

# BLITZ LICHT.

DESY erzeugt brillante Lichtblitze  
für eine tiefergehende Sicht der Dinge



Teilchenbeschleuniger erzeugen eine besondere Strahlung, die kleinste Details aus dem Mikrokosmos sichtbar macht. Bei DESY untersuchen Wissenschaftler aus aller Welt damit die atomare Struktur und die Reaktionen von vielversprechenden Werkstoffen und Biomolekülen, aus denen neue Medikamente gewonnen werden können. Im weltweiten Vergleich zeichnet sich die Forschung mit Photonen bei DESY durch die einzigartige Vielfalt der Lichtquellen aus.

Beschleuniger | [Forschung mit Photonen](#) | Teilchenphysik

Deutsches Elektronen-Synchrotron  
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft





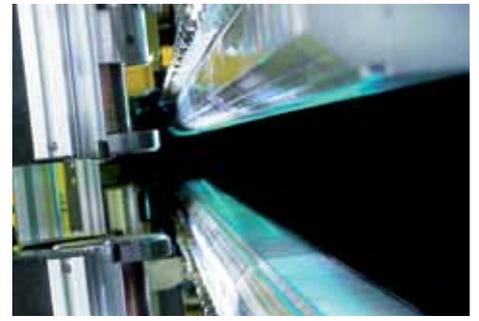
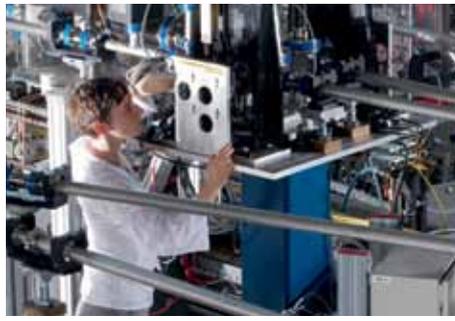
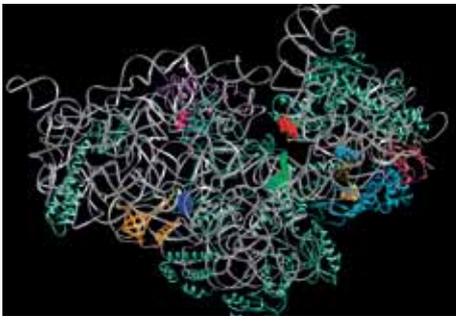
Arbeiten in der Experimentierhalle von FLASH bei DESY



# INHALT.



<b>DESY</b>	<b>Wir machen Erkenntnis möglich</b> Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren zur Erforschung der Materie. DESY entwickelt, baut und nutzt Beschleuniger und Detektoren für die Forschung mit Photonen und die Teilchenphysik.	<b>4</b>
<b>STRAHL KRAFT</b>	<b>Lichtblitze für die Forschung</b> Ob in Medizin und Materialwissenschaften oder in der Grundlagenforschung – Röntgenstrahlen sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Die rasante Verbesserung der Lichtquellen hat dabei immer neue Forschungs- und Anwendungsbereiche eröffnet. Mittlerweile nutzen Wissenschaftler auf der ganzen Welt die intensive Röntgenstrahlung aus Teilchenbeschleunigern für ihre Experimente. Mit seiner einzigartigen Vielfalt von Lichtquellen ist das Forschungszentrum DESY ganz vorn mit dabei.	<b>6</b>
<b>ENERGIE BÜNDEL</b>	<b>Wie aus Teilchen Licht entsteht</b> Ob in Physik, Chemie, Geologie, Biologie, Materialforschung oder Medizin – das Licht aus den DESY-Beschleunigern bietet eine breite Palette von Untersuchungsmöglichkeiten. Erzeugt wird die begehrte Strahlung von winzigen Teilchen, die auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.	<b>8</b>
<b>LICHT MASCHINEN</b>	<b>Strahlungsquellen bei DESY</b> Im weltweiten Vergleich zeichnet sich die Forschung mit Photonen bei DESY durch die Vielfalt der Lichtquellen aus. In anderen, ähnlichen Forschungseinrichtungen steht meist ein einziger Beschleuniger für die Lichterzeugung zur Verfügung, der speziell für bestimmte Strahlungseigenschaften ausgelegt ist. Bei DESY dagegen ergänzen sich die vorhandenen und geplanten Lichtquellen auf ideale Weise. So erhalten die Wissenschaftler bei DESY exakt die Strahlung, die sie für ihre Experimente brauchen.	<b>10</b>
<b>RÖNTGEN BLICK</b>	<b>Experimentiermöglichkeiten bei DESY</b> Das Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB unterstützt und koordiniert die Forschung mit Photonen bei DESY. Die einmaligen Experimentiermöglichkeiten locken jährlich mehr als 2000 Forscher aus über 35 Ländern nach Hamburg. Einige Forschungsinstitute haben bei DESY ständige Außenstellen eingerichtet oder betreiben eigene Messstationen, beispielsweise für biologische Strukturforschung oder Materialforschung.	<b>14</b>



## WISSENS WERTE

### Beispiele aus der Forschung

Das intensive Licht aus den Beschleunigern bei DESY lässt tief blicken. Die vielseitige Strahlung eignet sich für Untersuchungen an so unterschiedlichen Materialien wie Halbleiterkristallen, Werkstoffen der Nanotechnologie oder Proteinen – den Bausteinen des Lebens. Ausgewählte Forschungsbeispiele zeigen einen kleinen Ausschnitt aus dem breiten Spektrum von Experimentiermöglichkeiten, die Wissenschaftler aus aller Welt an den Beschleunigern FLASH, DORIS III und PETRA III in Hamburg nutzen können.

18

## WELT KLASSE

### Lichtquellen der Superlative

Neben der bewährten Strahlungsquelle DORIS III stehen bei DESY drei zukunftsweisende Lichtquellen zur Verfügung, die weltweit Maßstäbe setzen: PETRA III, die brillianteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle der Welt; FLASH, der weltweit einzige Freie-Elektronen-Laser für Strahlung im Vakuum-Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich; und ab 2015 der Röntgenlaser European XFEL, der als einzige Lichtquelle dieser Art in Europa ultrakurze, hochintensive Laserlichtblitze im harten Röntgenbereich liefern wird.

34

## BRILLANT RING

### PETRA III – ein Juwel mit vielen Facetten

Im Jahr 2009 hat sie den Betrieb aufgenommen: PETRA III, die brillianteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle der Welt. Als leistungsstärkste Lichtquelle ihrer Art bietet sie den Wissenschaftlern exzellente Experimentiermöglichkeiten mit Röntgenstrahlung besonders hoher Brillanz. Davon profitieren vor allem Forscher, die sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzweiliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen.

36

## ZIEL GERADE

### FLASH – Weltrekord im Laserblitzen

Seit 2005 steht den Forschern bei DESY eine einmalige Lichtquelle zur Verfügung: FLASH, der weltweit einzige Freie-Elektronen-Laser im Vakuum-Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich. Die Anlage spielt in mehrfacher Hinsicht eine Vorreiterrolle. Als erster Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich mit supraleitendem Linearbeschleuniger liefert sie unentbehrliche Erkenntnisse für die Entwicklung von Beschleunigern und Röntgenlasern der Zukunft. Zugleich bietet sie Forschern fast aller Naturwissenschaften bisher nie dagewesene Experimentiermöglichkeiten.

44

## GLANZ LEISTUNG

### European XFEL – Europas Leuchtturm für die Wissenschaft

Er ist ein wahres Highlight: der Freie-Elektronen-Röntgenlaser European XFEL, der derzeit als europäisches Projekt mit starker Beteiligung von DESY gebaut wird und 2015 in Betrieb gehen soll. Als einzige Lichtquelle dieser Art in Europa wird der European XFEL hochintensive, ultrakurze Laserlichtblitze im harten Röntgenbereich liefern – also mit Wellenlängen, die nochmals deutlich kürzer sind als die von FLASH. Auch seine Leuchtstärke wird neue Maßstäbe setzen. Damit eröffnet der European XFEL völlig neue Forschungsmöglichkeiten für Naturwissenschaftler und industrielle Anwender aus aller Welt.

50

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren zur Erforschung der Materie. DESY entwickelt, baut und nutzt Beschleuniger und Detektoren für die Forschung mit Photonen und die Teilchenphysik.

DESY betreibt Grundlagenforschung in verschiedenen Naturwissenschaften und verfolgt dabei drei Schwerpunkte:

- > **Beschleuniger:**  
DESY entwickelt, baut und betreibt große Beschleunigeranlagen, um Teilchen auf höchste Energien zu bringen.
- > **Forschung mit Photonen:**  
Physiker, Chemiker, Geologen, Biologen, Mediziner und Materialforscher nutzen das besondere Licht aus den Beschleunigern, um Strukturen und Prozesse im Mikrokosmos sichtbar zu machen.
- > **Teilchenphysik:**  
Wissenschaftler aus aller Welt erforschen an Beschleunigern die fundamentalen Bausteine und Kräfte im Universum.

Entsprechend vielseitig sind das Forschungsspektrum und die Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern. Aus über 40 Nationen kommen jährlich mehr als 3000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, um bei DESY zu forschen.

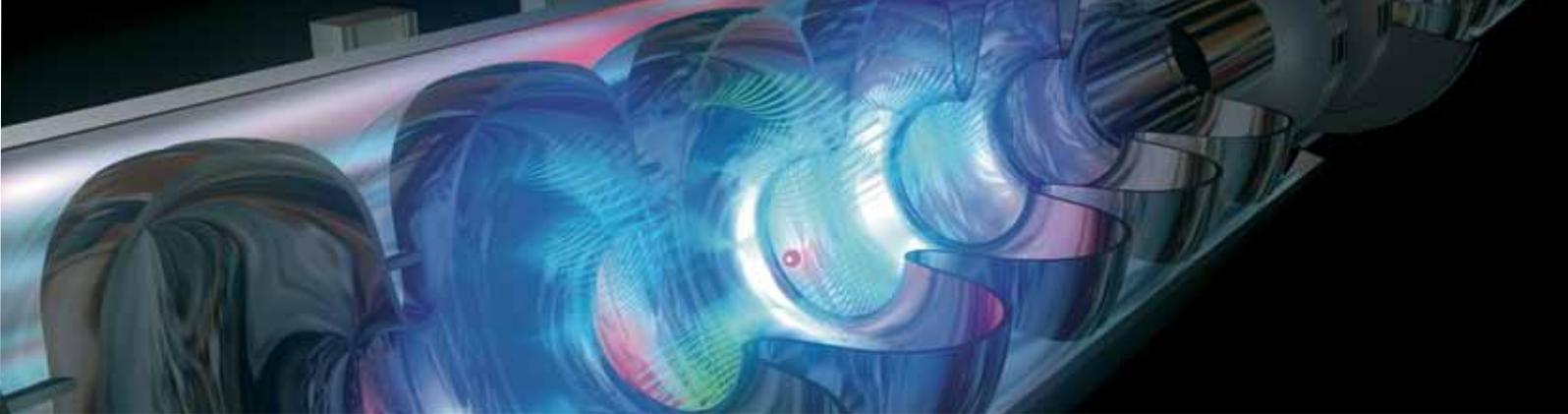
Das Forschungsprogramm reicht dabei weit über die Anlagen in Hamburg und Zeuthen hinaus. DESY arbeitet intensiv an internationalen Großprojekten mit. Beispiele sind der Röntgenlaser European XFEL in Hamburg und Schleswig-Holstein, der Protonenbeschleuniger LHC in Genf, das Neutrinoobservatorium IceCube am Südpol oder der internationale Linearbeschleuniger ILC.



---

### Steckbrief DESY

- > Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
  - > Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren
  - > Mit öffentlichen Mitteln finanziertes nationales Forschungszentrum
  - > Standorte: Hamburg und Zeuthen (Brandenburg)
  - > Mitarbeiter: etwa 2000, davon 200 in Zeuthen
  - > Etat: 192 Millionen Euro (Hamburg: 173 Mio. Euro, Zeuthen: 19 Mio. Euro)
-



Computersimulation der Teilchenbeschleunigung

## Beschleuniger

Die Entwicklung von Teilchenbeschleunigern stellt Mensch und Maschine vor besondere Herausforderungen. Immer wieder gilt es, in technisches Neuland vorzustoßen und Pionierarbeit zu leisten. DESY hat in über 50 Jahren umfangreiche Erfahrungen in der Beschleunigerentwicklung gesammelt und gehört zur Weltspitze. Dabei verfolgt DESY zwei Forschungsrichtungen:

> Für die Forschung mit Photonen werden Lichtquellen entwickelt, die es ermöglichen, Strukturen und Prozesse auf

extrem kleinen Raum- und Zeitskalen zu beleuchten. Dazu werden Teilchen zunächst beschleunigt und dann in großen Magnetstrukturen so abgelenkt, dass sie eine besondere Strahlung aussenden.

> Für die Teilchenphysik werden immer leistungsstärkere Beschleuniger entwickelt, um Teilchen auf immer höhere Energien zu beschleunigen und damit immer tiefer ins Innerste der Materie und zurück zur Entstehung des Universums zu blicken.

## Forschung mit Photonen

Teilchenbeschleuniger erzeugen eine besondere Strahlung, die kleinste Details aus dem Mikrokosmos sichtbar macht. Bei DESY untersuchen Wissenschaftler aus aller Welt damit die atomare Struktur und die Reaktionen von vielversprechenden Werkstoffen und Biomolekülen, aus denen neue Medikamente gewonnen werden können. Im weltweiten Vergleich zeichnet sich die Forschung mit Photonen bei DESY durch die einzigartige Vielfalt der Lichtquellen aus.

> Der Teilchenbeschleuniger DORIS III liefert Strahlung für eine Vielzahl von Anwendungen. Hier werden zum Beispiel

Katalysatoren oder Halbleiterkristalle analysiert.

> Weltweit einmalige Untersuchungsmöglichkeiten bietet der Freie-Elektronen-Laser FLASH, der hochintensive, kurzwellige Laserlichtblitze erzeugt.

> Die weltbeste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle, PETRA III, liefert brillantes Röntgenlicht der Extraklasse.

> Der im Bau befindliche Röntgenlaser European XFEL ergänzt das einzigartige Spektrum modernster Lichtquellen in der Metropolregion Hamburg.

## Teilchenphysik

Auf den Spuren von Quarks, Supersymmetrie und Extradimensionen – die Teilchenphysiker bei DESY erforschen das Gefüge unserer Welt.

> Mit den am „Super-Elektronenmikroskop“ HERA, einem unterirdischen, sechs Kilometer langen Beschleuniger, aufgenommenen Daten enträtseln sie den Aufbau des Protons und die fundamentalen Naturkräfte.

> Einzigartige Chancen, die Geheimnisse von Materie, Energie, Raum und Zeit zu lüften, bieten den Forschern die Großprojekte der Teilchenphysik, an denen auch die DESY-Wissenschaftler beteiligt sind: der weltweit leistungs-

stärkste Beschleuniger LHC in Genf und der geplante internationale Linearbeschleuniger ILC.

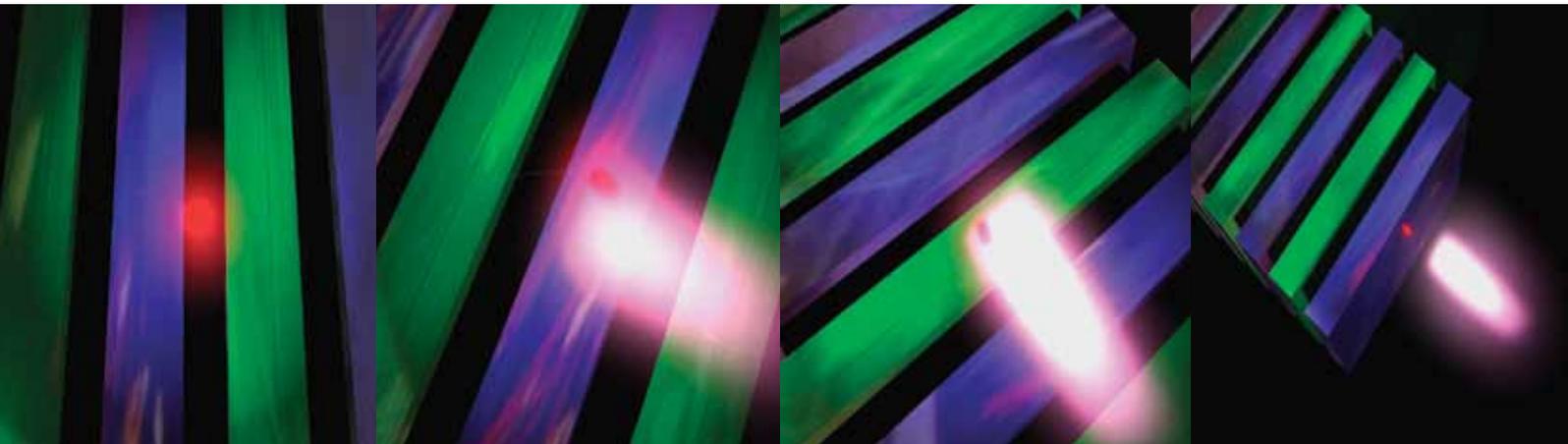
> In die fernen Weiten des Kosmos blicken die DESY-Forscher und ihre Kollegen mit dem Neutrinoobservatorium IceCube im Eis des Südpols, auf der Suche nach flüchtigen Geisterteilchen aus dem Weltall.

Ergänzend dazu ergründet die theoretische Teilchenphysik bei DESY das große Bild, das den vielen experimentellen Ergebnissen zugrunde liegt. ●

# STRAHL KRAFT.

## Lichtblitze für die Forschung

Ob in Medizin und Materialwissenschaften oder in der Grundlagenforschung – Röntgenstrahlen sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Die rasante Verbesserung der Lichtquellen hat dabei immer neue Forschungs- und Anwendungsbereiche eröffnet. Mittlerweile nutzen Wissenschaftler auf der ganzen Welt die intensive Röntgenstrahlung aus Teilchenbeschleunigern für ihre Experimente. Mit seiner einzigartigen Vielfalt von Lichtquellen ist das Forschungszentrum DESY ganz vorn mit dabei.



### Vorreiter DESY

Seit dem ersten Einsatz von Beschleunigern als Synchrotronstrahlungsquellen in den 1960er Jahren ist DESY einer der Vorreiter auf diesem Gebiet. An den DESY-Beschleunigern wurden bahnbrechende Experimente durchgeführt – zum Beispiel der erste Einsatz der Synchrotronstrahlung in der Biologie 1971, die ersten Messungen von Mößbauer-Spektren mit Synchrotronstrahlung 1984 und die ersten Untersuchungen des Magnetismus mit Hilfe der Röntgenabsorptionsspektroskopie 1987. Heute nutzen mehr als 2000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt jährlich die Lichtquellen bei DESY für die Forschung mit Photonen.

### Licht der Zukunft

Im Jahr 2009 ging die neue Speicherringanlage PETRA III bei DESY in Betrieb, die weltbeste Synchrotronstrahlungsquelle im Bereich der harten Röntgenstrahlung. Schon in der ersten Zeit konnten die Nutzer äußerst vielversprechende Experimente durchführen. Bis Ende 2011 werden alle Strahlführungen der ersten Phase an PETRA III in Betrieb sein. In Verbindung mit dem Speicherring DORIS III, der für Experimente mit hohem Photonenfluss besonders geeignet ist und PETRA III hervorragend ergänzt, steht der nationalen und internationalen Nutzergemeinschaft bei DESY damit eine einzigartige Kombination von Synchrotronstrahlungsanlagen zur Verfügung.

Mit den heutigen Synchrotronstrahlungsquellen lassen sich vor allem Gleichgewichtszustände der Materie untersuchen. Doch die Forscher träumen davon, physikalische oder biologische Systeme „in Aktion“ zu beobachten, also von statischen Bildern zu richtigen Filmen überzugehen. Die Art von Strahlung, die für solche zeitaufgelösten Beobachtungen notwendig ist, kann nur von neuartigen Röntgenquellen erzeugt werden: Röntgenlasern mit linearen Teilchenbeschleunigern. Auch hier ist DESY einer der Vorreiter der aktuellen Entwicklungen.

Seit 2005 steht bei DESY der einzigartige Freie-Elektronen-Laser im weichen Röntgenbereich FLASH zur Verfügung. Bereits während der ersten Messperioden konnten bahnbrechende Ergebnisse erzielt werden, die Maßstäbe setzen. Die Vielzahl der bisher veröffentlichten, international vielbeachteten Forschungsergebnisse belegt den starken Einfluss von FLASH auf die Forschung mit Photonen weltweit. Ab 2011 wird die Anlage um eine zweite Tunnelstrecke und eine zweite Experimentierhalle erweitert (FLASHII). Damit lässt sich die Nutzerkapazität der Anlage mehr als verdoppeln und der großen Nachfrage gerecht werden.

Im Jahr 2015 folgt die Inbetriebnahme des Röntgenlasers European XFEL, der unter der Federführung von DESY entwickelt und vorbereitet wurde. Aufgrund seiner einzigartigen Verbindung von extremer Spitzenbrillanz mit sehr hoher mittlerer Brillanz wird der European XFEL in den verschiedensten Bereichen Neuland erschließen und es erlauben, spannende naturwissenschaftliche Fragestellungen zum ersten Mal zu erforschen. Ein weiterer Vorteil im Vergleich zu den Konkurrenzanlagen in Japan und den USA ist der laufende

Betrieb und die erfolgreiche Nutzung von FLASH, dem Prototypen für den European XFEL. So ist garantiert, dass die Nutzergemeinschaft des European XFEL optimal auf die Forschung mit dem neuen Röntgenlaser vorbereitet ist.

## Kooperationen für exzellente Forschung

Zu diesen einmaligen Anlagen kommen verschiedene Kooperationen, die den Spitzenplatz von DESY in der Forschung mit Photonen weiter ausbauen. Das „Center for Free-Electron Laser Science“ (CFEL) ist ein europaweit einmaliges Kompetenzzentrum für Forschung an und mit Lichtquellen der nächsten Generation. Über Fach- und Instituts-grenzen hinweg wird hier das Potenzial der neuen Freie-Elektronen-Laser ausgelotet. Das CFEL-Team von 110 Wissenschaftlern forscht erfolgreich an FLASH und dem Röntgenlaser LCLS in Kalifornien und produziert Ergebnisse der Spitzenklasse.

Zudem entsteht auf dem DESY-Campus in Hamburg das interdisziplinäre „Centre for Structural Systems Biology“ (CSSB). Mit Hilfe der DESY-Lichtquellen werden Infektionsforscher und Physiker am CSSB die Angriffe von Krankheitserregern atomgenau untersuchen und die molekularen Grundlagen von Krankheiten mit extrem hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung analysieren.

Um dem wachsenden Bedarf an nanotechnologischen Methoden an PETRA III und FLASH gerecht zu werden, plant DESY zudem die Errichtung eines Forschungslabors zur Herstellung, Manipulation und Analyse von Materialien und Strukturen auf der Nanoskala (NanoLab). ●

---

„Seit den 1960er Jahren ist DESY ein Vorreiter der Forschung mit Photonen. Jährlich kommen über 2000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt nach Hamburg, um an den DESY-Lichtquellen zu forschen. Das einzigartige Angebot an Lichtquellen ebenso wie wegweisende Kooperationen mit nationalen und internationalen Partnern garantieren auch in Zukunft DESYs Platz an der Weltspitze der Forschung mit Photonen.“

---



Prof. Dr. Edgar Weckert

DESY-Direktor für den Bereich Forschung mit Photonen



# ENERGIE BÜNDEL.

## Wie aus Teilchen Licht entsteht

Ob in Physik, Chemie, Geologie, Biologie, Materialforschung oder Medizin – das Licht aus den DESY-Beschleunigern bietet eine breite Palette von Untersuchungsmöglichkeiten. Erzeugt wird die begehrte Strahlung von winzigen Teilchen, die auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.

In ringförmigen Beschleunigern, so genannten Speicherringen, rasen die Teilchen praktisch mit Lichtgeschwindigkeit auf einer kreisförmigen Bahn und werden dabei beschleunigt. Ähnlich den Fahrgästen eines Kettenkarussells, die durch die Kette auf einer Kreisbahn gehalten werden, werden die Teilchen in der Kurve durch Magnetfelder in Richtung Mittelpunkt gelenkt. Das Ergebnis dieser Radialbeschleunigung: In den Ablenkmagneten im Kreisbogen geben die Teilchen einen beträchtlichen Teil ihrer Energie ab, indem sie einen intensiven, gebündelten Lichtstrahl aussenden. Bereits 1947 entdeckte der US-amerikanische Techniker Floyd Haber an einem Elektronenbeschleuniger seines Arbeitgebers General Electric ein gleißendes Licht. Da es sich bei diesem Beschleuniger um ein so genanntes Synchrotron handelte, wurde dieses Licht fortan als Synchrotronstrahlung bezeichnet.

---

### Steckbrief Synchrotronstrahlung

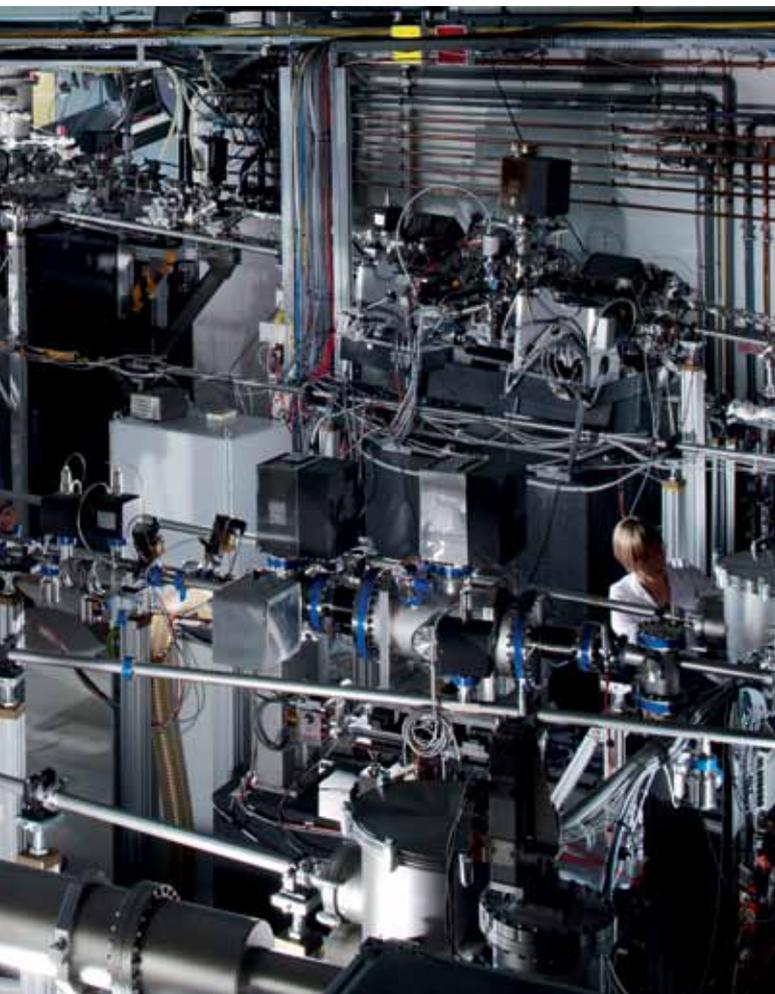
#### Das Licht aus den Beschleunigern

- > ist extrem hell und intensiv
  - > besteht aus ultrakurzen Blitzen
  - > ist stark gebündelt, beim Freie-Elektronen-Laser sogar laserartig
  - > enthält sämtliche Farben des elektromagnetischen Spektrums von Infrarot bis Röntgenstrahlung
  - > ist exakt berechenbar
  - > ist linear und elliptisch polarisiert.
- 



## Das Licht aus dem Ring

Synchrotronstrahlung ist elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen, die vom Infraroten über das sichtbare Licht und die ultraviolette Strahlung bis hin zu den Röntgenstrahlen reichen. Schon in den 1950er Jahren zeigten erste Experimente, dass Synchrotronstrahlung ganz besondere Eigenschaften aufweist und sich hervorragend zur Untersuchung der verschiedensten Materialien eignet. Das größte Plus: Synchrotronstrahlung ist extrem intensiv. Besonders relevant ist das für den Röntgenbereich. Speicherringe strahlen um Größenordnungen intensiver als herkömmliche Röntgenröhren. Zudem ist der Strahl sehr stark gebündelt. Im Gegensatz zum Laserlicht ist Synchrotronstrahlung nicht einfarbig, sondern enthält – ähnlich wie Sonnenlicht – ein kontinuierliches Spektrum an Wellenlängen. Hinzu kommt, dass die Teilchen in kurzen Paketen im Speicherring kreisen. Die Folge: Anstatt wie ein Laserzeiger einen Dauerstrahl von sich zu geben, produziert der Beschleuniger in schneller Abfolge ultrakurze Lichtblitze. Damit können die Forscher auch dynamische Prozesse im Mikrokosmos verfolgen. Des Weiteren ist Synchrotronstrahlung polarisiert – das Licht schwingt nur innerhalb bestimmter Ebenen. Dies lässt sich beispielsweise für die Untersuchung magnetischer Materialien verwenden. Alle diese Vorteile haben die Synchrotronstrahlung zu einem wichtigen Forschungswerkzeug werden lassen.



## Magnetparcours

In den heutigen Speicherringen wird Synchrotronstrahlung nicht allein in den Ablenkmagneten erzeugt, die die Teilchen auf ihrer Kreisbahn halten. Zusätzlich werden meterlange spezielle Magnetstrukturen eingebaut, so genannte Wiggler und Undulatoren. Sie bestehen aus einer Folge von sich abwechselnden Nord- und Südpolen. Durchlaufen lichtschnelle Elektronen diesen Magnetparcours, so werden sie auf einen Slalomkurs gezwungen. Aufgrund der vielen, hintereinander geschalteten Magnetpole senden die Elektronen einen weit aus intensiveren Lichtstrahl aus als in einem einzelnen Ablenkmagneten. Beim Wiggler ist die Synchrotronstrahlung bis zu hundertfach intensiver als bei Ablenkmagneten. Ein Undulator erreicht bei bestimmten Wellenlängen sogar das Tausendfache, da sich die Wellenzüge konstruktiv überlagern und dabei gegenseitig verstärken.

## Geradewegs zum Erfolg

Als Lichtquellen der nächsten Generation erzeugen Freie-Elektronen-Laser (FEL) Strahlung, die nochmals um Größenordnungen intensiver ist als die aus Speicherringen. Zudem besitzt sie die Eigenschaften von Laserlicht und wird in ultrakurzen Pulsen geliefert, was einzigartige Experimente ermöglicht.

Statt in einem ringförmigen Beschleuniger wie bei den Speicherring-Strahlungsquellen, werden die Elektronen in den neuartigen FEL-Strahlungsquellen mit einem Linearbeschleuniger auf hohe Energien gebracht. Bei den Freie-Elektronen-Lasern FLASH und European XFEL ist der Beschleuniger supraleitend, und es kann ein äußerst feiner und gleichmäßiger Elektronenstrahl von extrem hoher Qualität erzeugt werden – die Voraussetzung dafür, einen Freie-Elektronen-Laser überhaupt im Röntgenbereich betreiben zu können. Die hochbeschleunigten Elektronen fliegen anschließend durch einen langen Undulator, eine periodische Magnetanordnung, die sie auf einen rasanten Slalomkurs zwingt. Nach dem SASE-Prinzip der selbstverstärkten spontanen Emission (*Self-Amplified Spontaneous Emission*) verstärken sich die von den Elektronen entlang des Undulators abgegebenen Strahlungsblitze immer mehr, bis schließlich extrem kurze und intensive Röntgenblitze mit den Eigenschaften von Laserlicht entstehen.

## Experimente mit Licht

Vom Beschleuniger aus, in dessen Magnetstrukturen die Synchrotron- oder FEL-Strahlung erzeugt wird, führen luftleere Edelstahlrohre sie bis zum Messplatz, wo das eigentliche Experiment stattfindet. So genannte Monochromatoren filtern bei Bedarf aus dem Licht die gewünschte Wellenlänge heraus. Dann beleuchtet dieser Strahl die Probe, beispielsweise einen Kristall; deren „Reaktion“ wird von verschiedenen Arten von Detektoren gemessen. Bei der Auswertung der Messwerte helfen schnelle Messplatzrechner und ausgefeilte Computerprogramme. Jeder Messplatz ist für spezielle experimentelle Schwerpunkte und Messmethoden ausgerüstet. ●

# LICHT MASCHINEN.

## Strahlungsquellen bei DESY

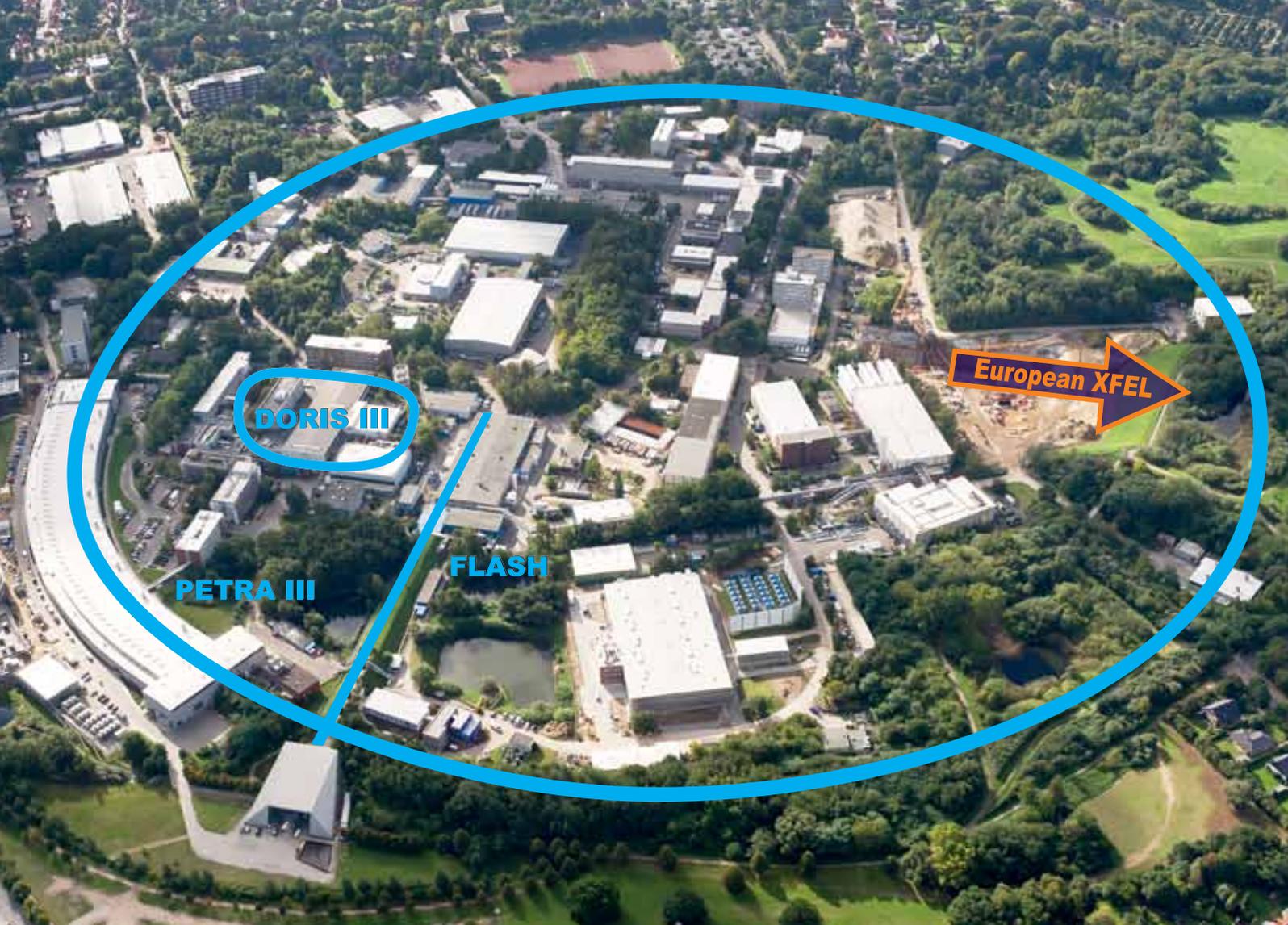
Im weltweiten Vergleich zeichnet sich die Forschung mit Photonen bei DESY durch die Vielfalt der Lichtquellen aus. In anderen, ähnlichen Forschungseinrichtungen steht meist ein einziger Beschleuniger für die Lichterzeugung zur Verfügung, der speziell für bestimmte Strahlungseigenschaften ausgelegt ist. Bei DESY dagegen ergänzen sich die vorhandenen und geplanten Lichtquellen auf ideale Weise. So erhalten die Wissenschaftler bei DESY exakt die Strahlung, die sie für ihre Experimente brauchen.

### DORIS III

Der knapp 300 Meter lange Speicherring DORIS III ist seit 1974 in Betrieb. Er wurde zunächst parallel für die Teilchenphysik und die Forschung mit Synchrotronstrahlung genutzt, seit 1993 dient er – nach einem entsprechenden Umbau – ausschließlich zur Erzeugung von Strahlung. Als zuverlässiges „Arbeitspferd“ unter den Lichtquellen bei DESY bietet DORIS III 36 Messplätze mit 45 im Wechsel betriebenen Instrumenten, größtenteils für Röntgen-, aber auch für ultraviolette Strahlung. Die in DORIS III beschleunigten Positronen erzeugen die Strahlung in den Kurven des Ringes – in den Ablenkmagneten, welche die Teilchen auf ihrer Kreisbahn halten. Weitaus intensivere Strahlung wird außerdem in zusätzlich eingebauten meterlangen Spezialmagneten produziert, so genannten Wiggler und Undulatoren, die die Positronen auf einen rasanten Slalomkurs bringen.

### PETRA III

Der 2,3 Kilometer lange Speicherring PETRA diente lange Zeit der Teilchenphysik; für die Forschung mit Photonen standen Testmessplätze für Experimente mit harter Röntgenstrahlung zur Verfügung. Die Zukunft von PETRA steht ganz im Zeichen der Lichterzeugung: Vom Sommer 2007 an wurde der Beschleuniger umgebaut, im Jahr 2009 nahm er unter dem Namen PETRA III als weltweit brillanteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle den Nutzerbetrieb auf. Für die Umrüstung mussten knapp 300 Meter des Rings komplett umgebaut und eine neue Experimentierhalle errichtet werden. Im Endausbau hat PETRA III 14 Messplätze mit bis zu 30 Instrumenten. Auch hier garantiert der Einbau mehrerer maßgeschneiderter Undulatoren, die Röntgenstrahlung mit besonders hoher Brillanz liefern, den Nutzern aus aller Welt exzellente Forschungsmöglichkeiten.



## FLASH

Seit 2005 steht bei DESY eine einmalige, neuartige Lichtquelle zur Verfügung: FLASH, der weltweit einzige Freie-Elektronen-Laser im Vakuum-Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich. Die 260 Meter lange Anlage spielt in mehrfacher Hinsicht eine Vorreiterrolle. Als erster Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich mit supraleitendem Linearbeschleuniger liefert sie unentbehrliche Erkenntnisse für die Entwicklung von Beschleunigern und Röntgenlasern der Zukunft, wie dem European XFEL. Zugleich bietet sie Forschern fast aller Naturwissenschaften bisher nie dagewesene Experimentiermöglichkeiten. Bereits in den ersten Messperioden konnten die Wissenschaftler an FLASH spektakuläre neuartige Experimente durchführen. Entsprechend groß ist das Interesse an der Anlage. Als Nutzer-einrichtung bietet FLASH fünf Messplätze, an denen im Wechsel verschiedene Instrumente aufgebaut werden können. Ab 2011 wird die Anlage um eine zweite Tunnelstrecke und eine zweite Experimentierhalle erweitert (FLASHII).

## European XFEL

Er ist ein Highlight im wahrsten Sinne des Wortes: der Freie-Elektronen-Röntgenlaser European XFEL, der derzeit als europäisches Projekt mit maßgeblicher Beteiligung von DESY in der Metropolregion Hamburg entsteht. Als einzige Lichtquelle dieser Art in Europa wird der European XFEL hochintensive, ultrakurze Laserlichtblitze im harten Röntgenbereich erzeugen. Damit eröffnet der European XFEL völlig neue Forschungsmöglichkeiten für Naturwissenschaftler und industrielle Anwender aus aller Welt. Die 3,4 Kilometer lange Anlage reicht von DESY in Hamburg bis in die schleswig-holsteinische Stadt Schenefeld (Kreis Pinneberg), wo der Forschungscampus mit einer Experimentierhalle mit Platz für zehn Messstationen entsteht. Der European XFEL wurde im Februar 2003 im Grundsatz genehmigt. Im Juni 2007 gab das Bundesforschungsministerium grünes Licht für den Bau einer Startversion mit sechs Messplätzen, die von Deutschland und internationalen Partnern finanziert wird. Der Bau startet im Januar 2009, die Inbetriebnahme erfolgt 2015.

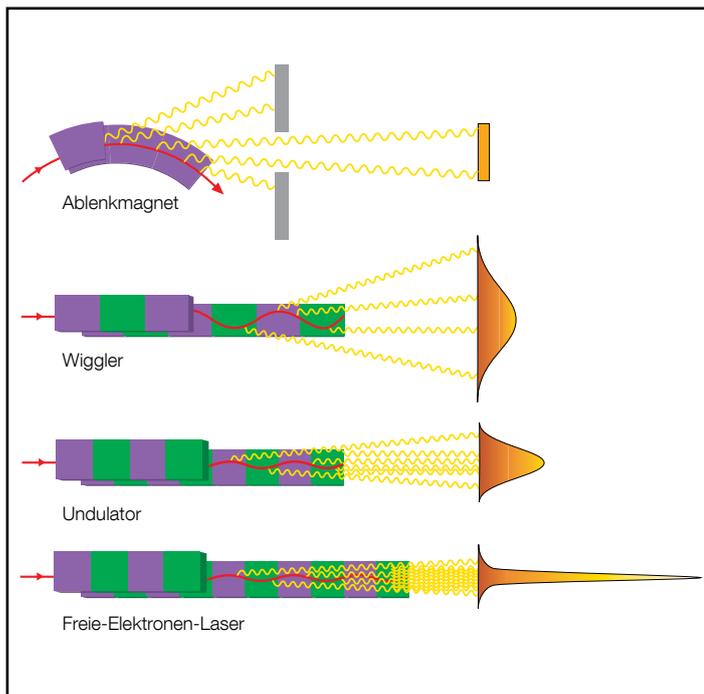
# STAMMBAUM.

## Die Dynastie der Lichtquellen

Der Andrang an den Lichtquellen ist groß. Weltweit nutzen derzeit etwa 40 000 Forscher das außergewöhnliche Licht aus Teilchenbeschleunigern, um die verschiedensten Materialien zu durchleuchten – Tendenz steigend. Zahlreiche Innovationen in der Materialforschung wären ohne das intensive Licht undenkbar, und nahezu 90 Prozent aller bei der weltweiten Proteindatenbank PDB eingereichten Kristallstrukturen von Eiweißen werden heutzutage mit Synchrotronstrahlung entschlüsselt. Lichtquellen wie die bisher leistungsstärksten Speicherringe ESRF in Frankreich, APS in den USA und SPring-8 in Japan sind stark überbucht – doch die Nachfrage wächst weiter. Die Entwicklung neuer, international konkurrenzfähiger Strahlungsquellen steht deshalb ganz oben auf der Prioritätenliste der Beschleunigerzentren.

### Die zweite Generation – DORIS III

Ein wichtiger Maßstab für die Leistungsfähigkeit einer Lichtquelle ist ihre Brillanz oder Leuchtstärke, ein Maß sowohl für die Anzahl der in einem bestimmten Wellenlängenbereich erzeugten Photonen als auch dafür, wie klein die Lichtquelle ist und wie eng gebündelt der Lichtstrahl ausgesandt wird. Je brillanter die an einer Lichtquelle erzeugte Strahlung, desto vielseitigere Experimente können damit durchgeführt werden, und auch die für eine Messung aufgewendete Zeit hängt stark von der Leuchtstärke ab.



Erzeugung von Strahlung in verschiedenen  
Arten von Magnetanordnungen



Der Speicherring DORIS III, der bei DESY seit 1993 ausschließlich als Synchrotronstrahlungsquelle eingesetzt wird, ist eine Lichtquelle der zweiten Generation. Im Gegensatz zu ihren Vorgängern der ersten Generation sind diese nicht nur mit Ablenkmagneten zur Lichterzeugung ausgestattet, sondern auch mit speziellen Magnetstrukturen, vorwiegend Wiggler, in denen bis zu tausend Mal mehr Licht produziert werden kann als in Ablenkmagneten. Aufgrund des relativ großen Querschnitts des Elektronenstrahls im Beschleuniger liefern diese Strahlungsquellen einen ziemlich breiten Lichtstrahl, der sich hervorragend für die Untersuchung von zentimeter- oder millimetergroßen Proben oder ganzen Werkstücken eignet, wie sie zum Beispiel in der Materialforschung üblich sind.

### Die dritte Generation – PETRA III

Möchte man jedoch kleinere Proben mit Größen im Bereich von Millimetern und Mikrometern (millionstel Metern) untersuchen oder Experimente durchführen, die nur mit stark gebündelter Strahlung möglich sind, so reichen die Lichtquellen der zweiten Generation nicht aus. Hier kommt die dritte Generation zum Zug, deren erste Vertreter in den 1990er Jahren in Betrieb gingen: eigens für die Strahlungserzeugung gebaute Speicherringe, die aufgrund des kleinen Strahlquerschnitts im Beschleuniger und des systematischen Einsatzes von Undulatoren eine um mehrere Größenordnungen höhere Brillanz liefern.

Experimente an diesen Quellen erreichen eine räumliche Auflösung im Sub-Mikrometer-Bereich. Da diese hochbrillante Strahlung auch einen gewissen Anteil an genau „im Gleichtakt“ schwingenden, also laserartig kohärenten Strahlen enthält, ließen sich damit spezielle Untersuchungen durchführen, die an den Quellen der zweiten Generation unmöglich waren. Mit der Lichtquelle PETRA III, die 2009 in Betrieb gegangen ist, steht bei DESY die weltbeste Strahlungsquelle der dritten Generation für harte Röntgenstrahlung zur Verfügung.

Bei ihren Bemühungen, noch höhere Brillanzen zu erreichen und möglicherweise sogar Synchrotronstrahlung mit echten Lasereigenschaften zu erzeugen, stießen die Lichtquellen-



Wiggler im Speicherring DORIS III

entwickler bald auf ein grundsätzliches Problem: In einem Speicherring kreisen die Elektronen über Stunden hinweg, wobei sie mehrere Millionen Mal pro Sekunde in den eingebauten Ablenkmagneten, Wigglern und Undulatoren Licht abstrahlen. Jedes Mal, wenn ein Elektron ein Lichtteilchen aussendet, wird es jedoch ganz leicht aus der Bahn geworfen. Diese Störungen beeinflussen den Teilchenstrahl so stark, dass er nicht beliebig eng gebündelt werden kann – es ist deshalb nahezu unmöglich, die Elektronenstrahlen in einem Speicherring nochmals sehr viel feiner zu machen, als es in den Lichtquellen der dritten Generation bereits der Fall ist. Damit schien jedoch auch die maximal erreichbare Brillanz an ihre Grenzen zu stoßen.

## Die vierte Generation – FLASH und European XFEL

Erst die jüngsten Durchbrüche in der Entwicklung leistungsfähiger Linearbeschleuniger für die Teilchenphysik brachten die entscheidende Wende. Sie ebneten den Weg für die Lichtquellen der vierten Generation, die Freie-Elektronen-Laser: Da die Elektronen in einer geradlinigen Anlage die Beschleunigungsstrecke und den anschließenden Undulator nur ein einziges Mal durchlaufen, treten in einer solchen Anlage deutlich weniger Störungen auf, so dass sich deutlich feinere Teilchenstrahlen herstellen lassen. Über einen besonderen Verstärkungsprozess erzeugen diese dann im Undulator extrem intensive Strahlungsblitze mit Lasereigenschaften.

Der Freie-Elektronen-Laser FLASH, der im Sommer 2005 bei DESY den Nutzerbetrieb aufgenommen hat, spielt eine Vorreiterrolle auf diesem Gebiet. Zwar wurden schon einige Jahre früher Freie-Elektronen-Laser im Infraroten und sichtbaren Bereich entwickelt, doch FLASH war die erste Anlage dieser Art, die Strahlung im Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich liefert. Nun gilt: Je kürzer die Wellenlänge der Strahlung, desto feinere Strukturen lassen sich damit erkennen. Die kurzwellige Röntgenstrahlung ist so begehrt, weil ihre Wellenlänge so klein ist, dass damit einzelne Atome beobachtet werden können.

Der erfolgreiche Nutzerbetrieb von FLASH mit ersten bahnbrechenden Experimenten hat die Realisierung von Röntgen-

lasern extrem hoher Brillanz in greifbare Nähe gerückt. Eine der weltweit geplanten Anlagen ist der Röntgenlaser European XFEL, der zurzeit in Hamburg und Schleswig-Holstein gebaut wird und dessen Inbetriebnahme für das Jahr 2015 vorgesehen ist. Dank ihrer Brillanz, ihrer Lasereigenschaften und insbesondere ihrer im Vergleich zu den Synchrotronstrahlungsquellen zehntausendfach kürzeren Lichtpulse eröffnen die Freie-Elektronen-Laser insbesondere im Röntgenbereich völlig neue Forschungsmöglichkeiten, die an den Quellen der dritten Generation wiederum undenkbar waren.

## Immer das passende Licht

Die verschiedenen Typen von Lichtquellen liefern also Strahlung ganz unterschiedlicher Eigenschaften, die jeweils für bestimmte Untersuchungen besonders geeignet sind. Somit konkurrieren die Lichtquellen nicht miteinander, sondern ergänzen sich gegenseitig. Denn jede Anwendung stellt ganz bestimmte Anforderungen an das verwendete Licht, die sich je nach Forschungsgebiet, Untersuchungsmethode, zu durchleuchtender Probe und Ziel des Experiments unterscheiden.

So steht bei DESY für Experimente, die einen hohen Photonfluss benötigen und millimetergroße Lichtstrahlen verwenden, die bewährte Synchrotronstrahlungsquelle DORIS III zur Verfügung. Am Speicherring PETRA III können die Nutzer Proben mit einer räumlichen Auflösung im Mikrometerbereich untersuchen, mit intensiver Strahlung, deren Spektrum weit in den harten Röntgenbereich hinein reicht. Der Freie-Elektronen-Laser FLASH ermöglicht völlig neuartige Experimente mit extrem intensiven, ultrakurzen Laserlichtpulsen im Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich. Und nach seiner Fertigstellung im Jahr 2015 wird der Röntgenlaser European XFEL Laserlichtblitze noch höherer Brillanz im harten Röntgenbereich liefern.

Zusammen mit dem European XFEL bieten die Lichtquellen bei DESY somit für jede Anwendung das perfekte Forschungswerkzeug – im weltweiten Vergleich ein entscheidender Wettbewerbsvorteil für die Forschung mit Photonen in Europa. ●

# RÖNTGEN BLICK.

## Experimentiermöglichkeiten bei DESY

Das Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB unterstützt und koordiniert die Forschung mit Photonen bei DESY. Die einmaligen Experimentiermöglichkeiten locken jährlich mehr als 2000 Forscher aus über 35 Ländern nach Hamburg. Einige Forschungsinstitute haben bei DESY ständige Außenstellen eingerichtet oder betreiben eigene Messstationen, beispielsweise für biologische Strukturforschung oder Materialforschung.

Das Hamburger Synchrotronstrahlungslabor versteht sich nicht nur als bloßer Anbieter von Messzeit an Lichtquellen, sondern vielmehr als eine echte Serviceeinrichtung für die Forschung. Die HASYLAB-Mitarbeiter stehen den Gastforschern mit Rat und Tat zur Seite. Ob in den Werkstätten bei der Lösung eines technischen Problems an einer Apparatur, bei der Informationssuche in der Bibliothek oder sogar bei der kompletten Umsetzung eines Experiments – bei HASYLAB erhalten die Gastwissenschaftler kompetente und umfassende Unterstützung rund um ihr Forschungsvorhaben. Auch deshalb wird das Hamburger Labor unter den Synchrotronstrahlungsforschern ganz besonders geschätzt.

### Das HASYLAB-Kooperationsmodell

Wollen Wissenschaftler einer Universität oder eines Instituts aus dem In- oder Ausland die DESY-Lichtquellen nutzen, können sie unter Begründung ihres Vorhabens Messzeit beantragen und nach entsprechender Bewilligung durch international besetzte Gutachterausschüsse für eine bestimmte Zeit an einem der HASYLAB-Messplätze experimentieren. Diese Nutzung ist kostenlos, wenn die Wissenschaftler ihre Ergebnisse, wie in der Grundlagenforschung üblich, der Fachwelt zugänglich machen.

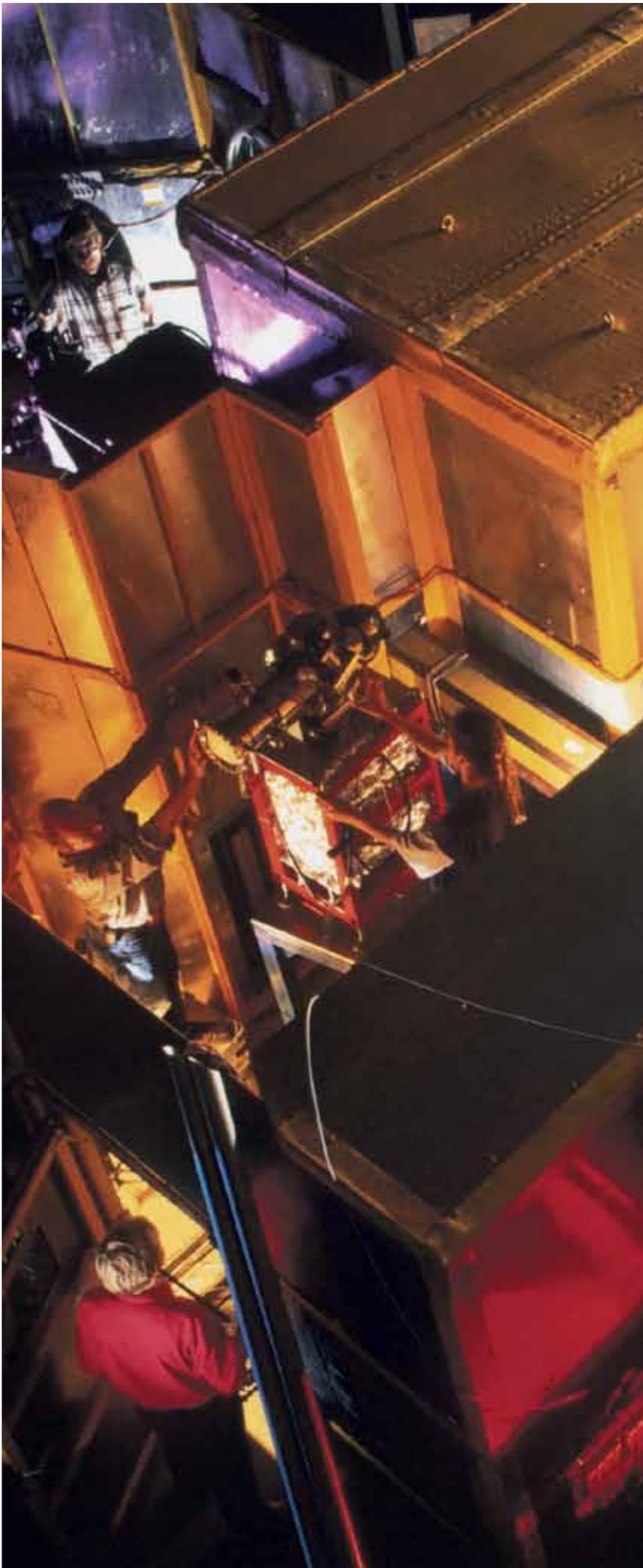
Für Industrieunternehmen, die anwendungsbezogene Experimente planen, bietet HASYLAB das „Kooperationsmodell“ an: Eine Firma schließt mit dem Hamburger Labor einen Koopera-

tionsvertrag ab und zahlt als Kostenbeteiligung eine jährliche Pauschale. Dafür erhält das Unternehmen einen schnellen, flexiblen Zugriff auf Messzeiten und wird bei seinen Experimenten durch eine spezielle Servicegruppe unterstützt. Danach kann die Firma die Ergebnisse exklusiv für die eigenen Belange nutzen. ●

---

### Externe Partner an den DESY-Lichtquellen

- > Center for Free-Electron Laser Studies (CFEL), eine Kooperation von DESY, der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) und der Universität Hamburg
  - > Centre for Structural Systems Biology (CSSB), ein interdisziplinäres Zentrum zur Strukturbiochemie unter Federführung des Helmholtz-Zentrums für Infektionsforschung (HZI)
  - > Europäisches Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL), Außenstelle Hamburg
  - > Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
  - > Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Materialforschung und Küstenforschung
  - > Institut für Experimentalphysik, Institut für Laser-Physik und Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität Hamburg
  - > Max-Planck-Gesellschaft (MPG), Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie
  - > Forschergruppen der Universitäten Aarhus (Dänemark), Kiel, der RWTH Aachen und der TU Darmstadt
-



## Lichtquellen bei DESY

### Steckbrief DORIS III

- > Ringbeschleuniger für Elektronen und Positronen
- > Länge: 289 Meter
- > seit 1993 Quelle für Synchrotronstrahlung
- > 36 Messplätze mit 45 im Wechsel betriebenen Instrumenten

### Steckbrief PETRA III

- > Ringbeschleuniger für Elektronen und Positronen
- > Länge: 2304 Meter
- > Weltbeste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle
- > seit 2009 Nutzerbetrieb
- > 14 Messplätze mit bis zu 30 Instrumenten

### Steckbrief FLASH

- > Freie-Elektronen-Laser mit supraleitendem Linearbeschleuniger in TESLA-Technologie
- > Gesamtlänge: 260 Meter
- > erzeugt extrem brillante Laserstrahlung im Vakuum-Ultravioletten (VUV) sowie im Bereich des weichen Röntgenlichts nach dem SASE-Prinzip (Wellenlänge zwischen 4 und 60 Nanometern einstellbar)
- > seit 2005 Nutzerbetrieb
- > fünf Messplätze

### Steckbrief European XFEL

#### Europäischer Freie-Elektronen-Röntgenlaser

- > europäisches Projekt mit starker Beteiligung von DESY
- > Freie-Elektronen-Laser mit supraleitendem Linearbeschleuniger in TESLA-Technologie
- > Gesamtlänge: ca. 3,4 km
- > erzeugt extrem brillante Laserstrahlung im Röntgenbereich nach dem SASE-Prinzip (Wellenlänge zwischen 0,05 und 6 Nanometern einstellbar)
- > Start der Inbetriebnahme im Jahr 2015
- > eine unterirdische Experimentierhalle mit Platz für 10 Messplätze

# ZUSAMMENARBEIT.

## Neue Kompetenzzentren

Derzeit entstehen auf dem DESY-Campus neue Kompetenzzentren von internationalem Format: Das Center for Free-Electron Laser Science (CFEL), das von DESY, der Max-Planck-Gesellschaft und der Universität Hamburg getragen wird, soll das Potenzial der neuen Freie-Elektronen-Laser ausloten. Das Centre for Structural Systems Biology (CSSB) ist ein interdisziplinäres Zentrum für Infektionsforschung, an dem Partner verschiedener norddeutscher Universitäten und Forschungseinrichtungen beteiligt sind. Diese engmaschige Vernetzung mit Partnern aus dem In- und Ausland macht DESY zu einem Ort von inspirierendem, innovationsfreudigem Charakter.



● Außen- und Innenansicht des CFEL-Gebäudes nach den Plänen des Architekturbüros hammeskrause

## CFEL – Einmaliges Kompetenzzentrum

Das Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) ist ein europaweit einmaliges Kompetenzzentrum für Forschung an und mit Lichtquellen der nächsten Generation, wie den Freie-Elektronen-Lasern FLASH in Hamburg, LCLS in Kalifornien und in Zukunft dem European XFEL in Hamburg und Schleswig-Holstein. Als neuartige Kooperation von DESY, der Max-Planck-Gesellschaft und der Universität Hamburg soll das Zentrum die Zusammenarbeit der universitären und außeruniversitären Forschung weiter intensivieren. Über Fach- und Instituts Grenzen hinweg wird am CFEL das Potenzial der neuen Freie-Elektronen-Laser ausgelotet.

CFEL wurde gegründet, um die wissenschaftlichen Möglichkeiten der neuesten Strahlungsquellen optimal auszuschöpfen. Mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen Femtosekunden (billiardstel Sekunden) und extremen Intensitäten (eine Million mal mehr als bisher) lassen sich mit diesen Lichtquellen der nächsten Generation dynamische Prozesse und strukturelle Änderungen von Atomen, Molekülen, Festkörpern, Plasmen oder von biologischen Systemen in Echtzeit beobachten und analysieren.

Die drei an CFEL beteiligten Partnerinstitutionen vereinen ihre Kompetenzen zur Erforschung struktureller Änderungen von Atomen, Molekülen, kondensierter Materie, Schmelzen oder biologischen Systemen und leisten damit einen fundamentalen Beitrag zur Erforschung dynamischer Prozesse in allen Bereichen der Materie. Forscher aus unterschiedlichen Disziplinen und Forschungsorganisationen treffen sich unter dem Dach des CFEL, um in einem anregenden Umfeld von Interdisziplinarität und Internationalität alle sich ergebenden Synergien zu nutzen. Insbesondere im Bereich der Bio- und Nanomaterialien setzt CFEL dabei neue Maßstäbe in der Forschung.

Im Juni 2009 wurde der Bau des CFEL-Gebäudes mit dem ersten Spatenstich begonnen, das Richtfest fand im Juli 2010 statt. Endgültig fertiggestellt wird das Gebäude voraussichtlich im Frühjahr 2012.

---

## Partner im CFEL

- Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
  - Max-Planck-Gesellschaft MPG
  - Universität Hamburg
-

## CSSB – Supermikroskope für die Infektionsforschung

Infektionsforscher und Physiker in Norddeutschland gehen in Zukunft gemeinsam auf die Jagd nach Krankheitserregern: Auf dem DESY-Campus in Hamburg entsteht unter der Federführung des Helmholtz-Zentrums für Infektionsforschung (HZI) das Centre for Structural Systems Biology (CSSB), ein interdisziplinäres Zentrum mit Partnern verschiedener Universitäten und Forschungseinrichtungen aus Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Ihr gemeinsames Ziel: den Angriffen von Krankheitserregern atomgenau auf die Spur zu kommen.

Krankheitserreger sind winzig, haben jedoch erhebliche Auswirkungen auf den Menschen. Noch viel kleiner sind die Werkzeuge, mit denen uns die Erreger infizieren: Das Wechselspiel von Molekülen auf ihrer Oberfläche verschafft ihnen den Zutritt in unseren Körper. Strukturbiologen entschlüsseln diese Interaktionen auf atomarer Ebene und untersuchen, wie Moleküle und Proteine aufgebaut sind. So verstehen die Forscher nicht nur, wie Wechselwirkungen von Krankheitserregern mit ihren Wirten ablaufen. Sie finden auch Angriffspunkte für neue Wirkstoffe, Anti-Infektiva und Impfstoffe. Systembiologen hingegen untersuchen biologische Systeme wie Zellen oder Krankheitserreger in ihrer Gesamtheit: Welche Prozesse laufen in einem Organismus zu einem bestimmten Zeitpunkt gleichzeitig ab? Sie sammeln und werten große Datenmengen über Stoffwechselprozesse oder Interaktionen von Proteinen aus.



Am 7. Januar 2011 unterzeichneten die Bundesforschungsministerin Prof. Dr. Annette Schavan (Mitte), die Hamburger Wissenschaftssenatorin Dr. Herlind Gundelach (rechts) und die niedersächsische Wissenschaftsministerin Prof. Dr. Johanna Wanka (links) die Bundesländer-Vereinbarung für den Bau des CSSB.

Das CSSB schlägt die Brücke zwischen Strukturbiologie und Systembiologie: Hier werden Biologen, Chemiker, Mediziner, Physiker und Ingenieure die Wechselwirkung von Krankheitserregern mit ihren Wirten untersuchen. Dazu stehen ihnen bei DESY deutschlandweit einmalige Lichtquellen zur Verfügung, die optimale Bedingungen für die Strukturbiologie bieten. Mit „Supermikroskopen“ wie PETRAIII und FLASH können die Forscher biologische Proben auf verschiedene Arten untersuchen – von der Strukturanalyse von Einzelmolekülen bis hin zur Echtzeit-Darstellung von Abläufen in lebenden Zellen – und die molekularen Grundlagen von Krankheiten mit extrem hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung analysieren.

Das CSSB-Forschungsgebäude soll am südlichen Ende der PETRAIII-Experimentierhalle auf dem DESY-Campus gebaut werden und die Arbeitsgruppen aller beteiligten Forschungseinrichtungen unter einem Dach vereinen. Dank des direkten Zugangs zur PETRA-Halle wird es in Zukunft viel besser möglich sein, die Strahlungsquellen bei DESY für biologische Fragestellungen zu nutzen. Nach Fertigstellung wird das CSSB auch ausländischen Forscherinnen und Forschern offenstehen und dadurch einen wichtigen Beitrag zur Stärkung internationaler Kooperationen leisten. Die Bund-Länder-Vereinbarung für den Bau des CSSB wurde im Januar 2011 bei DESY in Hamburg unterzeichnet. Der Baubeginn ist für 2012 geplant.

### Partner im CSSB

#### Hamburg

- > Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
- > Universitätsklinikum Eppendorf, Hamburg
- > Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
- > Heinrich-Pette Institut für Experimentelle Virologie und Immunologie, Hamburg
- > Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin, Hamburg

#### Niedersachsen

- > Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung, Braunschweig
- > Medizinische Hochschule Hannover

#### Schleswig-Holstein

- > Universität zu Lübeck
- > Forschungszentrum Borstel, Leibniz-Zentrum für Medizin und Biowissenschaften

#### Nationale und internationale Partner

- > European Molecular Biology Laboratory EMBL
- > Forschungszentrum Jülich

# WISSENS WERTE.

## Beispiele aus der Forschung

Das intensive Licht aus den Beschleunigern bei DESY lässt tief blicken. Die vielseitige Strahlung eignet sich für Untersuchungen an so unterschiedlichen Materialien wie Halbleiterkristallen, Werkstoffen der Nanotechnologie oder Proteinen – den Bausteinen des Lebens. Ausgewählte Forschungsbeispiele zeigen einen kleinen Ausschnitt aus dem breiten Spektrum von Experimentiermöglichkeiten, die Wissenschaftler aus aller Welt an den Beschleunigern FLASH, DORIS III und PETRA III in Hamburg nutzen können.



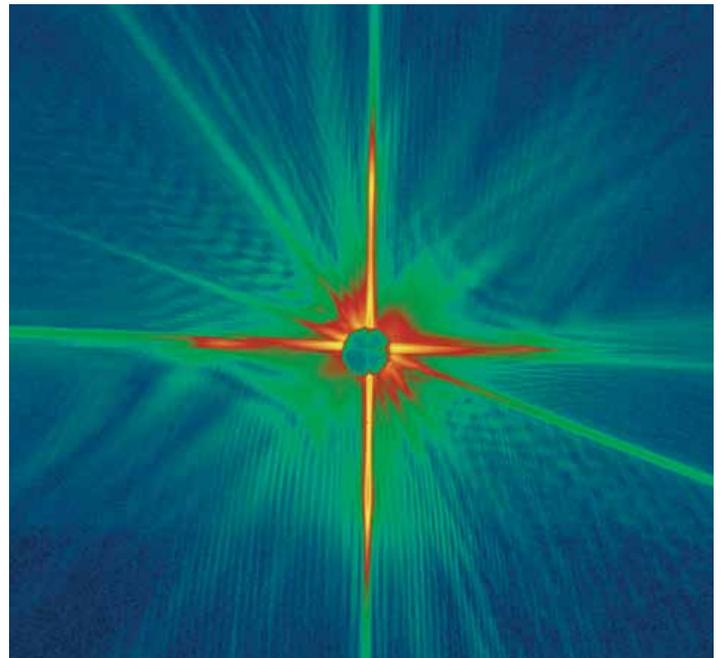
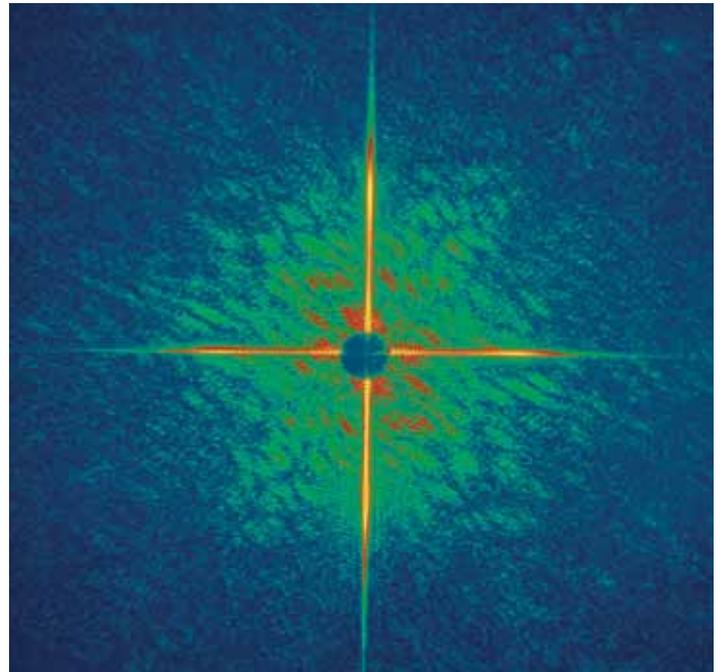


„FLASH, what a picture!“ titelte die Zeitschrift *nature physics*. Was die *nature*-Redakteure so begeisterte, war ein an der FLASH-Anlage aufgenommenes Bild von zwei winzigen Strichmännchen unter einer ebenso winzigen Sonne. Das mag auf den ersten Blick nach Spielerei klingen, in Wirklichkeit markiert das „Blitzbild“ jedoch einen bedeutenden Durchbruch in der Experimentiertechnik. Gleich in einem der ersten Experimente an FLASH gelang es den Forschern, mit einem einzigen Laserblitz ein detailliertes Beugungsbild der nur wenige Mikrometer kleinen Probe aufzunehmen – bevor sie durch das intensive Licht zerstört wurde. Ein weiterer Clou: Die Strichmännchen und ihre Sonne wurden in eine dünne Membran geritzt, die Probe war also nicht kristallförmig – und trotzdem reichte ein einzelner Laserblitz aus, um ein aussagekräftiges Bild zu erzeugen.

Diese erste Anwendung der Blitzbild-Methode (*flash diffractive imaging*) zeigt, dass es schon bald möglich sein sollte, mit einem einzigen ultrakurzen, extrem intensiven Laserpuls Bilder von Nanoteilchen oder sogar von einzelnen großen Makromolekülen aufzunehmen. Damit verspricht die neue Methode einzigartige Möglichkeiten, die Dynamik von Nanoteilchen und die Struktur großer Biomoleküle, Viren oder Zellen zu untersuchen, ohne die Proben vorher aufwendig kristallisieren zu müssen, wie es bei der herkömmlichen Röntgenstrukturanalyse erforderlich ist.

Bildgebende Verfahren sind oft dadurch begrenzt, dass die Strahlung, mit der das Bild erzeugt wird, die Probe beschädigt, oder zu wenig Signal an den Nachweisgeräten ankommt. Das lässt sich beispielsweise vermeiden, indem man die zu untersuchenden Moleküle in eine Kristallform bringt, so dass sehr viele von ihnen gleichzeitig untersucht werden können. Diese Methode hat jedoch einen Haken: Der Kristallisationsprozess ist meist nur äußerst schwierig zu realisieren. Das bedeutet insbesondere für die Lebenswissenschaften eine harte Einschränkung, da sich gerade Biomoleküle nur sehr schwer oder gar nicht in eine Kristallform zwingen lassen.

Es gibt jedoch einen Weg, das Problem zu umschiffen. Man muss das Bild schneller aufnehmen, als die Probe von der Strahlung zerstört werden kann – möglichst mit einem so intensiven Lichtpuls, dass bereits ein einziger Blitz ausreichend Signal erzeugt. Dieser Ansatz hat auch den Vorteil, dass die Kristallisation entfällt: Für die Aufnahme eines Blitzbilds wird nur ein einziger Molekülkomplex benötigt, der mit einem einzelnen ultrakurzen, intensiven Röntgenlaserpuls bestrahlt wird. Aus vielen dieser Beugungsbilder lässt sich dann die räumliche Anordnung der Atome ermitteln. Dass die Methode tatsächlich funktioniert, konnte das internationale Forscherteam dank FLASH beweisen.

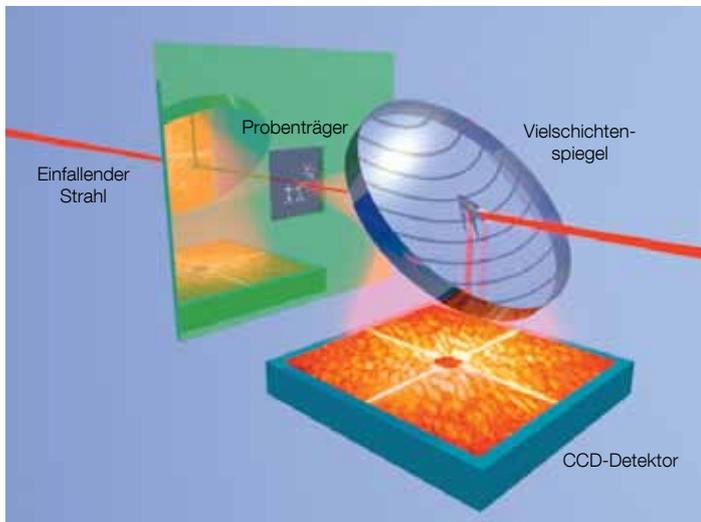


- Oben: Beugungsbild einer Probe, aufgenommen mit einem einzigen ultrakurzen, extrem intensiven und kohärenten Laserblitz aus dem Freie-Elektronen-Laser FLASH.
- Unten: Beugungsbild derselben Probe nach ihrer Zerstörung durch den ersten Laserpuls.

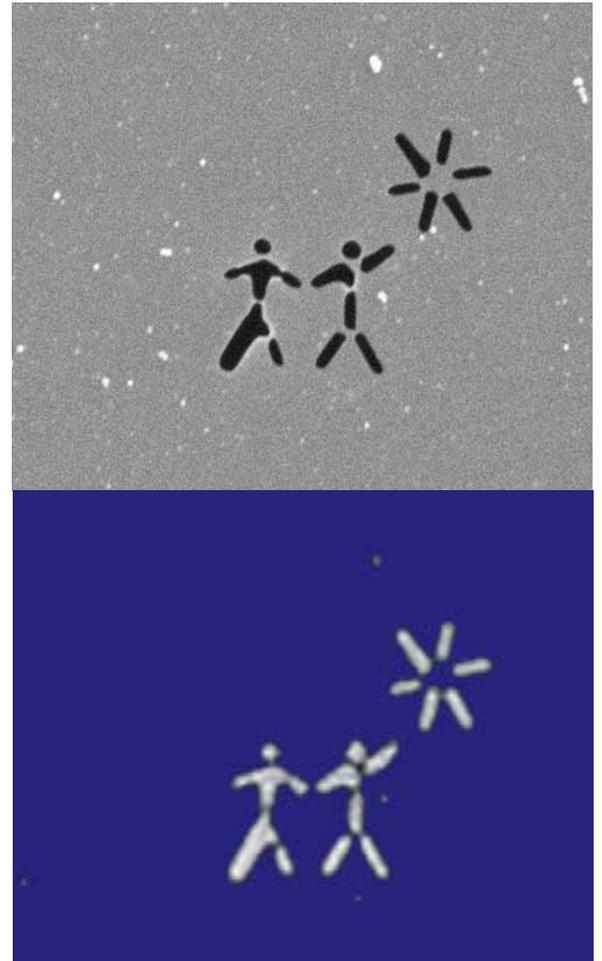
## Das Blitzbild-Experiment im Detail

Für die Blitzbild-Aufnahme bestrahlten die Forscher eine dünne Membran, in die ein 3 Mikrometer breites Muster – zwei Cowboys unter einer Sonne – geritzt worden war, mit einem FLASH-Lichtblitz von 32 Nanometern Wellenlänge und nur 25 Femtosekunden Dauer. Die Energie des Laserpulses heizte die Probe auf etwa 60 000 Grad Celsius auf, so dass sie verdampfte. Dem Team gelang es jedoch, ein Beugungsmuster aufzunehmen, bevor die Probe zerstört wurde. Das daraus mit speziellen Rechenmethoden ermittelte Bild zeigte keine Strahlenschäden, das Testobjekt konnte bis zur maximal möglichen Auflösung rekonstruiert werden. Schäden an der Probe traten erst auf, nachdem der ultrakurze Laserpuls sie durchquert hatte.

- > Mikrometer: millionstel Meter
- > Nanometer: milliardstel Meter
- > Femtosekunde: milliardstel Sekunde



Schematische Darstellung des Blitzbild-Experiments am Freie-Elektronen-Laser FLASH



Oben: Die Probe unter dem Rasterelektronenmikroskop – zwei Strichmännchen unter einer Sonne, in eine nur wenige Nanometer dicke Membran geritzt  
Unten: Rekonstruktion des Musters aus dem aufgenommenen Beugungsbild

Das Blitzbild-Prinzip verspricht eine Revolution der Strukturforschung in den Naturwissenschaften – und zwar immer dort, wo Bilder mit sehr hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung benötigt werden. Da das neue Abbildungsverfahren ohne Linsen auskommt, lässt sich die Methode bis hin zur atomaren Auflösung weiterentwickeln, sobald Röntgenlaser mit noch kürzerer Wellenlänge zur Verfügung stehen. Damit untermauert das FLASH-Experiment auch die großen Hoffnungen auf die revolutionären Messmöglichkeiten an den neuen Freie-Elektronen-Lasern im harten Röntgenbereich, der Linac Coherent Light Source LCLS in Stanford (USA) oder dem European XFEL in Hamburg und Schleswig-Holstein.

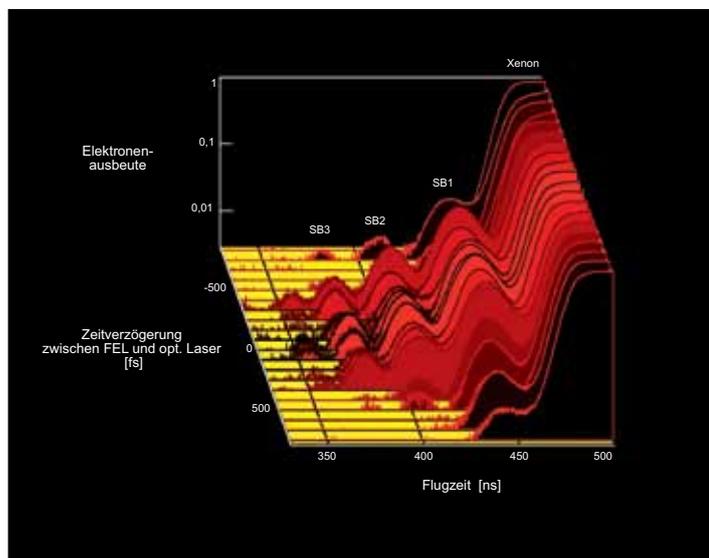
- > Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Deutschland
- > Spiller X-ray Optics, USA
- > Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, SLAC National Accelerator Laboratory, USA
- > Technische Universität Berlin, Deutschland
- > University of California, Davis, USA
- > University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, USA
- > Universität Uppsala, Schweden

# SNAPPSSCHUSS.

Richtig blitzen mit FLASH

Wenn es darum geht, schnelle Reaktionen zeitaufgelöst, also quasi wie in einem Film zu verfolgen, ist die „Pump-Probe-Technik“ das Mittel der Wahl. Dabei kommen zwei ultrakurze Lichtblitze zum Einsatz: Der erste löst eine photochemische Reaktion aus, der zweite blitzt sie unmittelbar darauf. Eine Serie solcher Momentaufnahmen mit verschiedenen Zeitabständen zwischen dem ersten und dem zweiten Lichtpuls ergibt schließlich einen Film des Reaktionsablaufs.

Die ultrakurzen Lichtblitze aus dem Freie-Elektronen-Laser FLASH eröffnen hier ganz neue Möglichkeiten – so ließen sich bestimmte Reaktionen mit einem Blitz aus einem optischen Laser anregen und mit der FLASH-Strahlung abfragen, oder umgekehrt. Dafür muss jedoch eine wichtige Voraussetzung erfüllt sein: Um den Schnappschuss jeweils zu einem genau definierten Zeitpunkt auszulösen und die maximal mögliche Zeitauflösung zu erreichen, müssen die beiden Laserpulse synchronisiert sein, d.h. der zeitliche Abstand zwischen ihnen muss mit einer Genauigkeit einstellbar sein, die etwa der Dauer der Pulse entspricht – also auf einige Femtosekunden (billiardstel Sekunden) genau.



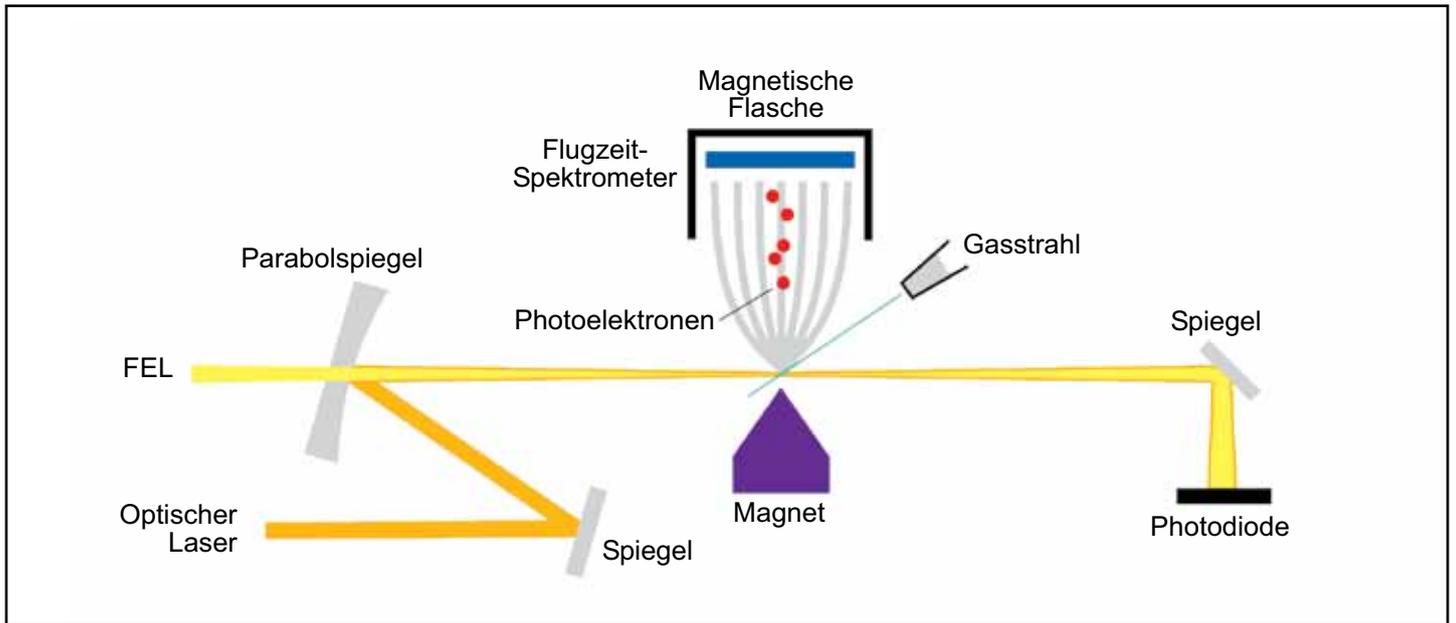
Charakteristische Seitenbänder (SB) in den Energiespektren zeigen an, wie gut die Lichtblitze von FLASH mit denen eines optischen Lasers zeitlich überlappen.

Einem internationalen Wissenschaftlerteam ist an FLASH eine solche Kombination gelungen: Die Forscher kombinierten Lichtpulse aus einem optischen Laser im infraroten bzw. grünen Bereich mit den ultrakurzen Blitzen aus der FLASH-Anlage und bestrahlten damit Edelgasatome wie Xenon oder Helium. Dabei wurde der zeitliche Abstand zwischen den Lichtblitzen verändert, indem der optische Laserstrahl durch eine variable Verzögerungsstrecke geschickt wurde. Durch die kombinierten Lichtblitze werden aus den Edelgasatomen Elektronen herausgeschlagen (Photoionisation), deren Energieverteilung anschließend in einem Detektor nachgewiesen wurde.

Da die Elektronen mit Photonen aus zwei verschiedenen Blitzen bestrahlt werden, können sie Energie in entsprechend unterschiedlichen Mengen aufnehmen. Dadurch entstehen in den gemessenen Energiespektren charakteristische Seitenbänder, bei denen ein Elektron beispielsweise ein FLASH-Photon und ein Laserphoton absorbiert hat. Da die Form und Intensität dieser Seitenbänder vom zeitlichen Überlapp zwischen den beiden Lichtpulsen abhängt, lässt sich aus dem Verlauf der gemessenen Spektren die relative Zeitverzögerung zwischen den Laserblitzen ermitteln – die unentbehrliche Voraussetzung dafür, mit FLASH zeitaufgelöste Experimente durchzuführen.

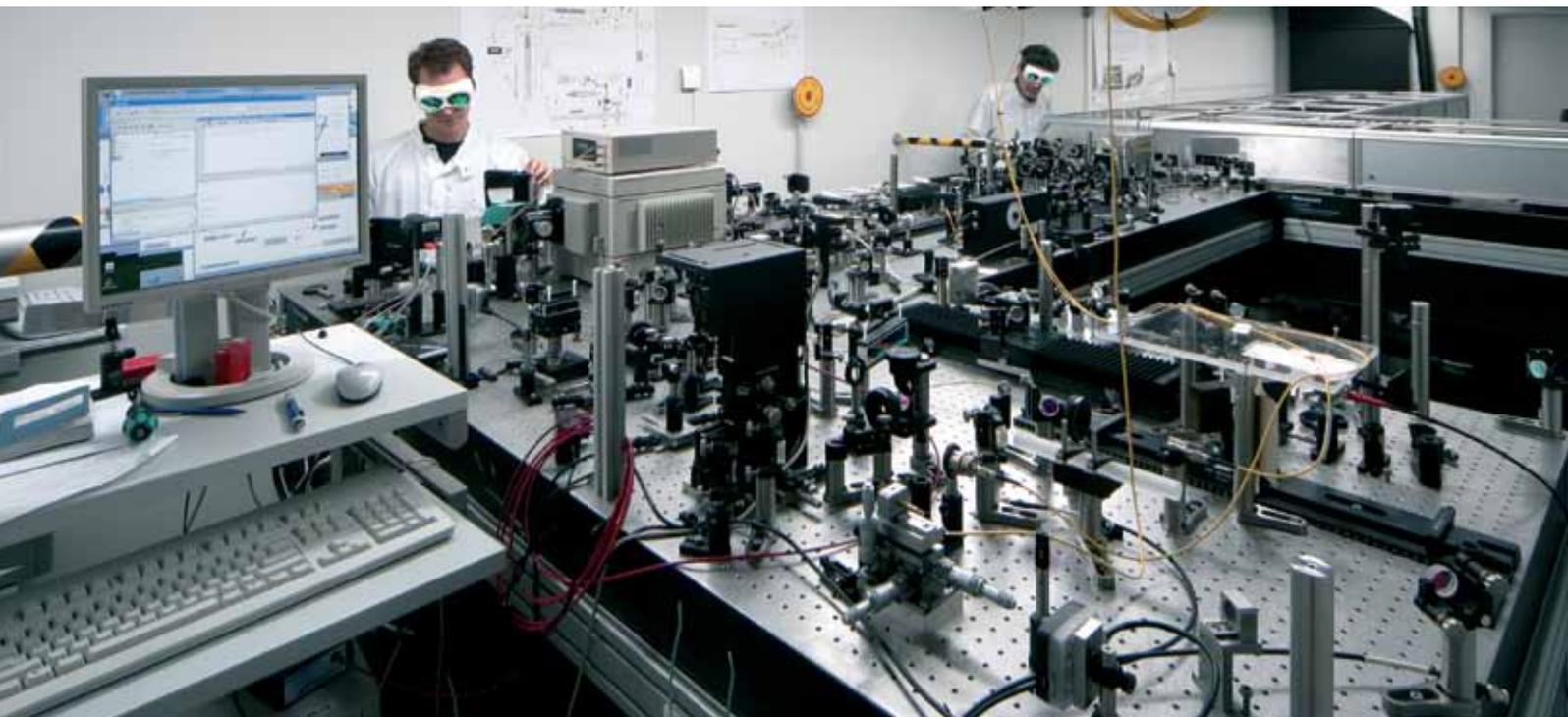
Die Messung der Seitenbänder gelang den Forschern sogar mit einzelnen FLASH-Blitzen, also nicht etwa gemittelt über eine große Vielzahl von Pulsen. So konnten sie den zeitlichen Abstand zwischen dem FLASH-Puls und dem optischen Laserblitz mit einer Genauigkeit von weniger als 50 Femtosekunden bestimmen. Durch diese erfolgreiche Kombination von zwei sehr unterschiedlichen Lasertypen demonstrierten sie klar das Potenzial von Pump-Probe-Experimenten mit kurzweiligem Freie-Elektronen-Laser und optischem Laser – die sich sogar mit einzelnen FLASH-Lichtblitzen durchführen lassen sollten.

- > Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Deutschland
- > Dublin City University, Irland
- > LIXAM/CNRS, Centre Universitaire Paris-Sud, Orsay, Frankreich
- > Queen's University Belfast, UK
- > Université Pierre et Marie Curie, Paris, Frankreich



● Schematische Darstellung des Experimentieraufbaus

Bei FLASH kann zusätzlich ein optisches Lasersystem mit den Lichtblitzen von FLASH synchronisiert werden, um mittels der „Pump-Probe-Technik“ den Ablauf schneller Reaktionen zeitaufgelöst zu verfolgen.



# STERNENFEUER.

Sternmaterie im Röntgenblick von FLASH

Sternmaterie mit einem Laser zu röntgen – das ist Wissenschaftlern vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, der Universität Hamburg und DESY dank der Röntgenlaserblitze von FLASH gelungen. Anders als ihre Kollegen an Satelliten und Teleskopen studierten die Forscher das leuchtende Plasma von Sternatmosphären direkt im Labor: In einer speziellen Apparatur erzeugten sie bei Temperaturen von rund einer Million Grad Celsius hochgeladene Eisen-Ionen, wie sie unter anderem auch in der Korona der Sonne vorkommen.

Unter solch extremen Bedingungen verlieren Atome die meisten ihrer Elektronen, beispielsweise behält ein Eisenatom von insgesamt 26 nur noch die drei, die am stärksten an den Kern gebunden sind. Diese verbleibenden Elektronen zeigen ungewöhnliche Eigenschaften: Sie halten sich in der Nähe, manchmal sogar innerhalb des Atomkerns auf und spüren dadurch dessen elektrische und magnetische Kraftfelder besonders stark. Daraus ergeben sich Verschiebungen der atomaren Spektrallinien, die im neutralen Atom in schwächerer Form zwar auch auftreten, jedoch im komplizierten Wechselspiel der vielen Elektronen kaum auszumachen sind. Beschrieben werden diese Phänomene durch die Quantenelektrodynamik (QED), die derzeit genaueste aller physikalischen Theorien und einer der Grundpfeiler des modernen physikalischen Verständnisses. Die präzise Vermessung hochgeladener Ionen erlaubt es nun, wichtige theoretische Vorhersagen der QED experimentell zu überprüfen – was das große Interesse der Physiker an diesem Sternenfeuer im Labor erklärt.

Die hochgeladenen Ionen stellten die Wissenschaftler in einer speziellen Ionenfalle her, einer *Electron Beam Ion Trap* (EBIT): Ein scharf fokussierter Elektronenstrahl ionisierte die Atome im Inneren der EBIT bis zum gewünschten Ladungszustand. Gleichzeitig hielten starke elektrische und magnetische Felder die Ionen gefangen. Die Forscher produzierten so einige Millionen hochgeladene Ionen, konzentriert auf das Volumen eines Haars: Fünf Zentimeter lang, aber gerade mal 250 Mikrometer dick war das Ionenwölkchen, auf das sie die Röntgenblitze von FLASH lenkten. Mit Hilfe der Resonanzfluoreszenzspektroskopie gelang es ihnen so erstmals, eine Spektrallinie dieser Ionen zum Leuchten anzuregen





und präzise zu vermessen. Anhand des Fluoreszenzsignals bestimmten sie die Frequenz eines elektronischen Übergangs von 23-fach positiv geladenem Eisen auf wenige Millionstel genau. Damit übertraf die Präzision der Messung bereits in diesem ersten Experiment die Genauigkeit der theoretischen Vorhersage. Die Forscher konnten somit nicht nur präzise Informationen über die Struktur dieser weitgehend unbekanntes Sternmaterie gewinnen, sondern auch wichtige Voraussagen der QED überprüfen. Die Präzision der Messung soll in Zukunft nochmals um das Hundertfache verbessert werden.

Möglich wurde das Experiment erst dank FLASH: Da hochgeladene Ionen Strahlung bei vergleichbar kurzen Wellenlängen aufnehmen und aussenden, konnten sie erst mit den Röntgenlaserpulsen von FLASH direkt zum Fluoreszieren angeregt werden. Die Wellenlänge, die FLASH aussendet, lässt sich zudem variieren, und erfüllt damit alle wesentlichen Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Resonanzfluoreszenzspektroskopie. Künftig wollen die Physiker noch einen Schritt weiter gehen: Sie wollen messen, wie lange ein Elektron in einem angeregten Zustand verweilt. Das sind bei hochgeladenen Ionen nur wenige milliardstel Sekunden. Da die Pulse von FLASH etwa ebenso kurz sind wie die Zeit, die ein Elektron auf dem oberen elektronischen Niveau verbringt, lässt sich diese Verweildauer mit den ultrakurzen Röntgenblitzen von FLASH bestimmen.

● Untersuchung hochgeladener Eisen-Ionen bei FLASH

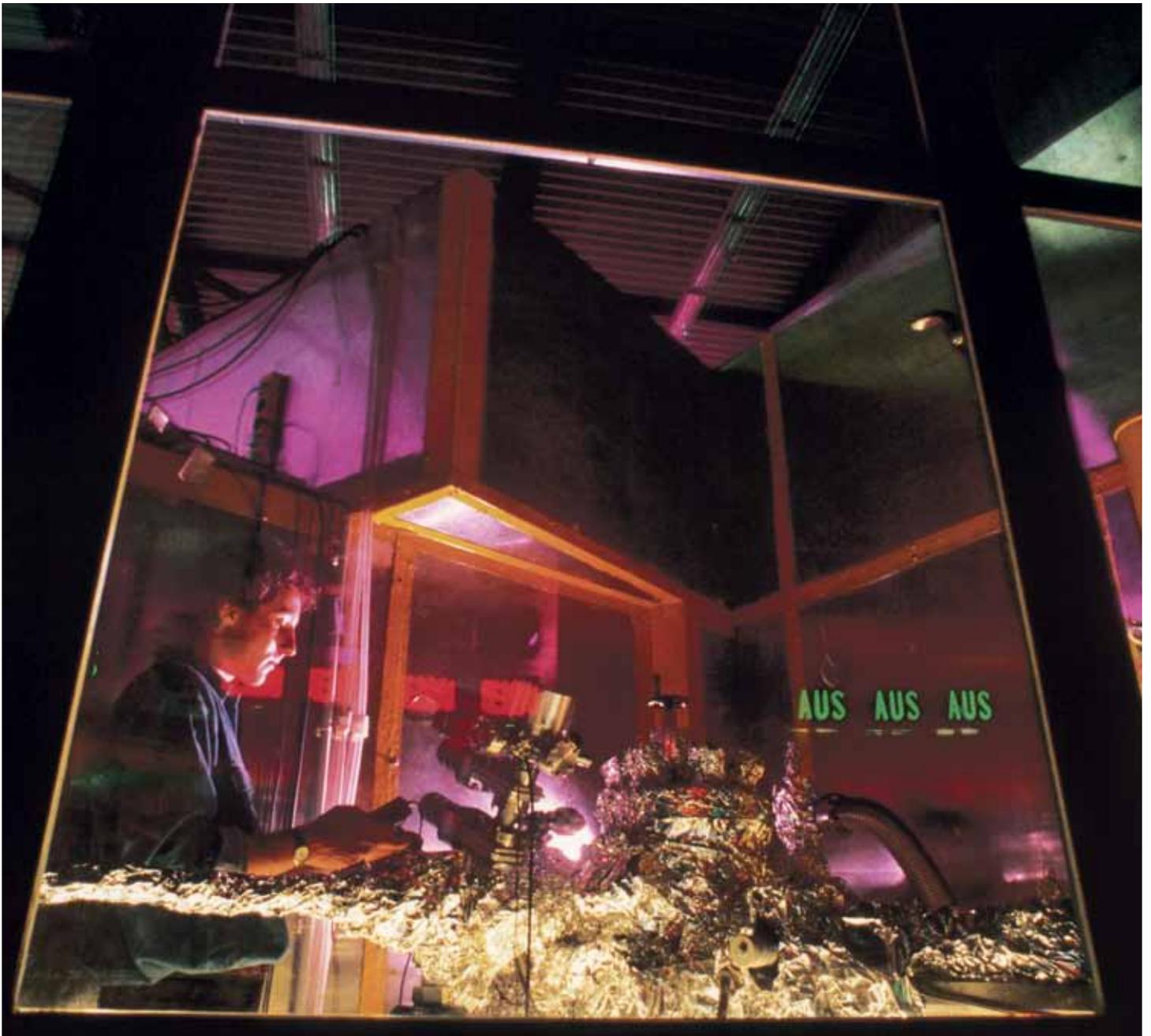
# ERFOLGSSTORY.

## Die Strahlungsquelle DORIS III

Am Speicherring DORIS bei DESY wird seit über 30 Jahren mit dem intensiven Licht aus dem Ring geforscht: Seit 1974 ist DORIS in Betrieb – zunächst parallel für die Teilchenphysik und die Forschung mit Synchrotronstrahlung. In den Jahren 1990 und 1991 wurde der Speicherring ausgebaut, um Platz für sieben zusätzliche Magnetstrukturen, so genannte Wiggler und Undulatoren, zu schaffen. Die umgebaute Maschine, DORIS III, wird seit 1993 ausschließlich als Quelle für Synchrotronstrahlung verwendet.

Die Bilanz dieser Zeit kann sich sehen lassen. Immer wieder gelang es den Wissenschaftlern und Ingenieuren an DORIS, neue Methoden und Instrumente zu entwickeln und mit bahnbrechenden Ergebnissen neue Forschungsfelder zu eröffnen. Was oftmals als laborinternes Testexperiment begann, entwickelte sich zur erfolgreichen Experimentiermethode, die sich schließlich weltweit in Forschung und Industrie als Standardverfahren etablierte.

Forschung an einem Messplatz bei DORIS III



# SCHLÜSSELROLLE.

Mit DORIS III Tuberkuloseproteine entschlüsseln



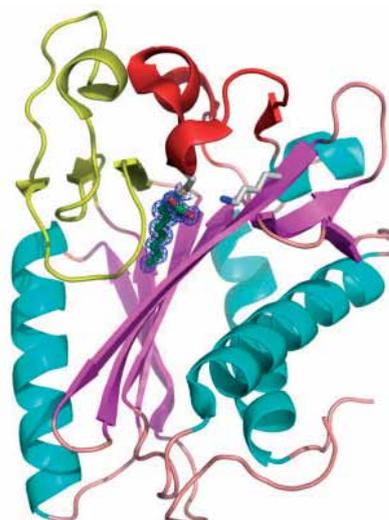
Die Tuberkulose ist bis heute eine der tödlichsten Gefahren für die globale Gesundheit. Zwei Millionen Todesopfer fordert die vom Mikroorganismus *Mycobacterium tuberculosis* verursachte Krankheit im Jahr. Etwa ein Drittel der Weltbevölkerung ist infiziert, und immer mehr Stämme des Erregers entwickeln eine Resistenz gegen vorhandene Medikamente. Forscher der Außenstelle des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) auf dem DESY-Gelände in Hamburg und des Max-Planck-Instituts für Infektionsbiologie (MPIIB) in Berlin entschlüsselten mit dem Licht aus dem Beschleuniger DORIS III die Struktur eines Proteins, welches das Überleben des Tuberkulose-Erregers in menschlichen Zellen sichert. Das Strukturbild dieses Moleküls zeigt mögliche Ansatzpunkte für neue Antibiotika auf.

Gefährlich ist *M. tuberculosis*, weil es sich in den Immunzellen des menschlichen Körpers versteckt hält und dort überdauert. Dabei wird sein Überleben durch die Aktivität bestimmter Schlüsselmoleküle gesichert. Die Wissenschaftler untersuchen deshalb die Funktionen von Tuberkuloseproteinen und bestimmen ihre atomare Struktur, um mögliche Schwachstellen des Bakteriums und neue Hemmstoffe zu finden.

Eines der lebenswichtigen Proteine des Tuberkulose-Erregers ist LipB – lebenswichtig, weil es Zellmaschinerien aktiviert, die dem Bakterium als Stoffwechsellmotoren dienen. Die Forschungsabteilung des MPIIB hat sich auf die Biologie der Infektion mit *M. tuberculosis* und dessen Überlebensstrategien in Immunzellen spezialisiert. Bei ihren Untersuchungen kamen die Wissenschaftler einer erhöhten Aktivität von LipB in akut infizierten Zellen auf die Spur, insbesondere bei Patienten, die mit Formen des Bakteriums infiziert waren, die bereits gegen zahlreiche Wirkstoffe eine Resistenz entwickelt hatten.

In diesen Zellen beobachteten die Forscher eine im Vergleich zu anderen Zellen 70-fach erhöhte Produktion von LipB – ein deutlicher Hinweis darauf, dass das Protein an der Pathogenese beteiligt ist. Dadurch wird es zu einem besonders interessanten Angriffspunkt in Fällen, in denen traditionelle Wirkstoffe keine Wirkung mehr zeigen. Nachdem LipB zunächst gereinigt und kristallisiert worden war, erstellten die Wissenschaftler an den Messstationen des EMBL mit Hilfe der hochenergetischen Synchrotronstrahlung aus dem Speicherring DORIS III ein Strukturbild des Proteins – eine Art technisches Diagramm seines atomaren Bauplans. Das gab wichtige Hinweise auf seine Wirkungsmechanismen: Die Funktion des Enzyms ließ sich durch ein hochaufgelöstes Bild des aktiven Bereichs von LipB bestimmen. In Zusammenarbeit mit Forschern des EMBL Heidelberg und der University of Illinois in den USA entdeckte das Team, wie LipB spezifische Fettsäuren an andere Proteine bindet.

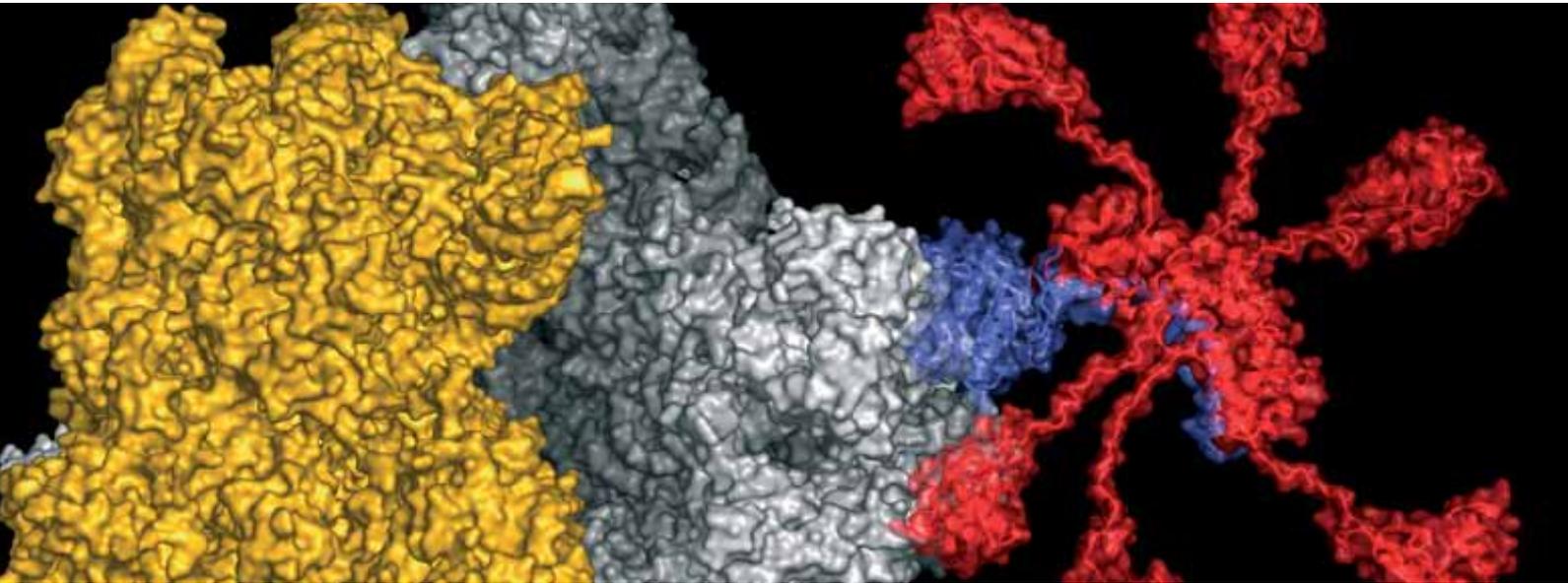
LipB liefert somit einen vielversprechenden Angriffspunkt für Medikamente, weil es einem lebenswichtigen Signalweg angehört. Im Unterschied zu anderen Lebewesen verfügt *M. tuberculosis* über keinerlei Ausweichmechanismen, die die Rolle von LipB übernehmen könnten. Ein so genannter Inhibitor, der den aktiven Bereich des Bakteriums blockiert, würde daher zentrale Prozesse lahmlegen, ohne die der Erreger nicht überleben oder sich vermehren könnte – eine sehr effektive Strategie für einen Wirkstoff. Die Wissenschaftler suchen nun nach Substanzen, die diese Rolle übernehmen können. Parallel setzen sie ihre Suche nach weiteren potenziellen Zielproteinen für Medikamente fort. Dabei konzentrieren sie sich auf die Strukturen von Molekülen, die *M. tuberculosis* im Ruhestadium halten und als mögliche Angriffspunkte für Arzneimittel in Frage kommen.



- Vereinfachte atomare Struktur des Proteins LipB, eines lebenswichtigen Proteins für den Tuberkulose-Erreger

# SCHALTSTATION.

Die kleinste Angelrute der Welt im Licht von DORIS III



Das genetische Alphabet hat nur vier Buchstaben. Aber in ihrer Abfolge ist der gesamte Bauplan des Lebens verschlüsselt. Nach diesem Plan werden die Bausteine des Lebens, die Proteine, zusammengesetzt. Hergestellt werden Proteine in den Ribosomen – speziellen Molekülkomplexen, die in jeder Zelle vorkommen. Wissenschaftler der Max-Planck-Gesellschaft und anderer Institute nehmen das Ribosom unter anderem mit Hilfe des intensiven Lichts aus dem Speicherring DORIS III unter die Lupe. So konnten sie die atomare Struktur eines wichtigen Regulationszentrums der Proteinsynthesemaschinerie in lebenden Zellen aufklären. Damit sind sie dem Verständnis der Funktionsweise dieser Schaltstation einen entscheidenden Schritt nähergekommen.

Mit einem Durchmesser von ca. 25 milliardstel Millimetern sind bereits die einfachsten Ribosomen aus Bakterien gigantische molekulare Maschinen. Sie bestehen aus über fünfzig Proteinkomponenten und drei langen Ribonukleinsäure-Molekülen, die zu einer großen und einer kleinen ribosomalen Untereinheit zusammengesetzt sind. Für jede Teilaufgabe der Translation, d.h. der Übersetzung der Protein-Bauanleitungen in der Erbinformation in eine entsprechende Kette von Proteinbausteinen (Aminosäuren), ist ein spezielles Modul des Ribosoms zuständig.

Um Fehler bei der Synthese der Proteine – von denen einige mehrere tausend Bausteine umfassen – zu vermeiden, müssen die einzelnen Module und ihre Arbeitsgänge genau aufeinander abgestimmt sein. Dazu bedient sich das Ribosom

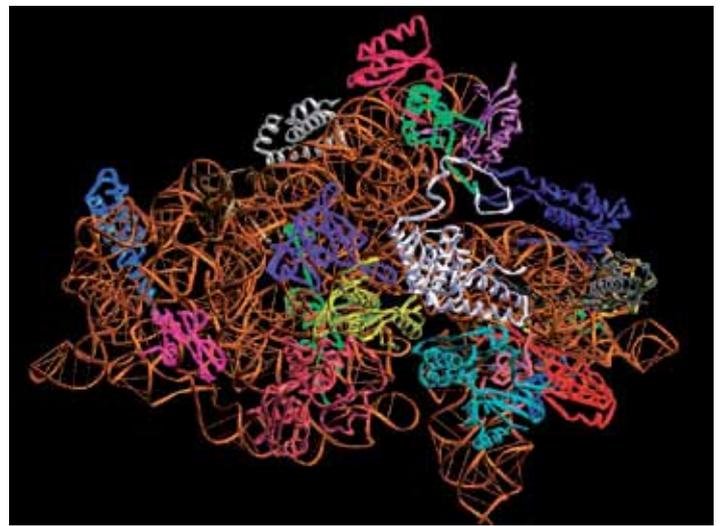
einer Reihe von Kontrollproteinen, so genannten Translationsfaktoren, die nur zu bestimmten Zeitpunkten an die zentrale Maschinerie andocken. Einige der Translationsfaktoren funktionieren dabei als molekulare Schalter. Sie tragen kleine, energiereiche Moleküle, die während eines Arbeitsganges chemisch gespalten werden. Diese Spaltung bewirkt eine Formveränderung der Faktoren, die vom Ribosom wahrgenommen wird und den Startschuss zur Einleitung des nächsten Arbeitsschrittes gibt. Das Einholen der Translationsfaktoren und das Umlegen der molekularen Schalter werden von einer speziellen Schaltzentrale am Ribosom koordiniert. Obwohl die Bestandteile dieser Schaltzentrale seit längerem bekannt waren, wusste man bisher wenig darüber, wie sie funktioniert.

Um dieser Funktionsweise auf die Schliche zu kommen, nutzten die Wissenschaftler eine Kombination von verschiedenen physikalischen und biochemischen Untersuchungsmethoden, unter anderem die Proteinkristallographie mit Röntgenstrahlung am Speicherring DORIS III. Sie erstellten ein detailliertes, dreidimensionales Bild der atomaren Struktur dieses Ribosomenbereichs, indem sie Kristalle von Teilen des Schaltzentrums züchteten und deren Streuung im Röntgenlicht untersuchten. Ebenso analysierten sie die Verankerung des Schaltzentrums an der großen ribosomalen Untereinheit. Wie in einem dreidimensionalen Puzzlespiel passten sie anschließend alle Teilstrukturen in Hüllen des Ribosoms ein, die mit Hilfe der Elektronenmikroskopie sichtbar gemacht worden waren.

Von der großen ribosomalen Untereinheit in unmittelbarer Nähe der Stelle, an der die Translationsfaktoren zu liegen kommen, erstreckt sich ein langer, beweglicher Fortsatz, an dem bis zu sechs flexible Molekülketten mit je einem kugelförmigen Kopf aufgehängt sind. Im Einklang mit früheren Arbeiten, die darauf hindeuteten, dass die Köpfe die ersten Andockstellen für die Translationsfaktoren darstellten, ähnelte die Struktur einer molekularen Angelrute mit sechs Schnüren und je einem Köder, mit denen das Ribosom nach Translationsfaktoren „fischen“ konnte. Die Forscher vermuteten zudem, dass die Köpfe auch an die ribosomgebundenen Faktoren heranreichen könnten, um deren Schalter umzulegen.

Diese Hypothesen testeten sie durch gezielte Veränderungen an der Angelrute: Zunächst wurden die Köder durch genetische Verfahren abgeschnitten. Wie erwartet waren die Angelschnüre ohne Köder erfolglos beim Fischen nach Faktoren. Auch die Schaltprozesse waren etwa 1000-fach verlangsamt. Dann veränderten die Wissenschaftler gezielt Oberflächenbausteine der Köpfe, die mit den Translationsfaktoren in Berührung kommen konnten, und störten somit ihre Funktionsweise. Wie die Ergebnisse zeigten, sind eine ganze Reihe solcher Bausteine gemeinsam für das Einholen der Faktoren und das Umlegen der Schalter verantwortlich.

Die Fähigkeit zur Proteinsynthese ist eine elementare Grundlage für alles Leben auf der Erde. Deshalb kommen Ribosomen mit ähnlichem Aufbau in allen Organismen vor, vom Bakterium bis zum Menschen. Die bakteriellen Ribosomen weisen jedoch Detailunterschiede zu denen höherer Organismen auf. So verhindern z.B. einige Antibiotika die Proteinsynthese in Bakterien, aber nicht bei Menschen, Tieren oder Pflanzen. Auch bei der Schaltzentrale des Ribosoms gibt es Unterschiede. Eine genauere Kenntnis der verschiedenen Translationsprozesse könnte daher eine Grundlage für die Neuentwicklung beispielsweise von Medikamenten gegen Infektionskrankheiten bieten.



● Ribosomen sind die Eiweißfabriken der Zellen. Mit Hilfe der Strahlung aus dem Speicherring DORIS III lässt sich ihre komplizierte Struktur entschlüsseln.

## Herausforderung Strukturbiologie

Unverzichtbar ist das intensive Röntgenlicht aus Teilchenbeschleunigern, wenn es darum geht, die komplexen Strukturen von Biomolekülen, beispielsweise Proteinen, im Detail aufzuklären. Bei DESY erforschen Wissenschaftler vom Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL), von der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) sowie von anderen Instituten eine Vielzahl von Biomolekülen am Speicherring DORIS III mit der Methode der Proteinkristallographie.

Das Prinzip ist das gleiche wie bei der Röntgenstrukturanalyse eines Minerals: Ein intensiver Röntgenstrahl wird auf einen Kristall gelenkt, dessen regelmäßig angeordnete Gitterbausteine das Licht in charakteristischer Weise beugen. Aus dem aufgenommenen Beugungsmuster können die Forscher schließen, wie die einzelnen Atome im Kristallgitter angeordnet sind. Bei Proteinen aber stößt dieses Verfahren auf eine große Schwierigkeit: Eiweiße sind große, normalerweise in Wasser gelöste Moleküle und lassen sich deshalb nur ungern in eine feste Kristallform zwingen. Trotz ausgefeilter Methoden wachsen Eiweiße nur zu sehr dünnen Kristallen. Die einzige Möglichkeit, die Struktur dieser winzigen und fragilen Gebilde zu studieren, ist die Beleuchtung mit dem intensiven Röntgenlicht aus dem Beschleuniger.

Doch die Geduldsarbeit lohnt sich: Mit dem Verfahren der Proteinkristallographie lässt sich der Aufbau von großen, kompliziert gebauten Biomolekülen im Detail entschlüsseln – was den Forschern wichtige Informationen liefert, um die biologische Funktion eines Proteins aufzuklären. Für Molekularbiologen ist die Kristallographie deshalb ein unverzichtbares Werkzeug, das ihnen beispielsweise hilft herauszufinden, wie Proteine bei der Erschaffung der vielen verschiedenen Zelltypen im menschlichen Körper zusammenwirken oder wie sich neue Medikamente maßschneidern lassen.

- 
- > Lomonosov Universität, Moskau
  - > Max-Planck-Arbeitsgruppen für strukturelle Molekularbiologie, Hamburg
  - > Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen
  - > Universität Witten-Herdecke
-

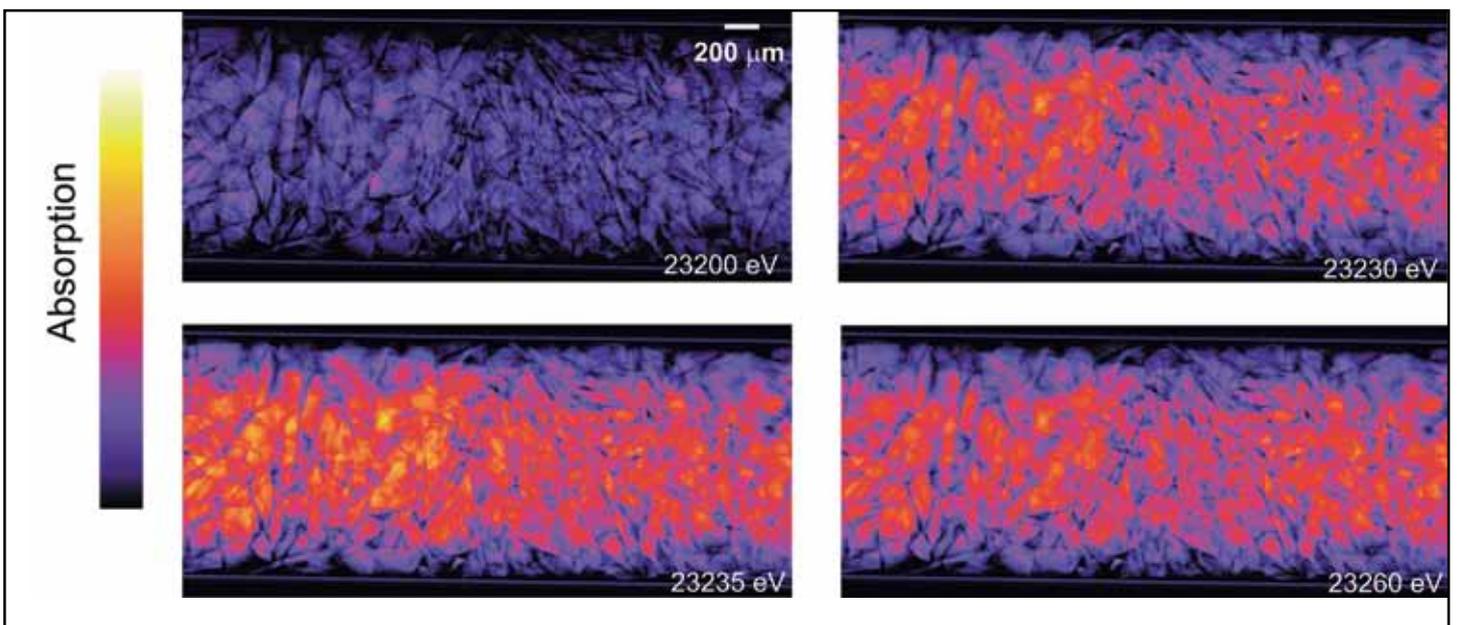
# MIKROREAKTOR.

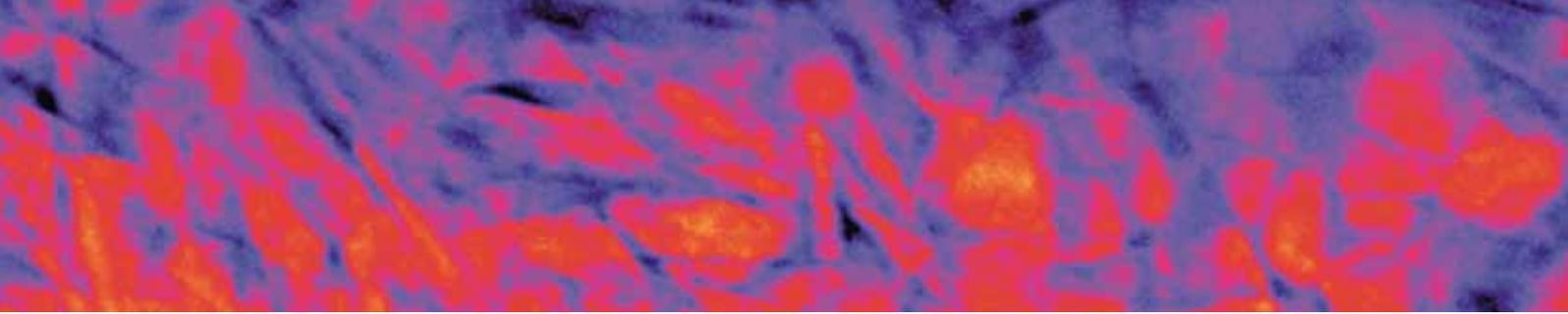
Katalysatoren im Röntgenblick von DORIS III

„Ein Katalysator ist ein chemischer Stoff, der die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion verändert, ohne selbst verbraucht zu werden“, so nüchtern steht es im Lexikon. Doch ohne Katalysatoren kämen zahlreiche technische Verfahren nicht in Gang: Schätzungsweise 90 Prozent aller chemischen Produkte durchlaufen bei ihrer Produktion mindestens eine katalytische Stufe. Ohne die Anwesenheit des Katalysators würde die jeweilige chemische Reaktion sehr viel langsamer oder gar nicht erfolgen. Deshalb sind Katalysatoren heutzutage aus der chemischen Industrie nicht mehr wegzudenken. Auch im Umweltschutz spielen sie eine wichtige Rolle. Katalysatoren helfen, Energie einzusparen, unerwünschte Nebenprodukte zu reduzieren oder, wie beim Abgaskatalysator im PKW, unvermeidbare, gefährliche Substanzen in weniger gefährliche umzuwandeln.

Wie solche katalytischen Reaktionen im atomaren Detail ablaufen, zeigt die intensive Röntgenstrahlung von DORIS III. Damit lassen sich Katalysatoren selbst in der gasförmigen und flüssigen Phase oder unter sehr hohem Druck untersuchen. Eine wichtige Frage ist dabei, wie sich die aktive Struktur des Katalysators während des Ablaufs der Reaktion verändert – zum Beispiel, wenn die Gaszusammensetzung oder die Temperatur entlang des Katalysators stark variieren. Dazu gab es bisher allerdings kaum Untersuchungen. Einer Forschergruppe von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, der Technischen Universität Dresden und DESY ist es gelungen, mit Hilfe einer Röntgenkamera die Strukturveränderungen eines Rhodium-Katalysators während der partiellen Oxidation von Methan zu verfolgen. Diese Reaktion gilt als einer der vielversprechenden Prozesse für die

Ein Mikroreaktor, in dem Methangas mit Sauerstoff reagiert, im Licht der Röntgenstrahlung von DORIS III bei vier verschiedenen Energien

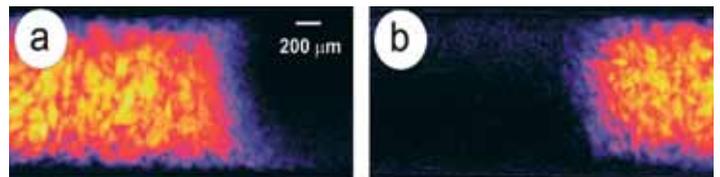




Gewinnung von Wasserstoff und für so genannte *Gas-to-Liquid*-Technologien, bei denen aus Erdgas flüssiges Methanol oder Kraftstoffe gewonnen werden. Diese lassen sich viel leichter transportieren als das Erdgas.

Die Forscher schickten Methangas und Sauerstoff durch einen Mikroreaktor, ein mit Rhodium-Katalysatormaterial gefülltes und mit verschiedenen Analyseinstrumenten versehenes Glasröhrchen. Während in dessen Inneren die Reaktion von Methan mit Sauerstoff ablief, durchleuchteten die Wissenschaftler den Mikroreaktor mit Röntgenstrahlung aus dem Speicherring DORIS III und registrierten die transmittierte Strahlung mit einer Röntgenkamera. Dabei stellten sie entlang des Mikroreaktors drastische Veränderungen der Rhodium-cluster-Struktur fest: Auf der Eingangsseite des Mikroreaktors lagen die Rhodiumteilchen während der Reaktion eher oxidiert, auf der Ausgangsseite eher reduziert vor – ein Muster, das über Stunden hinweg stabil blieb und sich erst mit einer Änderung der Temperatur oder des Gasflusses veränderte. Diese charakteristische Verteilung deutet darauf hin, dass das Methan im vorderen und hinteren Teil des Mikroreaktors nicht über den gleichen Prozess reagiert: Während vorne die katalytische Oxidation von Methan vorherrscht, überwiegt im hinteren Teil die so genannte Methanreformierung. Dies bedeutet, dass das Reaktionsgemisch im ersten Teil das Katalysatorbett auf die nötige Temperatur bringt, während im zweiten Teil die eigentlich gewünschte Reaktion zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid stattfindet. Dieses so genannte Synthesegasgemisch eignet sich ausgezeichnet in industriellen Verfahren, um Methanol oder auch, über die Fischer-Tropsch-Synthese, Kraftstoffe herzustellen.

Solche strukturellen Einsichten in die Wirkungsweise von Katalysatoren sind in zahlreichen Bereichen von Interesse, beispielsweise in der Materialforschung, den Umweltwissenschaften, der Elektrokatalyse oder der Sensortechnologie. Die in diesem Experiment angewendete Methode eignet sich dabei besonders für alle In-Situ-Analysen, bei denen der Verlauf von Reaktionen direkt an Ort und Stelle untersucht werden soll.



- Das Rhodium-Katalysatormaterial im Mikroreaktor liegt während der Reaktion auf der Eingangsseite eher oxidiert (a), auf der Ausgangsseite eher reduziert vor (b) – ein Hinweis darauf, dass Methan und Sauerstoff im vorderen und hinteren Teil des Mikroreaktors über unterschiedliche Prozesse reagieren.

# SCHNITTSTELLE.

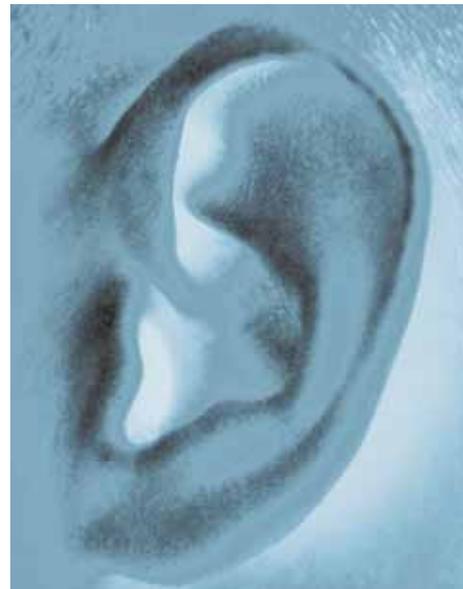
## Hörschnecken und Implantate – Röntgen in 3D mit DORIS III

Gehörlosen, deren Hörnerv noch funktioniert, kann mit so genannten Cochlearimplantaten geholfen werden. Herkömmliche Hörgeräte verstärken zwar den Schall, nützen den Betroffenen jedoch wenig, wenn die Hörschnecke im Innenohr – die Cochlea – die Töne nicht weiterverarbeiten kann. Ein Cochlearimplantat umgeht dagegen den nicht funktionsfähigen Teil der Hörschnecke und übermittelt die Tonsignale direkt an den Hörnerv. Dazu wird eine lange Reihe von Elektroden in den schneckenförmigen Hohlraum der Cochlea eingeführt. Die Elektroden geben den per Mikrofon aufgenommenen Schall mit Hilfe eines digitalen Signalprozessors als elektrische Impulse unmittelbar an die Sinneszellen beziehungsweise den Hörnerv weiter.

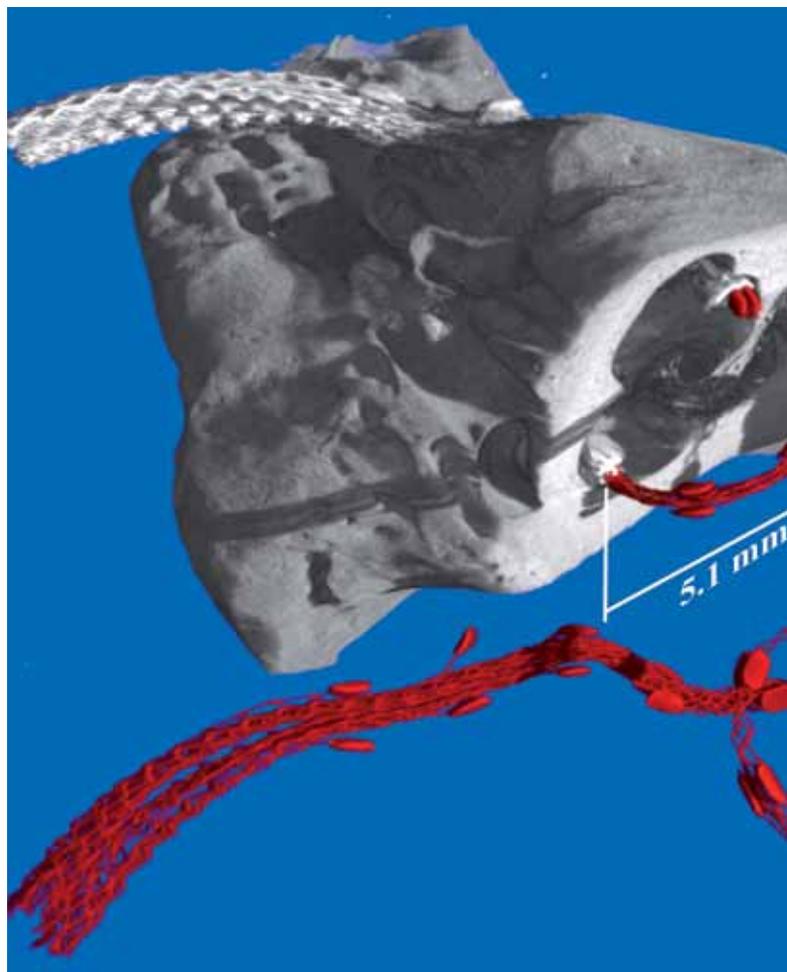
Für Ärzte ist es sehr schwierig, zuverlässige Daten über die Integration der Elektroden in den Knochen des Innenohrs – den härtesten Knochen im menschlichen Körper – zu erhalten. Herkömmliche histologische Untersuchungen, bei denen mikrometerdünne Gewebeschnitte am Mikroskop beurteilt werden, liefern nur begrenzte Informationen, da die Elektroden entfernt werden müssen, bevor die Schnitte angefertigt werden können. Mit Hilfe der Mikrotomographie mit Synchrotronstrahlung gelang es einem Wissenschaftlerteam erstmals, das gesamte Elektrodensystem eines Cochlearimplantats, die Struktur des Innenohrs und das Schläfenbein gleichzeitig sichtbar zu machen – zerstörungsfrei und in 3D.

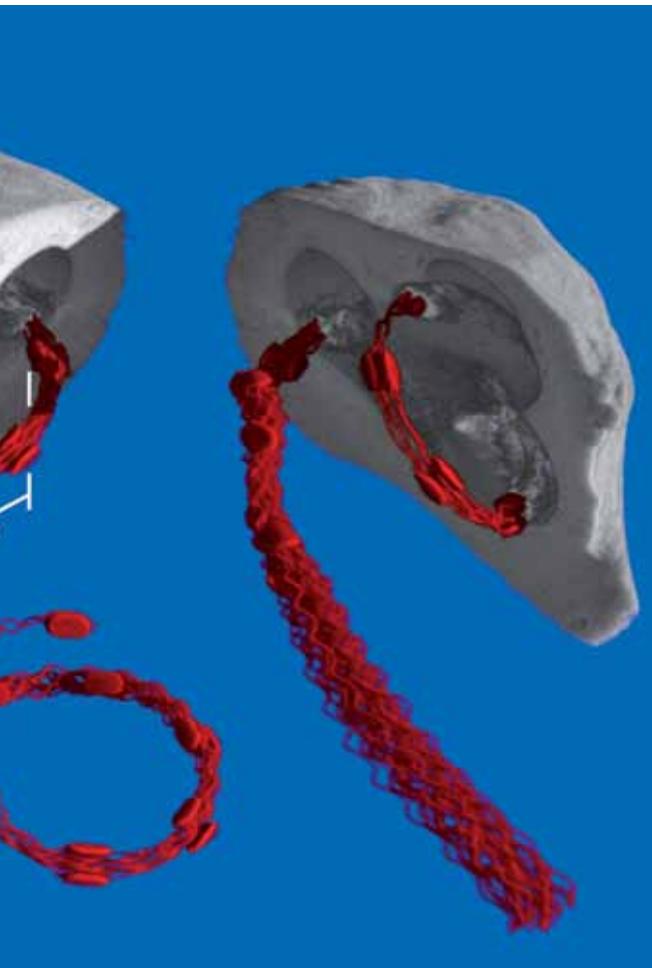
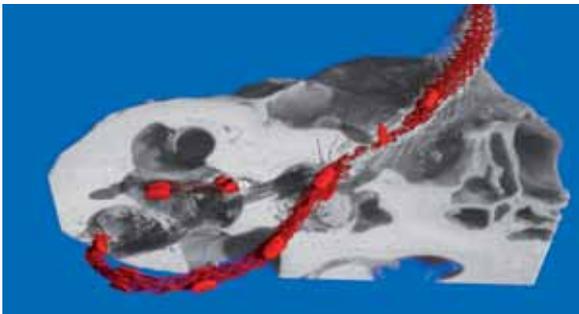
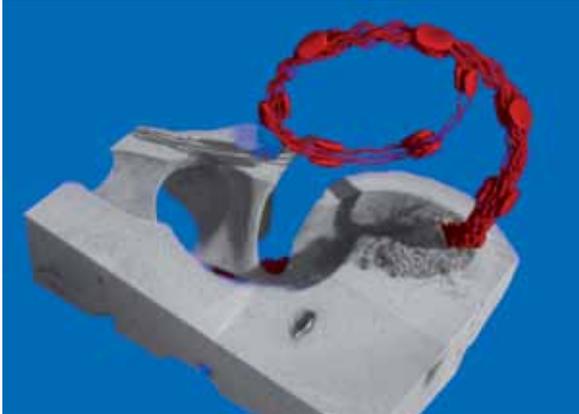
Dazu entfernten die Forscher das Implantat zusammen mit dem umliegenden Gewebe nach dem Tod des Patienten, fixierten die Probe und färbten sie ein, um die Dichteauflösung der weichen Gewebeteile zu verbessern. Dann untersuchten sie die Probe mit Hilfe der Röntgenstrahlung aus dem Speicherring DORIS III. Per Computer wurden die aufgenommenen Tomogramme schließlich zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt.

Das Ergebnis kann sich sehen lassen: Deutlich sind auf dem 3D-Bild die 12 Elektrodenpaare, die entsprechenden Platindrähte sowie die Silikonmatrix, in die sie eingelassen sind, zu erkennen. Der umliegende Knochen kann graduell immer transparenter dargestellt werden, so dass sich die Schnittstelle von Knochen und Implantat genau studieren lässt und die komplexe, charakteristische Form der Elektrodenanordnung zutage tritt. Diese folgt dem spiralförmigen Verlauf der Cochlea, die beim Menschen zweieinhalb Windungen besitzt. Anhand der 3D-Abbildung lässt sich die Position des Implantats im Innenohr genau bestimmen und von allen Seiten betrachten. Zudem erlaubt der dreidimensionale Datensatz, der völlig zerstörungsfrei erhalten wurde, virtuelle Schnitte der Probe in jede beliebige Richtung anzufertigen. Damit lässt sich eine spätere histologische Untersuchung optimal vorbereiten.



Die Mikrotomographie mit Synchrotronstrahlung macht das Elektrodensystem eines Cochlearimplantats, die Struktur des Innenohrs und das Schläfenbein gleichzeitig sichtbar. Die 3D-Bilder zeigen nicht nur die exakte Platzierung des Implantats, auch neu gebildete Knochen lassen sich genau erkennen.





Die Mikrotomographie mit Synchrotronstrahlung erweist sich somit als einzigartige Untersuchungsmethode für komplexe dreidimensionale Strukturen, die aus unterschiedlichen, harten und weichen Geweben bestehen. Die Auflösung von wenigen Mikrometern ermöglicht es, die Strukturen des Innenohrs im Detail zu analysieren und die Elektrodenanordnung des Implantats mit hoher Präzision zu lokalisieren. Die Methode erlaubt zudem, die Bildung von Knochen und Weichteilen zu visualisieren, die die Funktion von Cochlearimplantaten beeinträchtigen können. Damit bilden die erhaltenen Daten eine wichtige Grundlage, um realistische Modelle für die Ausbreitung des vom Implantat erzeugten Stroms zu entwickeln und somit das Design der Cochlearimplantate zu verbessern.

- 
- > Biomaterials Science Center (BMC), Universität Basel, Schweiz
  - > Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Materialforschung und Küstenforschung, Deutschland
  - > MED-EL, Innsbruck, Österreich
  - > Medizinische Universität, Innsbruck, Österreich
- 

## Mikrotomographie – 3D-Röntgen im Kleinen

In den Krankenhäusern sind dreidimensionale Röntgenbilder heute Standard. Das Prinzip der Computertomographie: Der Patient liegt in einer Röhre; ein Röntgenapparat dreht sich um ihn und nimmt Schicht für Schicht eine Reihe von Einzelbildern des Körpers auf. Anschließend kombiniert ein Computer die Aufnahmen und rekonstruiert daraus ein räumliches Abbild des Körperinneren.

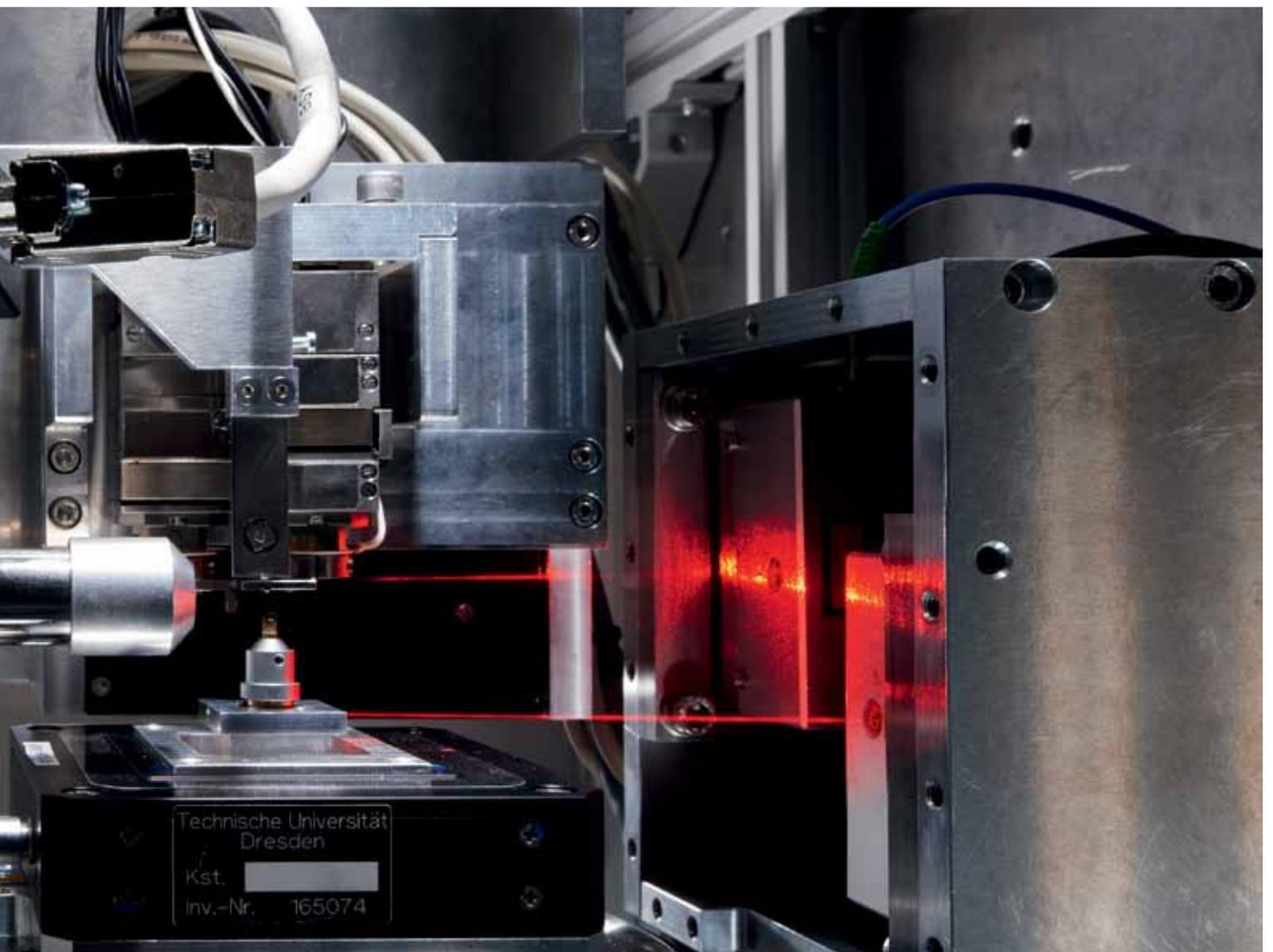
Die Forscher am Speicherring DORIS III treiben dieses Verfahren auf die Spitze. Bei der Mikrotomographie mit Synchrotronstrahlung nehmen sie – ähnlich wie bei der klinischen Computertomographie – eine Reihe von zweidimensionalen Absorptionsbildern einer Probe auf. Diese Schattwürfe fügt der Rechner zu einem 3D-Bild zusammen. Dabei erreichen die Wissenschaftler eine tausendmal höhere Auflösung als ein herkömmlicher Computertomograph: Während Krankenhausgeräte die Details mit einer Genauigkeit von weniger als einem Millimeter sichtbar machen, lässt diese Methode Einzelheiten bis auf weniger als einen Mikrometer genau erkennen. Ermöglicht wird die hohe Bildauflösung durch die Synchrotronstrahlung. Denn für die Mikrotomographie benötigt man auf minimalem Raum maximale Lichtintensität – wie sie der gebündelte und extrem helle Röntgenstrahl aus dem Beschleuniger DORIS III liefert.

# WELT KLASSE.

## Lichtquellen der Superlative

Neben der bewährten Strahlungsquelle DORIS III stehen bei DESY drei zukunftsweisende Lichtquellen zur Verfügung, die weltweit Maßstäbe setzen: PETRA III, die brillianteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle der Welt; FLASH, der weltweit einzige Freie-Elektronen-Laser für Strahlung im Vakuum-Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich; und ab 2015 der Röntgenlaser European XFEL, der als einzige Lichtquelle dieser Art in Europa ultrakurze, hochintensive Laserlichtblitze im harten Röntgenbereich liefern wird.





# BRILLANT RING.

## PETRA III Ein Juwel mit vielen Facetten

Im Jahr 2009 hat sie den Betrieb aufgenommen: PETRA III, die brillanteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle der Welt. Als leistungsstärkste Lichtquelle ihrer Art bietet sie den Wissenschaftlern exzellente Experimentiermöglichkeiten mit Röntgenstrahlung besonders hoher Brillanz. Davon profitieren vor allem Forscher, die sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzweiliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen.

### Brillante Lichtquelle bei DESY

Der Speicherring PETRA nahm 1978 bei DESY den Betrieb auf. Als größter damals existierender Speicherring seiner Art diente er zunächst der Teilchenphysikforschung. Anschließend fungierte er als Vorbeschleuniger für den großen Speicherring HERA. Als HERA im Jahr 2007 abgeschaltet wurde, baute

DESY den PETRA-Ring innerhalb von nur zwei Jahren zur weltbesten Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle aus. Dazu wurde die Anlage komplett umgebaut und modernisiert.

Blick über die Messstationen in der  
300 Meter langen Experimentierhalle von PETRA III





Die Experimentierhalle von PETRA III

Auf einem Achtel ihres Umfangs wurde eine 300 Meter lange Experimentierhalle errichtet, in der an 14 Strahlführungen bis zu 30 Experimente stattfinden können. Für den Hallenboden kam eine spezielle Technik zum Einsatz: Er wurde in Form einer einzigen, ein Meter dicken Betonplatte gegossen, die den Beschleuniger und die Experimente trägt – die längste am Stück gefertigte Betonplatte der Welt. Diese Platte ist schwingungstechnisch vom Rest des Gebäudes entkoppelt, so dass die hochpräzisen Messapparaturen nicht durch mechanische Schwingungen gestört werden. Sie trägt die neuen Komponenten des Beschleunigers, der nun speziell für den Einsatz als Synchrotronstrahlungsquelle optimiert ist, sowie die bis zu 20 Meter langen Undulatoren, in denen die intensive Röntgenstrahlung erzeugt wird.

Die neue Lichtquelle bei DESY zeichnet sich durch mehrere maßgeschneiderte Undulatoren aus, die Röntgenstrahlung mit besonders hoher Brillanz liefern. Das bedeutet vereinfacht: Sehr viele Photonen sind auf kleinster Fläche gebündelt und bilden einen extrem intensiven Lichtstrahl. So liefert PETRA III auf einer Fläche von einem einzigen Quadratmillimeter einen ebenso hohen Photonenfluss wie DORIS III auf einigen Quadratzentimetern.

Davon profitieren Nutzer aus deutschen und internationalen Forschungseinrichtungen sowie industrielle Forscher und Entwickler, die insbesondere sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzwelliges Röntgenlicht

für ihre Experimente benötigen. Die erste reguläre Messzeit an PETRA III begann im September 2010. Schon da war die Anlage überbucht: Von 54 eingegangenen Anträgen auf Messzeit wurden 32 von einem internationalen Gutachtergremium ausgewählt. Die Themen der Experimente reichen von Hochtemperatursupraleitung bis zu biologischen Nanostrukturen.



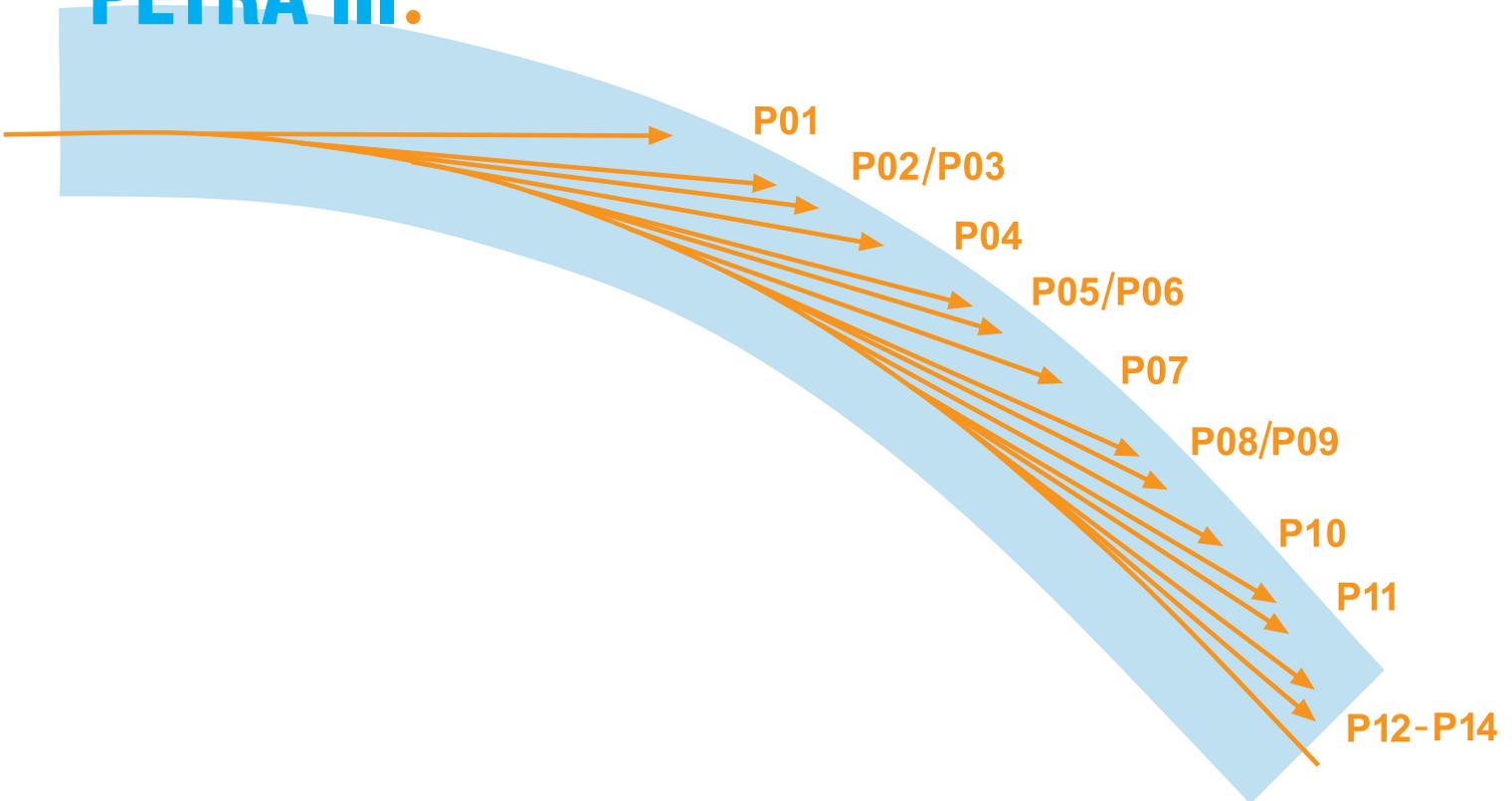
---

## Die weltbeste Lichtquelle ihrer Art

Als weltbeste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle setzt PETRAIII unter den Lichtquellen der dritten Generation neue Maßstäbe. Die Qualität einer Synchrotronstrahlungsquelle wird maßgeblich durch die Emittanz des Teilchenstrahls bestimmt. Diese ist als das Produkt aus Größe und Auffächerung des Strahls definiert. Je kleiner die Emittanz, desto besser ist der Strahl gebündelt und desto brillanteres Synchrotronlicht lässt sich damit erzeugen. PETRAIII besitzt im weltweiten Vergleich der Lichtquellen eine drei- bis viermal kleinere horizontale Emittanz als andere Hochenergiespeicherringe und ist damit die weltweit brillianteste Strahlungsquelle ihrer Art.

---

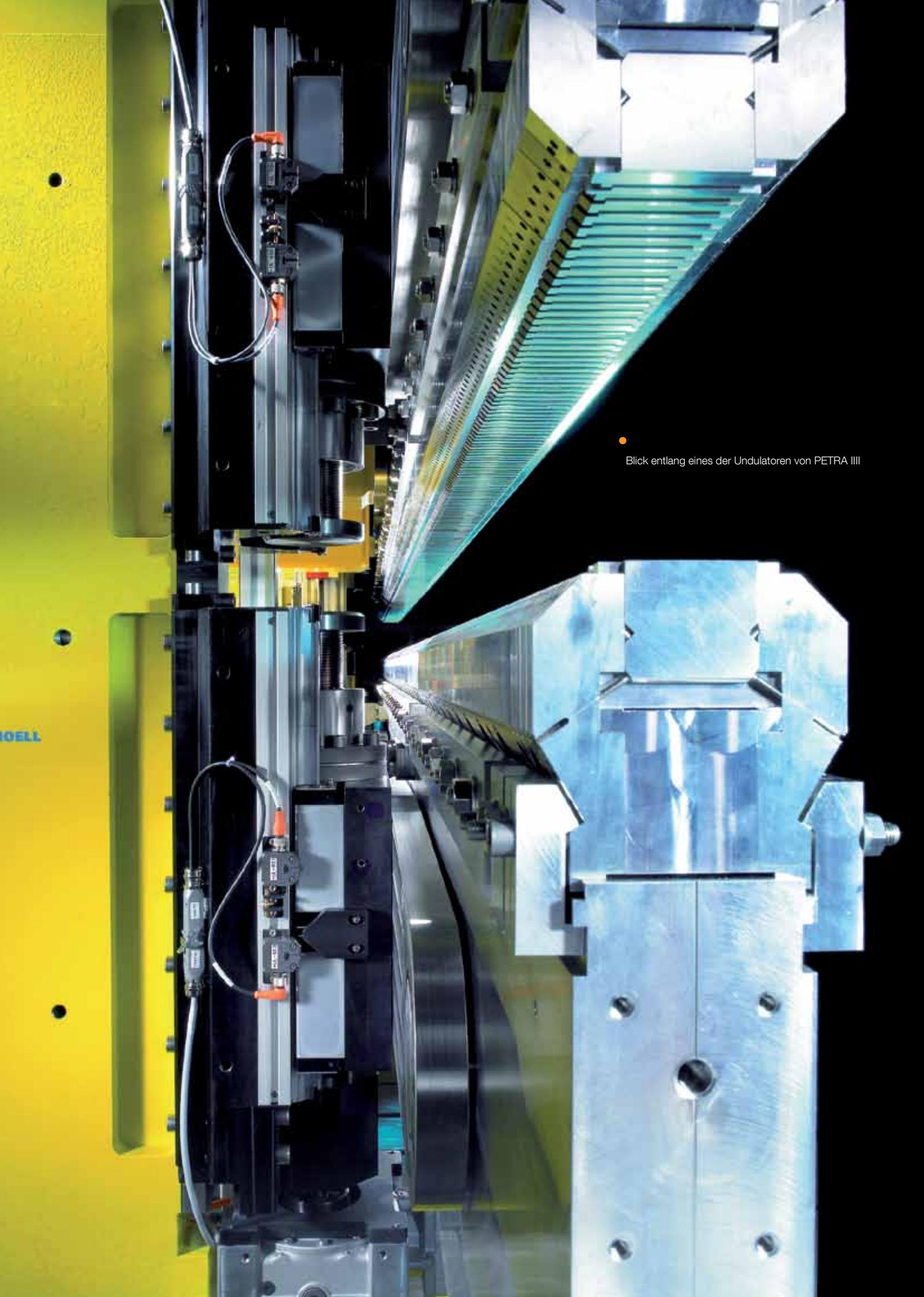
## PETRA III.



### Nanolampe mit herausragenden Eigenschaften

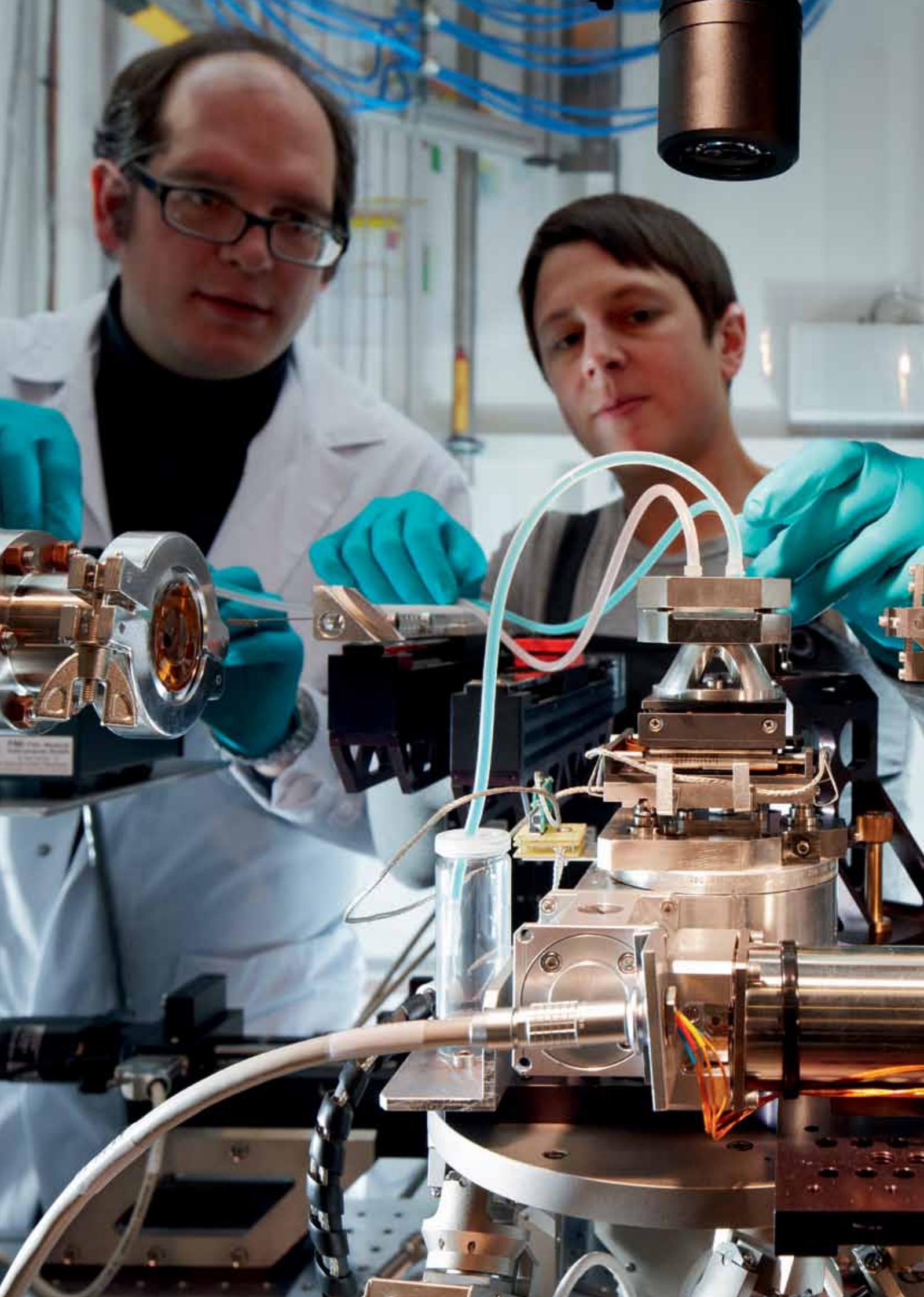
PETRAIII zeichnet sich durch einen besonderen Betriebsmodus aus, der den wissenschaftlichen Nutzern optimale Experimentierbedingungen bietet. Dabei werden die umlaufenden Teilchenpakete alle paar Minuten aufgefüllt, um die Intensität des Strahlstroms und damit die Helligkeit der Röntgenblitze konstant zu halten. Dieser Top-up-Modus bringt Vorteile für Maschine und Experimentatoren: Der Beschleuniger unterliegt bei konstantem Strahlstrom einer gleichbleibenden Wärmebelastung, so dass thermische Ausdehnungen fast nicht vorkommen, und die Nutzer in der Experimentierhalle können ihre Experimente mit konstant hoher Lichtintensität und somit unter stets gleichbleibenden Bedingungen durchführen.

Auch die extrem feinen Lichtstrahlen von PETRAIII sind ein entscheidender Vorteil für viele Experimente. An der Strahlführung P10 beispielsweise gelang es einem Team der Universität Göttingen, zur Beleuchtung einer Probe einen Lichtfleck von nur zehn Nanometern Durchmesser zu erzeugen – das ist 5000 Mal dünner als ein menschliches Haar. Solche nahezu punktförmigen Lichtquellen eignen sich insbesondere, um holographische 3D-Aufnahmen von Zellen und anderen kleinen Objekten zu machen.



Blick entlang eines der Undulatoren von PETRA III

MOELL



## Exzellente Aussichten für die Forschung

Ein solch haarfeiner, brillanter Röntgenlichtstrahl wie der von PETRA III bietet den Forschern entscheidende Vorteile. So lassen sich auch sehr kleine Materialproben untersuchen und die Anordnung ihrer Atome extrem genau bestimmen. Molekularbiologen beispielsweise können damit die räumliche atomare Struktur von winzigen Proteinkristallen aufklären. Der Bedarf hierfür ist groß: Die Struktur der Proteine, die nach dem genetischen Bauplan zusammengesetzt werden, steht ganz oben auf der Wunschliste der Forscher. Eine wichtige Anwendung ist die Entwicklung von neuen Medikamenten, die gezielt und punktgenau dort ansetzen, wo ein Krankheitserreger angreift.

Aufgrund dieser exzellenten Perspektiven bauen das Europäische Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) und DESY ihre über 30-jährige Zusammenarbeit auch bei PETRA III weiter aus: Die Hamburger Außenstelle des EMBL errichtete bei DESY die integrierte Forschungsanlage für Strukturbiologie EMBL@PETRA III. Deren hochmoderne Messstationen erlauben es den Forschern, die außergewöhnlichen Eigenschaften des Speicherring für neuartige Anwendungen in den Lebenswissenschaften zu nutzen – beispielsweise für Fortschritte in der Proteinkristallographie, der Kleinwinkel-Röntgenstreuung und der Röntgen-Absorptionsspektroskopie von biologischen Materialien. In der neuen Anlage lassen sich sämtliche Schritte von Hochdurchsatz-Proteinkristallisation über Probenaufbereitung bis zu Datenverarbeitung unter einem Dach durchführen – was die Erforschung von Molekülen, die über Krankheit oder Gesundheit des Menschen entscheiden, deutlich beschleunigt.

Auch für das weite Feld der Materialforschung bietet PETRA III vielseitige Möglichkeiten. Für einige Anwendungen brauchen die Materialforscher sehr energiereiche Photonen mit starkem Durchdringungsvermögen, beispielsweise um Schweißnähte zu prüfen oder Ermüdungserscheinungen von Werkstücken zu untersuchen. Der Speicherring PETRA III erzeugt besonders energiereiche Strahlung bis über 100 000 Elektronenvolt mit hoher Leuchtstärke – und bietet damit ein entscheidendes Plus für viele Experimente.

## Herausforderung Strukturbiologie

Um die Bausteine des Lebens zu entschlüsseln und zu verstehen, werden heutzutage immer größere und komplexere Moleküle untersucht, deren Kristalle Röntgenstrahlung jedoch immer schwächer beugen. Ein Beispiel ist die Aufklärung des Ribosoms (siehe Seite 28). Je komplexer die Struktur ist, desto intensiver muss auch die Röntgenstrahlung sein, mit der sie durchleuchtet wird. Die große Herausforderung der Zukunft ist es, die Wirkungsweise einer kompletten Zelle auf molekularer Ebene zu erkunden. Moderne Synchrotronstrahlungsquellen wie PETRA III liefern dazu wertvolle Beiträge.

## Neue Werkstoffe in 3D

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Computertomographie (siehe Seite 32) auch auf dem Gebiet der Materialwissenschaften etabliert und zu einem Standardverfahren für die Untersuchung innerer Strukturen von Werkstoffen entwickelt. Insbesondere die räumliche Auflösung und der Bildkontrast wurden immer weiter verbessert. Die hochbrillante Röntgenstrahlung von PETRA III ermöglicht es, Strukturen in verschiedenen Materialien mit einer Genauigkeit von unter einem Mikrometer mit hoher Geschwindigkeit zu untersuchen.

So lassen sich auch schnelle Prozessabläufe wie Schäumvorgänge dreidimensional verfolgen. Mit speziellen Kontrastverfahren ist es dabei möglich, auch kontrastschwache Objekte zerstörungsfrei dreidimensional darzustellen und quantitativ zu analysieren. Mit dem Verfahren der Mikrotomographie kann man so zum Beispiel das Einwachsverhalten von Zellen in biokompatible Materialien zerstörungsfrei verfolgen und damit Erkenntnisse über den optimalen Herstellungsprozess der 3D-Zellsubstrate gewinnen.

## Chemische Analysen im mikroskopischen Maßstab

Das Lichtmikroskop eröffnet den Blick in den Mikrokosmos. In der Regel bleibt jedoch offen, aus welchen chemischen Elementen die unter dem Mikroskop sichtbaren Strukturen bestehen. Fokussierte Röntgenstrahlen an PETRA III ermöglichen die chemische Analyse einer Probe auf engstem Raum. Das Ergebnis sind dreidimensionale mikroskopische Abbildungen der Elementverteilung – selbst wenn deutlich weniger als eines von einer Millionen Teilchen aus dem jeweiligen Element bestehen.

Darüber hinaus können die chemische Bindung und die kristalline Struktur abgebildet werden. Die Messung ist zerstörungsfrei und schnell, so dass auch Wachstumsprozesse verfolgt werden können. Dadurch ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten in Biomedizin, Umweltanalytik und Materialwissenschaften.

## Nanomagnete als Datenspeicher

Ultradünne magnetische Schichten sind heutzutage unverzichtbar, wenn es um die Speicherung von Daten auf immer kleinerem Raum geht. Die magnetische Speicherdichte in kommerziell erhältlichen Festplatten ist mittlerweile so weit angestiegen, dass heute z.B. das Abspeichern und Wiedergeben kompletter Spielfilme auf Geräten im Scheckkartenformat möglich ist. Die physikalische Grundlage dafür liegt in magnetischen Strukturen, die 10 000-fach kleiner sind als der Durchmesser eines menschlichen Haares.

Die gespeicherte Information steckt in der Ausrichtung von winzigen Nanomagneten, die dicht nebeneinander angeordnet sind. Beim Schreiben von Informationen auf solche Speichermedien muss man diese Ausrichtung in kürzester Zeit ändern können, ohne dabei benachbarte Nanomagnete zu beeinflussen. Der Ablauf dieses Prozesses hängt davon ab, wie diese Strukturen im Inneren beschaffen sind. Um derartige Speichermedien weiterzuentwickeln und zu optimieren, ist es daher erforderlich, in solche Nanostrukturen hineinblicken zu können. Dies ermöglichen die hochbrillanten Röntgenstrahlen von PETRA III.

Forschung am Messplatz P06 bei PETRA III





## Maßgeschneiderte Oberflächen

Fokussierte Röntgenstrahlen an PETRA III sind bis zu 1000 Mal feiner als ein menschliches Haar. Solche Nanostrahlen eröffnen völlig neue Möglichkeiten zur Untersuchung von Materialien, insbesondere von Oberflächen.

Vielfach bestimmt die Mikrostruktur von Oberflächen deren Eigenschaften und Funktion. Beispiele sind wasser- und schmutzabweisende Beschichtungen, Katalysatoroberflächen oder Materialien, deren optische Eigenschaften gezielt eingestellt werden können, indem an der Oberfläche nanometerkleine Edelmetallteilchen platziert werden. Form und Anordnung der Teilchen bestimmen die Farbe und die Helligkeit der Oberfläche in sichtbarem Licht. Damit lassen sich beispielsweise fälschungssichere Kennzeichnungen erstellen.

Die Nanostrahlen von PETRA III ermöglichen es, die Struktur und die Anordnung solcher Teilchen auf Oberflächen mit sehr großer Genauigkeit zu bestimmen. Darüber hinaus lassen sich die Entstehung, das Wachstum und die Anordnung von Nanoteilchen auf Oberflächen in realen technischen Produktionsprozessen verfolgen und verstehen – eine wichtige Voraussetzung dafür, diese Verfahren weiter zu optimieren. ●

# ZIEL GERADE.

## FLASH Weltrekord im Laserblitzen

Seit 2005 steht den Forschern bei DESY eine einmalige Lichtquelle zur Verfügung: FLASH, der weltweit einzige Freie-Elektronen-Laser im Vakuum-Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich. Die Anlage spielt in mehrfacher Hinsicht eine Vorreiterrolle. Als erster Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich mit supraleitendem Linearbeschleuniger liefert sie unentbehrliche Erkenntnisse für die Entwicklung von Beschleunigern und Röntgenlasern der Zukunft. Zugleich bietet sie Forschern fast aller Naturwissenschaften bisher nie dagewesene Experimentiermöglichkeiten.

### Rekordlaser im Röntgenbereich

Seit Jahren wetteiferten die Strahlungsquellenbauer weltweit darum, den ersten Hochleistungslaser für den Röntgenbereich zu entwickeln. Das internationale FLASH-Team bei DESY stellte dabei einen Weltrekord nach dem anderen auf. Die FLASH-Experten verkürzten die Wellenlänge der

erzeugten Laserstrahlung immer weiter, bis 2007 schließlich der Zielwert von 6,5 Nanometern erreicht war. Zwei Jahre lang blieb FLASH unübertroffen. Erst 2009 ging in Kalifornien mit der LCLS-Anlage ein Freie-Elektronen-Laser in Betrieb, der noch kürzere Wellenlängen im harten Röntgenbereich





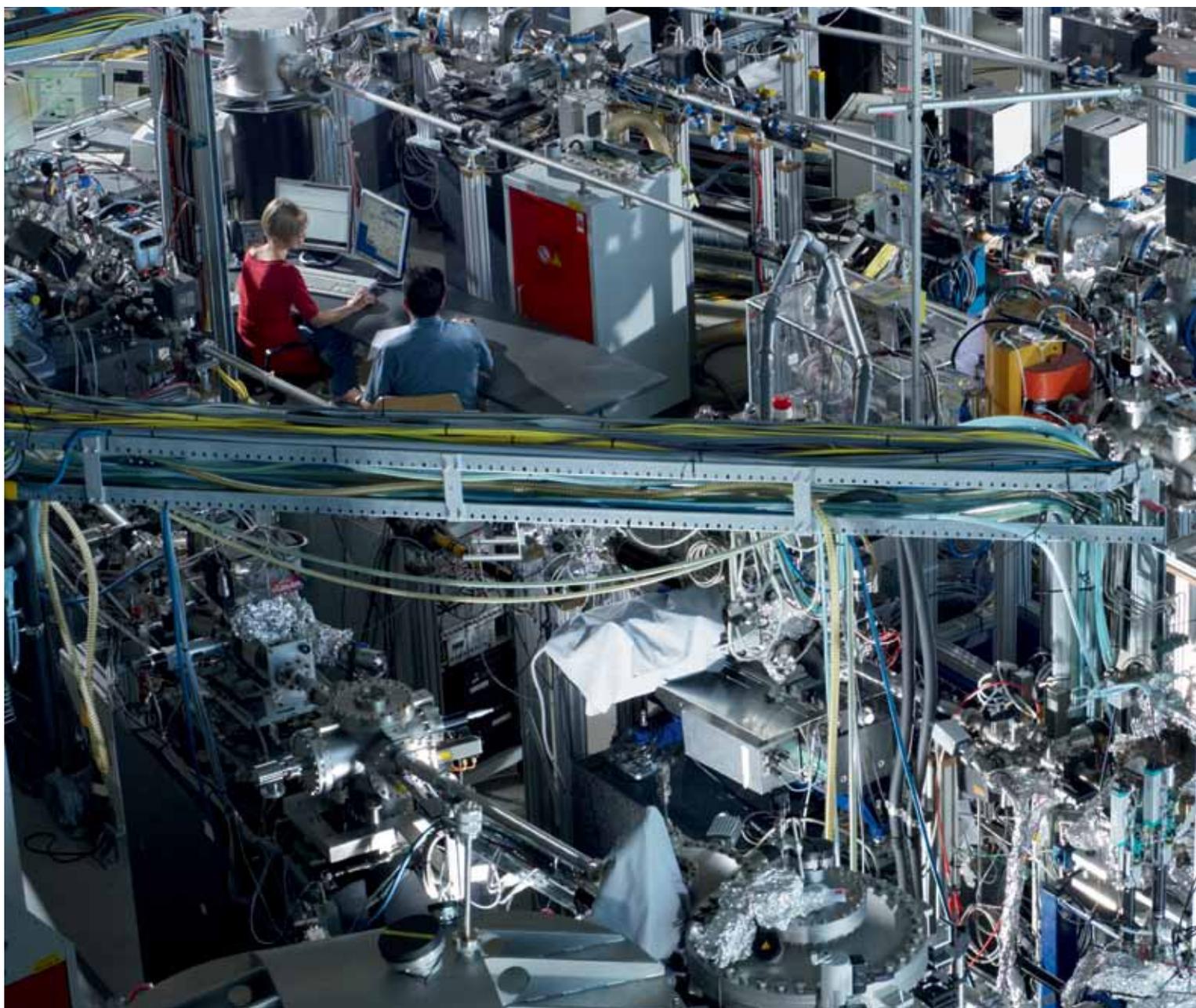
um 0,15 Nanometern liefert. Dennoch bleibt FLASH weiterhin einmalig: Der Freie-Elektronen-Laser bei DESY ist weiterhin die einzige Laseranlage auf der Welt, die leistungsstarke und ultrakurze Lichtblitze im Vakuum-Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich liefert, bis hinunter zu einer Wellenlänge von mittlerweile knapp über 4 Nanometern.

Dabei übertrifft FLASH sowohl die besten Synchrotronstrahlungsquellen als auch die modernsten herkömmlichen Lasersysteme im Röntgenbereich. Während heutige Speicherring-Synchrotronstrahlungsquellen zwar stark gebündelte Strahlung liefern, erzeugt FLASH Licht mit echten Lasereigenschaften, also perfekt gebündelte Strahlen. Herkömmliche Laser bieten im Röntgenbereich nur geringe Leistungen – die Spitzenleuchtstärke von FLASH ist um Größenordnungen höher, sogar als die moderner Synchrotronstrahlungsquellen. Da die Laserstrahlung außerdem in ultrakurzen Blitzen abge-

geben wird, eröffnen sich den Forschern mit FLASH einzigartige Experimentiermöglichkeiten.

### Heiß begehrt

Die FLASH-Anlage bei DESY ist als Nutzereinrichtung für die Forschung mit kurzwelliger ultravioletter und weicher Röntgenstrahlung im Einsatz. Die Messzeit an den fünf Messplätzen ist heiß begehrt – ein Jahr nach Beginn des Nutzerbetriebs war die Anlage bereits dreifach überbucht. Schon in den ersten Messperioden bestätigten sich die großen Hoffnungen, die die Forscher in die revolutionär neuen Messmöglichkeiten gesetzt hatten. Die an FLASH durchgeführten Experimente reichen von der Erzeugung und Vermessung von Plasmen über Studien an Gasen und Clustern bis hin zu ersten Untersuchungen von neuen Experimentiermethoden für komplexe Biomoleküle. Einigen Gruppen gelang es mit



den ultrakurzen Lichtblitzen von FLASH, erste Prozesse auf extrem kurzen Zeitskalen zeitaufgelöst zu verfolgen, also quasi zu filmen. Die Untersuchung solcher Prozesse mit Strahlung kurzer Wellenlängen gehört zu den wichtigsten neuen Anwendungsmöglichkeiten von Röntgenlasern dieser Art.

Doch FLASH ist nicht nur als neuartiges Forschungsinstrument gefragt. Die Anlage spielt zudem eine wichtige Pionierrolle für künftige größere Freie-Elektronen-Laser, wie den im Bau befindlichen Röntgenlaser European XFEL, der Lichtblitze im harten Röntgenbereich erzeugen wird. An FLASH entwickeln und testen die Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure sowohl die supraleitende Beschleunigertechnologie, die beim European XFEL zum Einsatz kommt, als auch die Undulatoren – jene speziellen Magnetanordnungen zur Erzeugung der Röntgenblitze – sowie die optischen Komponenten, Messaufbauten und Nachweis-

geräte. Ebenso wertvolle Erfahrung sammeln sie beim Betrieb von FLASH mit der elektronischen Verarbeitung großer Datenmengen. Nicht zuletzt können die Forscher an FLASH neuartige Experimentiermethoden für die künftigen Röntgenlaser studieren.

## Einmalige Experimentiermöglichkeiten

Die außergewöhnlichen Eigenschaften der FLASH-Strahlung eröffnen Forschern fast aller Naturwissenschaften nie dagewesene Experimentiermöglichkeiten. So übertrifft die Spitzenleuchtstärke von FLASH die der modernsten Synchrotronstrahlungsquellen um das Zehnmillionenfache und erlaubt damit bisher undurchführbare Untersuchungen beispielsweise von Prozessen der Astrophysik an extrem verdünnten Proben. Die Strahlung ist laserartig, also kohärent, und die Wellenlänge lässt sich im Bereich von 4 bis 60 Nanometern einstellen. Besonders wichtig ist auch die extrem kurze Dauer der Strahlungspulse, die nur 10 bis 50 Femtosekunden (billiardstel Sekunden) beträgt. Wie mit einem ultraschnellen Stroboskop können die Wissenschaftler damit zukünftig schnelle Abläufe wie die Bildung von chemischen Bindungen filmen oder etwa die Vorgänge bei der magnetischen Datenspeicherung direkt beobachten.

Die hohe Energie der Strahlung erlaubt es, im Labor Energiedichten in Materie herzustellen, wie man sie sonst nur im Kosmos findet, und eröffnet daher auch für die Plasmaphysik neuen Zugang zu offenen Fragen. Besonders interessant ist auch der Wellenlängenbereich um 13,5 Nanometer, denn Strahlung dieser Wellenlänge wird in der Halbleiterindustrie benötigt, um mit Hilfe der EUV (*extreme ultraviolet*)-Lithographie die zukünftige Generation von Mikroprozessoren herzustellen.

Für die Lebenswissenschaften ist der Wellenlängenbereich zwischen 2,3 und 4,4 Nanometern, der als „Wasserfenster“ bezeichnet wird, ausschlaggebend. Im Wasserfenster absorbieren die Kohlenstoffatome in organischer Materie die Strahlung sehr gut, während das umgebende Wasser transparent und damit unsichtbar bleibt. Dieser Wellenlängenbereich wird von den Oberschwingungen des FLASH-Lasers und seit 2010 auch von der Grundwellenlänge erreicht. Dadurch werden für die Biologen bisher undurchführbare Untersuchungen zugänglich, etwa holographische Aufnahmen von Zellsystemen mit Hilfe eines einzigen Lichtpulses aus der FLASH-Anlage.



● Experimentierplätze in der FLASH-Halle

---

## SASE – das Prinzip der Freie-Elektronen-Laser

Die Freie-Elektronen-Laser FLASH und European XFEL funktionieren nach dem SASE-Prinzip der selbstverstärkten spontanen Emission: Beim Slalomkurs durch eine periodische Magnetanordnung (Undulator) strahlen die Elektronenpakete Licht (Photonen) einer festen Wellenlänge aus. Der Photonenstrahl breitet sich geradlinig aus und überlappt mit dem Elektronenpaket. Er prägt den Elektronen seine regelmäßige Struktur auf, das heißt: Nach einiger Zeit ist aus der anfangs gleichmäßigen Ladungsdichteverteilung eine Aneinanderreihung von einzelnen Ladungsscheibchen geworden, die jeweils eine Lichtwellenlänge voneinander getrennt sind. Nun strahlen alle Elektronenscheibchen im Gleichtakt – das Licht kann sich zu intensiver Laserstrahlung verstärken.



---

## Technologie für die Beschleuniger von morgen

Auch in technologischer Hinsicht dringt FLASH weit in Neuland vor. Der Freie-Elektronen-Laser funktioniert nach dem SASE-Prinzip (*Self-Amplified Spontaneous Emission*), einem besonderen Verstärkungsprozess. Dabei fliegen Elektronen aus einem Teilchenbeschleuniger durch eine periodische Magnetanordnung, den Undulator, der sie auf einem rasanten Slalomkurs zur Aussendung von Lichtblitzen zwingt. Diese verstärken sich nach dem SASE-Prinzip zu kurzweiligen, intensiven Laserlichtblitzen.

Ein besonderes Merkmal bei FLASH ist der Einsatz supraleitender Beschleunigertechnik, um die Elektronen auf die erforderlichen hohen Energien zu bringen. Die hierfür eingesetzte Technologie wurde vom internationalen Team der TESLA Collaboration von 1992 bis 2004 bei DESY entwickelt und erprobt. In den auf minus 271 Grad Celsius gekühlten Beschleunigungselementen, den Resonatoren, fließt der Strom verlustfrei, so dass praktisch die gesamte eingespeiste elektrische Leistung auf die Teilchen übertragen werden kann – eine äußerst effiziente Methode der Beschleunigung. Außerdem liefern die supraleitenden Resonatoren einen sehr feinen und gleichmäßigen Elektronenstrahl von extrem hoher Qualität. Ein solcher spezieller Teilchenstrahl ist die Voraussetzung dafür, einen Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich überhaupt betreiben zu können.

Die supraleitende TESLA-Beschleunigertechnologie bildet die Grundlage für zwei weitere Großprojekte: den Röntgenlaser European XFEL mit seinem rund 1,5 Kilometer langen Linearbeschleuniger und das Zukunftsprojekt der Teilchenphysik, den in weltweiter Zusammenarbeit geplanten International Linear Collider ILC. Dessen zwei bis zu 20 Kilometer lange Beschleunigungsstrecken sollen ebenfalls mit supraleitenden Resonatoren bestückt werden. Beim Betrieb des etwa 150 Meter langen Linearbeschleunigers von FLASH können die Wissenschaftler und Ingenieure deshalb für beide Projekte wichtige Erkenntnisse gewinnen. Auch für Industrieunternehmen ist die Beteiligung an der FLASH-Anlage langfristig sehr attraktiv, da sie sich durch das erworbene technische Know-how für den European XFEL und den Bau weiterer Linearbeschleuniger weltweit qualifizieren können.

### Doppelt Spitze: FLASH II

Zu den Eigenschaften einer Schlüsseltechnologie – und die Freie-Elektronen-Laser sind eine solche – gehört, dass sie sich rasant entwickelt und die Konstrukteure immer schon mit den Herausforderungen von morgen und übermorgen beschäftigt sind. Daher ist es nur folgerichtig, dass Konzepte für die Erweiterung der FLASH-Anlage (FLASH II) bereits konkrete Form annehmen.

Den Projektvorschlag für FLASHII arbeitete DESY gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin aus. Er sieht den Bau einer zweiten Tunnelstrecke mit Undulatoren und einer zweiten Halle vor, die Platz für sechs Experimentierstationen bietet. Damit lässt sich die Nutzerkapazität von FLASH mehr als verdoppeln und der großen Nachfrage gerecht werden. FLASH und FLASHII können parallel, mit weitgehend unabhängig einstellbarer Wellenlänge betrieben werden, wobei FLASHII noch deutlich kleinere Wellenlängen abdecken soll als FLASH. Denn die Erweiterung bietet mehr als nur zusätzliche Messplätze. Das Projekt beinhaltet wesentliche technische Verbesserungen, um auch die Strahlqualität weiter zu erhöhen und die Experimentierbedingungen zu optimieren.

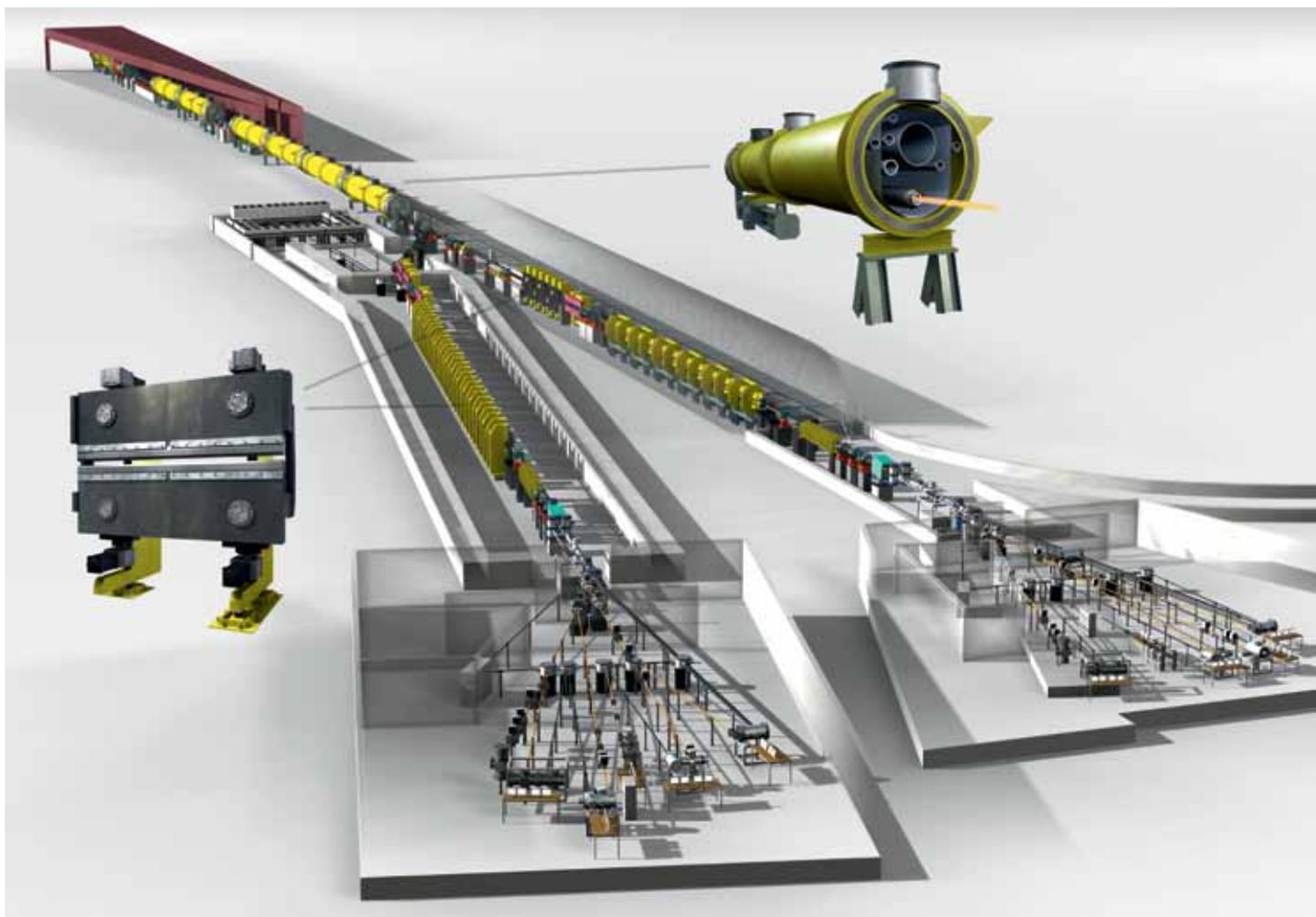
Geplant ist, insbesondere das so genannte Seeding, das für eine Testphase bei FLASH eingebaut ist, für den Experimentierbetrieb nutzbar zu machen. Bisher wird die Lichtverstärkung bei FLASH durch das von den Teilchenpaketen im Undulator abgestrahlte Licht selbst ausgelöst. Beim Seeding dagegen wird dieser Verstärkungsprozess gezielt mit dem Licht eines optischen Lasers gestartet. Dadurch sind die

erzeugten FEL-Pulse perfekt mit diesem Laser synchronisiert. Dies ist die Voraussetzung dafür, sehr schnelle Prozesse wie beispielsweise chemische Reaktionen zu beobachten. Außerdem wird immer dieselbe Pulsform erzeugt, was für viele Experimente sehr wichtig ist – bisher ist jeder Puls anders.

In Zukunft wird es ebenfalls möglich, noch kürzere Pulslängen von weniger als zehn Femtosekunden und noch kürzere Wellenlängen zu erreichen. Für Experimente mit magnetischen Materialien soll FLASHII außerdem zirkular oder sogar variabel polarisiertes Licht erzeugen, bislang steht nur linear polarisiertes Licht zur Verfügung. Solche neuartigen Experimente können beispielsweise dazu beitragen, künftige Magnetspeicher für Computer zu entwickeln.

Die Genehmigung für FLASHII erfolgte 2010, die Tunnelarbeiten starteten 2011. Der Beginn der Inbetriebnahme ist für 2013 vorgesehen. ●

Die Erweiterung FLASH II beinhaltet eine zweite Tunnelstrecke mit einer zweiten Experimentierhalle (links). Rechts: die bestehende FLASH-Anlage mit Linearbeschleuniger und Experimentierhalle. ●



# GLANZ LEISTUNG.

## European XFEL Europas Leuchtturm für die Wissenschaft

Er ist ein wahres Highlight: der Freie-Elektronen-Röntgenlaser European XFEL, der derzeit als europäisches Projekt mit starker Beteiligung von DESY gebaut wird und 2015 in Betrieb gehen soll. Als einzige Lichtquelle dieser Art in Europa wird der European XFEL hochintensive, ultrakurze Laserlichtblitze im harten Röntgenbereich liefern – also mit Wellenlängen, die nochmals deutlich kürzer sind als die von FLASH. Auch seine Leuchtstärke wird neue Maßstäbe setzen. Damit eröffnet der European XFEL völlig neue Forschungsmöglichkeiten für Naturwissenschaftler und industrielle Anwender aus aller Welt.

### Revolution in der Röntgenforschung

Die Erfindung von Lasern im infraroten und sichtbaren Bereich hat in den letzten 50 Jahren eine wahre Revolution in Wissenschaft und Technologie ausgelöst. Laser sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken – ihre Anwendungen reichen vom Laserpointer über die Datenspeicherung und Drucktechnik bis hin zur Entfernungsmessung, Schneid- und Schweißwerkzeugen oder Laserskalpellen. Parallel dazu hat auch die Nutzung der an Ringbeschleunigern erzeugten Synchrotronstrahlung im Ultravioletten sowie im weichen und harten Röntgenbereich seit den 1960er Jahren große experimentelle Fortschritte und Entdeckungen in nahezu allen Naturwissenschaften ermöglicht. Mit dem Bau leistungsstarker Röntgenlaser wie dem European XFEL hoffen Naturwissenschaftler aller Fachrichtungen, die Erfolgsgeschichte des Lasers nun auch im Röntgenbereich fortzuschreiben – und damit die Forschung mit Röntgenstrahlung ebenso zu revolutionieren.

Die Strahlung der Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich übertrifft die Synchrotronstrahlung nochmals deutlich: Sie ist um ein Vielfaches brillanter, kohärent, d.h. laserlichtartig, und wird in Pulsen von unter 100 Femtosekunden (billiardstel Sekunden) Dauer und mit einer Spitzenleistung von mehreren

Gigawatt abgestrahlt. Damit erschließen sich Forschungsfelder, von denen Wissenschaftler bisher nur träumen konnten. Mit den Röntgenblitzen des European XFEL lassen sich atomare Details von Viren und Zellen entschlüsseln, dreidimensionale Aufnahmen aus dem Nanokosmos machen, chemische Reaktionen filmen und Vorgänge unter Extrembedingungen untersuchen, wie sie etwa im Inneren von Planeten vorherrschen. Damit ermöglicht die Anlage neue Erkenntnisse in nahezu allen technisch-wissenschaftlichen Bereichen, die für die Alltagswelt von zentraler Bedeutung sind – darunter Medizin, Pharmazie, Chemie, Materialwissenschaft, Nanotechnologie, Energietechnik und Elektronik.

## Der Standort des European XFEL

Der European XFEL verläuft größtenteils in Tunneln unter der Erde, zu denen drei Betriebsgelände Zugang ermöglichen. Die 3,4 Kilometer lange Anlage erstreckt sich von DESY in Hamburg in nordwestlicher Richtung bis in die schleswig-holsteinische Stadt Schenefeld (Kreis Pinneberg). Auf dem DESY-Gelände beginnt der unterirdische Tunnel für den Linearbe-

schleuniger, der die lichtschnellen Elektronen zur Erzeugung der Röntgenstrahlung liefert. In Schenefeld entsteht der Forschungscampus mit einer unterirdischen Experimentierhalle, die Platz für zehn Messstationen bietet. Hier werden ab 2015 internationale Teams von Wissenschaftlern mit den intensiven Röntgenblitzen experimentieren.



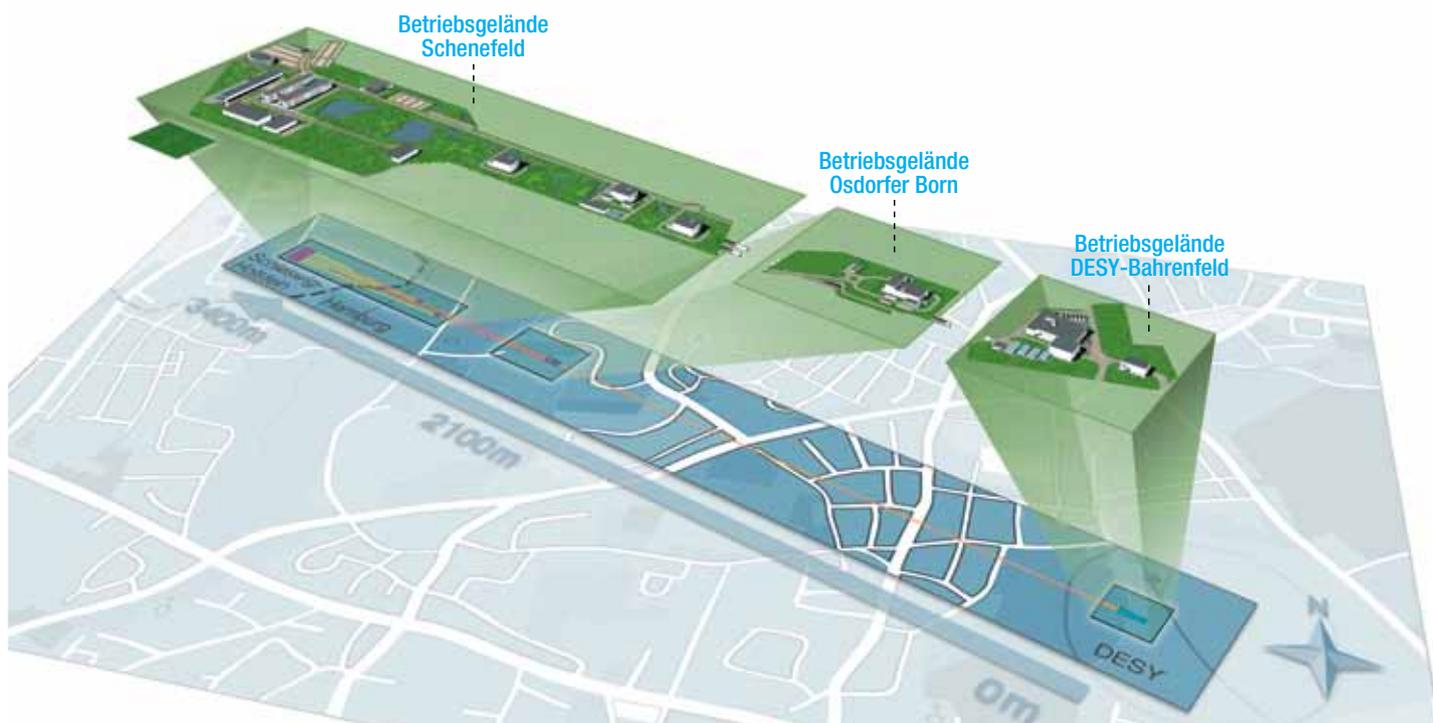
Das Zentralgebäude auf dem Forschungsgelände in Schenefeld: In der unterirdischen Experimentierhalle unter dem Hauptgebäude enden die Tunnel, aus denen die Röntgenlaserblitze zu den Experimentierstationen geleitet werden. Darüber befinden sich Labore und Büros, Seminarräume, ein Hörsaal und eine Fachbibliothek.



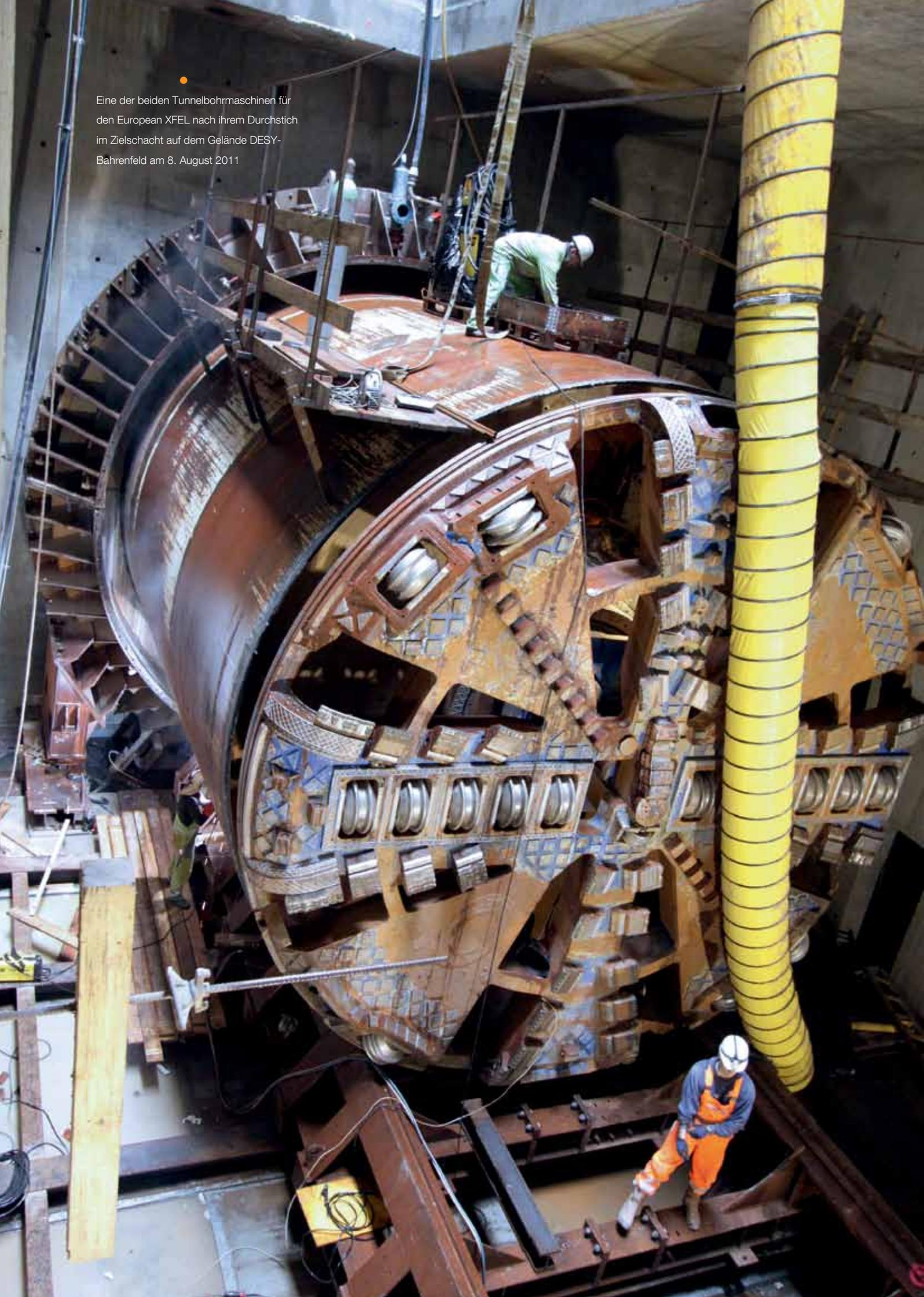
Unter dem Betriebsgelände Osdorfer Born beginnt die fächerartige Verzweigung der Tunnel. Unter der Verzweigungshalle werden die beschleunigten Elektronen zum ersten Mal auf verschiedene Tunnel verteilt. Hier werden zudem alle Elektronen gestoppt, für die es keine weitere Verwendung gibt.



Der Startpunkt auf dem Betriebsgelände DESY-Bahrenfeld. Im Injektorbereich (rechts) werden die Elektronen bereitgestellt, das Eingangsbauwerk (Mitte) bietet Zugang zum Beschleuniger. Die Modulatorhalle (links) dient der Stromversorgung. In der Kältehalle (verdeckt) wird das flüssige Helium aufbereitet, das den Beschleuniger auf minus 271 Grad Celsius kühlt.



•  
Eine der beiden Tunnelbohrmaschinen für den European XFEL nach ihrem Durchstich im Zielschacht auf dem Gelände DESY-Bahrenfeld am 8. August 2011



## Zwei starke Partner

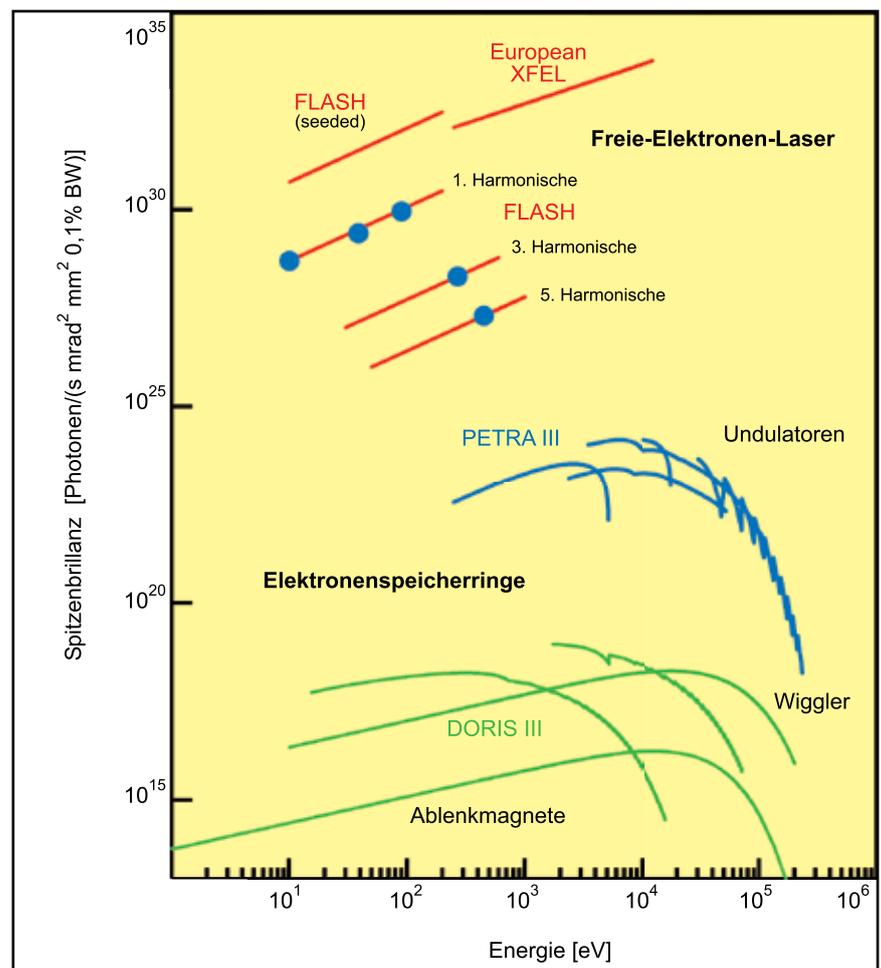
Als europäisches Projekt wird der European XFEL von einer eigenständigen Forschungsorganisation betrieben, bei der DESY ein Gesellschafter neben anderen ist. Die Beziehung zwischen der European XFEL GmbH und DESY ist aber nicht nur wegen der räumlichen Nähe eine besondere. Bei DESY wurden die ersten Pläne für den European XFEL entwickelt und das Planfeststellungsverfahren für das Großprojekt initiiert. DESY ist Bauherr der Tiefbauarbeiten, die im Januar 2009 begonnen haben. Außerdem baut DESY zusammen mit internationalen Partnern das Herzstück der Röntgenlaseranlage: den rund zwei Kilometer langen Beschleuniger inklusive der Elektronenquelle. Nach Fertigstellung wird DESY im Auftrag der European XFEL GmbH mit dem Betrieb des Beschleunigers betraut. Auch in Zukunft werden die European XFEL GmbH und DESY also starke Partner sein und den neuen Röntgenlaser zu einem Leuchtturm der Wissenschaft mit internationaler Strahlkraft machen.



## Laserlicht der Superlative

Als Lichtquelle der Zukunft setzt der European XFEL neue Maßstäbe:

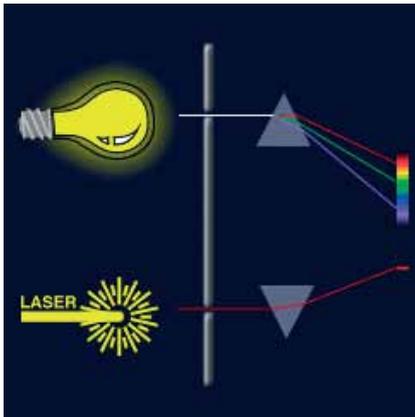
- > Seine Leuchtstärke ist in ihren Spitzenwerten milliardenfach höher als die modernster Röntgen-Synchrotronstrahlungsquellen, die mittlere Leuchtstärke ist zehntausendfach höher.
- > Seine Zeitauflösung ist um Größenordnungen besser als die bisher verfügbarer Synchrotronstrahlungsquellen im Röntgenbereich:  
Ein Laserblitz ist kürzer als 100 Femtosekunden (100 milliardstel Sekunden). Das ist die Zeitdauer, in der sich chemische Bindungen ausbilden oder Molekülgruppen ihre Lage ändern.
- > Die Wellenlänge seines Röntgenlichts ist so klein, dass selbst atomare Details erkennbar werden. Sie kann zwischen 0,05 und 6 Nanometern (milliardstel Metern) variiert werden.
- > Seine Röntgenstrahlung hat die Eigenschaften von Laserlicht, d.h. sie ist kohärent. Damit sind beispielsweise holographische Experimente auf atomarer Ebene möglich.



# Laser – ein besonderes Licht

## > Einfarbigkeit

Das Licht der Sonne oder das aus einer Taschenlampe besteht aus einer Vielzahl von Wellenzügen unterschiedlicher Wellenlängen, also Farben, die zusammen einen weiß-gelblichen Eindruck erzeugen. Laser dagegen erzeugen in der Regel nur Strahlung einer bestimmten Wellenlänge.



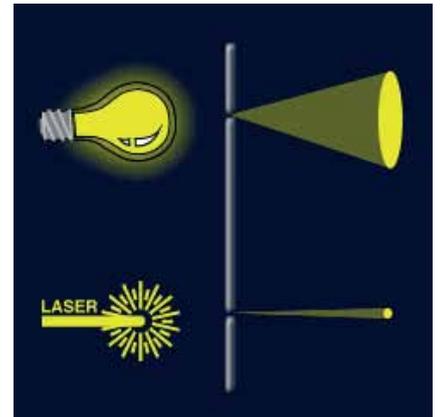
## > Kohärenz (Laserartigkeit)

Um eine elektromagnetische Strahlung mathematisch genau zu beschreiben, hilft es, sich die Strahlung aus einzelnen Wellenzügen zusammengesetzt vorzustellen. Ein solcher Wellenzug zeichnet sich durch eine feste Wellenlänge, seine Länge und Position aus.

Für Laserlicht gilt, dass die einzelnen Wellenzüge sehr lang sein können und dass die sich nebeneinander befindenden Züge im Gleichtakt schwingen. Diese Eigenschaft heißt Kohärenz und ist beispielsweise Voraussetzung, wenn es darum geht, dreidimensionale Aufnahmen von Objekten zu machen.

## > Emittanz

Die Emittanz ist definiert als das Produkt aus Fläche und Auffächerung eines Lichtstrahls. Je kleiner die Emittanz, desto besser ist der Strahl bei gegebener Größe der Lichtquelle gebündelt. Im Gegensatz zu Licht z.B. aus Glühlampen besitzen Laserstrahlen eine kleine Emittanz, sie weiten sich nur geringfügig auf.



## > Brillanz

Die Brillanz oder Leuchtstärke ist ein Maß für die Anzahl der in einem bestimmten Wellenlängenbereich erzeugten Photonen. Sie ist umso größer, je kleiner die Lichtquelle und je enger gebündelt der ausgesandte Lichtstrahl ist. Die Brillanz eines Lasers ist weit größer als die der Sonne.

## Hologramme von Molekülen

Je kleiner die Wellenlänge der Strahlung, desto kleinere Strukturen lassen sich damit untersuchen. Deshalb ist Röntgenstrahlung bei den Forschern so begehrt: Ihre Wellenlänge ist so klein, dass Proben mit atomarer Auflösung untersucht werden können. Ist die Röntgenstrahlung nun auch noch laserartig, so lassen sich holographische Aufnahmen mit atomarer Auflösung realisieren – also Aufnahmen, bei denen die räumliche Anordnung der Atome, zum Beispiel in einem Kristall, dreidimensional abgebildet werden kann.

Bei konventioneller Röntgenstrahlung müssen die Forscher einen Umweg einschlagen, um sich vom Aufbau eines Kristalls ein räumliches Bild zu machen. Damit die Struktur der untersuchten Probe eindeutig bestimmt werden kann, müssen zahlreiche Informationen über das betreffende Molekül bereits im Vorfeld bekannt sein und in Computerprogramme einfließen. Unter Zuhilfenahme dieser Annahmen lässt sich aus den Röntgenaufnahmen mit Hilfe komplexer

mathematischer Verfahren am Computer die Anordnung der Atome dreidimensional rekonstruieren.

Bei laserartiger Strahlung sind im Prinzip keine Vorinformationen erforderlich, denn die räumlichen Informationen über die Positionen von verschiedenen Atomen im Kristall sind bereits in der Röntgenaufnahme enthalten, sie müssen „nur“ am Computer sichtbar gemacht werden – was allerdings ebenfalls sehr aufwendig sein kann. Die dreidimensionale Struktur der Probe, die aus dem aufgenommenen Hologramm herausgerechnet wurde, kann dann am Computer in alle Richtungen gedreht und betrachtet werden.

## Unerreichte Intensität

Die extrem hohe Intensität der vom European XFEL erzeugten Röntgenstrahlung bietet gleich mehrere Vorteile. Nicht nur, dass sich Messungen, die bislang mehrere Tage dauerten,

am European XFEL in Sekunden- oder gar Mikrosekunden-schnelle durchführen lassen; auch sehr stark verdünnte Proben wie dünne Gasstrahlen bis hin zu einzelnen Molekülen oder Atomen können mit den intensiven Röntgenblitzen untersucht werden. Die hohe Intensität eröffnet zudem ganz neue Möglichkeiten, exotische Materiezustände wie Plasmen herzustellen und zu untersuchen – also heiße, ionisierte Gase, wie sie zum Beispiel im Inneren von Sternen existieren. Die hohe Strahlungsintensität des European XFEL erlaubt es, Materie unter extremen Bedingungen mit einem einzigen ultrakurzen Röntgenlichtblitz zu erzeugen und sie mit einem zweiten unmittelbar darauf folgenden Blitz zu untersuchen.

Die hohe Brillanz der European-XFEL-Strahlung eröffnet spektakuläre Möglichkeiten, Beugungsbilder einzelner Moleküle mit Hilfe eines einzigen Lichtblitzes aufzunehmen, ohne aus diesen Molekülen zuvor mühsam einen Kristall züchten zu müssen. Damit wäre insbesondere in der Molekularbiologie ein wesentliches Hindernis aus dem Weg geräumt: Viele für die Forschung äußerst wichtige Strukturen wie Membranproteine oder Viren lassen sich nur sehr schwer beziehungsweise gar nicht in eine Kristallform zwingen, was die detaillierte Untersuchung ihrer Struktur bislang sehr schwierig macht.

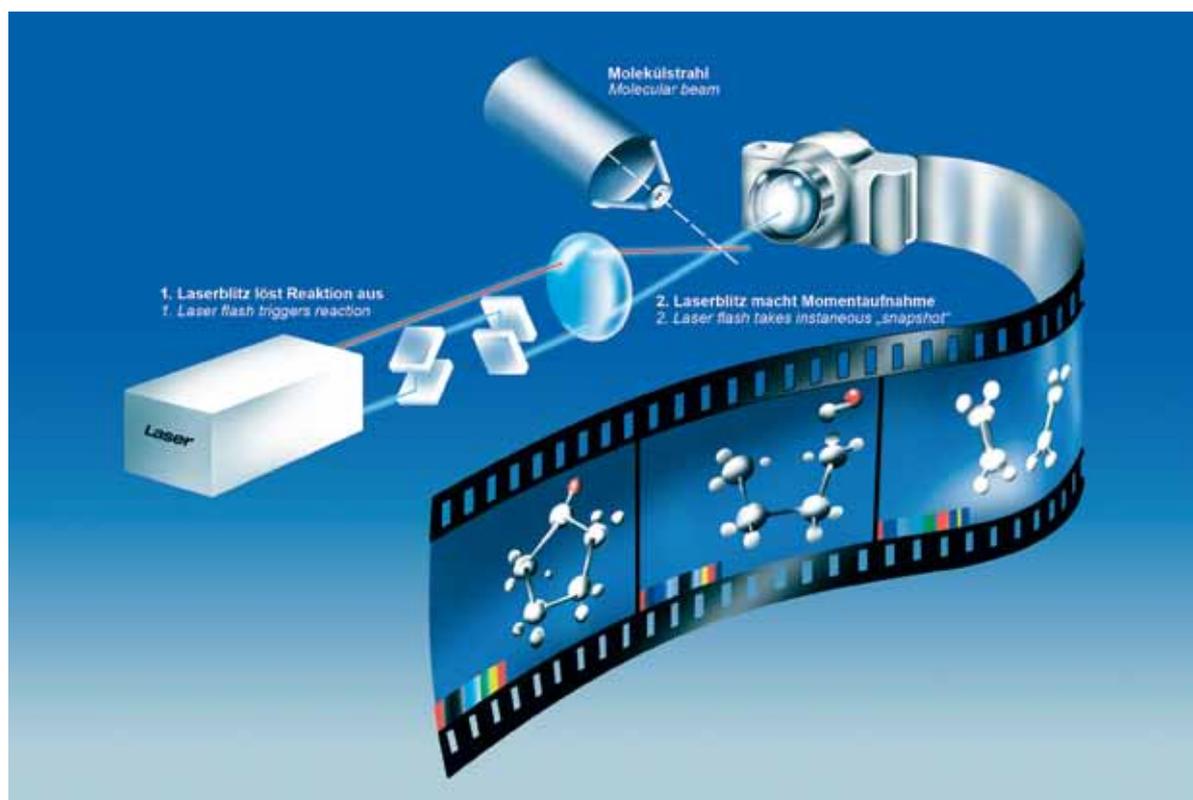
## Atome im Blitzlichtgewitter

Da die Lichtblitze aus dem European XFEL mit weniger als 100 Femtosekunden Dauer extrem kurz sind, eignen sie sich hervorragend dazu, den Ablauf schneller Prozesse – wie chemischer Reaktionen, Bewegungen von Biomolekülen

oder der Entstehung von Feststoffen – regelrecht zu filmen: Femtosekunden sind die zeitliche Größenordnung, in der Veränderungen auf atomarer Ebene ablaufen, wenn zwei Moleküle miteinander reagieren. Mit Hilfe ultraschneller Laser können die Forscher daher Momentaufnahmen der Molekülanordnungen machen, die sich während der Reaktion bilden – ohne dass die Aufnahmen verwackeln, wie es bei längeren Lichtblitzen, d.h. längeren Belichtungszeiten der Fall wäre. In Serie ergibt das einen Film des Reaktionsablaufs. Mit den ultrakurzen Röntgenlaserblitzen des European XFEL lassen sich solche Filme mit bislang unerreichter Zeitauflösung aufnehmen, wobei die reagierenden Moleküle mit atomarer räumlicher Auflösung abgebildet werden.

## Licht der Zukunft

Mit den außergewöhnlichen Eigenschaften seiner Strahlung hebt sich der European XFEL auch von den modernsten Synchrotronstrahlungsquellen deutlich ab. Von seinem zukunftsweisenden Potenzial profitieren fast alle Naturwissenschaften – von der Physik über die Chemie, die Material- und Geoforschung bis hin zu den Biowissenschaften. Längerfristig bieten sich auch für die Industrie und die Medizin hervorragende Perspektiven. Dabei wird die neue Anlage jedoch nicht die bestehenden Röntgenquellen ersetzen, sondern völlig neue Wege für die Forschung eröffnen und zukunftsweisende Experimente ermöglichen, die selbst an den modernsten heutigen Quellen nicht durchführbar sind. ●



● Mit ultraschnellen Lasern lassen sich chemische Reaktionen „filmen“.

Wir danken allen, die an der Entstehung dieser Broschüre mitgewirkt haben, für ihre tatkräftige Unterstützung. ●

# IMPRESSUM.

## Herausgeber

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY  
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Standort Hamburg: Notkestraße 85, D-22607 Hamburg  
Tel.: +49 40 8998-0, Fax: +49 40 8998-3282  
desyinfo@desy.de, www.desy.de

Standort Zeuthen: Platanenallee 6, D-15738 Zeuthen  
Tel.: +49 33762 7-70, Fax: +49 33762 7-7413  
desyinfo.zeuthen@desy.de

Hamburger Synchrotronstrahlungslabor: hasylab.desy.de

## Autorin

Ilka Flegel, Textlabor, Jena

## Realisation und Redaktion

Ute Wilhelmsen  
Wiebke Laasch  
Ilka Flegel, Textlabor, Jena

## Design

Jung von Matt/brand identity GmbH, Hamburg

## Layout

Heike Becker

## Druck

Hartung Druck + Medien, Hamburg

## Redaktionsschluss

September 2011

Nachdruck, auch auszugsweise, unter Nennung der Quelle  
gerne gestattet.

## Fotos und Grafiken

Bock-Film, Bremen  
DESY  
EMBL  
Jakob Erhorn, Hamburg  
European XFEL  
Peter Ginter, Lohmar  
Dirk Günther Grafik Design, Hamburg  
hammeskrause architekten, Hamburg  
Marc Hermann, tricklabor  
Kontor B3, Hamburg  
Max-Planck-Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie,  
Hamburg  
Heiner Müller-Elsner / Agentur Focus.de  
Rüdiger Nehmzow, Düsseldorf  
Option Z, Thomas Plettau, Frankfurt  
Dirk Rathje, Hamburg  
Dominik Reipka, Hamburg  
Reimo Schaaf, Hamburg  
Christian Schmid, Hamburg  
Eric Shambroom Photography

Seite 3, 39: Babcock Noell GmbH, Würzburg

Seite 20-21: Henry N. Chapman et al., Nature Physics 2, 839  
(2006)

Seite 22: Michael Meyer et al., Physical Review A 74,  
011401(R) (2006)

Seite 24-25: Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

Seite 28: Max-Planck-Institut für Biophysikalische  
Chemie, Göttingen

Seite 30-31: Nachdruck mit Genehmigung aus:

Jan-Dierk Grunwaldt et al., Journal of Physical  
Chemistry B, vol. 110, issue 17, pp 8674-8680  
(2006), Copyright © 2006 American Chemical  
Society

Seite 32-33: Felix Beckmann, Helmholtz-Zentrum Geesthacht

## Deutsches Elektronen-Synchrotron Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

In der Helmholtz-Gemeinschaft haben sich 17 naturwissenschaftlich-technische und medizinisch-biologische Forschungszentren zusammengeschlossen. Ihre Aufgabe ist es, langfristige Forschungsziele des Staates und der Gesellschaft zu verfolgen. Die Gemeinschaft strebt nach Erkenntnissen, die dazu beitragen, Lebensgrundlagen des Menschen zu erhalten und zu verbessern. Dazu identifiziert und bearbeitet sie große und drängende

Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft durch strategisch-programmatisch ausgerichtete Spitzenforschung in sechs Forschungsbereichen: Energie, Erde und Umwelt, Gesundheit, Schlüsseltechnologien, Struktur der Materie sowie Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr.

[www.helmholtz.de](http://www.helmholtz.de)