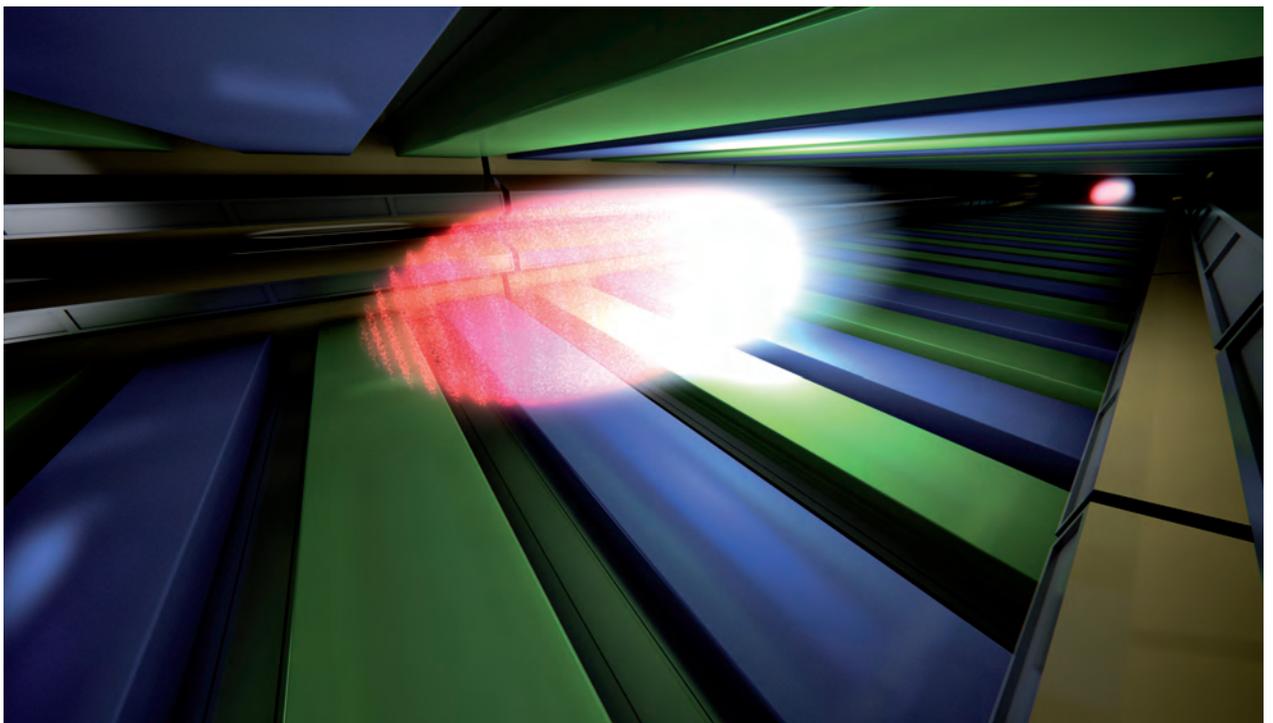


## DER RÖNTGENLASER EUROPEAN XFEL



UND DIE HERAUSFORDERUNGEN UNSERER ZEIT



**DER RÖNTGENLASER EUROPEAN XFEL  
UND DIE HERAUSFORDERUNGEN UNSERER ZEIT**

<b>1 Einführung: Der European XFEL – eine neue Forschungseinrichtung</b>	<b>1</b>
<b>2 Der European XFEL und drängende Gesundheitsfragen im 21. Jahrhundert</b>	<b>6</b>
<b>3 Herausforderung Energieversorgung: Natürliche und künstliche Photosynthese</b>	<b>11</b>
<b>4 Materialien und Prozesse für zukunftsweisende Technologien</b>	<b>14</b>
<b>5 Bau des European XFEL und Technologietransfer in die Industrie</b>	<b>16</b>
<b>6 Schlussbemerkungen</b>	<b>18</b>
<b>7 Impressum</b>	<b>19</b>



## 1 Einführung: European XFEL

Diese Broschüre beschreibt den gesellschaftlichen Nutzen, der von der neuen Forschungseinrichtung European X-Ray Free-Electron Laser Facility (European XFEL) erwartet wird. Der Röntgenlaser European XFEL wird derzeit in der Metropolregion Hamburg gebaut (Abbildung 1) und zählt zu den großen Forschungsinfrastruktur-Projekten, die in der Roadmap des Europäischen Strategieforums ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) hervorgehoben werden. Die 2009 auf Basis eines völkerrechtlichen Vertrags gegründete Einrichtung wird von derzeit elf europäischen Partnerländern unterstützt. Ab 2017 wird sie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus Forschung und Industrie herausragende neue Forschungsmöglichkeiten eröffnen. Diese umfassen die Gebiete Struktur der Materie, medizinische Forschung, erneuerbare Energien, Entwicklung von Materialien für neue Technologien und eine saubere Umwelt.

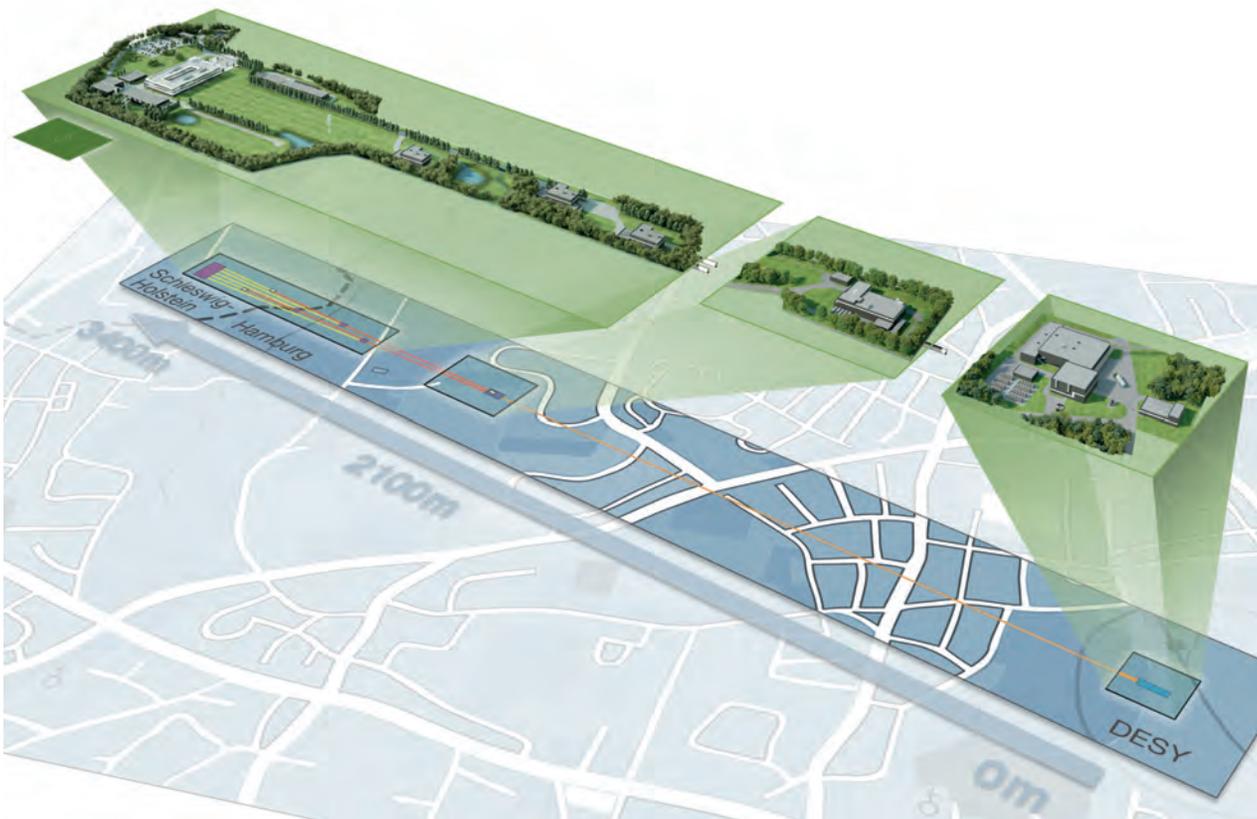


Abbildung 1: Der European XFEL im Überblick: Die Betriebsstätte DESY-Bahrenfeld rechts und der Forschungscampus Schenefeld mit der Experimentierhalle links. Die Gesamtlänge der größtenteils unterirdisch angelegten Einrichtung beträgt 3,4 Kilometer, die Gesamtlänge aller Tunnel zusammen 5,8 Kilometer.

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 (Abbildung 2). Röntgenlicht hat dagegen eine ausreichend kurze Wellenlänge, um einzelne Moleküle oder Atome zu untersuchen (Moleküle mit langwelliger „weicher“ Röntgenstrahlung, Atome mit kurzwelliger „harter“ Röntgenstrahlung).

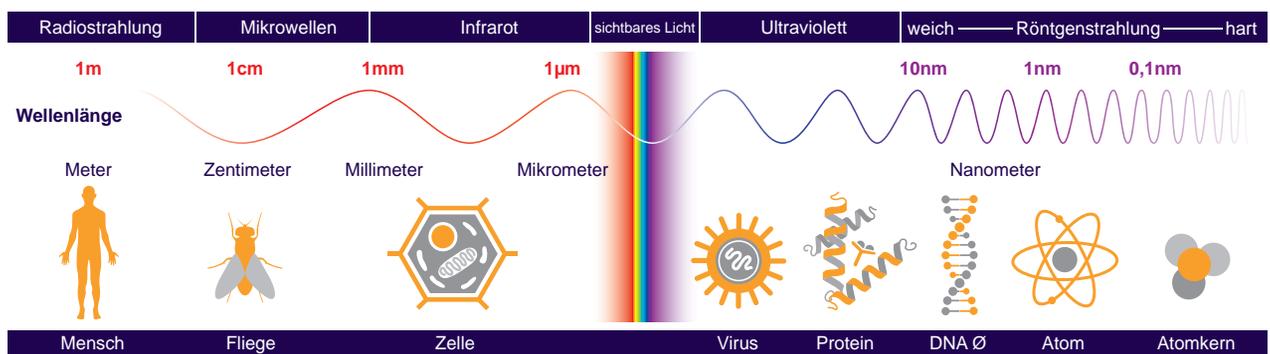


Abbildung 2: Spektrum elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen und verschiedenen Objekten zum Größenvergleich. Je kürzer die Wellenlänge des Lichts, desto kleiner sind die Objekte, die damit beobachtet werden können.

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 war eine der wichtigsten Entdeckungen des Jahrhunderts und demonstriert, wie eng Struktur und Funktion von Biomolekülen verknüpft sind – ein Zusammenhang, der auch in anderen Bereichen wie der Chemie oder den Materialwissenschaften eine wichtige Rolle spielt (siehe Abschnitt 4, „Materialien und Prozesse für zukunftsweisende Technologien“).

Um die Strukturen komplexer Moleküle zu untersuchen, benötigen Forscher sehr leuchtstarke Röntgenlichtquellen. Teilchenbeschleuniger, insbesondere Elektronenbeschleuniger, sind solche 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 September 2013 waren es bereits mehr als 94 000 Biomoleküle – bei über 83 000 von ihnen wurde die Struktur mit Hilfe von Röntgenstrahlung aus Synchrotronen aufgeklärt. Heute sind Synchrotrone das wichtigste Werkzeug zur Strukturaufklärung von Biomolekülen. Sechs Chemie-Nobelpreise wurden für Arbeiten vergeben, bei denen Synchrotronstrahlungsquellen eine entscheidende Rolle spielten.

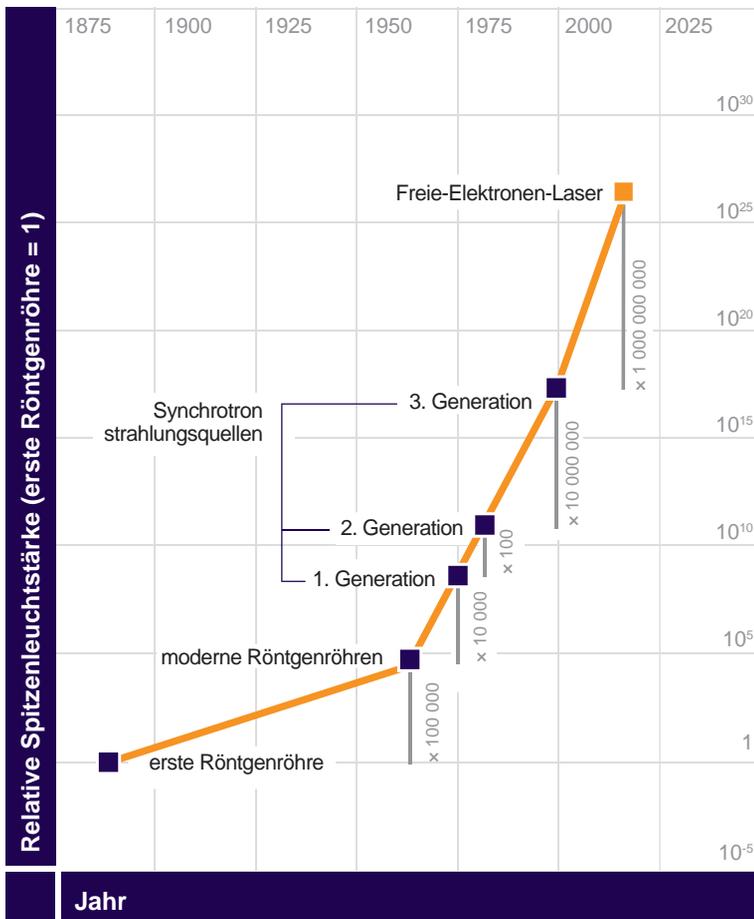


Abbildung 3: Steigerung der Spitzenleuchtstärke: Die Entwicklung der Röntgenstrahlungsquellen geht einher mit einem dramatischen Anstieg der Leuchtstärke seit dem Zeitpunkt der Entdeckung, dass Teilchenbeschleuniger Synchrotronstrahlung erzeugen. Die Freie-Elektronen-Laser setzen diesen Trend nach oben fort und ermöglichen zuvor ungeahnte Forschungsmöglichkeiten.

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

1. Die FEL-Pulse sind extrem leuchtstark, ihre Brillanz ist etwa 100 Millionen oder sogar milliardenfach stärker als die der Synchrotronstrahlung.
2. Die FEL-Pulse sind extrem kurz, die kürzesten dauern nur wenige 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.
3. 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 (Abbildung 4). Die räumliche Kohärenz der FEL-Röntgenpulse ist bei vielen Experimenten ein großer Vorteil gegenüber herkömmlicher Röntgenstrahlung.

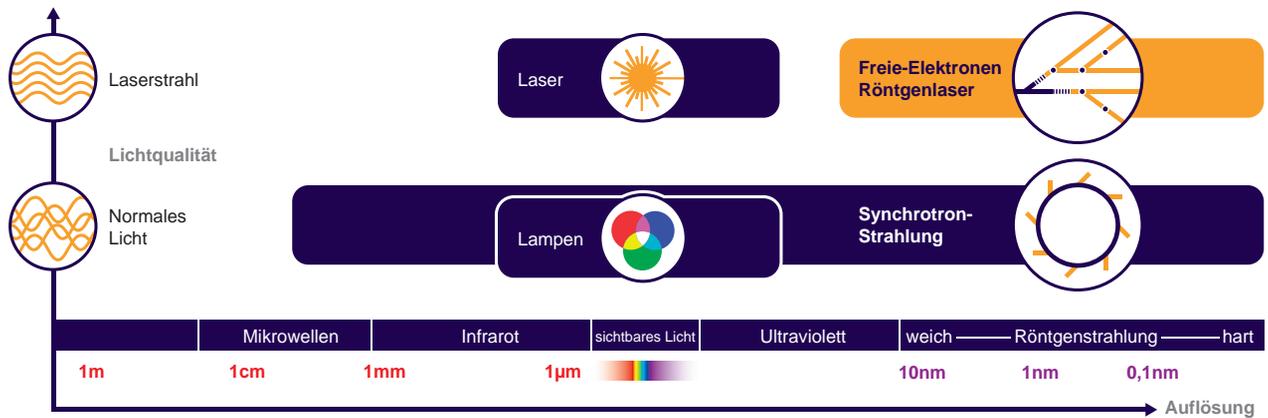


Abbildung 4: Lichtqualität und Wellenlängen verschiedener Lichtquellen im Vergleich. Laserstrahlen sind kohärent und haben eine höhere Lichtqualität als inkohärentes normales Licht, hier durch Lampen dargestellt. Röntgenlaser (orange) können kohärentes Licht im Röntgenbereich erzeugen. Synchrotrone liefern ein breites Spektrum von Licht unterschiedlicher Wellenlängen, jedoch nur inkohärent.

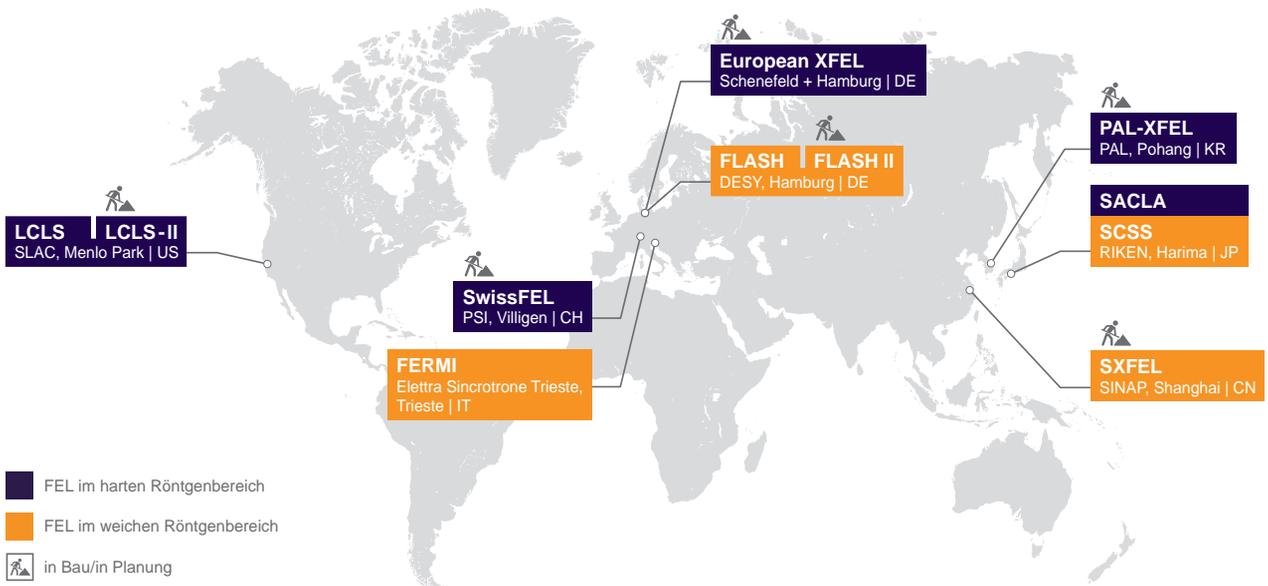


Abbildung 5: FEL-Röntgenlichtquellen weltweit. Derzeit sind LCLS in den USA und SACLA in Japan die beiden einzigen FELs, an denen Nutzer mit harter Röntgenstrahlung forschen können.

Heute sind bereits einige Röntgen-FELs weltweit in Betrieb (Abbildung 5): in Deutschland FLASH bei DESY in Hamburg, in Italien FERMI@Elettra in Triest, in den USA LCLS bei SLAC in Kalifornien und in Japan SACLA am RIKEN Harima Institut in Hyogo. LCLS und SACLA sind die derzeit leistungsstärksten Röntgenlaser. Andere Industrienationen wie Südkorea oder die Schweiz bauen ebenfalls Röntgenlaser, die Schweiz zusätzlich zur Beteiligung am European XFEL.

## EINFÜHRUNG: EUROPEAN XFEL

Der European XFEL wird über eine höhere Elektronenenergie und Leuchtstärke verfügen als die anderen Röntgenlaser. Darüber hinaus wird er pro Sekunde 27 000 Pulse erzeugen, anstatt der 60 bei SACLA oder der gegenwärtig 120 bei LCLS. Damit wird der European XFEL Europa in einem sich schnell entwickelnden und anspruchsvollen Umfeld in eine führende Position bringen (Tabelle 1).

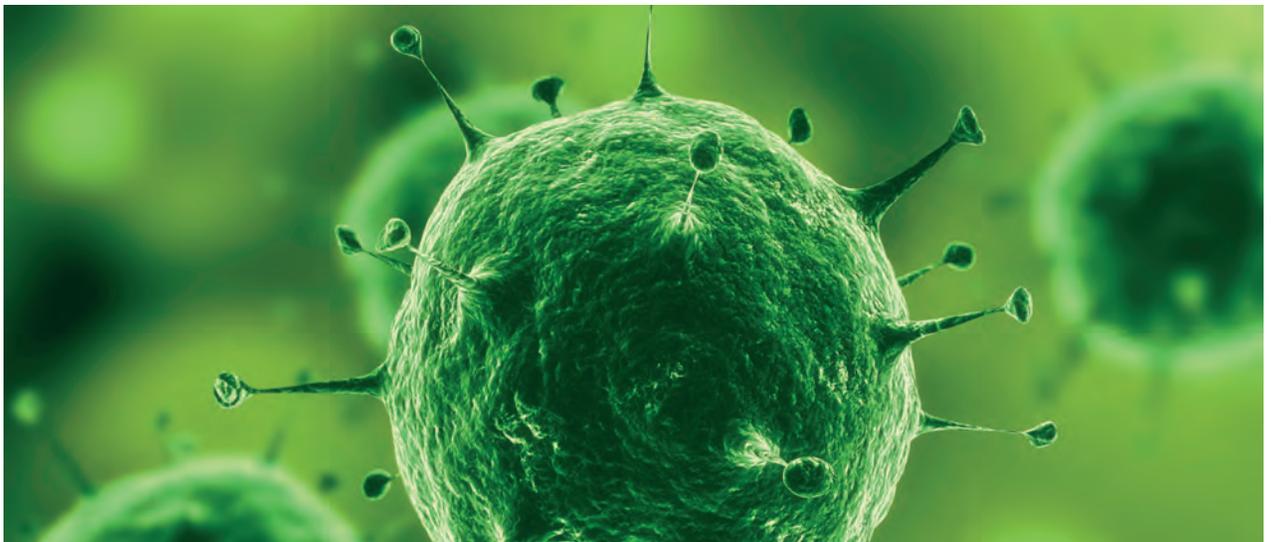
Projekt	LCLS USA	LCLS II CuRF	LCLS II SCRF	SACLA Japan	European XFEL	SwissFEL Schweiz	PAL-XFEL Korea
Max. Elektronenenergie (GeV)	14,3	15	4,5	8,5	17,5	5,8	10
Wellenlängenbereich (nm)	0,1–4,6	0,05–1,23	0,25–6	0,06–0,3	0,05–4,7	0,1–7	0,06–10
Photonen/Puls	$\sim 10^{12}$	$2 \times 10^{13}$	$3 \times 10^{13}$ <small>(weiche Röntgenstrahlen)</small>	$2 \times 10^{11}$	$\sim 10^{12}$	$\sim 5 \times 10^{11}$	$10^{11}$ – $10^{13}$
Spitzenleuchtstärke	$2 \times 10^{33}$	$2 \times 10^{33}$	$1 \times 10^{32}$	$1 \times 10^{33}$	$5 \times 10^{33}$	$1 \times 10^{33}$	$1,3 \times 10^{33}$
Pulse/Sekunde	120	120	1 000 000	60	27 000	100	60
Erster Röntgenstrahl	2009	2020	2020	2011	2016	2016	2016

Tabelle 1: Eckdaten von Freie-Elektronen-Lasern im Vergleich

In den folgenden Abschnitten zeigen ausgewählte Beispiele, welchen Beitrag Röntgenlaser zum wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Fortschritt leisten können.

## 2 Der European XFEL und drängende Gesundheitsfragen im 21. Jahrhundert

Die Lebenserwartung der Menschen hat sich von der Frühzeit bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts kaum verändert. Erst dann zeigten die sich allmählich bessernden Hygiene- und Lebensbedingungen in den entwickelten Ländern erste Auswirkungen. Der Fortschritt in den modernen Biowissenschaften und insbesondere die Entwicklung der Molekularbiologie im 20. Jahrhundert trugen zu einem weiteren Anstieg der Lebenserwartung weltweit bei. Dennoch zahlen vor allem die Menschen in Entwicklungsländern noch immer einen hohen Tribut an unterschiedlichste Krankheiten, während in den entwickelten Ländern einige altersbedingte Leiden gesellschaftlich immer relevanter werden. Schwere Epidemien können nach wie vor von Tieren auf Menschen überspringen, wie die Beispiele Vogelgrippe oder AIDS zeigen. Um Krankheiten erfolgreich vorbeugen und heilen zu können, ist es häufig notwendig, Ursachen und Mechanismen der Krankheitsentstehung auf molekularer Ebene umfassend zu verstehen (Abbildung 6). Details der atomaren Struktur von Biomolekülen sind eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung neuer pharmazeutischer Produkte. Daher sind Forscher von Pharma-Unternehmen die zahlenmäßig stärkste Gruppe industrieller Nutzer von Synchrotronstrahlungsquellen.



*Abbildung 6: Viren wie HIV oder Grippe-Erreger mit Durchmessern von 80 bis 150 Nanometern (milliardstel Meter) nutzen spezielle biomechanische und biochemische Prozesse, um Zellen zu infizieren. Der European XFEL soll in bisher ungekannter Detailschärfe zeigen, wie diese Infektionsprozesse ablaufen, und so die Entwicklung effektiver und zielgerichteter Therapien dieser Krankheiten ermöglichen.*

## European XFEL und Strukturuntersuchungen:

- Am European XFEL werden Forscherinnen und Forscher aufgrund der hohen Leuchtstärke, der Kohärenz (konstante Phasenbeziehung der Wellen) und der kurzen Dauer der Lichtblitze Biomoleküle besser und einfacher als je zuvor auf atomarer Ebene untersuchen können. Die kurze Dauer der Lichtblitze ist sehr wichtig, da eine zu lange „Belichtungszeit“ zu Strahlenschäden führt, die das größte Hindernis auf dem Weg zu Bildern mit hoher Auflösung sind: Ein von einem Lichtblitz getroffenes Molekül „explodiert“ regelrecht – ein Prozess, der einige hundert Femtosekunden andauern kann (Abbildung 7). Dies ist zwar nur ein Bruchteil eines Augenblicks, jedoch ein langer Zeitraum im Vergleich zur Dauer der Röntgenpulse des European XFEL. Deshalb kann der European XFEL ein Bild mit der Strukturinformation des Moleküls aufnehmen, bevor die Zerstörung einsetzt.
- Aus den gleichen Gründen hoffen die Forscherinnen und Forscher, am European XFEL biologische Objekte wie Zellen, Zellorganellen in Zellen oder Viren mit einer bisher unerreichten Auflösung von einigen Nanometern abbilden zu können.
- Schließlich erlauben die ultrakurzen Lichtpulse des European XFEL die Untersuchung dynamischer Prozesse – mit anderen Worten, den Übergang von einem Einzelbild zu einem Film, der ein Molekül in Aktion zeigt.

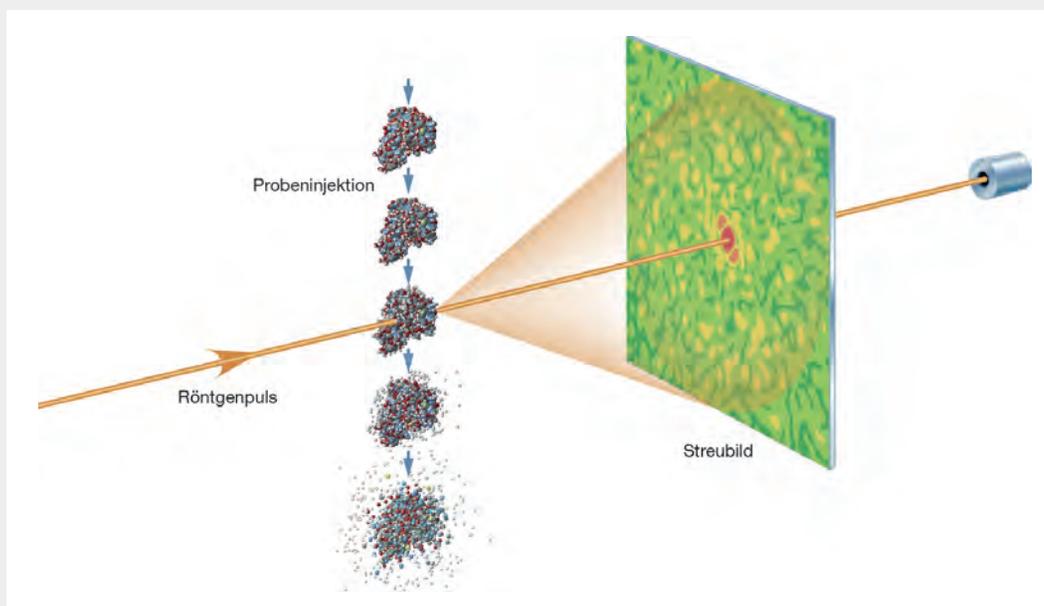


Abbildung 7: Der Röntgenpuls eines Freie-Elektronen-Lasers trifft ein Biomolekül. Eine Kamera nimmt das Streubild auf, das Informationen über die Struktur vor der Zerstörung des Moleküls enthält. Zahlreiche Aufnahmen von Kopien des Biomoleküls erlauben es den Wissenschaftlern, seine dreidimensionale Struktur zu berechnen.

Wer mit Hilfe von Röntgenstrahlen herausfinden möchte, wie die Atome in einem Molekül oder Material angeordnet sind, benötigt bislang Kristalle, denn hier befinden sich die Atome oder Moleküle in regelmäßiger Anordnung mit gleicher räumlicher Orientierung. Biomoleküle zu kristallisieren ist jedoch alles andere als einfach: Oft dauerte es Jahre oder gar Jahrzehnte, Kristalle in ausreichender Größe und Qualität für die Untersuchung an Synchrotronen zu gewinnen, während die nachfolgenden Schritte sehr viel schneller gelangen.

Eine qualitative Verbesserung gegenüber Synchrotronen konnte mit Röntgenlasern bei der Untersuchung sehr kleiner Kristalle (ein Mikrometer oder weniger) bereits erzielt werden: Am LCLS in Kalifornien entschlüsselten Forscher durch Messung an Nanokristallen bei Raumtemperatur die zuvor unbekannte Struktur eines Proteins, der Cystein-Protease Cathepsin B (Abbildung 8). Das Protein ist lebensnotwendig für den Erreger der Schlafkrankheit, an der in Afrika 30 000 Menschen im Jahr sterben. Die Forscher hoffen, dass das neue Wissen zu einer neuen Therapie gegen den Erreger führt.



Abbildung 8: Struktur eines für die Übertragung der afrikanischen Schlafkrankheit wichtigen Proteins. Wissenschaftler am LCLS nahmen die im Hintergrund gezeigten Diffraktionsmuster auf, aus denen sie dann die im Vordergrund gezeigte Struktur rekonstruierten (Darstellung nicht maßstabsgerecht).

# EUROPEAN XFEL UND DRÄNGENDE GESUNDHEITSPRAGEN IM 21. JAHRHUNDERT

Die Lichtpulse des European XFEL werden die Strukturaufklärung mit Nanokristallen deutlich verbessern. Erwartet wird auch, dass sie den Weg ebnen für den großen Traum der Strukturbiologie: die Strukturbestimmung anhand von einzelnen, nicht kristallisierten Molekülen. Die große Anzahl von Pulsen pro Sekunde wird zwei entscheidende Vorteile für die Nanokristallographie bringen: Zum einen verringert sich die Aufnahmezeit, zum anderen wird die benötigte Probenmenge Schätzungen zufolge rund 100 Mal kleiner sein als derzeit am LCLS. Da die Proben oft schwierig herzustellen und zu reinigen sind, können so sehr viel mehr Experimente zu einem Bruchteil der Materialkosten durchgeführt werden. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erhoffen sich mit dem European XFEL deshalb ein extrem effizientes Werkzeug zur Strukturbestimmung, mit dem sie in kürzerer Zeit und mit weniger Aufwand eine große Zahl von Strukturen entschlüsseln können – beispielsweise von Membranproteinen, aus denen sich nur schwer Kristalle mit einer Größe von mehr als einem Mikrometer züchten lassen. So wird der European XFEL unser Verständnis von Krankheitserregern und die Entwicklung von Arzneimitteln deutlich voranbringen. Die Anlage verspricht jedoch noch eine weitere wichtige Neuerung für die Lebenswissenschaften: die Möglichkeit, molekulare Filme aufzunehmen.

Biomoleküle sind die Maschinen des Lebens. Wie mechanische Maschinen mit beweglichen Teilen verändern sie ihre Struktur, während sie ihre Aufgaben erfüllen. Diese Veränderungen verfolgen und wie in einem Film ansehen zu können, wäre sehr aufschlussreich. Um von einem bewegten Objekt einen Film herzustellen, benötigt man viele Einzelbilder. Je schneller die Bewegung ist, desto kürzer muss die Belichtungszeit sein – sonst werden die Bilder unscharf – und desto mehr Bilder werden benötigt. Die ultrakurzen Lichtblitze des European XFEL werden solche scharfen Bilder von sehr schnellen Prozessen ermöglichen (Abbildung 9).

Ein besonders dynamischer und noch nicht hinreichend verstandener Prozess, der eine wichtige Rolle bei der Entstehung vieler ernster Erkrankungen spielt, ist die Proteinfaltung. Bei diesem natürlichen Vorgang faltet sich ein Protein, eine lineare Kette von Aminosäure-Molekülen, zu einer dreidimensionalen Struktur, die aussieht wie ein Wollknäuel und charakteristisch ist für das jeweilige Protein. In einigen Fällen kommt es jedoch zu einer Fehlfaltung der Moleküle. Diese steht in Zusammenhang mit vielen Krankheiten, darunter Typ-2-Diabetes, Creutzfeld-Jakob-Krankheit, BSE (Rinderwahnsinn), Alzheimer, familiäre Amyloid-Kardiomyopathie oder Polyneuropathie sowie Chorea Huntington (Veitstanz) und Parkinson-Krankheit. Den Ablauf der Proteinfaltung zu untersuchen und die Gründe aufzudecken, warum es dabei zu Fehlern kommt, könnte helfen, der Ursache dieser ernsten Erkrankungen auf die Spur zu kommen und sie letztendlich zu vermeiden. Es ist daher von großem Interesse, die sehr schnellen, grundlegenden Schritte des Faltungsprozesses mit Röntgenlasern zu erforschen, um den Ablauf der Proteinfaltung aufzuklären.

Insgesamt erwarten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vom European XFEL entscheidende neue Wege, die molekularen Grundlagen biologischer Prozesse zu untersuchen, sichtbar zu machen und zu verstehen. Die Forschungsfelder reichen dabei von der Krankheitsentstehung und der Erforschung von Abläufen bei der Immunabwehr mit Antikörpern über die Untersuchung biologischer Einheiten wie Zellen, Viren und Membranen bis hin zur Entwicklung pharmazeutischer Wirkstoffe. Die Forschung am European XFEL auf diesen Gebieten wird dem langjährigen Kampf für die Gesundheit der Bevölkerung und die Erhöhung der Lebenserwartung zugutekommen.



Abbildung 9: Molekülkino: Ein optischer Laser startet eine chemische Reaktion. Ein zweiter Puls, nun vom Röntgenlaser, trifft zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf die Probe und liefert Schnappschüsse der Veränderungen im Molekül.

# HERAUSFORDERUNG ENERGIEVERSORGUNG: NATÜRLICHE UND KÜNSTLICHE PHOTOSYNTHESE

## 3 Herausforderung Energieversorgung: Natürliche und künstliche Photosynthese

Die Bereitstellung von ausreichend Energie für Industrieproduktion, Transport und moderne Lebensführung stellt unsere Gesellschaft vor zahlreiche Herausforderungen. Fossile Energieträger stehen nur begrenzt zur Verfügung, und ihr Einsatz ist für Umwelt und Klima sehr bedenklich, insbesondere vor dem Hintergrund des steigenden Lebensstandards und wachsenden Energiebedarfs der Schwellenländer. Kernspaltung wird von der Öffentlichkeit als Gefahr angesehen, und der Nachweis der Nutzbarkeit der Kernfusion zur Energieerzeugung steht noch aus.

Von der Sonne gelangen gewaltige Mengen Energie zur Erde. Die saubere, wirtschaftliche und verlässliche Nutzung dieser im Überfluss vorhandenen Energie ist ein Zukunftstraum. Die direkte Nutzung der Sonnenenergie zur Stromerzeugung (mittels Photovoltaik-Anlagen) oder zur Wärmege-  
winnung (mittels Solarthermie) erfordert es, die Energie zu speichern, da der Produktionszyklus (hoch tagsüber, an klaren Tagen und im Sommer – niedrig nachts, bei Regen und im Winter) nicht mit dem entsprechenden Bedarfszyklus übereinstimmt. Derzeit ist die Speicherung von Energie wenig effizient und teuer, was den Einsatz von Solarthermie und Photo-  
voltaik wie auch Windenergie einschränkt.

Um diese Probleme zu lösen, versuchen viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler – inspiriert von der natürlichen Photosynthese in Pflanzen – Prozesse zu optimieren, die Sonnenenergie zur Produktion von speicher-  
baren und transportierbaren Brennstoffen nutzen. Pflanzen spalten mit Hilfe der Sonnenenergie Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff. Letzterer wird weiter in ein Proton und ein Elektron gespalten; die Rückverwand-  
lung in Wasserstoff liefert die Energie für weitere Reaktionen, die das Leben und Wachstum der Pflanzen ermöglichen. Könnte man diesen Prozess imitieren, ließe sich der Wasserstoff aus dem Wasser nutzen, um aus Kohlendioxid die Treibstoffe Methanol oder Methan zu erzeugen (Abbildung 10).

In der Natur übernimmt ein komplexes Biomolekül die Spaltung der Wasser-  
moleküle in Sauerstoff und Wasserstoff und die der Wasserstoffatome in Protonen und Elektronen. Das als Photosystem II bezeichnete Molekül enthält eine spezielle Anordnung von vier Manganatomen und einem Kalziumatom.

Im Labor kann Wasser zwar mit mäßiger Effizienz gespalten werden, aller-  
dings werden hierzu seltene Schwermetalle benötigt, die teuer sind und die Umwelt belasten. Es wäre deshalb ein großer Durchbruch, die Zwischen-  
schritte bei der Spaltung von Wasser in Pflanzen durch billige und reich-  
lich vorhandene Materialien wie Mangan und Kalzium genau zu kennen

und den Prozess nachahmen und optimieren zu können. Der vollständige Prozess in Pflanzen und Bakterien umfasst die schrittweise Absorption von Sonnenlicht (vier Photonen). Jedes der absorbierten vier Photonen bewirkt eine Strukturänderung des Mangan-Kalzium-Komplexes und einen Reaktionsschritt, der am Ende zur Spaltung von zwei Wassermolekülen führt. Das vierte Photon bringt den Komplex zurück in seinen Ausgangszustand, so dass der Prozess erneut beginnen kann.

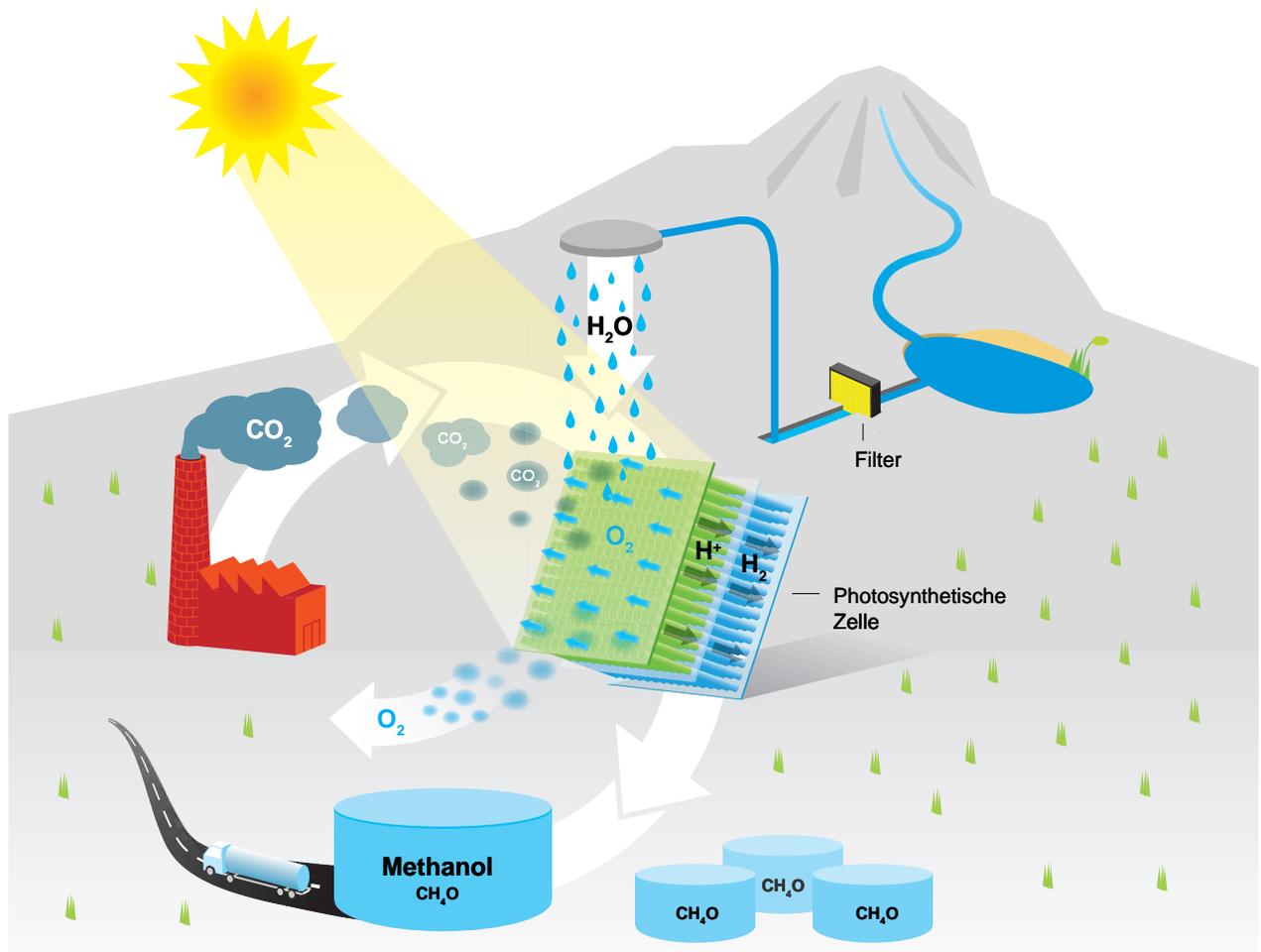


Abbildung 10: Künstliche Photosynthese. Künftig könnten Biokraftstoffe ähnlich wie in Pflanzenzellen aus Kohlendioxid, Wasser und Sonnenlicht produziert werden. Am European XFEL können Wissenschaftler zu unterschiedlichen Zeiten detailgenaue Bilder von den in Pflanzenzellen ablaufenden Reaktionen aufnehmen. Ein besseres Verständnis der verschiedenen Reaktionen, die in Pflanzen ablaufen, legt die Grundlage für eine saubere und effiziente Brennstoffproduktion.

# HERAUSFORDERUNG ENERGIEVERSORGUNG: NATÜRLICHE UND KÜNSTLICHE PHOTOSYNTHESE

Die Erforschung der Struktur des Mangan-Kalzium-Komplexes in den verschiedenen Zwischenzuständen wurde bisher dadurch beeinträchtigt, dass die Kristalle auf sehr niedrige Temperaturen gekühlt werden mussten, um Strahlungsschäden zu begrenzen. Röntgenlaser haben hier den großen Vorteil, dass die Untersuchung – wie der natürliche Prozess auch – bei Raumtemperatur stattfinden kann. Darüber hinaus können optische Laserblitze den Prozess gezielt durch die verschiedenen Phasen steuern.

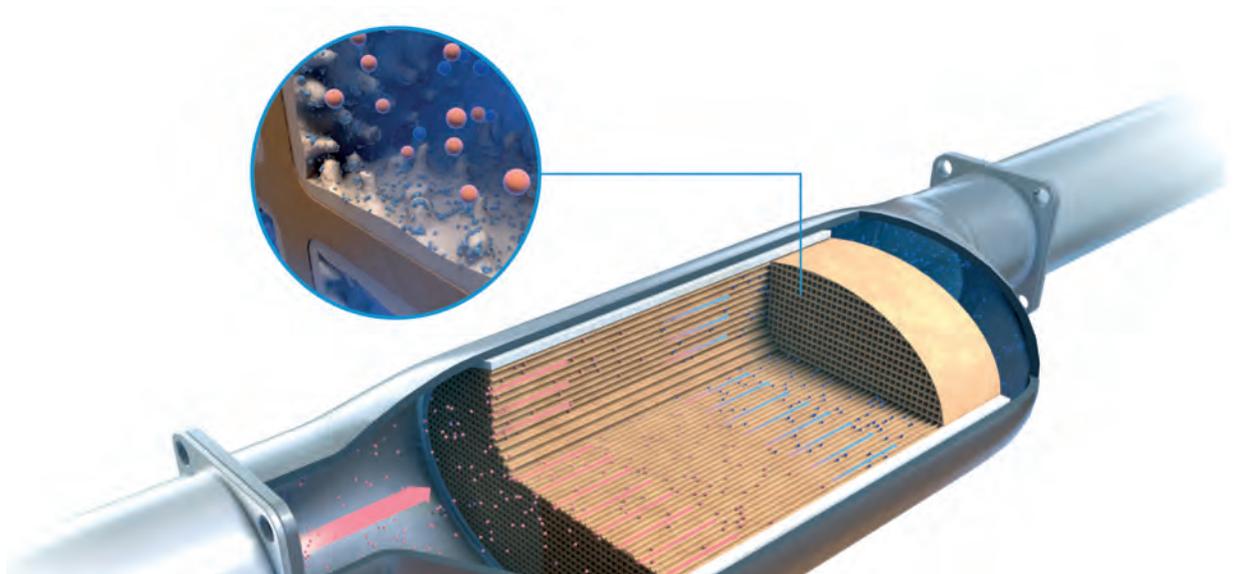
Die von Röntgenlasern eröffnete Möglichkeit, einzelne Schritte eines chemischen Prozesses wie in Zeitlupe zu verfolgen, lässt auf neue Erkenntnisse zur effizienten Spaltung von Wasser in Pflanzen hoffen. Die einzigartigen Eigenschaften des European XFEL könnten hierbei eine wichtige Rolle spielen und die Basis schaffen für eine optimierte Photosynthese im industriellen Maßstab, mit der Wasserstoff und flüssige Treibstoffe aus billigen und weitverbreiteten Ausgangsstoffen wie Sonnenlicht, Wasser, Kohlendioxid und Leichtmetallen gewonnen werden können.

## 4 Materialien und Prozesse für zukunftsweisende Technologien

### 4a Katalyse und katalytische Reaktionen

Die in Kapitel 3 beschriebene Photosynthese ist ein Beispiel für Katalyse in chemischen Reaktionen: Das komplexe, mangan- und kalziumhaltige Biomolekül wird durch die Reaktion, bei der die Wassermoleküle gespalten werden, nicht verändert. Es ist aber auch kein passiver Zuschauer. Es nimmt an einigen Zwischenschritten der Reaktion teil und ist unverzichtbar für den effizienten Verlauf der Reaktion. Chemiker bezeichnen einen solchen Stoff als Katalysator und den entsprechenden Prozess als Katalyse. Katalysatoren haben schon seit mindestens 100 Jahren eine fundamentale Bedeutung für die chemische Industrie. Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelten Fritz Haber und Carl Bosch Katalysatoren, um die Effizienz der Ammoniakherstellung aus Stickstoff und Wasserstoff zu steigern. Damit legten sie den Grundstein für die industrielle Erzeugung von synthetischen Düngemitteln. Heute werden Katalysatoren auch eingesetzt, um den Schadstoffausstoß von Autos zu begrenzen (Abbildung 11), und sie spielen eine grundlegende Rolle in der petrochemischen Industrie sowie bei vielen weiteren Anwendungen. Ihr Marktvolumen liegt bei vielen Milliarden Euro.

*Abbildung 11: 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.*



Trotz der weiten Verbreitung von Katalysatoren sind die genauen Vorgänge beim Katalyseprozess häufig kaum verstanden. In vielen Fällen wurden Katalysatoren nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ entwickelt, mit Methoden, die gelegentlich als „Kochrezepte“ be-

zeichnet werden. Röntgenlaser bieten die Möglichkeit, die Katalyse in molekularen Filmen in verschiedenen Phasen zu beobachten, und können damit neue Impulse für eine systematische Entwicklung von Katalysatoren geben. Ein detailliertes Verständnis der molekularen Mechanismen wird die Entwicklung von besseren und umweltfreundlicheren Katalysatoren ermöglichen, mit bedeutenden Auswirkungen auf eine ganze Reihe von wichtigen industriellen Prozessen.

## **4b Nanomagnetismus und Informationstechnologie**

Die Entwicklung und Verbesserung von Materialien für modernste Technologien stellt die Forscherinnen und Forscher vor Herausforderungen, zu deren Lösung Röntgenlaser ebenfalls beitragen können. Fortschritte in der Informationstechnologie beispielsweise hängen von den Möglichkeiten ab, Daten auf immer kleinerem Raum zu speichern, so schnell wie möglich zu schreiben und wieder auszulesen. Heutige Festplatten nutzen mehrschichtige magnetische Materialien, in denen das winzige magnetische Moment eines jeden Korns in der obersten Schicht in Richtung oben oder unten magnetisiert werden kann, entsprechend „0“ oder „1“, was einem Bit an Information entspricht. Geschrieben wird meist durch die Einwirkung von Magnetfeldern; gelesen wird durch Messung des elektrischen Widerstands, der von der Orientierung des magnetischen Moments der obersten Schicht abhängt. Für die Entdeckung dieses sogenannten Riesenmagnetowiderstands oder GMR-Effekts erhielten Albert Fert und Peter Grünberg 2007 den Nobelpreis für Physik. In den vergangenen Jahren entdeckte man, dass ein kurzer Laserpuls mit zirkular polarisiertem Licht, das wie eine Schraube mit Rechts- oder Linksgewinde zwei unterschiedliche Drehrichtungen hat, durch Veränderung der magnetischen Polarität ebenfalls Daten in eine Probe schreiben kann, und zwar mit höherer Geschwindigkeit. Am European XFEL wird mit einer speziellen Apparatur zirkular polarisiertes Licht erzeugt, mit deren Hilfe die Forscher die Magnetisierung von Proben kartieren und deren zeitliche Entwicklung verfolgen können. Dadurch lässt sich besser verstehen, wie die Magnetisierung von Datenträgern mit Hilfe von optischen Laserpulsen ultraschnell gelöscht und wiederbeschrieben werden kann. Gleichzeitig wird die Forschung am European XFEL dazu beitragen, den genauen Ablauf dieses Prozesses zu entschlüsseln und die Geschwindigkeit der magnetischen Datenerfassung und -aufzeichnung bis an ihre physikalischen Grenzen zu erhöhen. Dies ist nicht nur für den Fortschritt in der Informationstechnologie von zentraler Bedeutung, sondern auch für die Entwicklung zahlreicher Anwendungen und Produkte in Wissenschaft und Technik.

## 5 Bau des European XFEL und Technologietransfer in die Industrie

Schon in der Bauphase hat der European XFEL die Entwicklung industrieller Hochtechnologie in den Partnerländern stimuliert. Die hohen Anforderungen an den Betrieb erfordern für viele Komponenten einerseits das gesamte Know-how der beitragenden Forschungseinrichtungen, andererseits müssen sie in großer Stückzahl in der Industrie gefertigt werden. So werden beispielsweise für den Beschleuniger 800 Hohlraumresonatoren sowie zusätzliche Vorserien- und Ersatzresonatoren aus Niob benötigt. Der Auftrag ging an zwei Industrieunternehmen, die die erforderliche Infrastruktur installierten und intensiv von Experten von DESY und der italienischen Forschungsorganisation INFN geschult wurden. Die zugrunde liegende TESLA-Technologie von DESY (Abbildung 12) ist mittlerweile Standard für supraleitende Linearbeschleuniger weltweit – nicht nur für Freie-Elektronen-Laser, sondern auch bei anderen Forschungsanlagen wie Spallationsquellen für Neutronen und Hochenergie-Teilchenbeschleunigern. Ihr Einsatz ist weltweit für verschiedene geplante Projekte vorgesehen. Die beteiligten Firmen haben sich in einer expandierenden Marktnische eine gute Ausgangsposition gesichert.

*Abbildung 12: Die beim European XFEL eingesetzte Beschleunigertechnologie basiert auf den hier gezeigten Resonatoren aus dem Metall Niob und hat bei der Entwicklung von Beschleunigern weltweit Maßstäbe gesetzt.*



Beträchtliche Aktivitäten hat European XFEL auch bei der Entwicklung von Detektoren initiiert. Um alle Vorteile der hohen Anzahl von Pulsen pro Sekunde nutzen zu können, muss der Detektor – im Wesentlichen eine Digitalkamera für Röntgenblitze – in extrem

## BAU DES EUROPEAN XFEL UND TECHNOLOGIETRANSFER IN DIE INDUSTRIE

kurzer Zeit ein Bild in hoher Qualität auf einem Sensor aufnehmen, es in einen temporären Speicher überführen, das Bild anschließend vom Sensor löschen und für die nächste Aufnahme bereit sein. Die Kapazität des Zwischenspeichers ist auf mehrere hundert Bilder ausgelegt, in Zukunft sollen es mehrere tausend werden. All dies erfordert die umfangreiche Erfahrung und das Know-how einer Anzahl von europäischen Labors, die in die Entwicklung von Prototypen eingebunden war. Hochmoderne integrierte elektronische Schaltkreise wurden entwickelt und Firmen mit der Herstellung beauftragt. Einige Eigenschaften von Detektoren mit hohen Auslesegeschwindigkeiten werden dabei auch für die Forschung an Synchrotronen und möglicherweise weitere Gebiete von Interesse sein. Denkbar wäre die Entwicklung kommerzieller elektronischer Geräte, mit denen sich aufgrund der Geschwindigkeit der Datenverarbeitung, -speicherung und -wiederherstellung neue Geschäftsfelder erschließen lassen.

Alle Informationen eines Experiments – hunderttausende, manchmal auch Millionen von Bildern – müssen in einen Speicher überführt werden. Darüber hinaus werden alle Bilder mit zusätzlichen Informationen versehen, sogenannten Metadaten, die eine eindeutige Identifizierung ermöglichen: zum Beispiel, zu welchem Experiment und welcher Probe das Bild gehört und mit welchen Einstellungen es aufgenommen wurde. Auf diese Weise trägt European XFEL zu einem Forschungsgebiet bei, das unter dem Schlagwort „Data deluge“ (Datenflut) nicht nur die Wissenschaft (beispielsweise die Experimente am Forschungszentrum CERN, die zur Entdeckung des Higgs-Teilchens führten), sondern auch Unternehmen und öffentliche Einrichtungen in zunehmendem Maße betrifft. Der amerikanische Physiker Richard Feynman schätzte 1959, dass die gesamte weltweit in Bibliotheken gespeicherte Information – zirka 24 Millionen Bücher – etwa 0,1 Petabyte (oder  $10^{14}$  Byte) entspricht. In moderneren Maßstäben ist dies die Speicherkapazität von 10 000 hochwertigen DVDs. Der European XFEL wird solche Datenmengen bereits in den ersten Monaten nach Betriebsbeginn erzeugen – mit steigender Tendenz. Einige Lösungen, die zur effizienten Verarbeitung der Datenflut bei European XFEL, CERN und anderen Großforschungseinrichtungen entwickelt werden, sollten auch in anderen gesellschaftlich relevanten Bereichen auf Interesse stoßen: Bessere Wettervorhersagen, genauere Klimamodelle und globale Kommunikationsnetzwerke sind Beispiele, bei denen die erzeugten Datenmengen ebenfalls unaufhaltsam steigen, wenn auch nicht ganz so schnell.

## 6 Schlussbemerkungen

Der European XFEL – eine 3,4 Kilometer lange, überwiegend in unterirdischen Tunneln und Hallen gelegene Forschungseinrichtung in der Metropolregion Hamburg, die von elf europäischen Ländern gebaut wird – wird maßgeblich zur Stärkung der Position Europas an vorderster Front der wissenschaftlichen Grundlagenforschung beitragen. Die Anlage verspricht zahlreiche spannende Entdeckungen zum Nutzen der Gesellschaft, von denen wir einige in dieser Broschüre vorgestellt haben.

Bereits beim Bau der Anlage ergeben sich wissenschaftliche und technische Herausforderungen, die von Wissenschaft und Industrie zum beiderseitigen Nutzen angegangen werden.

Als einzigartiges Forschungsinstrument wird der European XFEL Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus der ganzen Welt offenstehen. Forscher zahlreicher unterschiedlicher Fachrichtungen werden Experimente vorschlagen, von denen die besten und innovativsten ausgewählt werden. Auch junge Wissenschaftler, die noch am Anfang ihrer Karriere stehen, werden eine Chance erhalten; ebenso Forscher aus Einrichtungen, die nur mit bescheidenen Budgets ausgestattet sind – solange ihre Ideen zu einem echten wissenschaftlichen Fortschritt führen können. Mit sechs Instrumenten in der Startkonfiguration und der Möglichkeit, auf bis zu 15 Instrumente zu erweitern, wird der European XFEL mehr Forschern Arbeitsmöglichkeiten bieten als jeder andere Röntgenlaser weltweit. In einem Umfeld renommierter Forschungseinrichtungen wie DESY, CFEL, der Universität Hamburg, Max-Planck-Instituten, EMBL, CSSB und anderer wird der European XFEL die Synergien und Möglichkeiten der Zusammenarbeit maximieren und so ein einzigartiges und stimulierendes Forschungsumfeld schaffen.

Mit dem Abschluss der Bauphase des European XFEL wird Europa in einigen Jahren zum Spitzenstandort für Röntgenstrahlungsquellen aufsteigen. Der European XFEL verspricht, eine weitere Erfolgsgeschichte der europäischen Zusammenarbeit in Wissenschaft und Technologie zu werden.

## 7 Impressum

Herausgeber:  
European XFEL GmbH  
Albert-Einstein-Ring 19  
22761 Hamburg  
Prof. Massimo Altarelli

Text:  
Prof. Massimo Altarelli

Übersetzung und Redaktion:  
Dr. Bernd Ebeling

Redaktionelle Mitarbeit  
Ilka Flegel

Bildredaktion  
Dr. Frank Poppe

Layout und Grafik  
Rothe Grafik, Georgsmarienhütte

Bilder und Grafiken  
S. 6: Sebastian Kaulitzki/fotolia,  
S. 8: Greg Stewart/SLAC National Accelerator Laboratory,  
S. 10, 14 und 16: DESY,  
alle anderen: European XFEL

Druck  
Die Printur Braun & Behrmann GmbH, Kaltenkirchen  
Februar 2016



EUROPEAN XFEL GMBH  
Albert-Einstein-Ring 19 · 22761 Hamburg · Germany

[www.xfel.eu/de](http://www.xfel.eu/de)