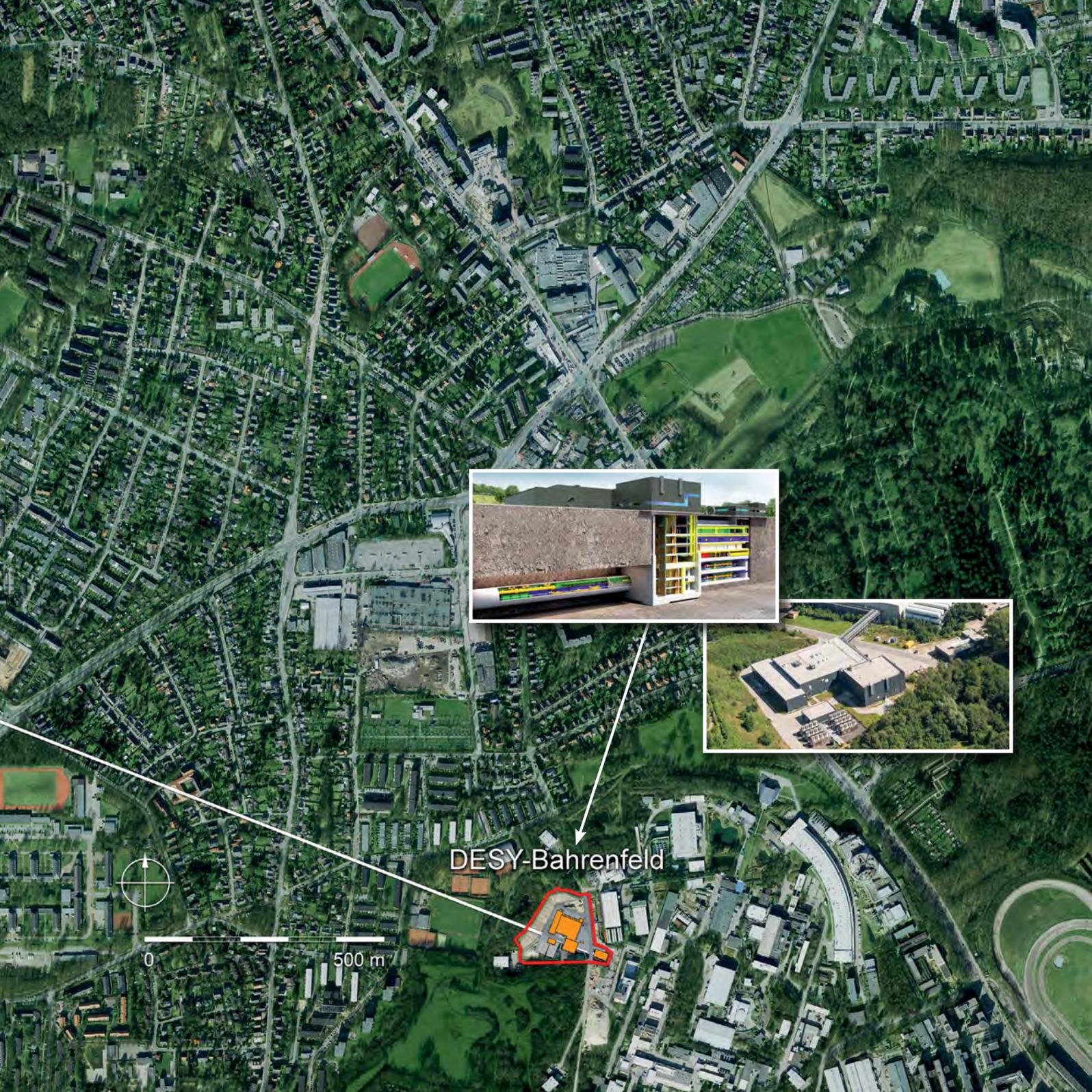
Schleswig-Holstein

Hamburg

Schenefeld

Osdorfer Born





DESY-Bahrenfeld



0 500 m



Die Experimentierstationen am European XFEL sind das Ergebnis umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Der hier gezeigte Aufbau ermöglicht die Probenzuführung in einem Flüssigkeitsstrahl.

Forschungsgebiete

Erschließung neuer Forschungsmöglichkeiten

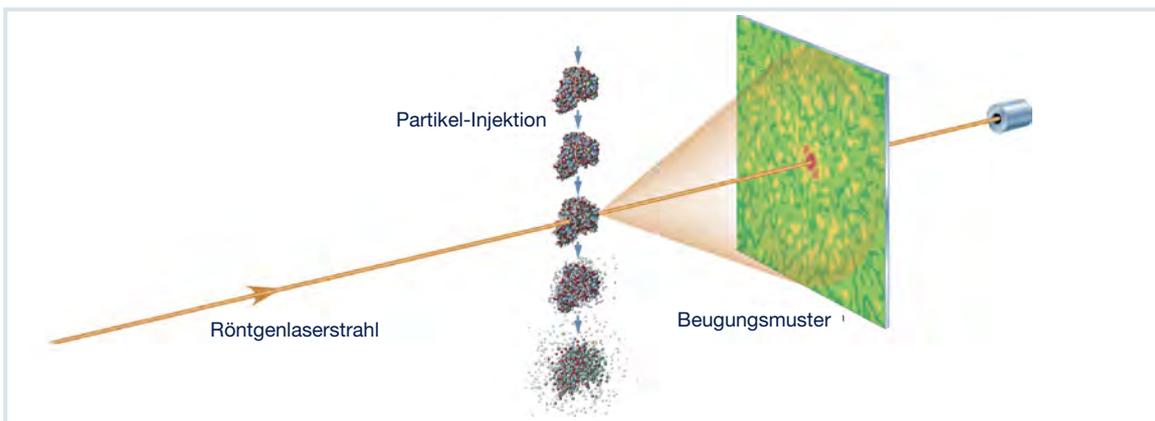
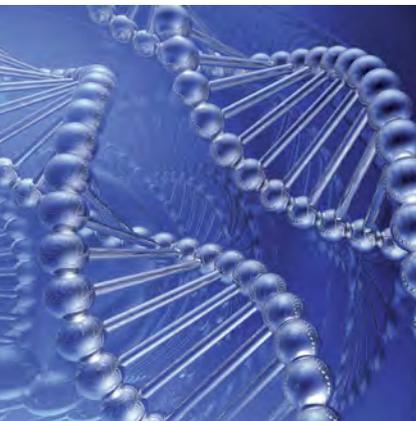
Kleiner, schneller, stärker – der European XFEL bietet einzigartige Möglichkeiten für Spitzenforscherinnen und -forscher aus der ganzen Welt. Die Anlage bringt unterschiedliche Disziplinen zusammen, die sich gegenseitig unterstützen und fördern. In diesem interdisziplinären Klima entsteht eine Vielfalt von Ideen, die zu neuen und besseren Produkten führen. **Der European XFEL produziert weit mehr Röntgenlichtblitze pro Sekunde als jede andere Forschungseinrichtung weltweit.** Die Blitze erreichen eine extrem hohe Leuchtstärke und sind außerdem extrem kurz – üblicherweise dauern sie nur einige Femtosekunden, also wenige milliardstel Sekunden. Diese herausragenden Eigenschaften ermöglichen es, ultraschnelle Vorgänge bei chemischen Reaktionen und Veränderungen von Biomolekülen zu filmen.

Mit den Röntgenblitzen des European XFEL können Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die atomaren Details von Viren und Zellen entschlüsseln, dreidimensionale Aufnahmen von Nanostrukturen machen und Prozesse untersuchen, wie sie im Inneren von Planeten und Sternen ablaufen. Von der neuen Forschungseinrichtung profitieren die unterschiedlichsten naturwissenschaftlichen Gebiete, darunter Biologie, Medizin, Pharmazie, Chemie, Materialwissenschaften, Physik, Astrophysik, Energieforschung, Umweltforschung, Elektronik, Nanotechnologie und Photonik.

Biologie, Medizin und Pharmazie

Schon kurz nach Entdeckung der Röntgenstrahlung durch Wilhelm Conrad Röntgen 1895 verbreiteten sich Röntgenaufnahmen auf der ganzen Welt. Im Jahr 1912 entdeckte der deutsche Physiker Max von Laue, dass Kristallstrukturen mit Hilfe von Beugungsmustern monochromatischer Röntgenstrahlung (Röntgenstrahlung einer definierten Wellenlänge) untersucht werden können. Diese Erkenntnis ermöglichte beispielsweise 1953 die Entdeckung der Doppelhelix-Struktur von DNA.

Heute haben wir einen weitaus besseren Einblick in die Mechanismen des Lebens, doch viele Fragen bleiben noch offen. Am European XFEL werden Forscher **weit mehr biologische Strukturen wie Proteine, Zellen oder Membranen aufklären können als bislang** möglich. Sie werden auch untersuchen können, wie sich diese Biomoleküle im Verlauf biologischer Prozesse verändern. Aus Struktur und Veränderung des Moleküls können sie Einsichten in seine Funktion gewinnen – ein wichtiger Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer Arzneimittel, beispielsweise gegen Viren.

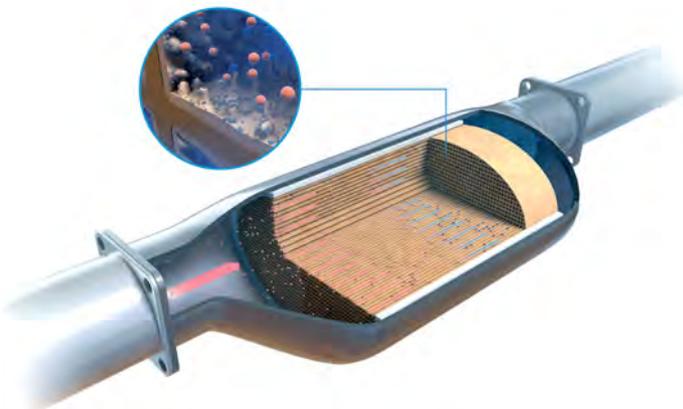


Der Röntgenblitz eines Freie-Elektronen-Lasers trifft auf ein Biomolekül. Bevor der Lichtpuls das Molekül zerstört, streut es einen Teil des Röntgenlichts, so dass ein Beugungsmuster entsteht. Aus vielen Beugungsmustern von unterschiedlich angeordneten Molekülen können Forscher die dreidimensionale Struktur des Moleküls berechnen.

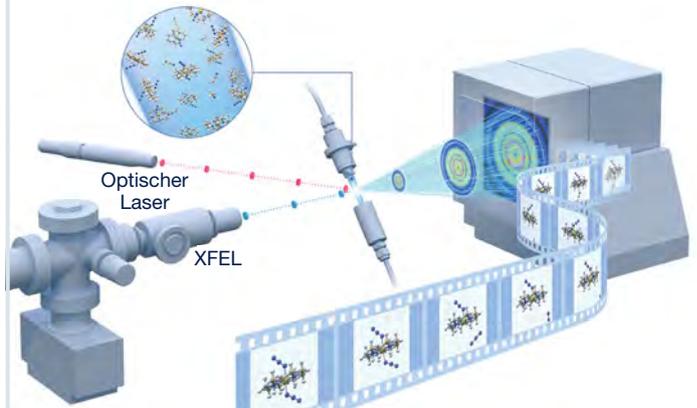
Chemie

Katalysatoren beschleunigen chemische Reaktionen. Bei mehr als der Hälfte aller chemischen Produktionsprozesse spielen sie eine wichtige Rolle.

Katalysatoren begrenzen auch den Schadstoffausstoß von Autos und sind in der petrochemischen Industrie ebenso wie bei vielen anderen Anwendungen nicht wegzudenken. Ihr weltweites Marktvolumen liegt bei vielen Milliarden Euro pro Jahr. Dennoch ist nur wenig darüber bekannt, wie die Katalyse auf atomarer Ebene abläuft. Ähnliches gilt für viele andere chemische Prozesse. Würde man sie detailgenau verstehen, könnte man gezielt effizientere Produktionsverfahren und neue Produkte entwickeln. Am European XFEL werden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler chemische Reaktionen in bisher ungekannter Detailschärfe filmen. So können sie **herausfinden, wie Moleküle und Katalysatoren in Wechselwirkung treten** und mit diesem Wissen versuchen, chemische Prozesse zu optimieren.



Im Auto hilft der Katalysator bei der Abgasreinigung. Der European XFEL kann dazu beitragen, die bei der Katalyse ablaufenden Prozesse besser zu verstehen und effizientere, umweltfreundlichere Katalysatoren zu entwickeln.



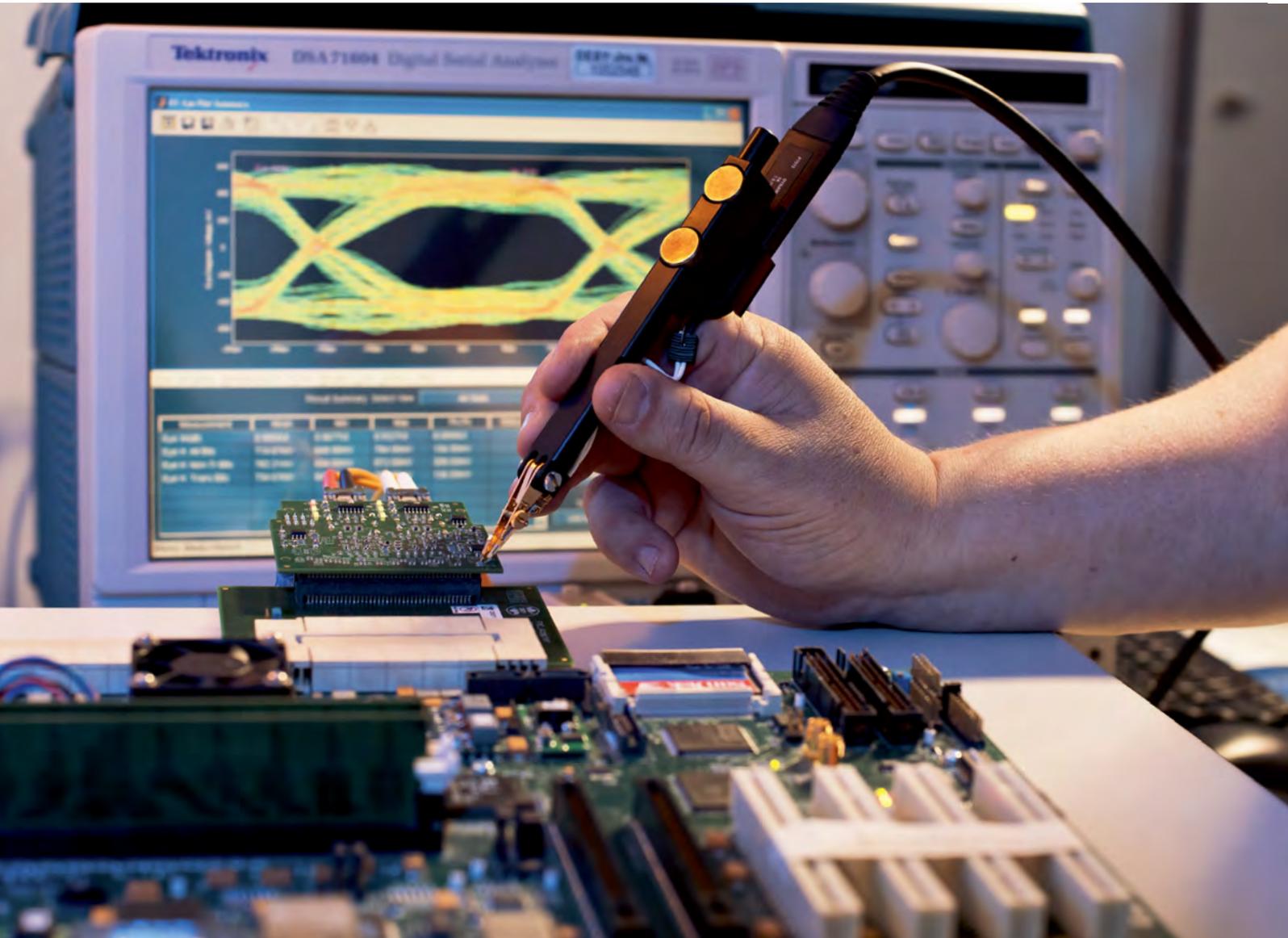
Moleküle filmen: Zunächst startet ein Laserpuls (rot) eine chemische Reaktion. Ein zweiter Puls – nun vom Röntgenlaser (blau) – nimmt anschließend zu unterschiedlichen Zeitpunkten Bilder von den Veränderungen der Moleküle auf.

Materialwissenschaften

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben in den vergangenen Jahrzehnten völlig neue Materialien für viele Anwendungen entwickelt. Die Forschung mit Röntgenstrahlen kann dazu beitragen, Eigenschaften wie Haltbarkeit, Leitfähigkeit oder Magnetisierung dieser Materialien noch besser als bisher auf die jeweiligen Anwendungsgebiete zuzuschneiden. Am European XFEL können Forscher strukturelle Eigenschaften und dynamische Veränderungen gleichzeitig untersuchen. Mit diesen Erkenntnissen lassen sich **neue Materialien mit revolutionären Eigenschaften entwickeln oder bereits bekannte weiter verbessern.**

Elektronik

Unser Alltag ist geprägt vom rasanten Fortschritt in der Elektronik und Computertechnologie. Gefragt sind unter anderem noch schnellere Computerchips und Festplatten mit größerer Speicherkapazität. Dazu müssen die Forscher zunächst die Materialeigenschaften besser verstehen und wissen, wie diese optimiert werden können. Am European XFEL lässt sich unter anderem **Magnetismus erforschen – mit möglichen Anwendungen bei der Entwicklung schnellerer Computer, größerer Speicherkapazitäten und schnellerer Datenspeichermedien.**

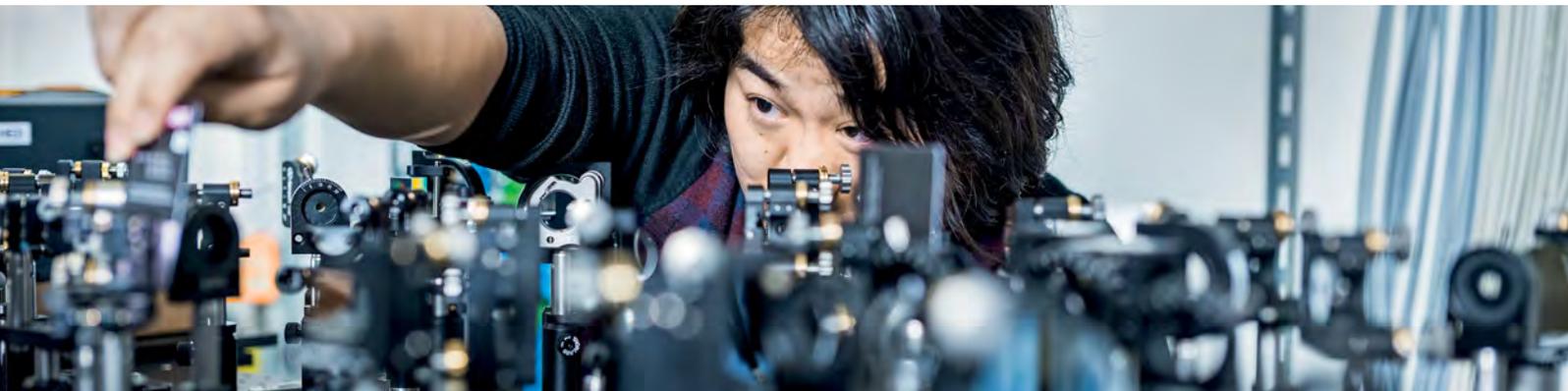


Die Forschung am European XFEL kann dazu beitragen, die Datenverarbeitungsgeschwindigkeit und Speicherkapazität von Computern und Unterhaltungselektronik weiter zu verbessern.

Physik

Physikalische Prozesse nutzen wir im Alltag auf vielfältige Weise. Am European XFEL können Forscherinnen und Forscher nicht nur die statischen Eigenschaften von Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern untersuchen, sondern auch dynamische Eigenschaften der Materie. Solche dynamischen Prozesse lassen sich durch elektrische oder magnetische Pulse, ultrakurze optische Laserblitze oder auch durch die extreme Belastung von Proben starten.

Die Forschungsergebnisse werden unser Wissen über angetriebene reversible (umkehrbare) und spontane irreversible (nicht umkehrbare) Prozesse erweitern. Reversible Prozesse wie zum Beispiel Phasenübergänge und Schwingungen – ausgelöst etwa durch optische Lichtpulse – **eröffnen neue technologische Anwendungen**. Die Erforschung irreversibler Prozesse wie Kristallisation oder Rissbildung kann zur Entwicklung **neuer Materialien mit verbesserten Eigenschaften** wie Festigkeit oder Elastizität beitragen.



Experiment am European XFEL

Astrophysik und die Erforschung extremer Zustände

Bei extremen Temperaturen, Dichte und Druck geht Materie in einen besonderen Zustand über. Werden die Atome dabei ionisiert, verlieren also einige oder alle Elektronen, spricht man von einem Plasma. Am European XFEL werden Wissenschaftler **Plasmen erzeugen und untersuchen, die bisher für Laboruntersuchungen unzugänglich waren, weil sie nur im Inneren von Planeten innerhalb und außerhalb unseres Sonnensystems vorkommen.** Anhand der Messdaten können Astrophysiker ihre Theorien zur Entstehung und Entwicklung von Sternen und Planeten einschließlich unserer Erde überprüfen. Außerdem gewinnen die Forscherinnen und Forscher neue Erkenntnisse über die Bedingungen im Inneren schwerer Planeten und die Entstehung und Entwicklung unseres Sonnensystems.



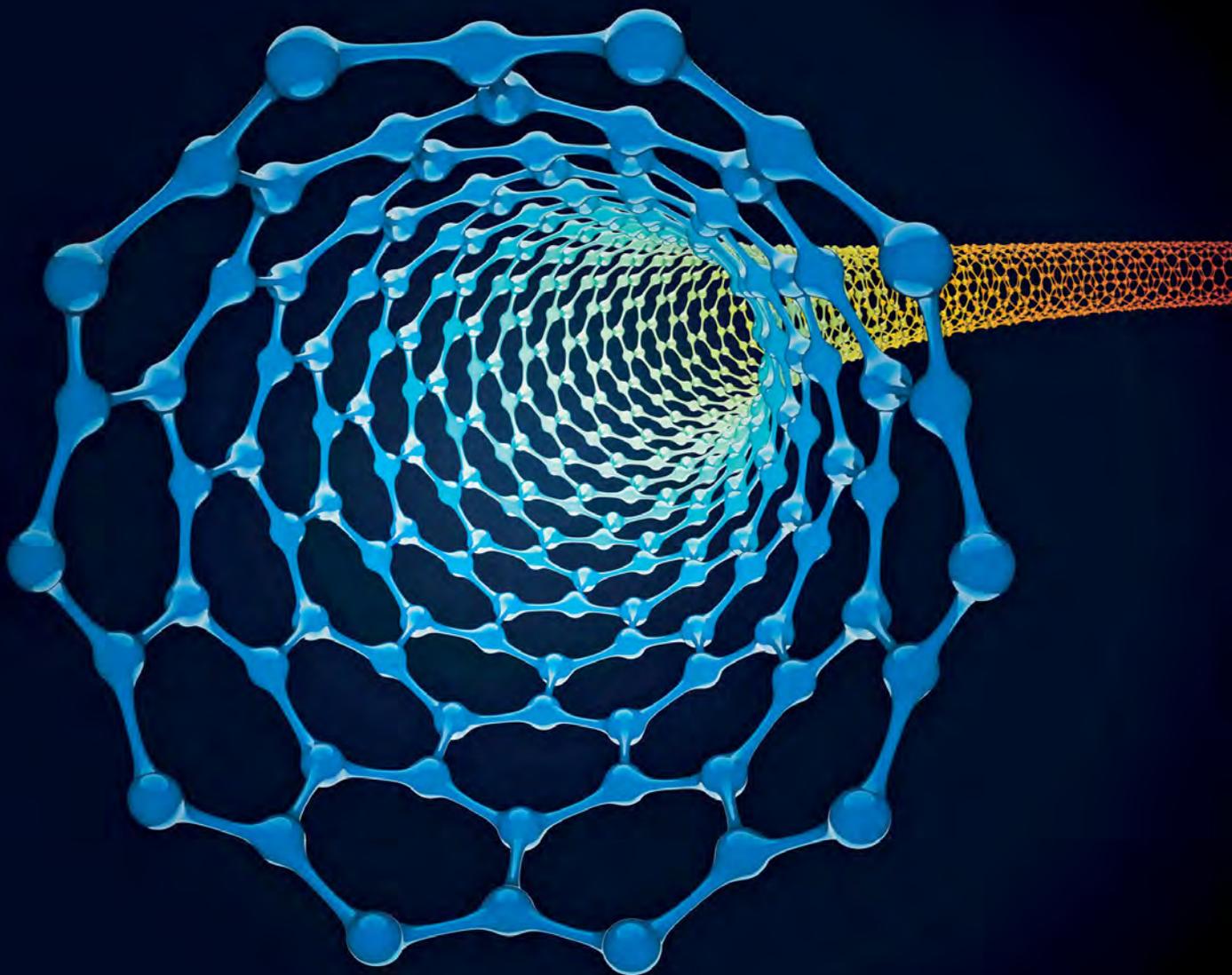
Der European XFEL ermöglicht Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern neue Einblicke in Plasmen und andere extreme Materiezustände, wie sie im Inneren von Sternen und Planeten existieren.

Nanotechnologie

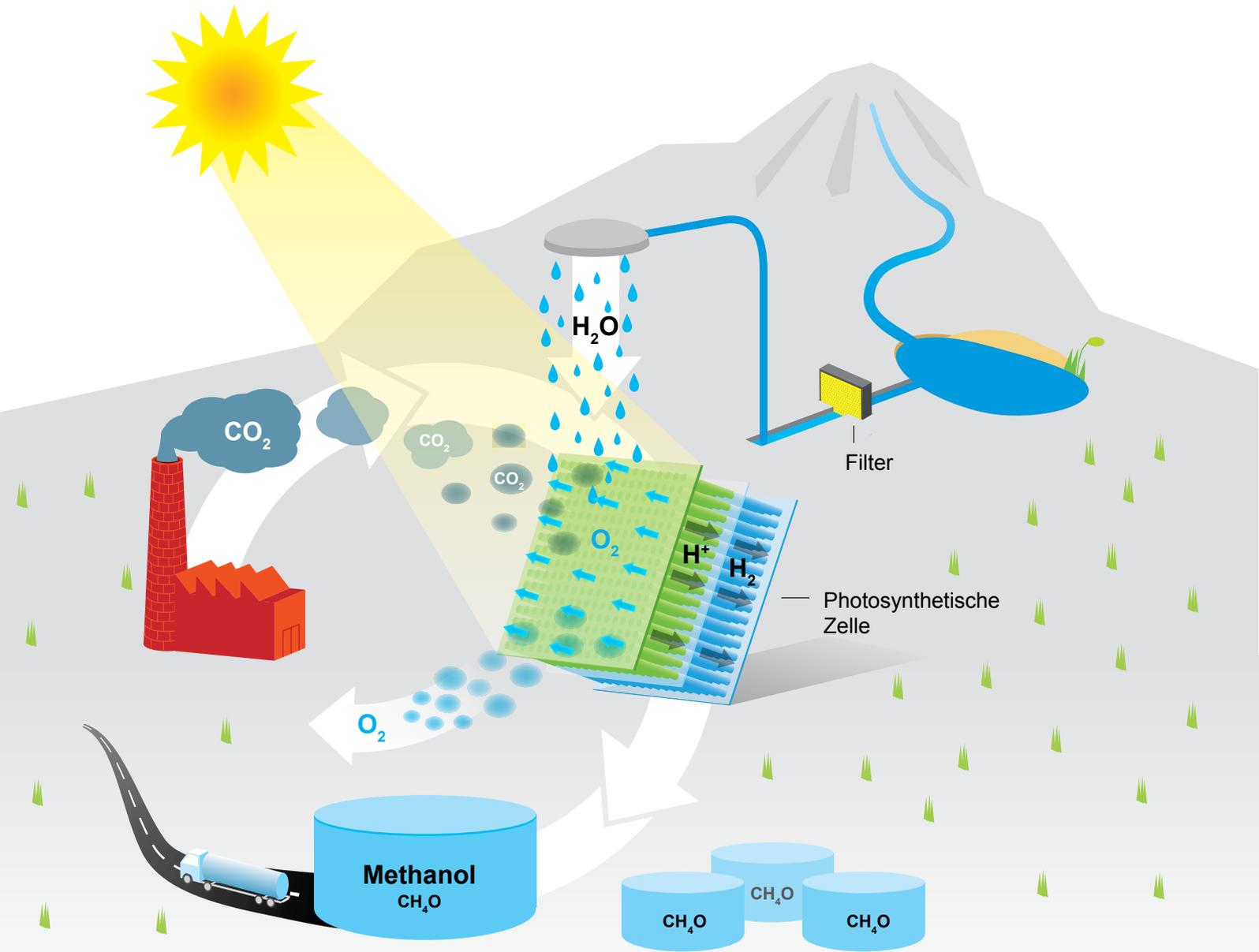
Die Strukturen, die wir technisch herstellen können, werden immer kleiner. Nanomaterialien halten Einzug in unseren Alltag. Solche Materialien bestehen aus Strukturen, die etwa zwischen einem und 100 Nanometer (milliardstel Meter) groß sind. Auf dieser Ebene zeigen Materialien überraschende neue Eigenschaften, die oft von der Größe der Partikel abhängen. Die kurzwelligen, kohärenten und ultrakurzen Lichtblitze des European XFEL sind ideal geeignet, die **räumliche Struktur und zeitliche Veränderungen von Nanomaterialien zu untersuchen**. Die so gewonnenen Erkenntnisse könnten zu neuen maßgeschneiderten Nanomaterialien führen und so die Grundlage für die Technologien von morgen legen.

Photonik

Lasertechnologie wird in vielen Produkten eingesetzt, die wir täglich nutzen. Sichtbares Licht zum Beispiel spielt in der Kommunikationstechnik eine wichtige Rolle. Die Forschung am European XFEL eröffnet die Möglichkeit, **das Anwendungsgebiet der Photonik vom sichtbaren Licht auf den Röntgenbereich auszudehnen**. Am Ende dieser Entwicklung könnten neue organische lichtempfindliche Materialien für Transistoren, Computer, Laser und andere Lichtquellen stehen. Darüber hinaus wird der European XFEL die Erforschung nicht-linearer Effekte bei sehr kurzen Wellenlängen ermöglichen. Nicht-lineare optische Materialien werden im Bereich des sichtbaren Lichts zum Bau von optischen Schaltern oder zur Frequenzverdopplung von optischen Lasern verwendet (beispielsweise für die Umwandlung von infrarot in grün oder violett).



Am European XFEL können Nanopartikel und andere neue Materialien wie diese Kohlenstoff-Nanoröhrchen atomgenau im Detail studiert werden.



Künstliche Photosynthese: Könnten wir die in Blättern ablaufenden Prozesse imitieren und optimieren, so ließen sich aus Sonnenlicht, Kohlendioxid und Wasser günstig und umweltfreundlich Biokraftstoffe produzieren. Am European XFEL lassen sich zu unterschiedlichen Reaktionszeiten extrem detailgenaue Bilder aufnehmen. Ein besseres Verständnis der verschiedenen Reaktionen, die in Pflanzen ablaufen, kann die Grundlage legen für eine effiziente und saubere Brennstoffproduktion.

Umweltforschung

Welche tieferen Ursachen haben Umweltveränderungen und wie können die damit zusammen-hängenden Probleme gelöst werden? Die Prozesse in unserer Umwelt auf atomarer Ebene besser zu verstehen ist der erste Schritt um Lösungen entwickeln, wie beispielsweise **künstliche Photosynthese**. Die Röntgenblitze des European XFEL können auch zur Entwicklung neuer Katalysatoren beitragen oder zur Suche nach Alternativen für seltene oder toxische Materialien in der industriellen Produktion. So können die Wissenschaftler beispielsweise Rußpartikel untersuchen, um Verbrennungsprozesse zu optimieren oder mit Hilfe anderer Nanopartikel den Einfluss der Rußpartikel auf die Umwelt zu minimieren.

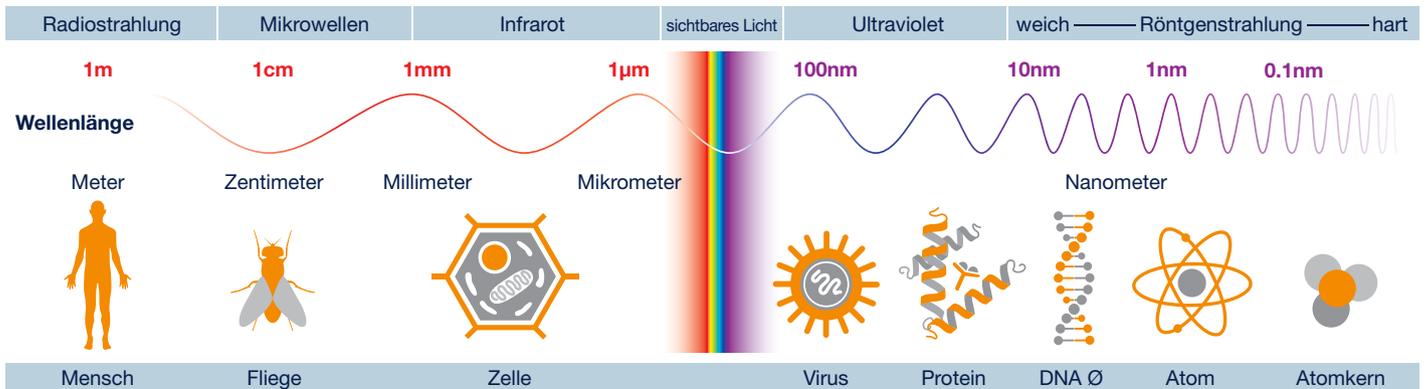
Energieforschung

Durch die wachsende Weltbevölkerung und den wirtschaftlichen Aufschwung der Schwellenländer steigt der Energiebedarf weltweit weiter an. Doch viele bekannte Energiequellen gehen zur Neige oder ihre Nutzung ist aus Sicht des Umweltschutzes problematisch. Auf der Suche nach Lösungen können Forscherinnen und Forscher am European XFEL Prozesse untersuchen, die in **Solarzellen oder Brennstoffzellen** ablaufen. Außerdem können sie Plasmen erzeugen und erforschen, die sich in Fusionsreaktoren einsetzen lassen.

Im Vergleich

Forschung mit Röntgenlichtquellen

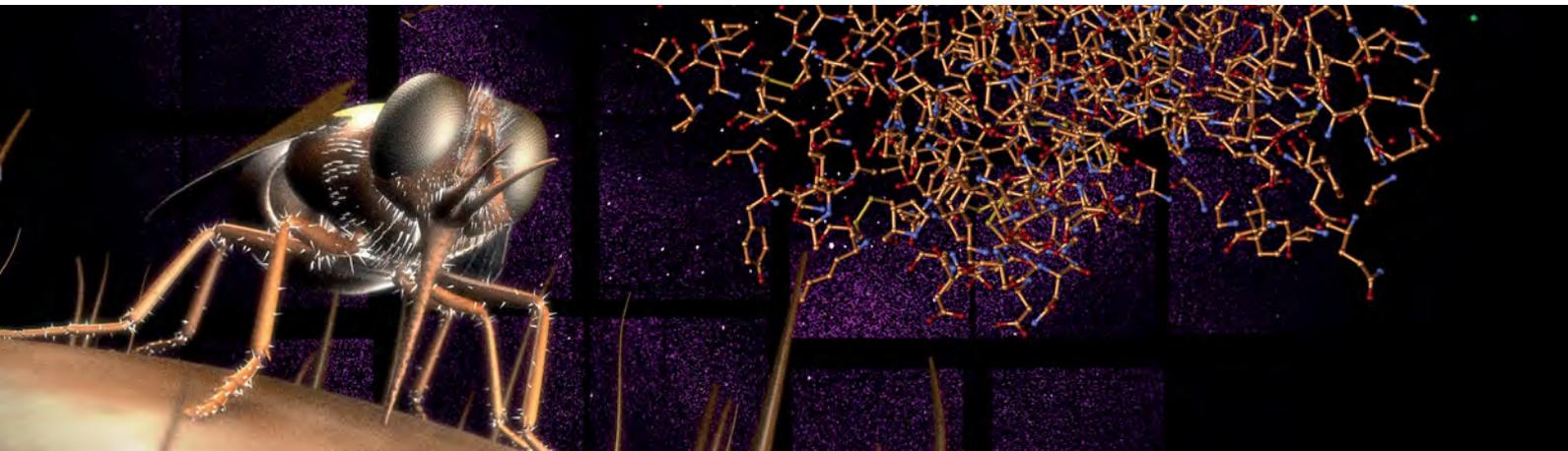
Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen wie Radiowellen, Mikrowellen oder sichtbares Licht, jedoch mit sehr viel kürzerer Wellenlänge. Mit optischen Mikroskopen lassen sich keine Objekte beobachten, die kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Röntgenlicht hat dagegen eine ausreichend kurze Wellenlänge, um einzelne Moleküle (mit längerwelliger „weicher“ Röntgenstrahlung) oder Atome (mit kurzwelliger „harter“ Röntgenstrahlung) zu beobachten.



Spektrum elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen und verschiedenen Objekten zum Größenvergleich. Je kürzer die Wellenlänge des Lichts, desto kleiner sind die Objekte, die damit beobachtet werden können.

In den 1950er Jahren spielte Röntgenstrahlung eine entscheidende Rolle bei der Entdeckung der Doppelhelix-Struktur der DNA, bei der die Stufen der Helix-„Leiter“ die Erbinformation tragen. Dieser wissenschaftliche Durchbruch demonstriert, wie eng Struktur und Funktion von Biomolekülen verknüpft sind – ein Zusammenhang, der beispielsweise auch in der Chemie oder den Materialwissenschaften eine wichtige Rolle spielt.

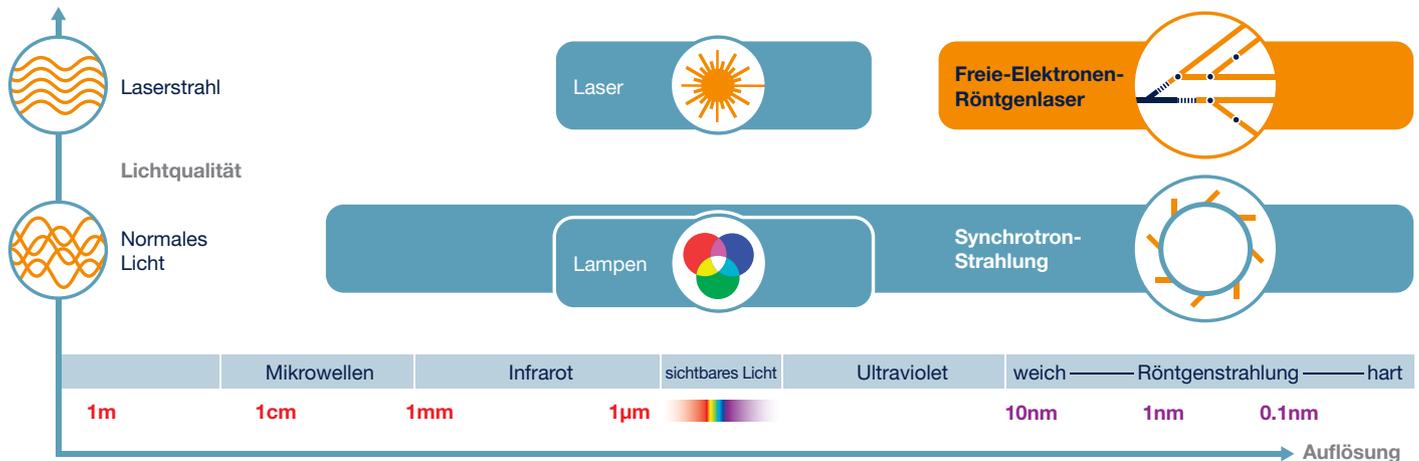
Um die Strukturen komplexer Moleküle zu untersuchen, benötigen die Forscher sehr leuchtstarke Röntgenlichtquellen. Teilchenbeschleuniger, insbesondere Elektronenbeschleuniger, bilden die Basis solcher Lichtquellen. Sie strahlen bis zu millionenfach heller als die in der Medizin verwendeten Röntgenröhren. Seit den 1960er Jahren haben Synchrotrone – ringförmige Teilchenbeschleuniger – die Forschung an Biomolekülen revolutioniert. 1980 war die Struktur von etwa 70 Biomolekülen bekannt. Im August 2017 waren es bereits mehr als 125 000 Biomoleküle – und bei über 99 000 von ihnen wurde die Struktur mit Hilfe von Synchrotronstrahlung aufgeklärt. Heute sind Synchrotrone das wichtigste Werkzeug zur Strukturaufklärung von Biomolekülen. Sechs Chemienobelpreise wurden für Arbeiten vergeben, bei denen Synchrotronstrahlungsquellen eine entscheidende Rolle spielten.



Eines der ersten Experimente zur Aufklärung einer unbekannt Biomolekül-Struktur an einem Röntgenlaser: Die Forscher entschlüsselten den Aufbau eines Eiweißes, das für den Erreger der Schlafkrankheit eine lebensnotwendige Rolle spielt und so Ansatzpunkte für eine Therapie liefert.

Mit dem Bau von Freie-Elektronen-Lasern (FEL), die auf linearen Elektronenbeschleunigern basieren, gelang in den letzten Jahren ein weiterer großer Schritt in Richtung noch stärkerer Röntgenquellen. Ihre Lichtblitze haben drei außergewöhnliche Eigenschaften:

- Die FEL-Pulse sind **extrem leuchtstark**, ihre Brillanz ist etwa 100 Millionen oder sogar milliardenfach stärker als die von Synchrotronstrahlung.
- Die FEL-Pulse sind **extrem kurz**, die kürzesten dauern nur einige Femtosekunden. Eine Femtosekunde ist eine milliardstel Sekunde – in dieser Zeit legt selbst das Licht nur eine Strecke von weniger als einem Hundertstel des Durchmessers eines Haars zurück.
- Die FEL-Pulse verfügen über eine Eigenschaft, die als **räumliche Kohärenz** bezeichnet wird. Dies bedeutet, dass die Lichtwellen des Lasers im Gleichtakt schwingen und sich gegenseitig verstärken. Die räumliche Kohärenz der FEL-Röntgenpulse ist bei vielen Experimenten ein großer Vorteil gegenüber herkömmlicher Röntgenstrahlung.



Lichtqualität und Wellenlängen verschiedener Lichtquellen im Vergleich. Laserstrahlen sind kohärent und haben eine höhere Lichtqualität als inkohärentes normales Licht, hier durch Lampen dargestellt. Röntgenlaser (orange) können kohärentes Licht im Röntgenbereich erzeugen. Synchrotrone liefern ein breites Spektrum von Licht unterschiedlicher Wellenlängen, jedoch nur inkohärent.

Freie-Elektronen-Laser weltweit

Neben dem European XFEL in Deutschland gibt es Freie-Elektronen-Laser im harten Röntgenbereich in den USA, in Japan, in Südkorea und in der Schweiz. Die Röntgenlaser Linac Coherent Light Source (LCLS) am SLAC National Accelerator Laboratory in Kalifornien und Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA) in Japan haben den Betrieb vor einigen Jahren aufgenommen, am European XFEL konnten 2017 die ersten externen Forscher Experimente machen. Das Funktionsprinzip der FEL-Forschungsanlagen ist sehr ähnlich. Zunächst werden Elektronen auf hohe Energien beschleunigt, anschließend wird damit Röntgenlaserlicht hoher Intensität erzeugt. Während LCLS, SACLA, SwissFEL und PAL-XFEL dazu konventionelle Beschleunigertechnologie einsetzen, wird der Beschleuniger des European XFEL bei -271 °C mit supraleitender Technologie betrieben. Für die geplante Weiterentwicklung von LCLS (LCLS-II) ist ebenfalls supraleitende Technologie vorgesehen.

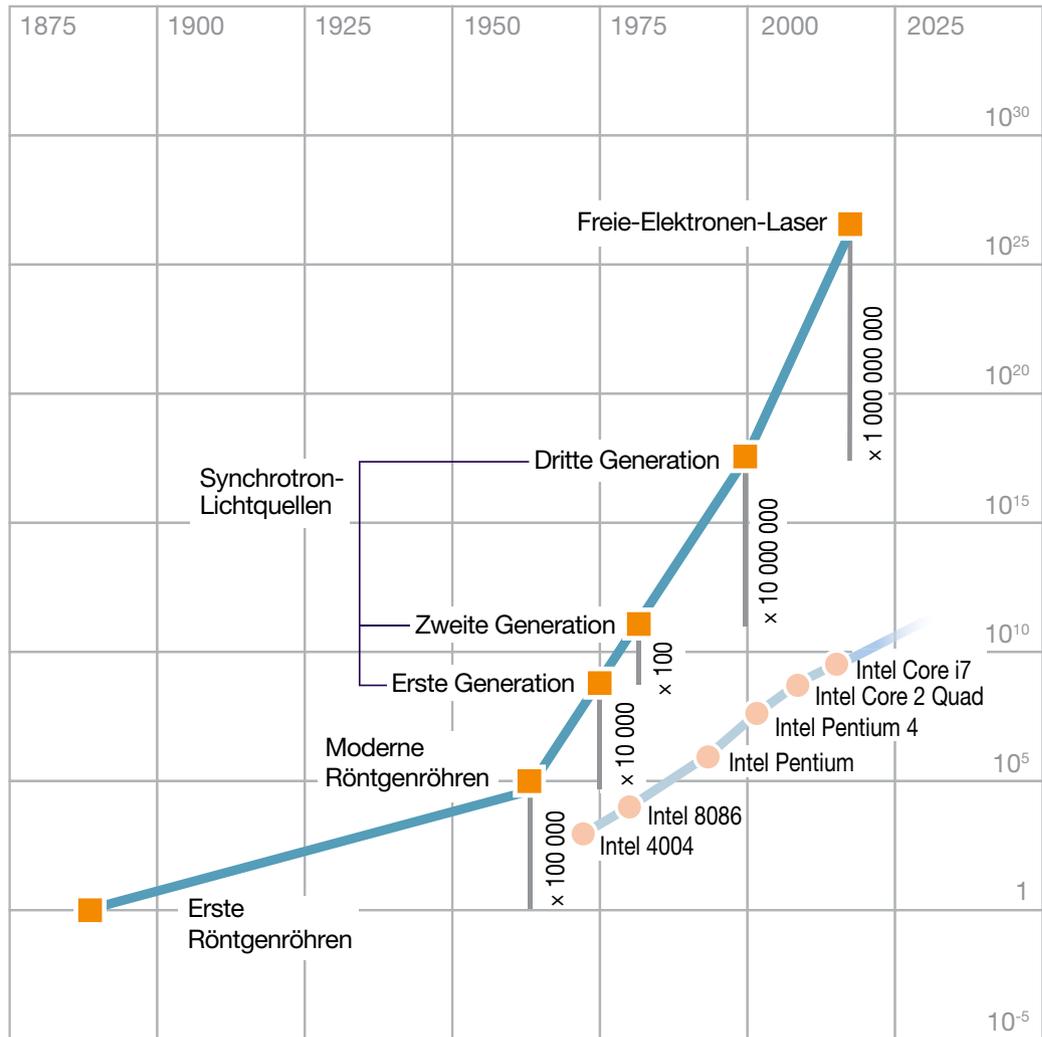


FEL-Röntgenlichtquellen weltweit. Am LCLS in den USA, bei SACLA in Japan, SwissFEL in der Schweiz, PAL-XFEL in Korea und am European XFEL in Deutschland können die Forscher mit harter Röntgenstrahlung forschen.

Die Supraleitung ermöglicht es, einen Elektronenstrahl von besonders hoher Qualität zu erzeugen, bei dem die Elektronenpakete in dichter Folge angeordnet sind. Die große Zahl der Elektronenpakete am European XFEL ermöglicht es, wesentlich mehr Röntgenblitzen pro Sekunde zu erzeugen als andere Einrichtungen. Einige Experimente sind ausschließlich am European XFEL möglich, andere können wesentlich schneller durchgeführt werden als an anderen Anlagen. Die hohe Zahl von Elektronenpaketen erlaubt es auch, jeweils drei der sechs Experimentierstationen der Startphase gleichzeitig zu betreiben.

Röntgen-laser	LCLS USA	LCLS-II CuRF	LCLS-II SCRF	SACLA Japan	European XFEL	SwissFEL Schweiz	PAL-XFEL Südkorea	SCLF VR China
Max. Elektronen-Energie (GeV)	14.3	15	5.0	8.5	17.5	5.8	10	8
Wellenlängen-Bereich (nm)	0.1–4.6	0.05–5.0	0.25–5.0	0.06–0.3	0.05–4.7	0.1–7	0.06–10	0.05–3.1
Photonen/Puls	$\sim 10^{12}$	2×10^{13}	3×10^{13} (weich)	2×10^{11}	$\sim 10^{12}$	$\sim 5 \times 10^{11}$	10^{11} – 10^{13}	10^{10} – 10^{13}
Spitzen-leuchtstärke	2.7×10^{34} (mit seeding)	2.7×10^{34} (mit seeding)	1×10^{32}	1×10^{33}	5×10^{33}	1×10^{33}	1.3×10^{33}	1×10^{33}
Pulse/Sekunde	120	120	1 000 000	60	27 000	100	60	1 000 000
Erster Röntgenstrahl	2009	2019	2020	2011	2017	2016	2016	2025
Inbetrieb-nahme	2009	2019	2020	2012	2017	2018	2017	2025

Eckdaten von Freie-Elektronen-Lasern im Vergleich. LCLS-II CuRF: nicht-supraleitender „warmer“ Linearbeschleuniger. LCLS-II SCRF: supraleitender „kalter“ Linearbeschleuniger.



— Relative Leuchtstärke (erste Röntgenröhre = 1)
 — Anzahl Transistoren je Prozessor

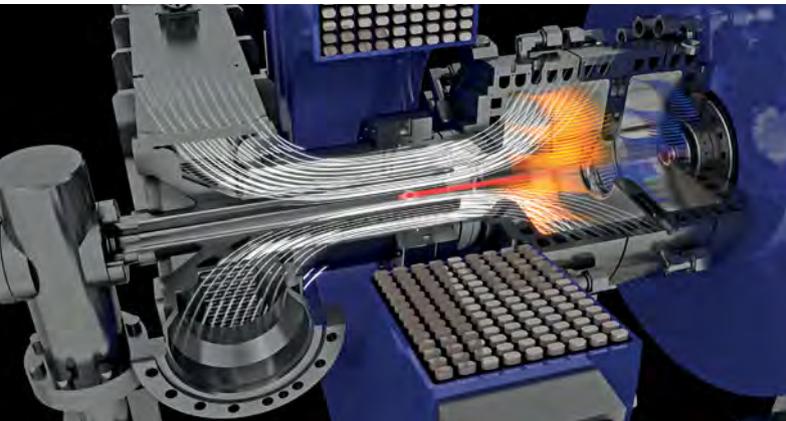
Entwicklung der Leuchtstärke von Röntgenstrahlungsquellen und der Rechenleistung von Prozessoren im Vergleich. Die Steigerung der Leuchtstärke ist höher als die Zunahme der Transistoren auf einem Computerchip, die sich nach dem sogenannten Mooreschen Gesetz bislang etwa alle 18 Monate verdoppelt. Die Leuchtstärke der Freie-Elektronen-Laser übertrifft die der meisten modernen Synchrotronstrahlungsquellen um mehrere Größenordnungen.

Funktionsweise

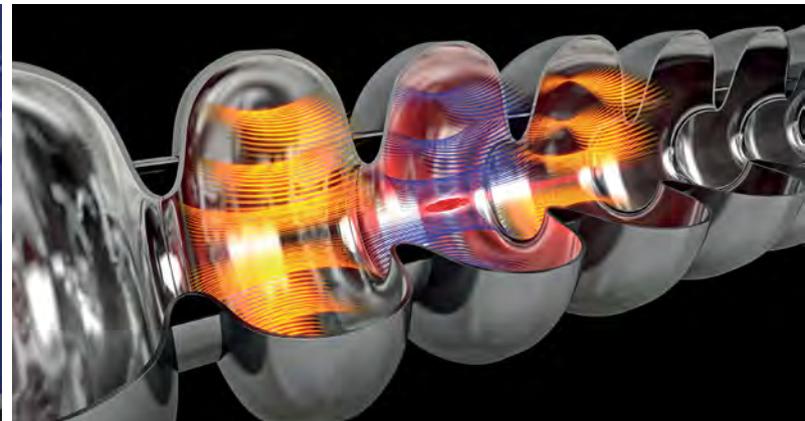
1. Der Beschleuniger: Elektronen auf hohe Energien bringen

Der erste Teil des European XFEL ist ein 1,7 Kilometer langer Teilchenbeschleuniger. Hier werden Elektronen in Paketen auf hohe Energien und nahezu Lichtgeschwindigkeit gebracht. Der lineare Aufbau des Beschleunigers ist Voraussetzung für die hohe Qualität des Elektronenstrahls und den hohen Spitzenstrom. Beide werden für den SASE-Prozess (beschrieben im nächsten Abschnitt) benötigt, bei dem das laserartige Röntgenlicht entsteht. Die Elektronen werden in speziellen Hohlkörpern beschleunigt, den sogenannten Resonatoren. In diesen Resonatoren übertragen schwingende Mikrowellen ihre Energie auf die Elektronen.

Die Resonatoren bestehen aus dem Metall Niob und sind bei sehr niedrigen Temperaturen supraleitend. **Bei einer Temperatur von -271 °C verlieren sie ihren elektrischen Widerstand.** Der Strom fließt dann praktisch verlustfrei durch eine dünne Schicht auf der Innenseite der Resonatoren und die gesamte elektrische Energie der Mikrowellen kann auf die Elektronen übertragen werden.



Der Injektor bildet den Anfang des Röntgenlasers. Er enthält die Elektronenquelle und die ersten Beschleunigermodule.



Elektromagnetische Felder beschleunigen die Elektronen in den supraleitenden Resonatoren.

Die Elektronenpakete werden im 45 Meter langen Injektor erzeugt, der am Anfang des supraleitenden Teilchenbeschleunigers steht. Pro Sekunde erzeugt und beschleunigt der Injektor bis zu 27 000 Elektronenpakete. Zuerst schlägt ein UV-Laserpuls dazu aus einer Cäsiumtellurid-Elektrode Milliarden von Elektronen heraus, die eine als Elektronenpaket bezeichnete Wolke bilden. Ein von einem sogenannten Klystron erzeugtes Hochfrequenzfeld katapultiert die Elektronen anschließend in einem kurzen normalleitenden Beschleuniger-Abschnitt von der Elektrode weg in den supraleitenden Teil des Injektors. Am Ende des Injektors werden die Pulse in den zwei Kilometer langen, supraleitenden Hauptbeschleuniger eingespeist, wo Hochfrequenzfelder die Elektronen auf die gewünschte Energie von bis zu 17,5 Gigaelektronenvolt (GeV) bringen.

Die Anforderungen an die Elektronenquelle sind dabei enorm. Schon kleinste Unregelmäßigkeiten in der ursprünglichen Struktur der Elektronenpakete würden sich im Verlauf der weiteren Beschleunigung verstärken und die Qualität des Elektronenstrahls so verschlechtern, dass er nicht mehr zur Röntgenlichterzeugung für Experimente genutzt werden könnte. Bei einem qualitativ hochwertigen Elektronenstrahl befinden sich alle Elektronen innerhalb eines definierten Volumens und haben fast die gleiche Energie. Nur ein sehr kleiner Teil bildet einen „Halo“ um den Kern des Elektronenpakets herum.



European XFEL-Tunnel mit Linearbeschleuniger



Beim Bau des 1,7-Kilometer langen supraleitenden Elektronenbeschleunigers wurden 96 gelbe Kryomodul an der Tunneldecke montiert. Jedes Modul ist 12 Meter lang.

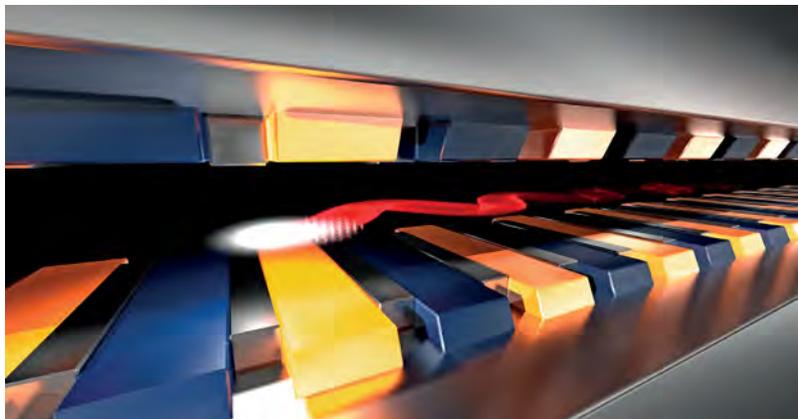
2. Undulatoren: Elektronen als Lichtquelle

Die beschleunigten Elektronen rasen durch sogenannte Undulatoren, spezielle Magnetanordnungen, die die Teilchen auf einen engen Slalomkurs bringen. Dabei senden sie Röntgenlicht aus, das sich immer weiter verstärkt.

Grund für die Verstärkung ist die Wechselwirkung des Röntgenlichts mit den Elektronen. Da sich Licht schneller ausbreitet als die auf der Slalombahn fliegenden Elektronen, überholt es die vorausfliegenden Teilchen und wirkt dabei auf sie ein. Einige Elektronen werden dadurch beschleunigt, andere abgebremst. Als Folge ordnen sich die Elektronen in zahlreichen dünnen Scheiben im Abstand der Wellenlänge des Röntgenlichts an. Alle Elektronen einer Scheibe und ebenso die meisten Elektronen der Nachbarscheiben



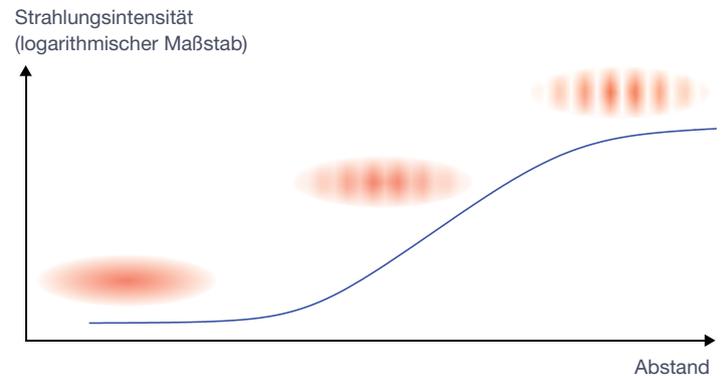
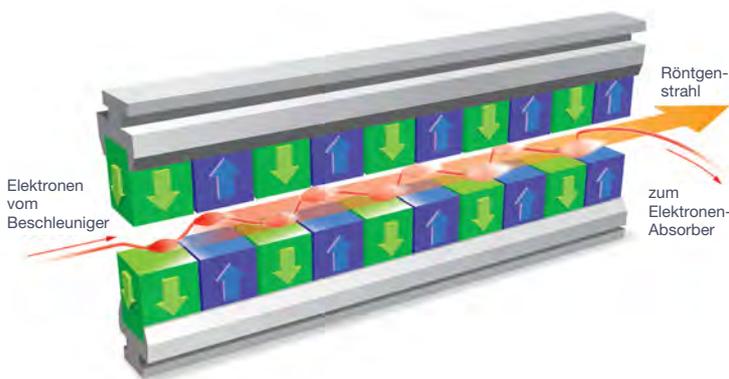
European XFEL-Tunnel mit Undulatoren



Um die extrem kurzen und intensiven Röntgenblitze zu erzeugen, werden die Elektronenpakete aus dem Beschleuniger durch spezielle Strukturen mit periodisch angeordneten Magneten gelenkt, die als Undulatoren bezeichnet werden (gelb-blaue Balken in der Illustration).

strahlen ihr Licht dann im Gleichtakt ab. Dies ist das entscheidende Merkmal des SASE-Prozesses (Self-Amplified Spontaneous Emission – sich selbst verstärkende spontane Emission). Die synchronisierten Elektronenscheiben senden extrem intensive Röntgenblitze mit Lasereigenschaften aus. Der supraleitende Beschleuniger des European XFEL kann zehn Pulsfolgen pro Sekunde liefern, wobei jede Pulsfolge aus 2700 Elektronenscheiben besteht. Das Ergebnis sind 27 000 Röntgenblitze pro Sekunde, ein einzigartiges Merkmal des European XFEL.

Weil sich die dünne Scheibenstruktur erst nach einer bestimmten Dauer der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Röntgenlicht ausbildet, benötigen Freie-Elektronen-Laser sehr lange Undulatoren. Beim European XFEL sind die Undulatoren bis zu 212 Meter lang und bestehen aus 35 fünf Meter langen Segmenten mit Magneten, unterbrochen durch 1,1 Meter lange Verbindungsstücke.



Links: Die Magnete (blau-grüne Struktur in der Abbildung) zwingen die Elektronen auf einen Slalomkurs, wo sie in den Kurven Röntgenstrahlung aussenden. Rechts: Exponentielles Wachstum der FEL-Pulsenergie und Microbunching: Weil die Strahlung schneller ist als die Elektronen auf ihrem Slalomkurs, holt sie die vorausfliegenden Elektronen ein und tritt mit ihnen in Wechselwirkung. Dabei werden einige Elektronen beschleunigt, andere abgebremst. Die Elektronen rücken dabei allmählich zu dünnen Scheibchen zusammen. Alle Elektronen in einer Scheibe senden ihr Licht synchron aus – dadurch entstehen die extrem kurzen und energiereichen Röntgenblitze.

Die Wellenlänge der erzeugten Strahlung hängt von der Energie der Elektronen und der Stärke des Magnetfelds in den Undulatoren ab. Die Feldstärke können die Wissenschaftler variieren, indem sie den Abstand zwischen den Magnetreihen verändern. Eine höhere Energie der Elektronen resultiert in kürzeren Wellenlängen, während eine größere Feldstärke den entgegengesetzten Effekt hat: einen weiteren Slalomkurs und damit langwelligere Röntgenstrahlung. Der Beschleuniger kann mehrere Undulatoren gleichzeitig bedienen, indem er Elektronenpakete in verschiedene Tunnel sendet. So lässt sich für die unterschiedlichen wissenschaftlichen Instrumente Strahlung mit unterschiedlichen Eigenschaften erzeugen.

Zunächst wird der European XFEL über drei Undulatoren und mindestens sechs wissenschaftliche Instrumente verfügen. Ein Verteilsystem ermöglicht es, nur die vom jeweiligen Experiment benötigten Pulse in der gewünschten Reihenfolge an die verschiedenen Instrumente zu schicken. Die Wissenschaftler können dabei sogar einzelne Lichtblitze für ihre Experimente auswählen.



Die Magnete der Undulatoren müssen mikrometergenau eingestellt werden. Nur dann bilden sie das äußerst präzise Magnetfeld, in dem die Röntgenblitze entstehen. Der Abstand zwischen der oberen und unteren Reihe kann variiert werden. Im Betrieb beträgt er zwischen 10 und 25 Millimeter, abhängig von der Elektronenenergie und der gewünschten Wellenlänge.

Self-seeding

Nachdem sie auf hohe Energien beschleunigt wurden, rasen die Elektronen durch die Undulatoren. Im SASE-Prozess lösen dabei zufällige spontane Emissionen den sich selbst verstärkenden Prozess aus, in dem das Röntgenlicht entsteht. Diese verstärken sich zu einem breiteren Spektrum von Wellenlängen, das für viele Anwendungen unerwünscht ist. Im Jahr 2010 haben Wissenschaftler von DESY und European XFEL in Hamburg ein Verfahren entwickelt, mit dem sich die bereits herausragenden Eigenschaften von Röntgenlasern noch weiter verbessern lassen. Dazu positionierten sie einen Diamantkristall in den Lichtstrahl zwischen die Undulatorsegmente nahe dem Startpunkt der Lichterzeugung. Dieser Kristall schränkt das Wellenlängenspektrum auf einen sehr kleinen Bereich ein, und nur dieser wird dann im nachfolgenden Undulator weiter verstärkt. Weil diese „Saat“ (engl: „seed“) nicht von einer externen Quelle, sondern vom Röntgenlaser selbst stammt, bezeichnen die Forscher das Verfahren als „self-seeding“. Mit den so entstehenden Lichtblitzen lassen sich außergewöhnlich scharfe Bilder aufnehmen. Das Verfahren wurde am Röntgenlaser Linac Coherent Light Source (LCLS) in Kalifornien erfolgreich getestet und soll bei den beiden Undulatorsystemen SASE 1 und SASE 2 (siehe S. 40) des European XFEL eingesetzt werden.

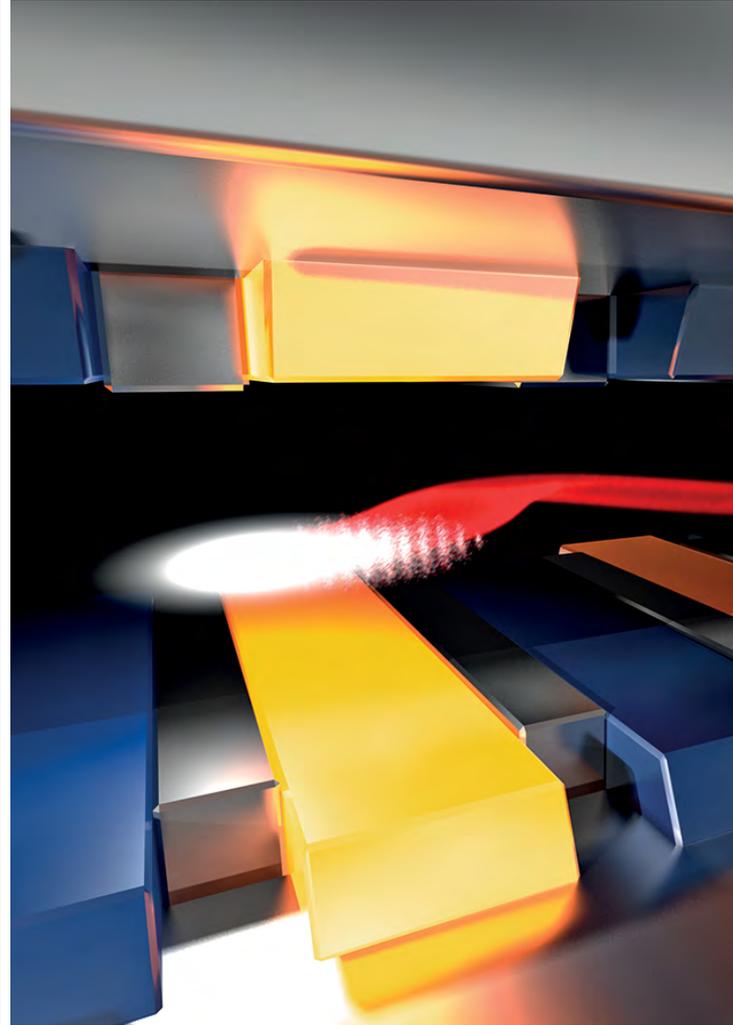
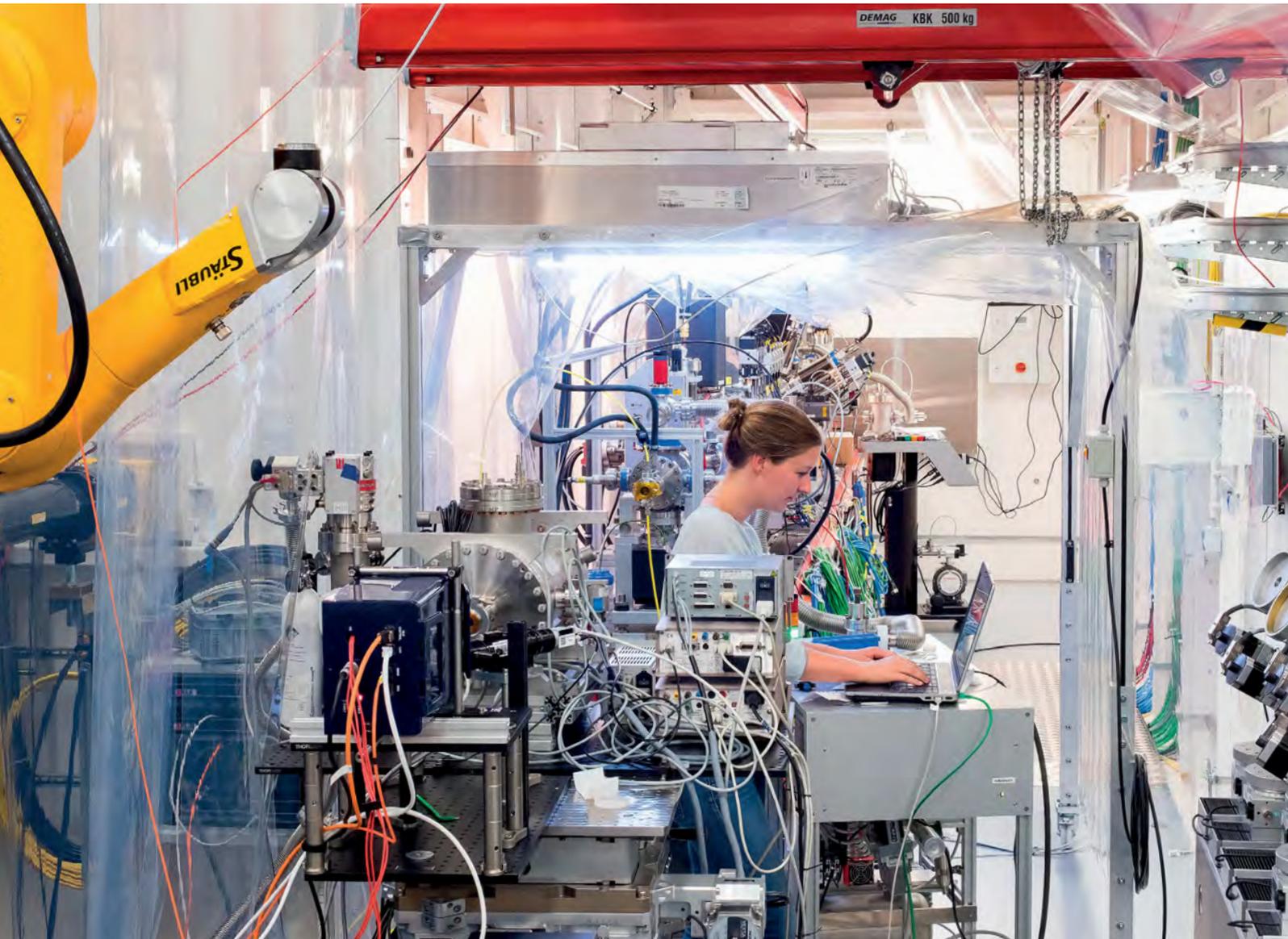


Illustration eines Undulators mit Magnetten (gelb und blau), Elektronenpaket und Röntgenlichtkegel



Die Experimentierstation FXE (Femtosecond X-Ray Experiments) ist eine von sechs Messplätzen, die neue Forschungsmöglichkeiten auf unterschiedlichen Gebieten ermöglichen.

3. Wissenschaftliche Experimentierstationen: Röntgenblitze für die Forschung

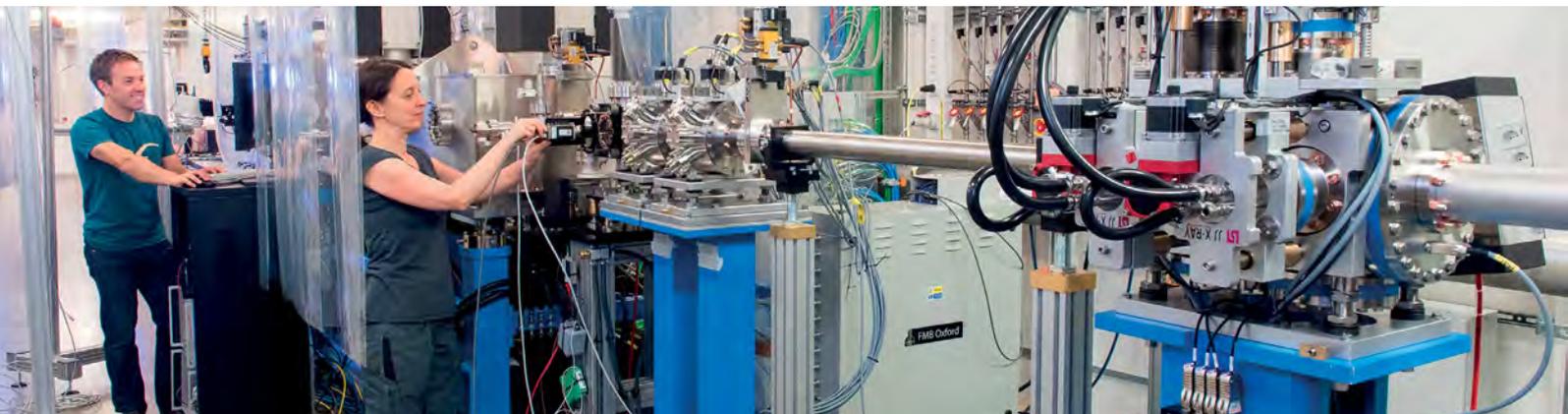
Die Röntgenblitze des European XFEL ermöglichen **ganz verschiedene Experimente** an unterschiedlichen Messplätzen. Je nach Bedarf können die Forscherinnen und Forscher die Blitze mit Hilfe von optischen Elementen wie Spiegeln, Gittern, Blenden oder Kristallen für ein bestimmtes Experiment aufweiten, bündeln, filtern oder abschwächen. An den Experimentierstationen werden die Proben dann mit den Röntgenblitzen untersucht. Das Grundprinzip eines typischen Experiments an einem Freie-Elektronen-Röntgenlaser (XFEL) ist einfach: Eine Probe wird mit den intensiven Röntgenblitzen beleuchtet, und geeignete Kameras oder Detektoren registrieren das von der Probe kommende Streubild, die Photonen (Lichtteilchen), als digitale Daten, ähnlich einer Fotokamera. Diese Daten werden dann weiter analysiert um die Struktur der Probe zu entschlüsseln.

Die Experimentierstationen am European XFEL sind jeweils für eine bestimmte Aufgabenstellung und einen bestimmten Typ von Experimenten optimiert. Jedes Experiment benötigt Röntgenlicht mit speziellen Eigenschaften, so dass die Instrumente dauerhaft den jeweiligen Undulatoren und Strahlführungen zugeordnet sind.

Die folgenden Experimentierstationen werden am European XFEL verfügbar sein:

SPB/SFX – Partikel, Cluster und Biomoleküle

Die Experimentierstation SPB/SFX (Single Particles, Clusters, and Biomolecules and Serial Femtosecond Crystallography) wird zur Erforschung kristalliner und nicht-kristalliner Proben genutzt. Ein Schwerpunkt liegt auf der Bestimmung der 3D-Struktur von biologischen Proben, bei der die räumliche, dreidimensionale Anordnung der Atome erkennbar wird. Untersucht werden beispielsweise Biomoleküle, makromolekulare Komplexe und Kristalle dieser Biomoleküle, sowie Viren, Zellorganellen und ganze Zellen. Nicht-biologische Proben können ebenfalls untersucht werden. Darüber hinaus lassen sich strukturelle Veränderungen wie Bewegungen von Molekülen, Molekülteilen, Atomgruppen oder einzelner Atome und Reaktionen von biologischen Systemen untersuchen. Dazu zählen sowohl Vorgänge, die als „langsam“ gelten, aber dennoch innerhalb weniger Millisekunden (tausendstel Sekunden) ablaufen, als auch sehr schnelle, die nur einige Femtosekunden (billiardstel Sekunden) benötigen. Ein detailliertes Verständnis solcher Prozesse in Organismen kann beispielsweise die Entwicklung von maßgeschneiderten Medikamenten oder die Lösung von Problemen im Zusammenhang mit der Entstehung von Antibiotika-Resistenzen unterstützen. Ein langfristiges Ziel ist die Erforschung von sehr kleinen Biomolekül-Proben bis hinunter zur Größe einzelner Moleküle, ohne die Notwendigkeit zuvor Kristalle zu züchten.

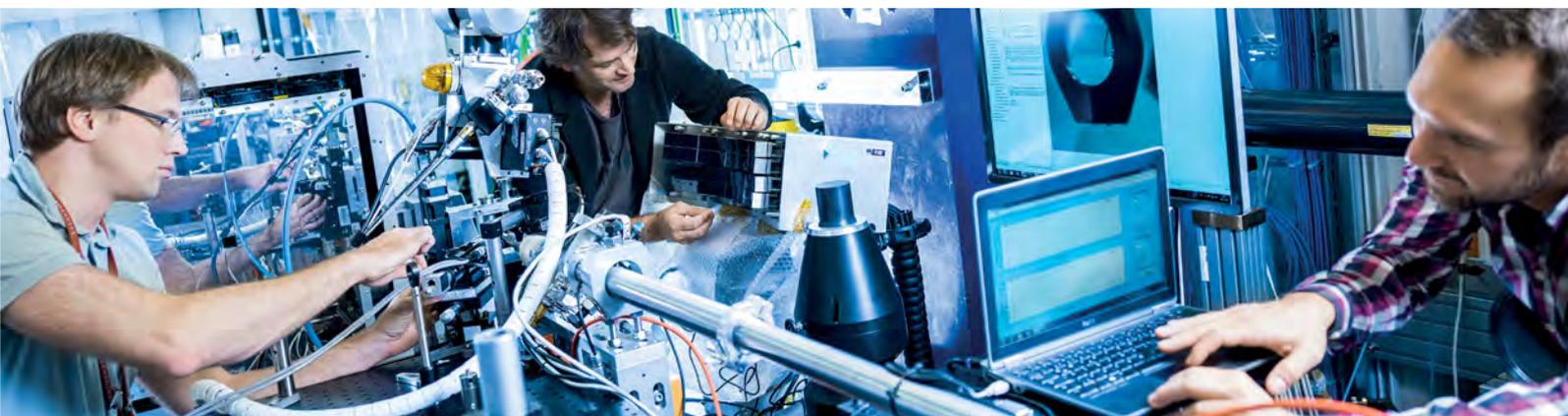


SPB/SFX ermöglicht die Bestimmung der dreidimensionalen Struktur von biologischen Objekten, Clustern von Atomen und Molekülen sowie von kleinsten Kristallen.

FXE – Schnelle Reaktionen und Molekülfilme

Die Experimentierstation FXE (Femtosecond X-Ray Experiments Instrument) ermöglicht die Erforschung extrem schneller Prozesse – bis hinab in den Bereich weniger Femtosekunden – durch sogenannte Pump-Probe-Experimente für ein breites Anwendungsgebiet. Bei einem typischen Pump-Probe-Experiment wird eine Probe zunächst mit einem optischen Laser angeregt und dann mit den Röntgenlichtblitzen des European XFEL untersucht. Dabei wird nicht nur die gestreute, sondern auch die von der Probe emittierte sekundäre Röntgenstrahlung ausgewertet, um Details von elektronischen Strukturänderungen aufzuschlüsseln. So lassen sich neue Erkenntnisse über atomare Strukturen und die Verteilung von Elektronen gewinnen, für die es Anwendungen auf vielen Forschungsgebieten gibt: schnellste chemische Prozesse und Reaktionen, Strom- und Energiegewinnung mit Sonnenlicht (Photovoltaik und künstliche Photosynthese), katalytische Prozesse und Materialwissenschaften. Zeitlupe-Molekülfilme von diesen Prozessen ermöglichen ein besseres Verständnis dieser ultraschnellen Abläufe und ihrer Zwischenschritte.

Sie können so zur Entwicklung neuartiger Werkstoffe beitragen, die solche Prozesse optimieren können.



FXE ist spezialisiert auf die Erforschung extrem schneller Prozesse, beispielsweise auf die Zwischenschritte bei chemischen Reaktionen.

HED – Hohe Energiedichte, starke Magnetfelder und astrophysikalische Objekte

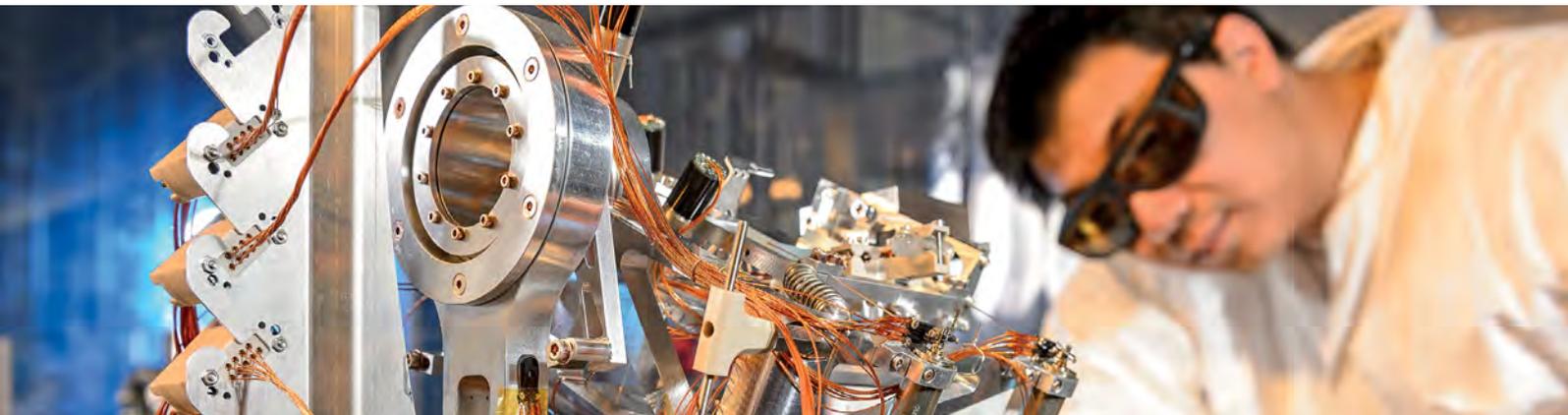
Die Experimentierstation HED (High Energy Density Science) dient der Erforschung von Materie unter extremen Druck- und Temperaturbedingungen oder sehr starken elektromagnetischen Feldern. Erzeugt werden diese Bedingungen von hochintensiven optischen Lasern, Diamant-Stempel-Zellen oder gepulsten Magneten. Zu den wissenschaftlichen Anwendungen gehört die Untersuchung von Zuständen, wie sie im Inneren astrophysikalischer Objekte wie Exoplaneten bestehen, von Phasenzuständen unter extremem Druck, von Plasmen mit hoher Dichte oder von Phasenübergängen komplexer Feststoffe unter dem Einfluss starker Magnetfelder. Mit den Ergebnissen lassen sich dann beispielsweise Planetenmodelle verbessern. Ferner ermöglicht es die Experimentierstation die Supraleitung weiter zu erforschen oder die Wechselwirkung von Lasern mit Materie in höchster Auflösung zu untersuchen.



In der HED-Probenkammer können extreme Zustände untersucht werden, wie sie im Inneren von Planeten herrschen.

MID – Struktur und Dynamik von Kristallen, Flüssigkeiten, Gläsern und Biomolekülen

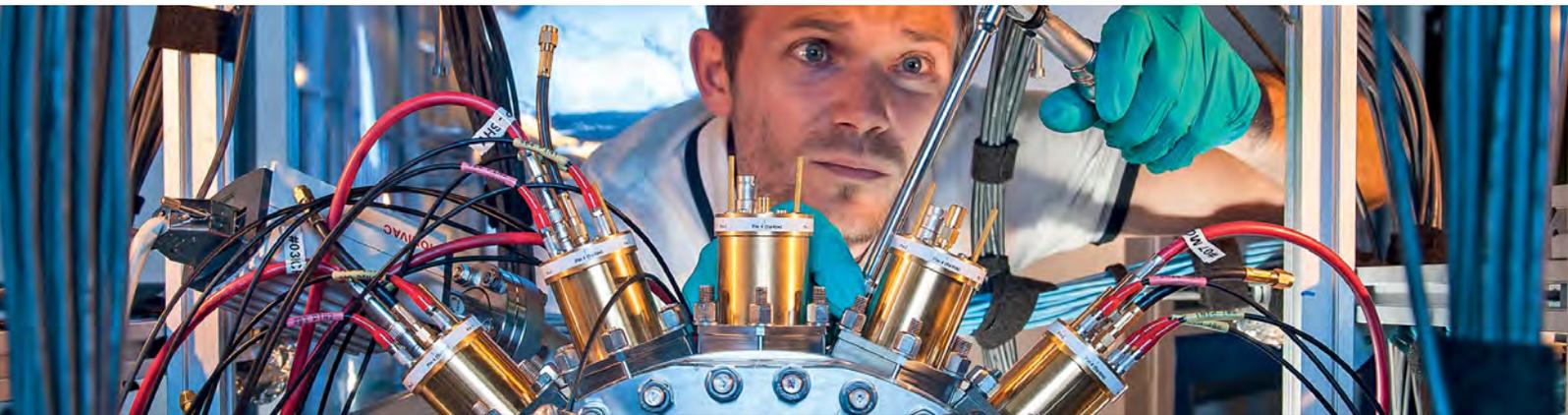
Die Experimentierstation MID (Materials Imaging and Dynamics Instrument) ermöglicht Strukturuntersuchungen an kristallinen, nanostrukturierten oder unregelmäßig geordneten Materialien wie Gläsern, Flüssigkeiten oder auch biologischen Substanzen. Dank spezieller, zeitaufgelöster Röntgenverfahren wird es auch möglich sein, extrem schnelle Vorgänge wie korrelierte Atombewegungen zu untersuchen, beispielsweise bei der Ausbreitung von Druck- beziehungsweise Schallwellen. Zu den Anwendungen gehört die Erforschung der Viskosität von Flüssigkeiten und Gläsern, die Untersuchung der Bewegung von Polymermolekülen in einer Polymer-Schmelze oder Lösung, oder von Veränderungen von Polymeren bei der Entstehung und beim Wachstum von Kristallen. Ferner lassen sich Phasenübergänge in technischen Materialien, die Faltung von Eiweißmolekülen oder die ultraschnelle Änderung der Magnetisierung eines Speichermaterials untersuchen. Mit Hilfe der so gewonnen Erkenntnisse lassen sich Materialien mit speziellen, maßgeschneiderten Eigenschaften und Anwendungen entwickeln, beispielsweise für die Energieumwandlung und -speicherung oder für die Datenspeicherung.



MID ermöglicht unter anderem Untersuchungen von Gläsern, Flüssigkeiten oder biologischen Substanzen.

SQS – Freie Atome und Moleküle

Die Experimentierstation SQS (Small Quantum Systems) wurde für die Untersuchung von freien Atomen und Molekülen sowie von Clustern und Nanopartikeln entwickelt, die aus bis zu einigen tausend Atomen bestehen. Die Experimente konzentrieren sich auf die Erforschung von „nicht linearen“ Prozessen, bei denen im Gegensatz zu „linearen Prozessen“ von den Atomen oder Molekülen gleichzeitig mehrere Photonen absorbiert werden. Darüber hinaus kann der durch die Absorption der Photonen ausgelöste Zerfall und dessen zeitliche Entwicklung untersucht werden. Die hohe Zahl von Pulsen pro Sekunde ermöglicht es, die Bildung von mehrfach geladenen Ionen oder den Bruch von chemischen Bindungen in Molekülen im Detail zu untersuchen. In kleinen, nur aus wenigen Atomen bestehenden Systemen können diese komplexen Prozesse mit hoher Präzision charakterisiert werden. Dadurch ergeben sich neue Erkenntnisse über die Wechselwirkung von Licht und Materie auf atomarer Ebene, die für die Grundlagenforschung und für wissenschaftliche Anwendungsgebiete wie Photochemie, Plasma- oder Astrophysik von Bedeutung sind. Die Experimentierstation SQS arbeitet wie SCS mit weicher Röntgenstrahlung, die eine etwas längere Wellenlänge hat als die harte Röntgenstrahlung an den anderen vier Experimentierstationen (siehe Tabelle auf S. 41).



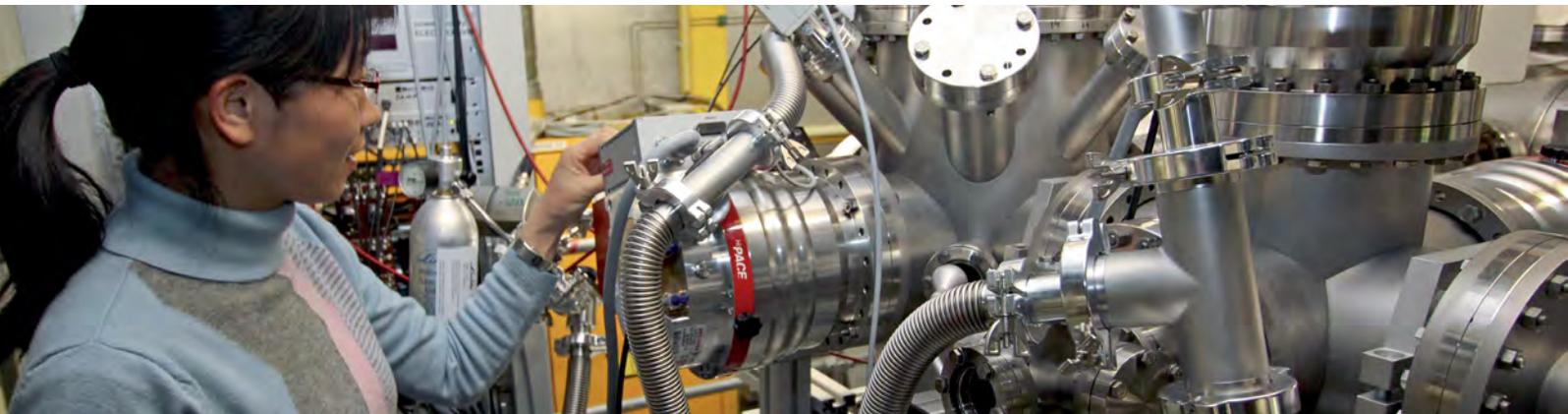
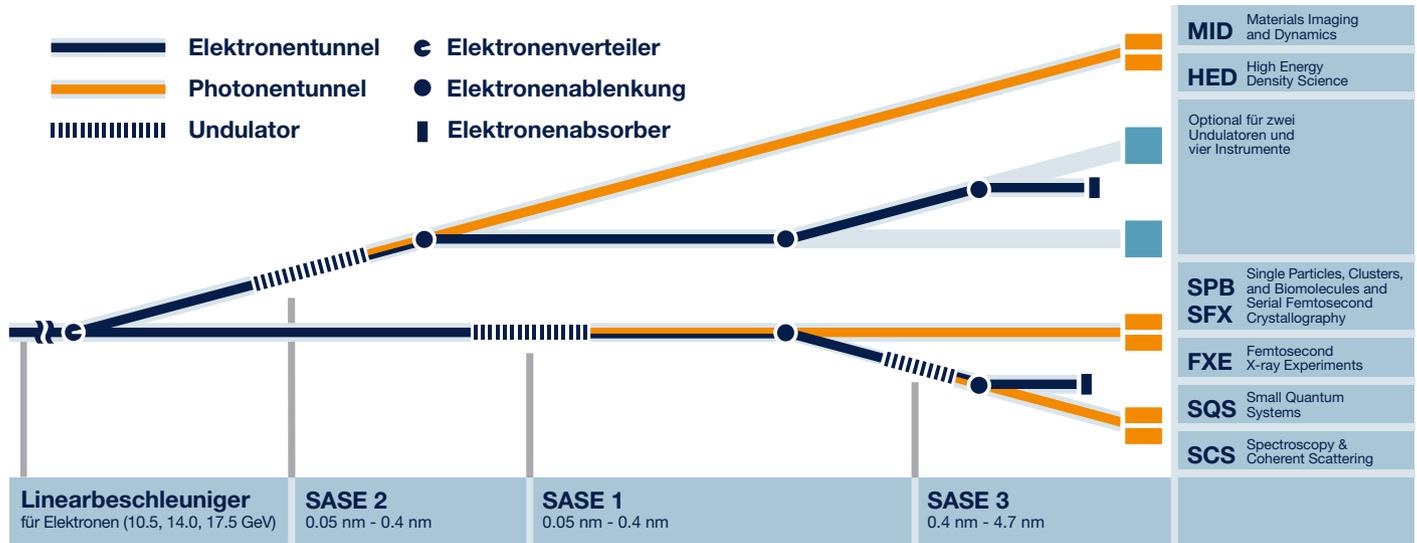
Die SQS-Experimentierstation ermöglicht es, das Zusammenspiel zwischen Licht und Materie unter starkem Lichteinfall zu erforschen.

SCS – Spektroskopie und komplexe Strukturen

Die SCS-Experimentierstation ermöglicht die Beobachtung von elektronischen und strukturellen Veränderungen von weicher Materie, wie beispielsweise Flüssigkeiten, Polymeren oder biologischen Materialien, von magnetischen Materialien oder von komplexen Festkörperproben. Zu letzteren zählen auch nanostrukturierte Übergangsmetalloxide mit interessanten funktionellen Eigenschaften wie zum Beispiel Hochtemperatur-Supraleitung. Wie die Experimentierstation SQS arbeitet auch SCS mit weicher Röntgenstrahlung, die eine räumliche Auflösung von bis zu zehn Nanometern ermöglicht. Anwendungsgebiete sind die Materialwissenschaften, die Untersuchung von Nano-Materialien und von dynamischen Prozessen. Die Experimentierstation kann dazu genutzt werden, neue Funktionsmaterialien zu erforschen und zu entwickeln, beispielsweise für die Informationstechnologie, für die Medizin, für die Energieforschung oder für die Katalyse. Von Interesse ist auch die ultra-schnelle Änderung von Materialeigenschaften wie Magnetisierung und Leitfähigkeit, die für die Datenspeicherung von Bedeutung sind. Die Kombination von Röntgenbeugung und spektroskopischen Methoden ermöglicht es sowohl atomare als auch elektronische Details zu erforschen. Für die kommenden Jahre sind Entwicklung und Bau weiterer Experimentierstationen geplant.

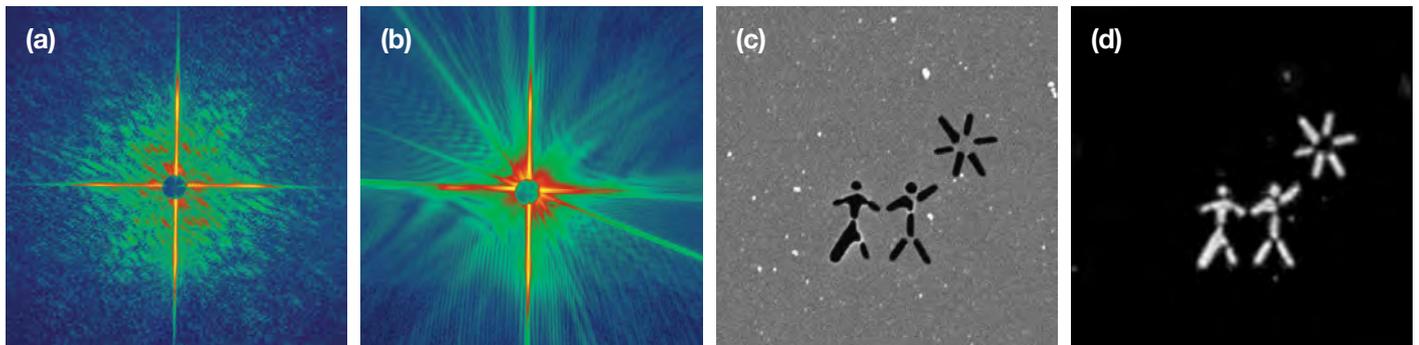


Beamlines – Strahlführungen des European XFEL



Der European XFEL wird Röntgenblitze mit unterschiedlichen Eigenschaften erzeugen.

Wissenschaftliches Instrument	Nanostrukturen	Ultraschnelle Prozesse	Extreme Zustände	Beamline
SPB / SFX Single Particles, Clusters, and Biomolecules: Strukturbestimmung einzelner Teilchen wie Atomcluster, Biomoleküle, Viruspartikel oder Zellen	■	■		SASE1
FXE Femtosecond X-Ray Experiments: Untersuchung zeitlicher Abläufe in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen		■		SASE1
MID Materials Imaging and Dynamics: Strukturbestimmung von Nanosystemen und Untersuchungen von Vorgängen auf der Nanoskala	■	■		SASE2
HED High Energy Density Science: Untersuchung von Materie in extremen Zuständen, beispielsweise von dichten Plasmen, mit harter Röntgenstrahlung		■	■	SASE2
SQS Small Quantum Systems: Untersuchung von Atomen, Ionen und Clustern in intensiven Feldern sowie von nicht-linearen Phänomenen		■	■	SASE3
SCS Spectroscopy and Coherent Scattering: Untersuchung von Struktur und Dynamik von Nanosystemen und biologischen Systemen mit weichem Röntgenlicht	■	■		SASE3



Abbildungen rechts: Datennahme mit ultrakurzen Lichtpulsen bei 32 nm, aufgenommen von Chapman et al. am Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY. (a) und (b): Hochaufgelöste, durch zwei aufeinander folgende, kurze und sehr intensive Laserpulse erzeugte Beugungsbilder. Wie das zweite Beugungsbild (b) zeigt, wurde die Probe durch den ersten Puls zerstört. Das Bild (c) zeigt die ursprüngliche Mikrostruktur der Probe. Aus dem Beugungsmuster des ersten Pulses (a) konnten die Forscher die ursprüngliche Mikrostruktur rekonstruieren (d).



Spezielle Laser starten die Reaktionen, die dann mit den Aufnahmen des Röntgenlasers untersucht werden.

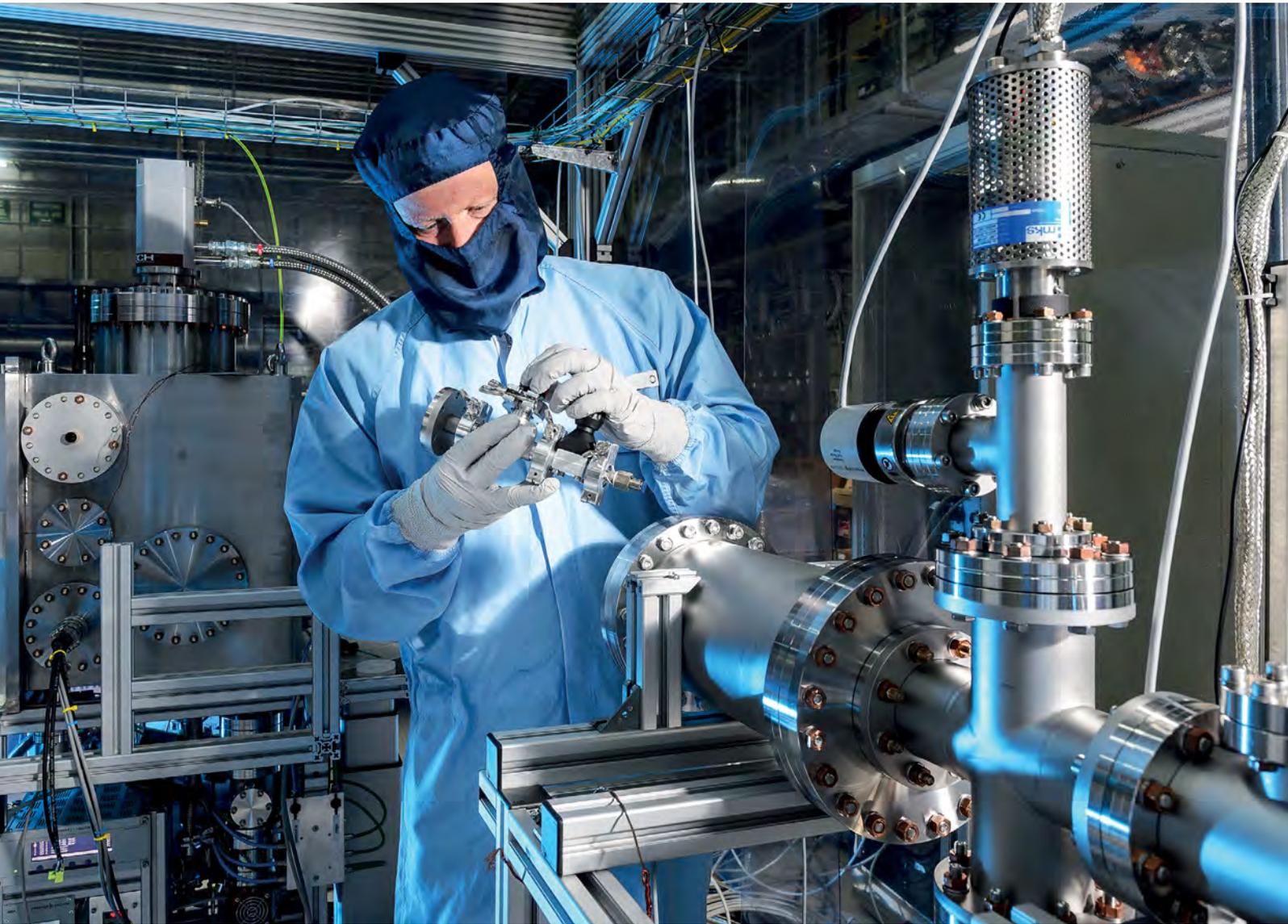
4. Optische Laser, Detektoren und Datenaufnahme

Der European XFEL zeichnet sich durch seine extrem hohe Pulsrate aus: Im Gegensatz zu anderen Röntgenlasern wird die Anlage bis zu 27 000 Blitze pro Sekunde erzeugen. Diese Blitze sind nicht gleichmäßig über eine Sekunde verteilt, sondern kommen in Paketen von 10 Pulsfolgen pro Sekunde (burst mode). Diese hohe Pulsrate lässt sich nur mit geeigneter Technik optimal nutzen, darunter **spezielle Laser, spezielle Detektoren** für zweidimensionale Bilder (2D-Detektoren), **Elektronik** für Datentransport und -reduzierung sowie umfassende **Speicherkapazität** und Software-Lösungen für die Datenanalyse. European XFEL hat ein umfangreiches Forschungs- und Entwicklungsprogramm ins Leben gerufen, um diese Instrumentierung zu entwickeln.

Optische Laser für die Experimente

Der European XFEL erzeugt Röntgenblitze, die so kurz sind, dass Wissenschaftler auch extrem schnelle Prozesse im Detail untersuchen können. Spezielle Laser erzeugen ebenso kurze Lichtpulse im sichtbaren und infraroten Spektralbereich, mit denen eine **Reaktion in der Probe gestartet wird, die anschließend mit einem Röntgenblitz des European XFEL untersucht werden kann** (Pump-Probe-Untersuchungen).

Laser für Forschungszwecke, die extrem kurze Lichtpulse erzeugen, können von kommerziellen Anbietern bezogen werden. Die hohe Rate von bis zu 2700 Lichtblitzen in einem Pulszug von 600 Mikrosekunden Dauer sowie die Anforderungen der Experimentierstationen bezüglich Pulsenergie und zeitlicher Synchronisation zwischen Röntgenblitzen und Laserpulsen gehen jedoch über die Möglichkeiten kommerziell verfügbarer Technologien weit hinaus. Laserwissenschaftler und Ingenieure bei European XFEL haben daher einen auf die Anforderungen der Experimente am European XFEL zugeschnittenen und auf parametrischer Verstärkung basierenden Pump-Probe-Laser entwickelt. Die hohe Wiederholrate der Femtosekunden-Röntgenblitze und der Laserpulse sowie deren Stärke ermöglichen Forschung mit der größtmöglichen Pulsrate.



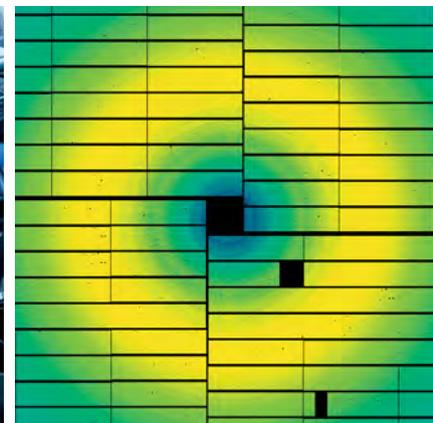
Ein umfangreiches Forschungs- und Entwicklungsprogramm führt zu ultraschnellen, empfindlichen Detektoren, die sowohl sehr viele als auch sehr wenige Photonen genau zählen können.

Detektorentwicklung

Bei einem typischen Experiment gewinnen die Wissenschaftler die Strukturinformation von Viren, Nanopartikeln und einzelnen Molekülen aus den Beugungsmustern des gestreuten Röntgenlichts. Die Beugungsmuster entstehen, weil sich die gestreuten Lichtwellen gegenseitig auslöschen oder verstärken – ähnlich wie bei den sich konzentrisch ausbreitenden Wellen die entstehen, wenn man zwei Steine nebeneinander ins Wasser wirft. Am European XFEL stehen hochempfindliche und sehr schnelle 2D-Detektoren für die Aufnahme der Beugungsbilder zur Verfügung.

Jede der zehn Pulsfolgen pro Sekunde wird aus bis zu 2700 Blitzen bestehen. Der Abstand zwischen den Blitzen innerhalb einer Pulsfolge beträgt nur 220 Nanosekunden (220 milliardstel Sekunden). Ziel der Detektorentwicklung ist es, von den 27 000 Blitzen pro Sekunde so viele Blitze wie technisch möglich zu registrieren – bei der ersten Detektorgeneration etwa 3000 bis 5000 pro Sekunde.

Einige Detektorflächen werden von Zehntausenden von Photonen getroffen, andere im besten Fall nur von einigen wenigen. Ein Detektor, der sowohl sehr viele als auch sehr wenige Photonen genau zählen kann, hat einen großen Dynamikbereich. **Der Dynamikbereich der Detektoren am European XFEL übertrifft den anderer Kameras und Detektoren um mehrere Größenordnungen.** Das Zeitintervall von 220 Nanosekunden zwischen zwei Blitzen ist wesentlich kürzer ist als die Zeit, die benötigt wird, um die Information vom Detektor an die Datennahmesysteme weiterzuleiten. Deshalb werden die innerhalb einer Pulsfolge erzeugten Bilder zunächst auf dem Sensorchip gespeichert, bevor sie zur weiteren Verarbeitung erst an ein lokales und später ein zentrales Datenzentrum weitergeleitet werden.

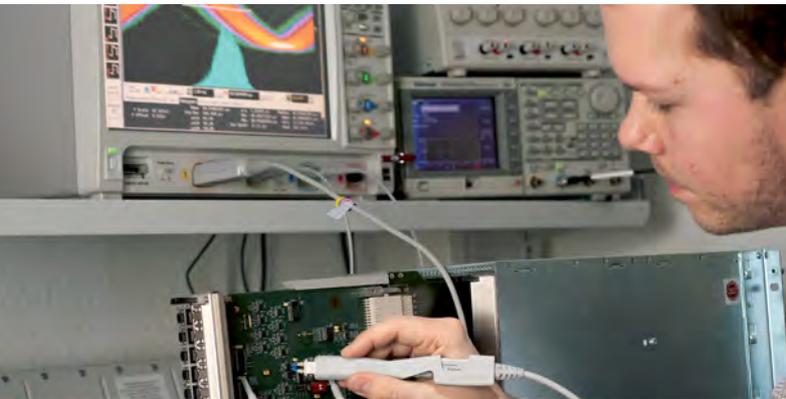


Detektoren am European XFEL wie der Large Pixel Detector (links), der gemeinsam mit dem Rutherford Laboratory in Großbritannien entwickelt wurde, liefern detaillierte und klare Streubilder wie das in der Abbildung rechts – und das schnell und zuverlässig auch bei den hohen Pulsfolgen des European XFEL.

Datennahme

Die Experimente am European XFEL erzeugen riesige Datenmengen, die gespeichert und für die Auswertung bereitgestellt werden müssen. Jeder der 2D-Pixeldetektoren kann pro Sekunde zwischen zehn und 40 Gigabyte an Daten erzeugen – genug Informationen, um bis zu sechs DVDs zu füllen. Nach derzeitiger Schätzung werden die ersten sechs wissenschaftlichen Experimentierstationen pro Jahr **zehn Millionen Gigabyte (GB), also zehn Petabyte (PB)** an Daten liefern. Mit weiter verbesserter Detektorauflösung könnten es künftig sogar mehr als 50 PB pro Jahr werden. Das entspräche zehn Millionen DVDs, die übereinanderstapelt einen Turm von zwölf Kilometern Höhe bilden würden. Am European XFEL kommen allerdings anstelle von DVDs modernere Speichertechnologien zum Einsatz (siehe Kasten auf Seite 39).

An vielen Röntgenstrahlungsquellen können Wissenschaftler ihre eigenen Speicherlaufwerke mitbringen, die Daten kopieren und zu Hause analysieren. Am European XFEL ist diese Lösung nicht mehr praktikabel. Die Daten werden in einem großen Speichersystem sicher abgelegt. Dabei setzt European XFEL auf ähnliche Lösungen wie Suchmaschinen im Internet. Auch die weitere Datenverarbeitung wird von European XFEL angeboten. Die am European XFEL entwickelte Software-Architektur Karabo unterstützt die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bei allen Schritten: von der Positionierung von Proben wie Nanokristallen über das Speichern, die gezielte Extraktion (data mining) und die Analyse von Daten bis hin zur Visualisierung der Ergebnisse.



Entwicklung und Test von hochpräzisen Elektronikbauteilen spielen bei der anspruchsvollen Technologie des European XFEL eine entscheidende Rolle.

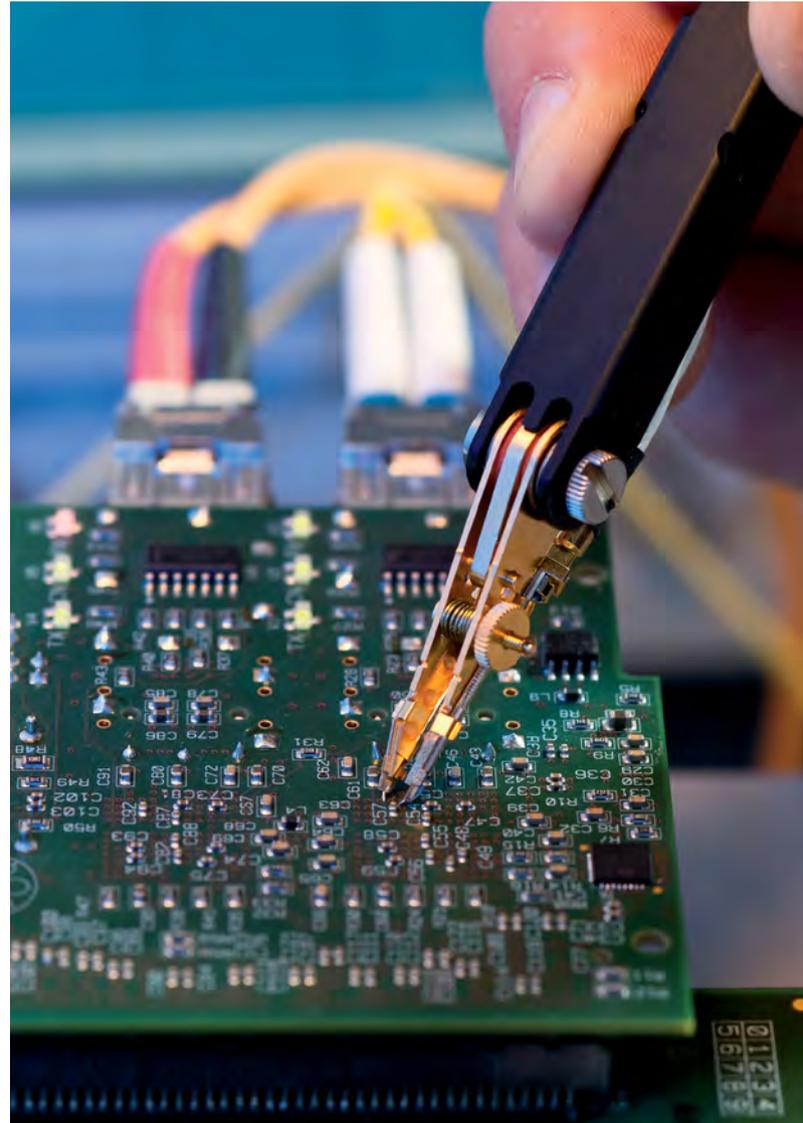


Die Computersysteme am European XFEL müssen einen enormen Datenfluss von den Experimentierstationen verarbeiten.

Technische Details

Wichtigste Eckpunkte des Datenverarbeitungssystems am European XFEL:

- Größe des Speichersystems anfänglich 10 PB (1 PB = 1 Million GB = 10^{15} bytes), später 50 PB.
- Einsatz von zeitgleicher, verlustfreier Datenkompression wo immer möglich. Für einzelne kleine Biomoleküle können die Daten auf bis zu 5% der ursprünglichen Größe reduziert werden. Bei Untersuchungen an Festkörpern, Gasen und Flüssigkeiten sind die möglichen Kompressionsraten geringer.
- Rohdaten und Analyseergebnisse werden für etwa ein Jahr auf Festplatten gespeichert. Danach werden alle Rohdaten zur Langzeitarchivierung auf Bänder verschoben.
- Zur Datenanalyse werden Rechencluster in der Nähe der Datenspeicher verwendet.



European XFEL GmbH

Mit Bau und Betrieb des European XFEL ist die European X-Ray Free-Electron Laser Facility GmbH (European XFEL GmbH) beauftragt. Die Gesellschaft dient **ausschließlich gemeinnützigen Zwecken** und arbeitet eng mit DESY und anderen Forschungseinrichtungen auf der ganzen Welt zusammen.

- Koordination und Überwachung der Bautätigkeiten
- wissenschaftliche Richtlinien und Strategie
- Aufbau der Undulatoren, Strahlführungen und Experimentierstationen sowie der zugehörigen Infrastruktur
- Betrieb der Forschungsanlage und die Einrichtung des Nutzerprogramms
- Weiterentwicklung der Anlage auf Grundlage eines intensiven Forschungs- und Entwicklungsprogramms
- Verwaltung, Überwachung und Kontrolle aller finanziellen und anderen Ressourcen, die die Gesellschafter beisteuern oder die im Rahmen von Kollaborationen zur Verfügung gestellt werden
- Wissens- und Technologietransfer an interessierte Stellen in den Partnerländern sowie Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Die Baukosten für das Projekt liegen bei über 1,22 Milliarden Euro (Preisniveau des Jahres 2005), die zu einem großen Teil in Form von Sachleistungen der Gesellschafter und Partner eingebracht wurden.

Gesellschafter

Die Gesellschafter werden von den Regierungen der internationalen Partnerländer benannt, die sich in einem völkerrechtlichen Abkommen verpflichtet haben, den European XFEL gemeinsam zu bauen und zu betreiben.



Am 30. November 2009 unterzeichneten Minister, Staatssekretäre und andere Regierungsvertreter von zehn Partnerländern im Hamburger Rathaus das internationale European XFEL-Abkommen.

Partnerländer und Gesellschafter (Stand: März 2018)



Dänemark

DASTI (Danish Agency for Science, Technology and Innovation)



Deutschland

DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron)



Frankreich

CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives),
CNRS (Centre national de la recherche scientifique)



Italien

INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) *
CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) *



Polen

NCBJ (Narodowe Centrum Badań Jądrowych,
National Centre for Nuclear Research)



Russland

NRC Kurchatov Institut (National Research Centre Kurchatov Institute)



Schweden

VR (Vetenskapsrådet, Swedish Research Council)



Schweiz

Schweizerische Eidgenossenschaft



Slowakei

Slowakische Republik



Spanien

Königreich Spanien *



Ungarn

Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal,
National Research, Development and Innovation Office



Vereinigtes Königreich

UKRI (UK Research and Innovation)

* wahrscheinliche künftige Gesellschafter



Arbeiten an Bauteilen für den supraleitenden Teilchenbeschleuniger in einem Reinraum bei DESY

Internationale Zusammenarbeit

Sachbeiträge

Die Gesellschafter und Partnerländer haben zum Bau der Einrichtung durch finanzielle Zuwendungen oder auch durch Sachleistungen beitragen. Zu Sachleistungen zählen Komponenten, Personal oder beides. Der Wert der Sachleistungen liegt bei rund 50 Prozent des Gesamtbudgets.



Die großen Elektromagneten für den Elektronenbeschleuniger sind ein Russische Sachbetrag, einige Magneten wurden im Rahmen eines schwedischen Sachbetrags getestet.



17 Institute in acht Ländern trugen mit Komponenten und anderen Sachleistungen, darunter die Qualitätskontrolle als polnische Sachleistung - zum Bau des Linearbeschleuniger bei.

Internationale Zusammenarbeit und Kooperationen

Als neue Forschungseinrichtung profitiert European XFEL von der Zusammenarbeit mit auf verwandten Gebieten tätigen Forschungszentren, Instituten und Hochschulen. Seit der Gründung im Oktober 2009 hat European XFEL zahlreiche Kooperationsvereinbarungen geschlossen. Eine Liste ist auf unserer Webseite unter www.xfel.eu/organisation/kooperationen hinterlegt.

Land	Akronym	Name	Stadt
Dänemark	DTU	Technical University of Denmark – Physics Department	Risø
Deutschland	DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron	Hamburg
Frankreich	CEA CNRS	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives – IRFU Centre national de la recherche scientifique – IN3P2	Saclay Orsay
Italien	INFN	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare	Mailand
Polen	NCBJ IFJ-PAN WUT	National Center for Nuclear Research Henryk Niewodniczański Institute for Nuclear Physics Wrocław University of Technology	Swierk Krakau Wrocław
Russland	BINP IHEP INR JINR NIIIEFA	Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS Institute for High Energy Physics Institute for Nuclear Research RAS Joint Institute for Nuclear Research D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus	Nowosibirsk Protvino Troitsk Dubna St. Petersburg
Schweden	KTH MSL SU GU	Royal Institute of Technology Manne Siegbahn Laboratory Stockholm University Gothenburg University	Stockholm Stockholm Stockholm Göteborg
Schweiz	PSI	Paul Scherrer Institut	Villigen
Spanien	CELLS CIEMAT UPM	Consortium for the Exploitation of the Synchrotron Light Laboratory Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas Universidad Politécnica de Madrid	Barcelona Madrid Madrid

Forschungseinrichtung und Campus

Anlage und Forschungscampus Schenefeld

Der European XFEL verbindet Hamburg und Schleswig-Holstein. Der größte Teil der Anlage befindet sich in unterirdischen Tunneln. Hier werden Elektronen beschleunigt und Röntgenblitze erzeugt, die anschließend zu den wissenschaftlichen Instrumenten in der Experimentierhalle weitergeleitet werden. Die Einrichtung erstreckt sich über 3,4 Kilometer und umfasst drei Betriebsgelände. Die Betriebsstätte DESY-Bahrenfeld steht am Anfang der Anlage, wo in 38 Metern Tiefe der Haupttunnel für den Elektronenbeschleuniger beginnt. Unter der Betriebsstätte Osdorfer Born werden die Elektronen auf zwei Tunnel verteilt, in denen sie das Röntgenlicht erzeugen (siehe „Beamlines – Strahlführungen des European XFEL“ auf Seite 40). Auf dem Forschungscampus in Schenefeld ist das Forschungs- und Innovationszentrum angesiedelt, an dem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der ganzen Welt forschen – unterstützt von mehr als 300 European XFEL-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeitern. Auf dem Forschungscampus sind auch eine Kantine und ein Gästehaus vorgesehen, die Ende 2018 und Mitte 2019 fertiggestellt werden sollen.



Tunnel mit Röntgenstrahlführung unter dem Forschungscampus Schenefeld

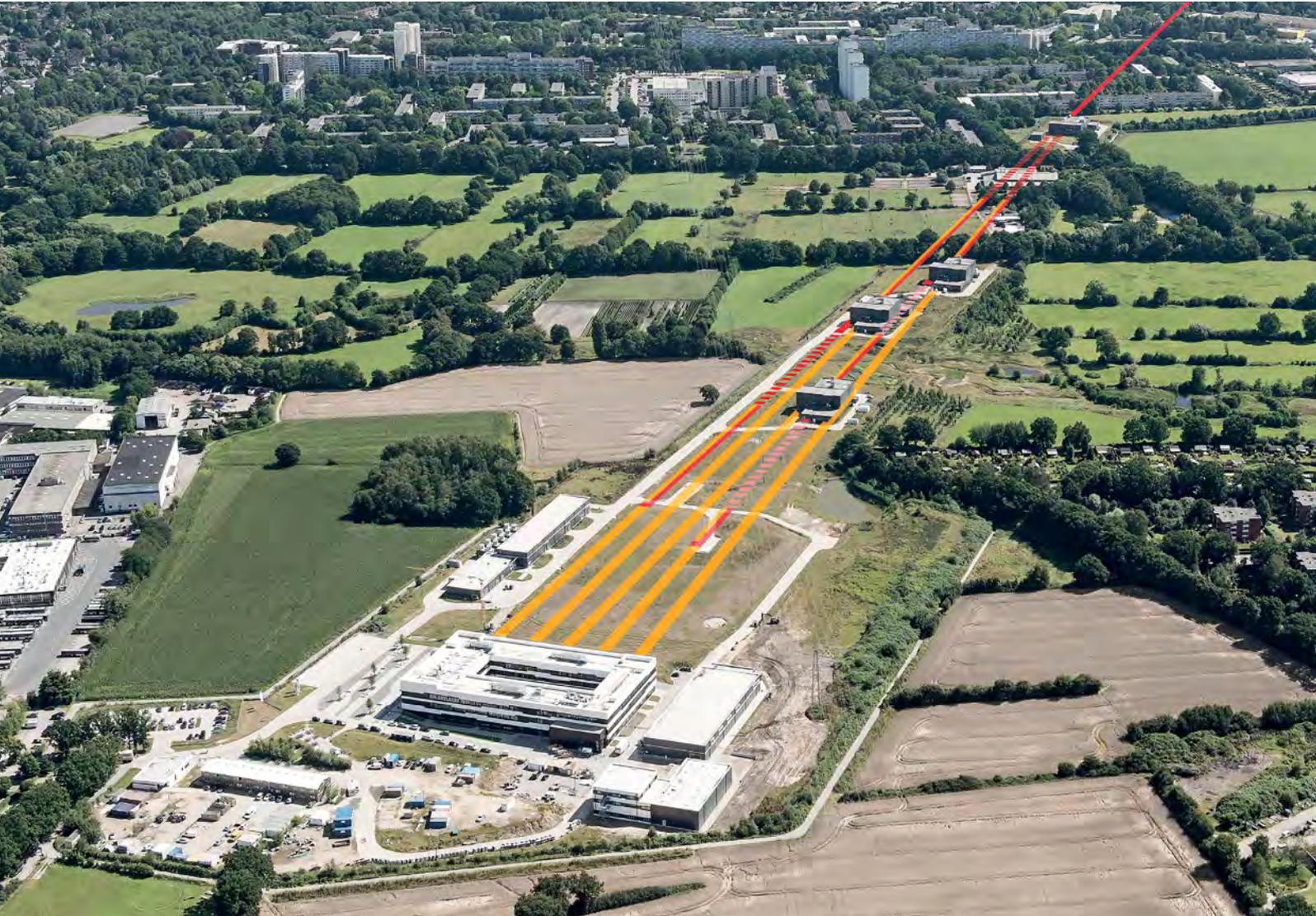


Künftiges Kantinegebäude auf dem Forschungscampus Schenefeld



European XFEL-Hauptgebäude mit Büros und Labors

Anlage und Forschungscampus im Überblick



Darstellung der Tunnel und Beamlines von European XFEL mit dem Forschungscampus Schenefeld im Vordergrund.

Standort Bahrenfeld



Luftbild der Betriebsstätte DESY-Bahrenfeld mit Injektorkomplex, Modulatorhalle und Kältehalle vom August 2017.

a) Kältehalle, b) Eingangshalle Injektor, c) Modulatorhalle, d) Eingangshalle Beschleunigtunnel

Standort Osdorfer Born



Das Betriebsgelände Osdorfer Born im August 2017. Unter dem Hallengebäude liegt das Schachtbauwerk XS1, das auf seinem Grund den Beschleunigtunnel mit den beiden ersten Undulatortunneln verbindet. Weitere Gebäude dienen der Versorgung mit Energie und Wasser sowie der Klimatisierung.

Standort Schenefeld



Links: Schematische Darstellung des Zentralgebäudes auf dem European XFEL-Forschungscampus. Die Röntgenblitze gelangen über die Tunnel in die Experimentierhalle unter dem Hauptgebäude, in dem die Labors, Seminarräume und Büros untergebracht sind. Rechts: Luftbild des Zentralgebäudes (a), vom August 2017. Dahinter Werkstatt und Lager (b) sowie die Lüftungszentrale (c).



Eine der Kompensationsmaßnahmen war die großflächige Renaturierung des Bachlaufs der Düpenau in Schenefeld.

Sicherheit und Umweltschutz

Sicherheit und Umweltschutz

Der **sichere Betrieb** des European XFEL ist die wichtigste Anforderung an das Forschungszentrum. Bau und Betrieb unter dicht besiedeltem Gebiet sind nicht mit besonderen Risiken verbunden. Zuverlässige Zugangskontrollsysteme stellen sicher, dass die geschlossenen Bereiche der Anlage während des Betriebs nicht betreten werden können. In dem unwahrscheinlichen Fall, dass der Elektronenstrahl von seiner vorgesehenen Bahn im Beschleuniger abweicht, würde er sofort in einen Elektronenabsorber geleitet und der Betrieb unterbrochen.

Vor dem Start der Bauarbeiten hat eine unabhängige Umweltverträglichkeitsstudie keine negativen Auswirkungen auf Klima, Luft, Grund- und Oberflächenwasser festgestellt. Grundsätzlich wurden die Bauarbeiten so ausgeführt, dass große Bäume, Hecken und kleine Wäldchen erhalten blieben, um Pflanzen, Tiere, Bäume und Landschaft in der Umgebung zu schonen. Nach Abschluss der Bauarbeiten hat European XFEL damit begonnen, die Flächen in der Nachbarschaft in ihren **ursprünglichen Zustand zurückzusetzen und ihren Wert durch naturnahe Grünflächen, Hecken und Baumgruppen weiter zu erhöhen**. Im Rahmen von Ausgleichsmaßnahmen sind unter anderem Wallhecken (Knicks), Feuchtgebiete und Wäldchen entstanden.

Weitere Informationen zum Thema Sicherheit und Umweltschutz finden Sie auf unserer Webseite <http://www.xfel.eu/de>

Daten und Fakten

Eigenschaften der Röntgenlaserblitze

- 27 000 Blitze pro Sekunde | Diese hohe Pulsrate ist weltweit einzigartig. Ermöglicht wird sie durch supraleitende Beschleunigertechnologie bei einer Betriebstemperatur von -271 °C .
- Wellenlänge: 0,05 bis 4,7 Nanometer (milliardstel Meter) | Die Wellenlängen sind so kurz, dass selbst atomare Details erkennbar werden.
- Kürzeste Dauer: im zweistelligen Femtosekunden-Bereich (billiardstel Sekunden) | Mit dieser extrem kurzen Pulsdauer lassen sich beispielsweise extrem schnelle Prozesse wie chemische Reaktionen filmen.
- Leuchtstärke (Photonen/s/mm²/mrad²/0,1% BW): 5×10^{33} (Spitze), $1,6 \times 10^{25}$ (Mittel) | Die Leuchtstärke (Brillanz) ist ein Maß für die Anzahl der in einem bestimmten Wellenlängenbereich erzeugten Photonen. Sie ist beim European XFEL in den Spitzenwerten milliardenfach höher als die von herkömmlichen Synchrotron-Röntgenlichtquellen.
- Kohärenz | Die Kohärenz erlaubt es, Blitze sinnvoll zu überlagern (Interferenz), wodurch dreidimensionale Aufnahmen (Holographie) möglich werden.

Die Anlage in Kürze

- Typ: Freie-Elektronen-Röntgenlaser (X-ray free-electron laser, XFEL)
- Gesamtlänge: 3,4 Kilometer; Tiefe der Tunnel: 6 bis 38 Meter
- Linearbeschleuniger (1,7 Kilometer lang), der Elektronen auf Energien von 10 bis 17,5 Milliarden Elektronenvolt (GeV) bringt; ausbaubar auf 20 GeV
- Betriebsgelände: DESY-Bahrenfeld (2 Hektar), Osdorfer Born (1,5 Hektar) und Schenefeld (15 Hektar)

Impressum

Herausgeber

Prof. Dr. Robert Feidenhans'l
European XFEL GmbH
Holzkoppel 4 | 22869 | Schenefeld | Deutschland
© European XFEL, 2018

Redaktion

Dr. Bernd Ebeling

Bildredaktion

Dr. Frank Poppe

Layout und Grafik

Rothe Grafik, Georgsmarienhütte

Bilder und Grafiken

S. 4: European XFEL / Heiner Müller-Elsner | S. 6–7: FHH, Landesbetrieb Geoinf. und Vermessung (Orthofoto-Luftaufnahmen); European XFEL / Blunck+Morgen Architekten (Gebäude-Grafiken) | S. 10: Dmitry Sunagatov/fotolia (links) | S. 11: DESY (links); European XFEL / Rey.Hori (rechts) | S. 14: European XFEL / Jan Hosan | S. 15: DLR (links); NASA/JPL (rechts) | S. 17: koya979/fotolia | S. 21: SLAC National Accelerator Laboratory | S. 26 (links): European XFEL / Heiner Müller-Elsner | S. 27, 28 (rechts): European XFEL / Option Z | S. 30 (links): European XFEL / Heiner Müller-Elsner | S. 31: European XFEL / Option Z | S. 35: European XFEL / Jan Hosan | S. 41: DESY | S. 42: European XFEL / Jan Hosan | S. 45, 46: European XFEL / Jan Hosan | S. 51–52: DESY | S. 54: European XFEL / Jan Hosan (links); European XFEL / Blunck+Morgen Architekten (rechts) | S. 57: European XFEL / Blunck+Morgen Architekten (unten links) | alle anderen: European XFEL

Druck

Druckerei Siepmann GmbH, Hamburg

April 2018

