

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
Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft



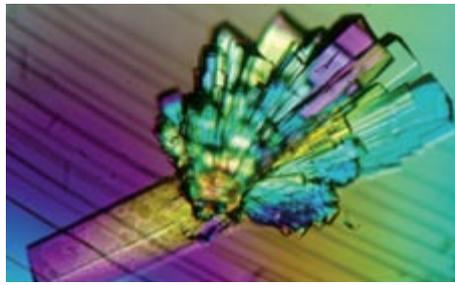
Arbeiten in der Experimentierhalle von FLASH bei DESY



INHALT.



DESY	Wir machen Erkenntnis möglich	4
	Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren zur Erforschung der Struktur der Materie. DESY entwickelt und baut große Teilchenbeschleuniger und forscht in den Bereichen Forschung mit Photonen und Teilchenphysik – diese Kombination ist einmalig in Europa.	
STRAHL KRAFT	Lichtblitze für die Forschung	6
	Röntgenstrahlen sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken: Seit mehr als 110 Jahren spielt die energiereiche Strahlung eine Schlüsselrolle in Medizin und Materialwissenschaften, aber auch in der Grundlagenforschung. Dabei hat die rasante Verbesserung der Röntgenquellen immer mehr neue Anwendungsbereiche eröffnet und ungeahnte Forschungsfelder erschlossen. Mittlerweile nutzen Wissenschaftler auf der ganzen Welt das intensive Licht aus Teilchenbeschleunigern für ihre Experimente. Mit seiner einzigartigen Vielfalt von Lichtquellen ist das Forschungszentrum DESY ganz vorne mit dabei.	
ENERGIE BÜNDEL	Wie aus Teilchen Licht entsteht	8
	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.	
LICHT MASCHINEN	Strahlungsquellen bei DESY	10
	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.	
RÖNTGEN BLICK	Experimentiermöglichkeiten im HASYLAB	14
	Das Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB unterstützt und koordiniert die Forschung mit Photonen bei DESY. Die einmaligen Experimentiermöglichkeiten bei DESY locken jährlich über 2000 Forscher von rund 300 verschiedenen Hochschulen und Forschungsinstituten nach Hamburg. Die Gastwissenschaftler stammen aus 36 Ländern – von Armenien bis zu den Vereinigten Staaten. Einige Forschungsinstitute haben bei HASYLAB ständige Außenstellen eingerichtet oder betreiben eigene Messstationen, beispielsweise für biologische Strukturforschung oder Materialforschung.	



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 und DORIS III in Hamburg nutzen können.

16

BRILLANT RING

PETRA III – ein Juwel mit vielen Facetten

2009 soll sie fertig sein: PETRA III, eine der brilliantesten Speicherring-Röntgenstrahlungsquellen der Welt. Als leistungsstärkste Lichtquelle ihrer Art wird sie den Wissenschaftlern exzellente Experimentiermöglichkeiten mit Röntgenstrahlung besonders hoher Brillanz bieten. Davon profitieren vor allem Forscher, die sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzwelliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen.

36

ZIEL GERADE

FLASH – Weltrekord im Laserblitzen

Seit 2005 steht den Forschern bei DESY eine einmalige neue Lichtquelle zur Verfügung: FLASH, der weltweit erste und bis 2009 einzige Freie-Elektronen-Laser für den Bereich der weichen Röntgenstrahlung. Unter den modernen Lichtquellen spielt FLASH eine absolute Vorreiterrolle – und übertrifft dabei sowohl die besten Synchrotronstrahlungsquellen als auch die modernsten Lasersysteme im Röntgenbereich.

42

GLANZ LEISTUNG

XFEL – Europas Leuchtturm für die Wissenschaft

Er ist ein wahres Highlight: der Freie-Elektronen-Röntgenlaser XFEL, der derzeit als europäisches Projekt mit starker Beteiligung von DESY realisiert wird und 2013 in Betrieb gehen soll. Als einzige Lichtquelle dieser Art in Europa wird die XFEL-Anlage hochintensive, ultrakurze Laserlichtblitze im harten Röntgenbereich liefern – also mit Wellenlängen, die nochmals deutlich kürzer sind als die von FLASH. Auch die Leuchtstärke des Röntgenlasers XFEL wird neue Maßstäbe setzen. Damit eröffnet der XFEL völlig neue Forschungsmöglichkeiten, die für Naturwissenschaftler und industrielle Anwender aus aller Welt bisher unvorstellbar waren.

46

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren zur Erforschung der Struktur der Materie. DESY entwickelt und baut große Teilchenbeschleuniger und forscht in den Bereichen Forschung mit Photonen und Teilchenphysik – diese Kombination ist einmalig in Europa.

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

> **Beschleuniger:**

DESY entwickelt und baut 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 45 Nationen kommen jährlich etwa 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 europäische Röntgenlaser XFEL in Hamburg, der europäische Protonenbeschleuniger LHC in Genf, das internationale Neutrinoobservatorium IceCube am Südpol oder der internationale Linearbeschleuniger ILC.



DESY-Steckbrief

- > **Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY**
 - > **Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren**
 - > **Mit öffentlichen Mitteln finanziertes nationales Forschungszentrum**
 - > **Standorte: Hamburg und Zeuthen (Brandenburg)**
 - > **Mitarbeiter: 1900, davon 200 in Zeuthen**
 - > **Etat: 170 Millionen Euro (Hamburg: 154 Mio. Euro, Zeuthen: 16 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 fast 50 Jahren umfangreiche Erfahrungen in der Beschleunigerentwicklung gesammelt und gehört mit 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

Kleinste Details aus dem Mikrokosmos macht die intensive Strahlung sichtbar, die von Teilchenbeschleunigern erzeugt wird. Sie zeigt Strukturen und Reaktionen von Werkstoffen und Biomolekülen. Im Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB bei DESY experimentieren Wissenschaftler aus aller Welt mit dem besonderen Licht. Die bestehenden und geplanten Lichtquellen bieten exzellente Forschungsmöglichkeiten:

> Der Teilchenbeschleuniger DORIS III liefert Strahlung für eine Vielzahl von Anwendungen. Hier werden zum Beispiel Katalysatoren oder Halbleiterkristalle analysiert und die

Grundlagen für die Entwicklung von neuen Medikamenten gelegt.

> Weltweit einmalige Untersuchungsmöglichkeiten bietet der neue Freie-Elektronen-Laser FLASH, der hochintensive, kurzwellige Laserlichtblitze erzeugt.
> Ab 2009 steht den Forschern bei DESY die weltbeste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle, PETRA III, zur Verfügung.
> Der geplante europäische Röntgenlaser XFEL ergänzt das einzigartige Spektrum von modernsten Lichtquellen in der Metropolregion Hamburg.

Teilchenphysik

Auf den Spuren von Quarks, Supersymmetrie und Extra-Dimensionen – 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, eröffnen sich den Forschern mit den nächsten Großprojekten der Teilchenphysik, an denen auch die DESY-Wissenschaftler beteiligt sind: der

weltweit leistungsstärkste Beschleuniger LHC in Genf und der geplante internationale Linearbeschleuniger ILC.

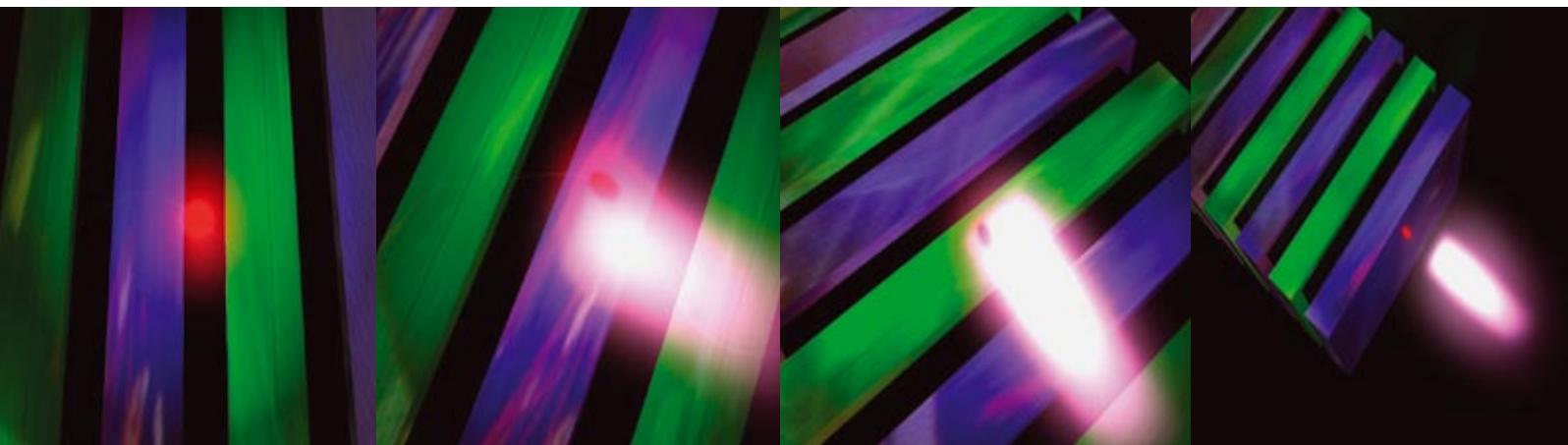
> In die fernen Weiten des Kosmos blicken die DESY-Forscher und ihre Kollegen mit den Neutrinooteleskopen AMANDA und IceCube im Eis des Südpols, auf der Suche nach flüchtigen Geisterteilchen aus dem Weltall.

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

STRAHL KRAFT.

Lichtblitze für die Forschung

Röntgenstrahlen sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken: Seit mehr als 110 Jahren spielt die energiereiche Strahlung eine Schlüsselrolle in Medizin und Materialwissenschaften, aber auch in der Grundlagenforschung. Dabei hat die rasante Verbesserung der Röntgenquellen immer mehr neue Anwendungsbereiche eröffnet und ungeahnte Forschungsfelder erschlossen. Mittlerweile nutzen Wissenschaftler auf der ganzen Welt das intensive Licht aus Teilchenbeschleunigern für ihre Experimente. Mit seiner einzigartigen Vielfalt von Lichtquellen ist das Forschungszentrum DESY ganz vorne mit dabei.



Licht für alle Fälle

Seit dem ersten Einsatz von Teilchenbeschleunigern als Synchrotronstrahlungsquellen in den 1960er Jahren wurden auf dem Gebiet enorme Fortschritte gemacht, vor allem durch die Verbesserung der Elektronenspeicherringanlagen: Alle zehn Jahre erhöhte sich die Brillanz der verfügbaren Lichtquellen um das Tausendfache! Die immer höhere Qualität der Röntgenstrahlen eröffnete den Wissenschaftlern völlig neue Forschungsmöglichkeiten, zum Beispiel in Bereichen wie den Umweltwissenschaften oder sogar der Archäometrie, der Untersuchung archäologischer Funde mit naturwissenschaftlichen Methoden.

Vorreiter DESY

DESY war von Anfang an einer der Vorreiter dieser überaus spannenden Entwicklungen. 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, die erste direkte Messung von Phononen mit Röntgenstrahlen 1986 und die ersten Untersuchungen des Magnetismus mit Hilfe der Röntgenabsorptionsspektroskopie 1987. Die meisten Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit universitären Gruppen durchgeführt, und auch für das überaus erfolgreiche Konzept der Außen-

stationen großer Forschungseinrichtungen – wie des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) – an den Synchrotronstrahlungsquellen wurde bei DESY der Grundstein gelegt. Mehr als 2000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt nutzen jährlich die Lichtquellen bei DESY für die Forschung mit Photonen.

Licht der Zukunft

Moderne Synchrotronstrahlungsanlagen werden eine entscheidende Rolle in der Nanoforschung und Nanotechnologie spielen, da sie nanometergroße, durchstimmbare und intensive Röntgenstrahlen mit einem hohen Grad an Kohärenz liefern. Ab 2009 geht die neue Speicherringanlage PETRA III bei DESY in Betrieb, die weltbeste Synchrotronstrahlungsquelle im Bereich der harten Röntgenstrahlung. In Verbindung mit dem Speicherring DORIS III, der für Experimente mit hohem Photonenfluss besonders geeignet ist und PETRA III somit hervorragend ergänzt, wird der nationalen und internationalen Nutzergemeinschaft bei DESY eine einzigartige Kombination von Synchrotronstrahlungsanlagen zur Verfügung stehen.

Mit den heutigen Lichtquellen lassen sich vor allem Gleichgewichtszustände der Materie untersuchen. Doch die Forscher träumen davon, physikalische oder biologische Systeme „bei der Arbeit“ beobachten zu können, also von statischen Bildern zu richtigen Filmen überzugehen. Dafür sind die von den

Speicherringen erzeugten Röntgenblitze jedoch zu schwach und vor allem zu lang im Vergleich zu den Zeitskalen, auf denen sich die Prozesse in der Natur abspielen. Die Art von Strahlung, die für solche zeitaufgelösten Beobachtungen notwendig ist, kann nur von neuartigen Röntgenquellen erzeugt werden: Röntgenlaser mit linearen Teilchenbeschleunigern werden dieses Ziel erreichen. Auch hier ist DESY einer der Vorreiter der aktuellen Entwicklungen.

Seit 2005 steht bei DESY der bisher einzigartige Freie-Elektronen-Laser im weichen Röntgenbereich FLASH zur Verfügung. Bereits während der ersten Messperioden konnten bahnbrechende Ergebnisse erzielt werden, die jetzt schon Maßstäbe setzen. Ab 2013 folgt die Inbetriebnahme des europäischen Röntgenlasers 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 XFEL in den verschiedensten Bereichen Neuland erschließen und es erlauben, spannende naturwissenschaftliche Fragestellungen zum ersten Mal zu erforschen, obwohl ähnliche Anlagen in Japan und den USA etwa drei Jahre früher in Betrieb gehen. Ein weiterer entscheidender Vorteil im Vergleich zur Konkurrenz ist der laufende Betrieb und die erfolgreiche Nutzung von FLASH, dem Prototypen für den XFEL. Denn so ist garantiert, dass die Nutzergemeinschaft des europäischen XFEL optimal auf die Forschung mit dem neuen Röntgenlaser vorbereitet ist. ●



„Dank der langjährigen exzellenten Leistungen von DESY in der Forschung mit Photonen und der Beschleunigerentwicklung, dank seines Angebots an außergewöhnlichen Anlagen und des neu eröffneten interdisziplinären Zentrums für Forschung an Freie-Elektronen-Lasern CFEL in Hamburg, wird DESY auch in Zukunft seinen Platz an der Weltspitze der Forschung mit Photonen behaupten und sogar noch weiter ausbauen können.“

Prof. Dr. Jochen R. Schneider
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

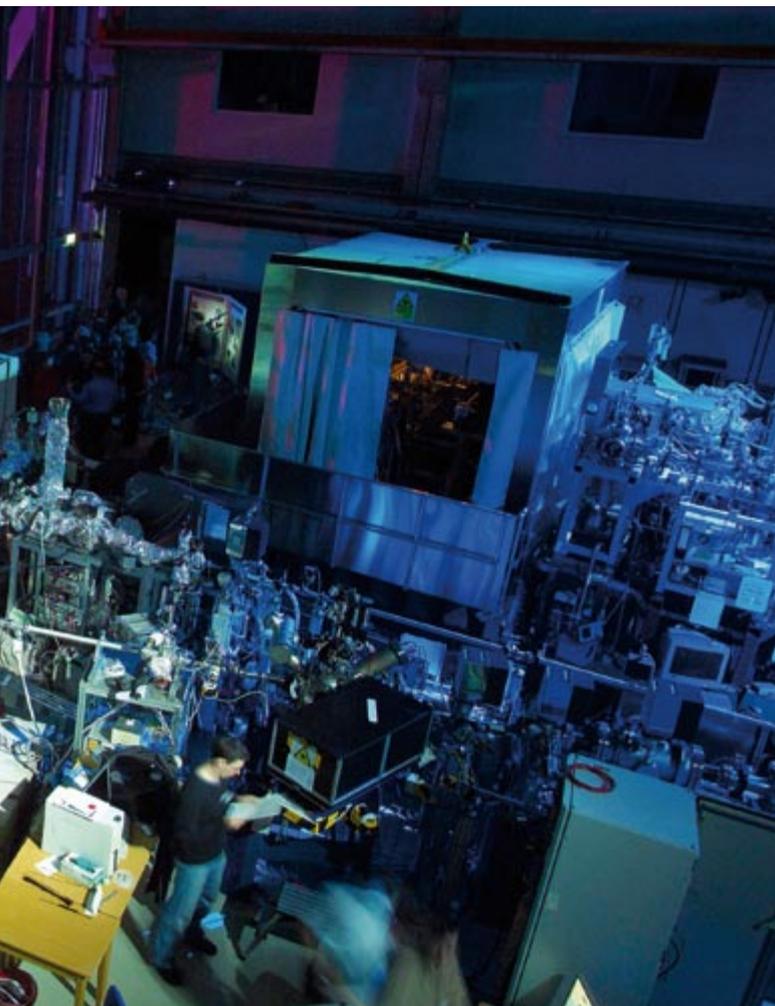
Das Licht aus den Beschleunigern

- > 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 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

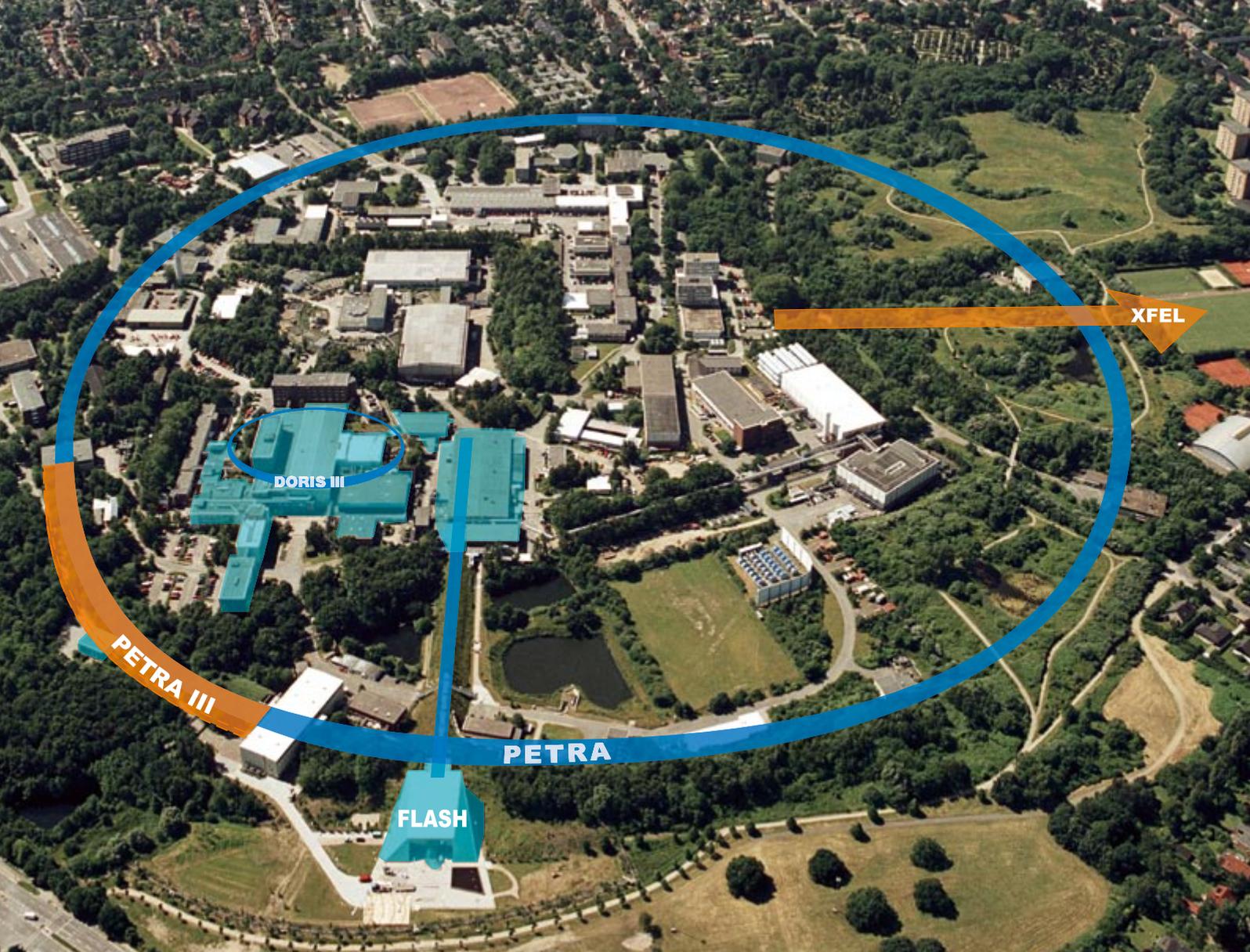
Im weltweiten Vergleich zeichnet sich die Forschung mit Photonen bei DESY durch die Vielfalt der Lichtquellen aus. In anderen, ähnlichen Forschungseinrichtungen steht meist ein einziger Beschleuniger für die Lichterzeugung zur Verfügung, der speziell für bestimmte Strahlungseigenschaften ausgelegt ist. 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 Wigglern 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: Seit Sommer 2007 wird der Beschleuniger umgebaut, im Jahr 2009 wird er unter dem Namen PETRA III als eine der weltweit brilliantesten Speicherring-Röntgenstrahlungsquellen den Nutzerbetrieb aufnehmen. Für die Umrüstung müssen knapp 300 Meter des Rings komplett umgebaut und eine neue Experimentierhalle errichtet werden. Geplant sind 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

Neu in der Riege der Lichtquellen bei DESY ist der Freie-Elektronen-Laser FLASH, der im Sommer 2005 den Nutzerbetrieb aufgenommen hat. Bis 2009 wird FLASH weltweit konkurrenzlos sein. Die 260 Meter lange Anlage ist die erste Lichtquelle der Welt, die Röntgenlaserstrahlung mit hoher Spitzenleuchstärke und ultrakurzen Lichtpulsen liefert – und erreicht dabei die kürzeste Wellenlänge, die je mit einem Freie-Elektronen-Laser erzeugt wurde. Bereits in der ersten Messperiode konnten die Wissenschaftler an FLASH spektakuläre neuartige Experimente durchführen. Entsprechend groß ist das Interesse an der Anlage. Als Nutzereinrichtung bietet FLASH fünf Messplätze, an denen im Wechsel verschiedene Instrumente aufgebaut werden können. Zudem liefert der Betrieb von FLASH wichtige Erkenntnisse für den zukünftigen Röntgenlaser XFEL und ähnliche Lichtquellen weltweit.

Der europäische Röntgenlaser XFEL

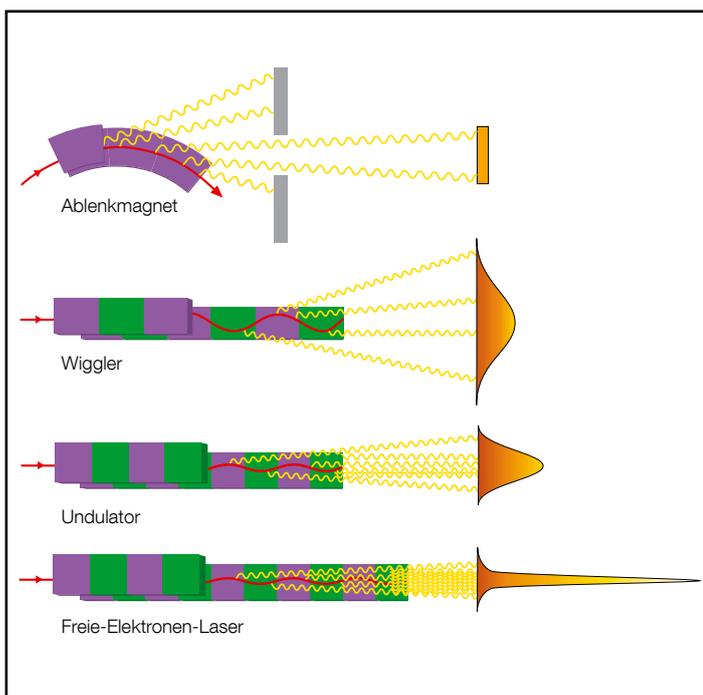
Er ist ein Highlight im wahrsten Sinne des Wortes: Der geplante europäische Freie-Elektronen-Röntgenlaser XFEL wird hochintensive, ultrakurze Laserlichtblitze im Röntgenbereich erzeugen, deren Wellenlängen nochmals deutlich kürzer sind als die von FLASH. Damit eröffnet der XFEL völlig neue, vielversprechende Experimentiermöglichkeiten in fast allen Naturwissenschaften. 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. Ein zweiter Experimentierkomplex mit weiteren zehn Messplätzen könnte hier später realisiert werden. Der XFEL wurde im Februar 2003 im Grundsatz genehmigt und soll als eigenständiges europäisches Projekt realisiert werden. Anfang Juni 2007 gab das Bundesforschungsministerium grünes Licht für den Bau einer Startversion mit sechs Messplätzen, die von Deutschland und internationalen Partnern finanziert wird. Der Beginn der Inbetriebnahme ist für 2013 geplant.

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



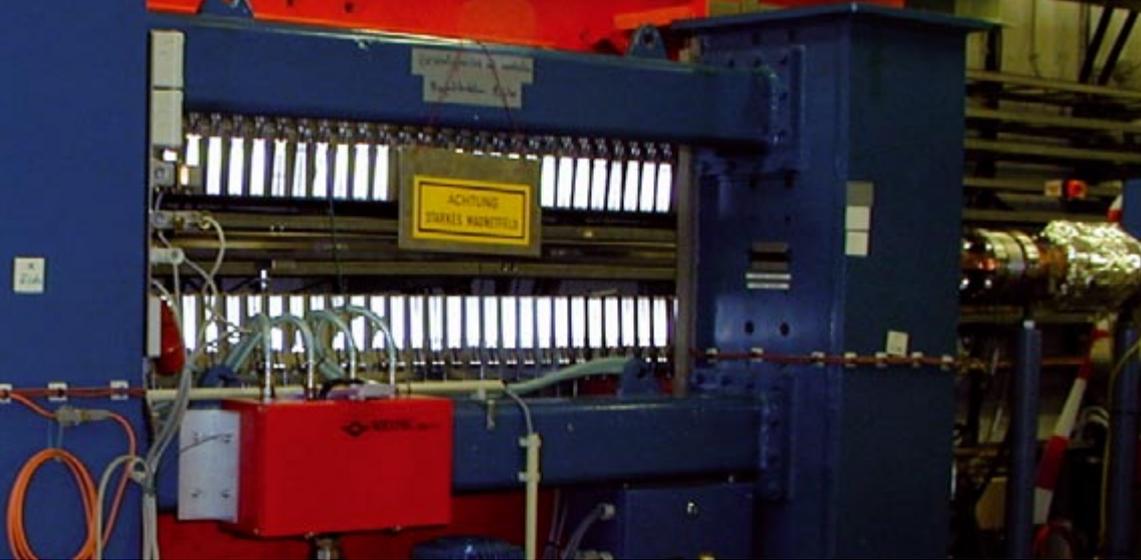
Der Speicherring DORIS III, der bei DESY seit 1993 ausschließlich als Synchrotronstrahlungsquelle eingesetzt wird, ist eine Lichtquelle der zweiten Generation. Im Gegensatz zu ihren Vorgängern der ersten Generation sind diese nicht nur mit Ablenkmagneten zur Lichterzeugung ausgestattet, sondern auch mit speziellen Magnetstrukturen, vorwiegend Wigglern, 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 gehen wird, steht bei DESY in Zukunft 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 Lichtquellenentwickler bald auf ein grundsätzliches Problem: In einem



Wiggler im Speicherring DORIS III

Speicherring kreisen die Elektronen über Stunden hinweg, wobei sie mehrere Millionen Mal pro Sekunde in den eingebauten Ablenkmagneten, Wiggler 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 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 ist 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 Röntgenlasern extrem hoher Brillanz in greifbare Nähe gerückt. Eine

der weltweit geplanten Anlagen ist der europäische Röntgenlaser XFEL, der zurzeit in Hamburg und Schleswig-Holstein gebaut wird und dessen Inbetriebnahme für das Jahr 2013 geplant 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 Photonenfluss 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 2013 wird der europäische Röntgenlaser XFEL Laserlichtblitze noch höherer Brillanz im harten Röntgenbereich liefern. Zusammen mit dem 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 im HASYLAB

Das Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB unterstützt und koordiniert die Forschung mit Photonen bei DESY. Die einmaligen Experimentiermöglichkeiten bei DESY locken jährlich über 2000 Forscher von rund 300 verschiedenen Hochschulen und Forschungsinstituten nach Hamburg. Die Gastwissenschaftler stammen aus 36 Ländern – von Armenien bis zu den Vereinigten Staaten. Einige Forschungsinstitute haben bei HASYLAB 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
 - > Europäisches Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL), Außenstelle Hamburg
 - > GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
 - > GKSS-Forschungszentrum Geesthacht
 - > 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
 - > in Vorbereitung: Helmholtz-Gruppe zur Strukturbiochemie unter Federführung des Helmholtz-Zentrums für Infektionsforschung
-



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
- > Ausbau zur weltbesten Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle
- > ab 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 6 und 60 Nanometern einstellbar)
- > seit 2005 Nutzerbetrieb
- > fünf Messplätze

Steckbrief XFEL

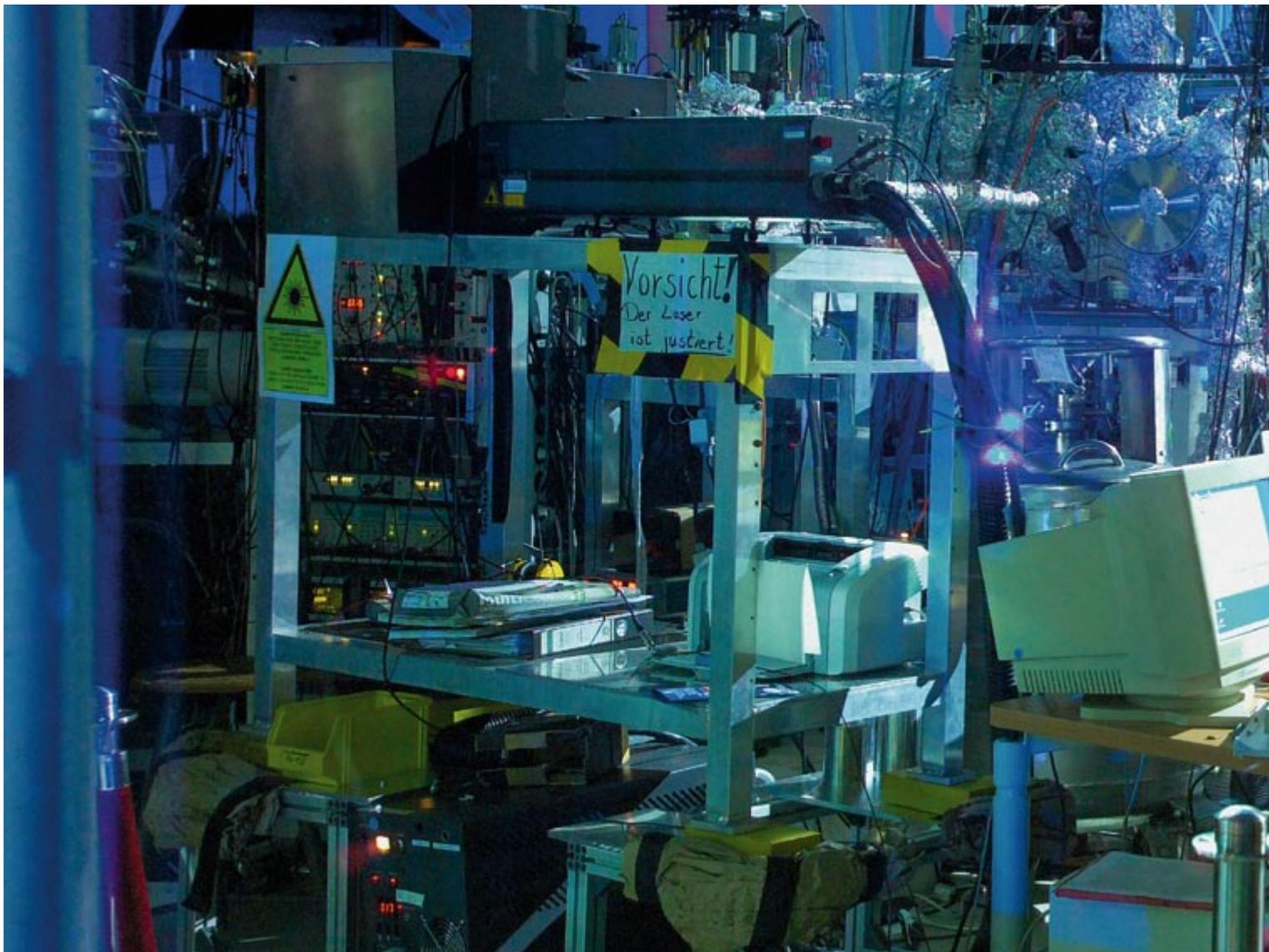
Europäischer Freie-Elektronen-Röntgenlaser

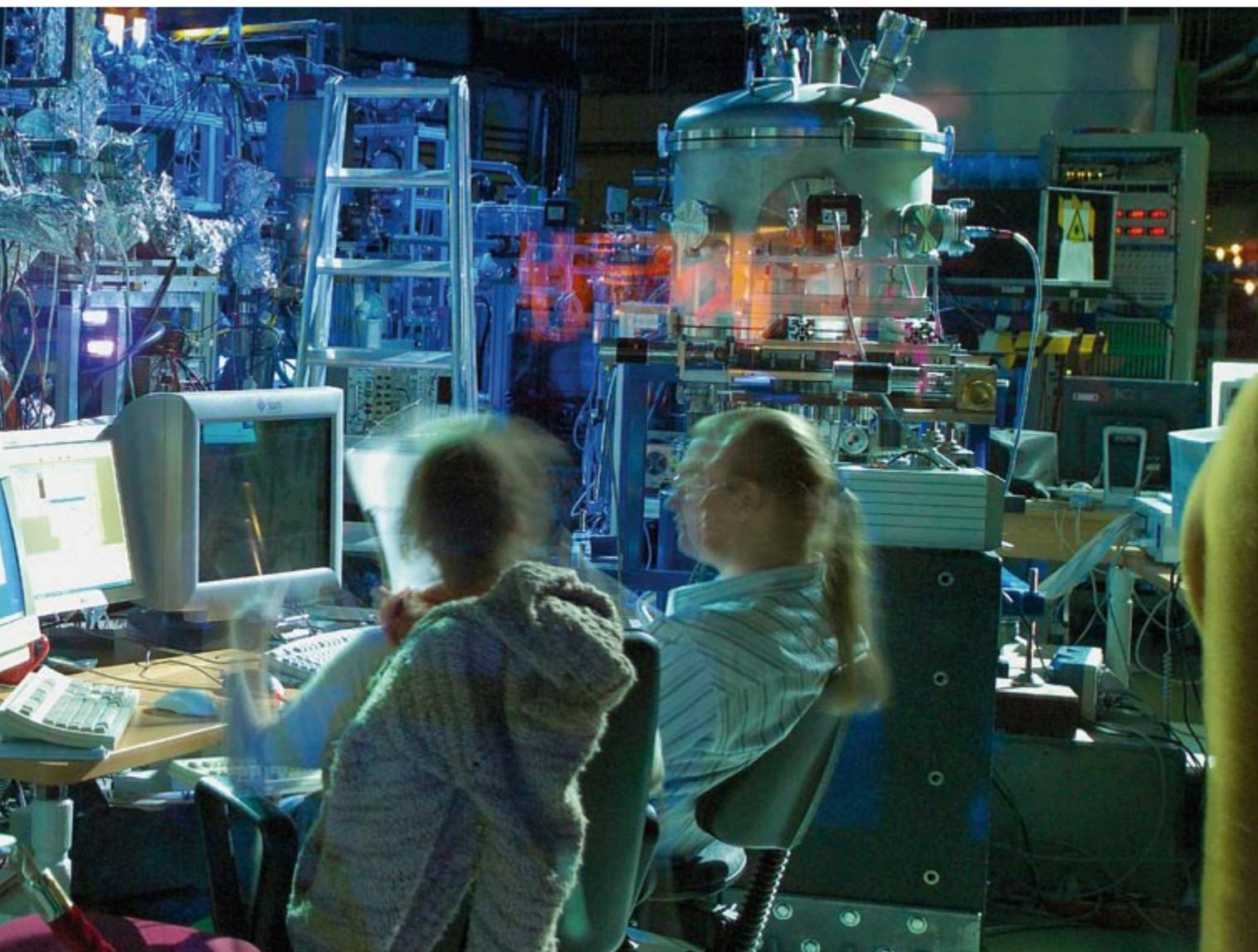
- > geplant als europäisches Projekt mit starker Beteiligung von DESY
- > Freie-Elektronen-Laser mit supraleitendem Linearbeschleuniger in TESLA-Technologie
- > Gesamtlänge: ca. 3,4 km
- > erzeugt extrem brillante Laserstrahlung im Röntgenbereich nach dem SASE-Prinzip (Wellenlänge zwischen 0,085 und 6 Nanometern einstellbar)
- > Start der Inbetriebnahme im Jahr 2013
- > eine unterirdische Experimentierhalle mit Platz für 10 Messplätze
- > Möglichkeit für einen zweiten, gleich großen Experimentierkomplex

WISSENS WERTE.

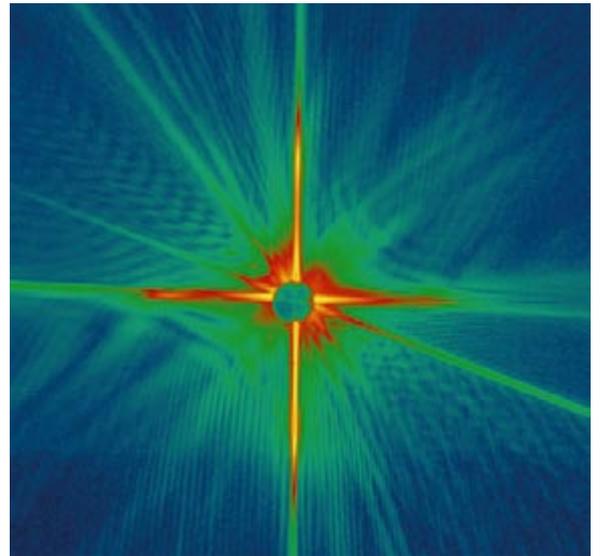
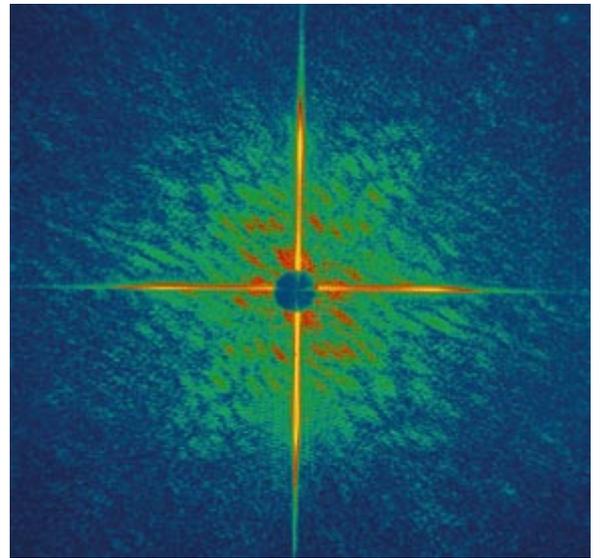
Beispiele aus der Forschung

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 und DORIS III in Hamburg nutzen können.





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.



BLITZ BILD.

„FLASH, what a picture!“

„FLASH, what a picture!“ titelte die Zeitschrift *nature physics* in ihrer Ausgabe vom 12. Dezember 2006. Was die *nature*-Redakteure so begeisterte, war ein an der neuen 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 ein-

zelen 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 nun beweisen.

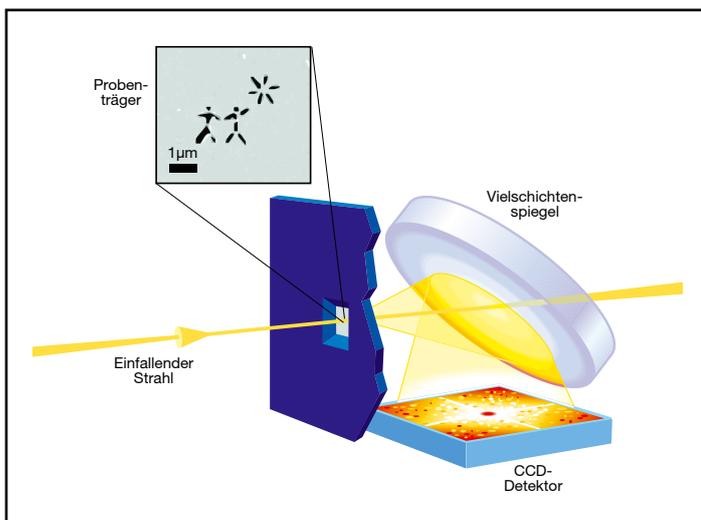
Das Blitzbild-Prinzip verspricht eine Revolution der Struktur- forschung in den Naturwissenschaften – und zwar immer dort, wo Bilder mit sehr hoher räumlicher und zeitlicher Auf- lösung benötigt werden. Da das neue Abbildungsverfahren ohne Linsen auskommt, lässt sich die Methode bis hin zur atomaren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

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

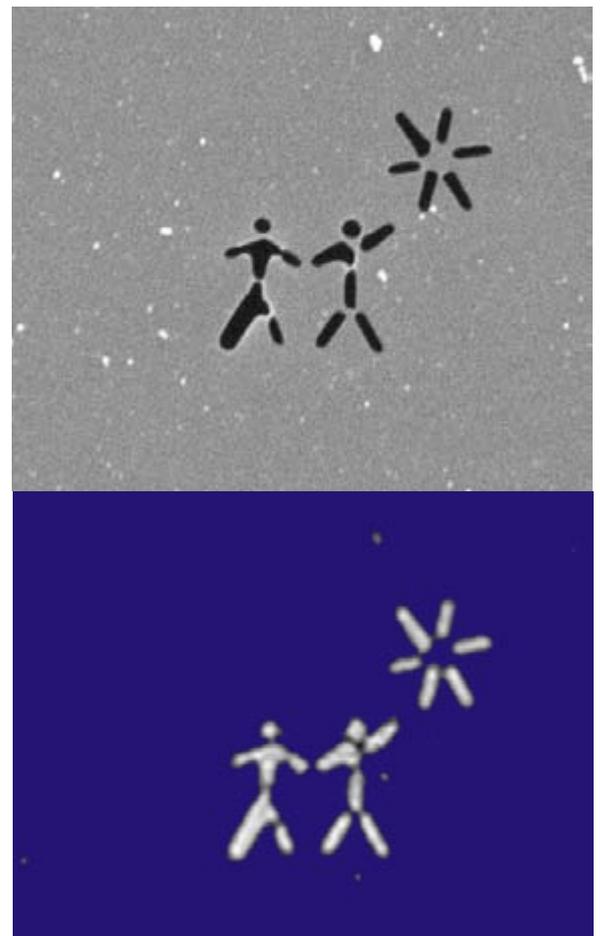
Das Blitzbild-Experiment im Detail

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

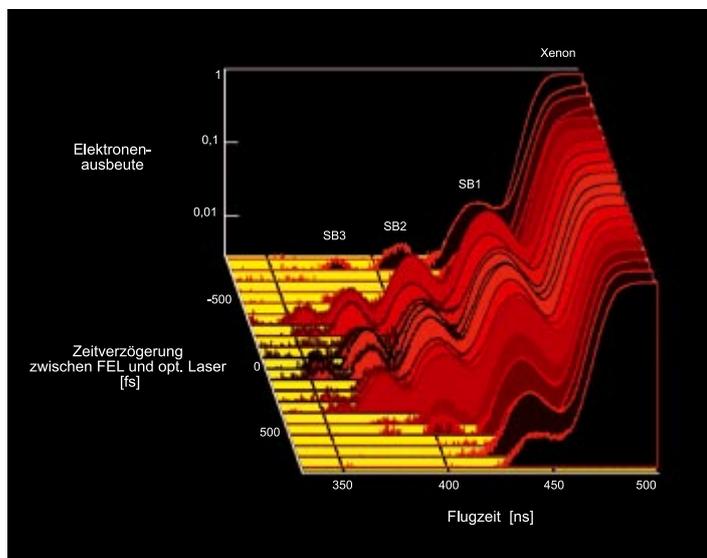


- Oben: Die Probe unter dem Rasterelektronenmikroskop – zwei Strichmännchen unter einer Sonne, in eine nur wenige Nanometer dicke Membran geritzt
- Unten: Rekonstruktion des Musters aus dem aufgenommenen Beugungsbild

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.



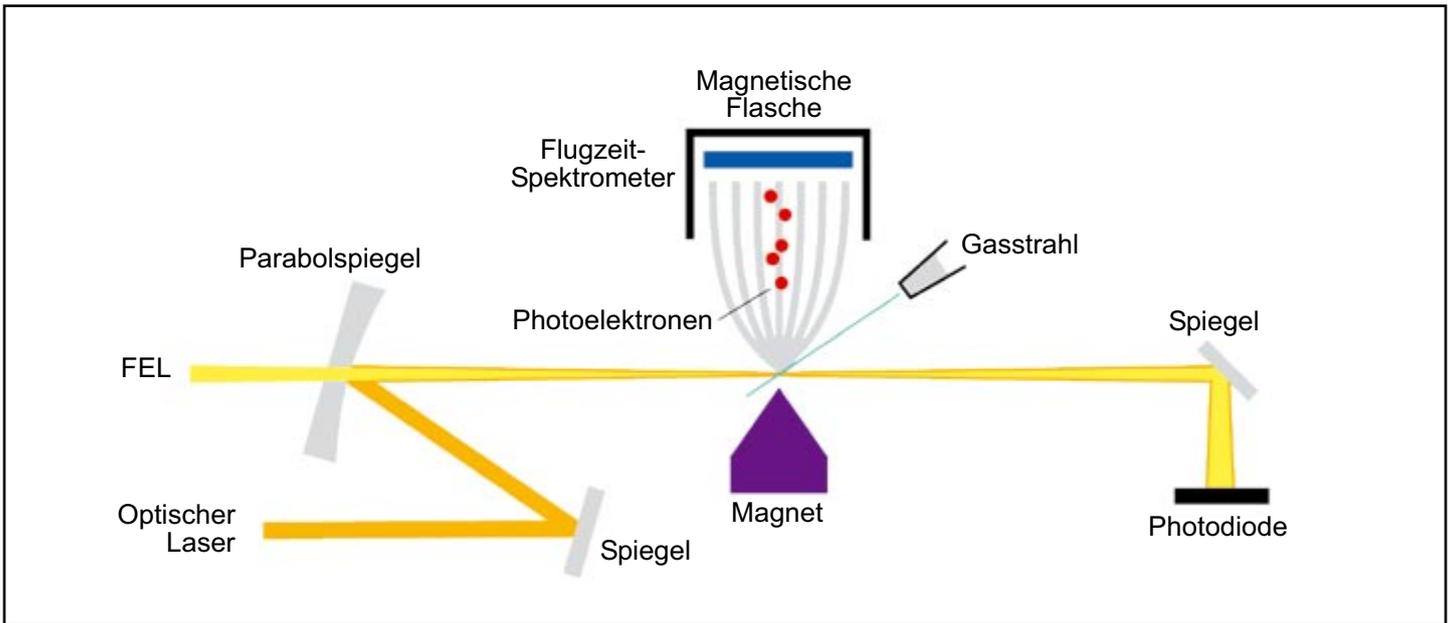
Charakteristische Seitenbänder (SB) in den Energiespektren zeigen an, wie gut die Lichtblitze von FLASH mit denen eines optischen Lasers zeitlich überlappen.

Einem internationalen Wissenschaftlerteam ist an FLASH nun 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.

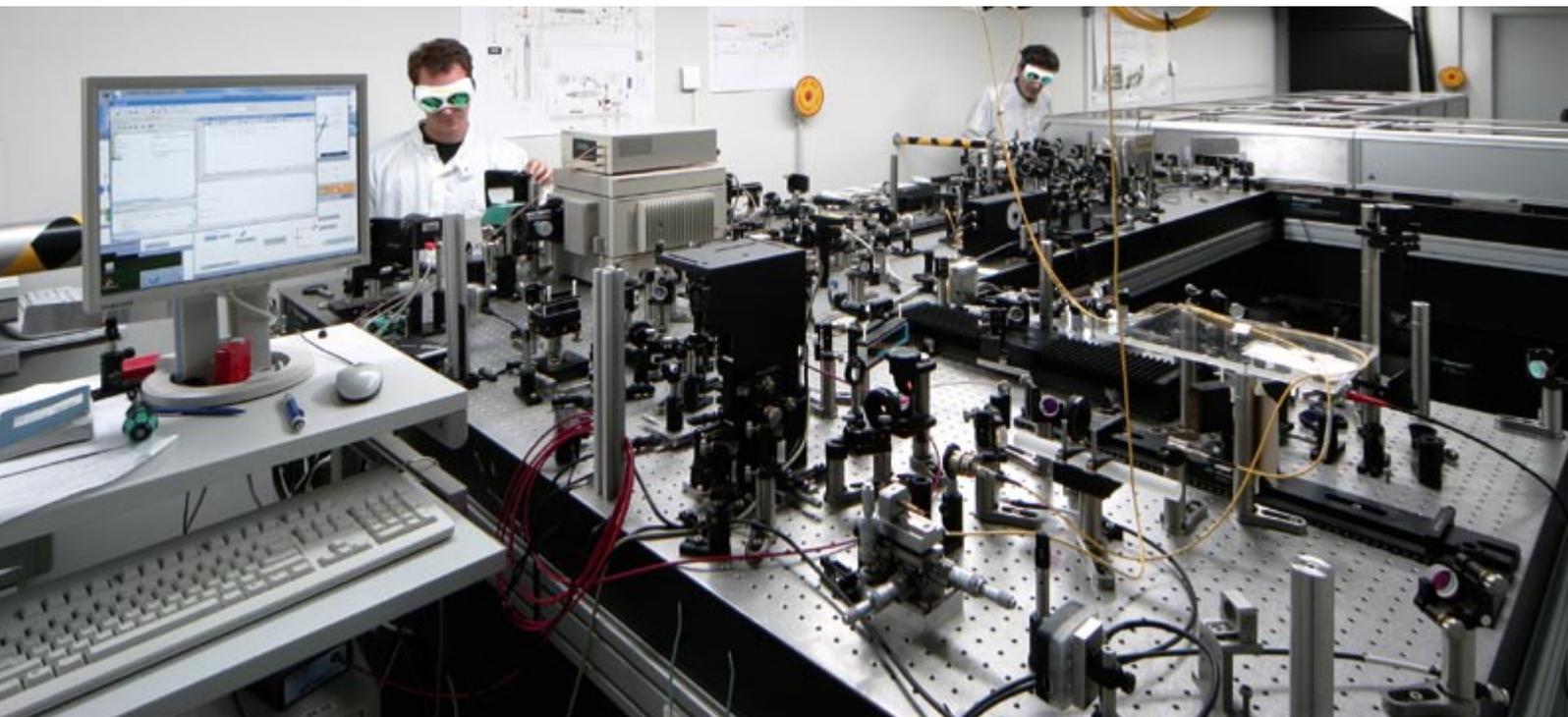
Die Messung der Seitenbänder gelang den Forschern sogar mit einzelnen FLASH-Blitzen, also nicht etwa gemittelt über eine große Vielzahl von Pulsen. So konnten sie den zeitlichen Abstand zwischen dem FLASH-Puls und dem optischen Laserblitz mit einer Genauigkeit von weniger als 50 Femtosekunden bestimmen.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



STERNEN FEUER.

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

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



SCHLÜSSEL ROLLE.

Mit DORIS III Tuberkuloseproteine entschlüsseln



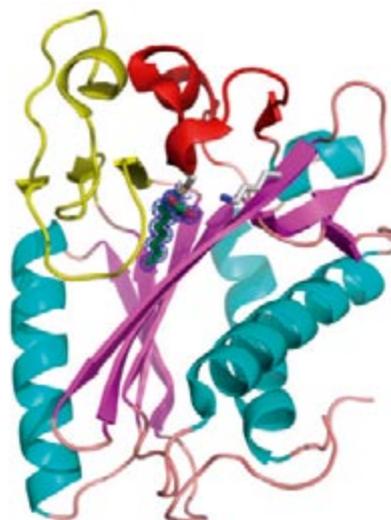
Die Tuberkulose ist bis heute eine der tödlichsten Gefahren für die globale Gesundheit. Zwei Millionen Todesopfer fordert die vom Mikroorganismus *Mycobacterium tuberculosis* verursachte Krankheit im Jahr. Etwa ein Drittel der Weltbevölkerung ist infiziert, und immer mehr Stämme des Erregers entwickeln 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.

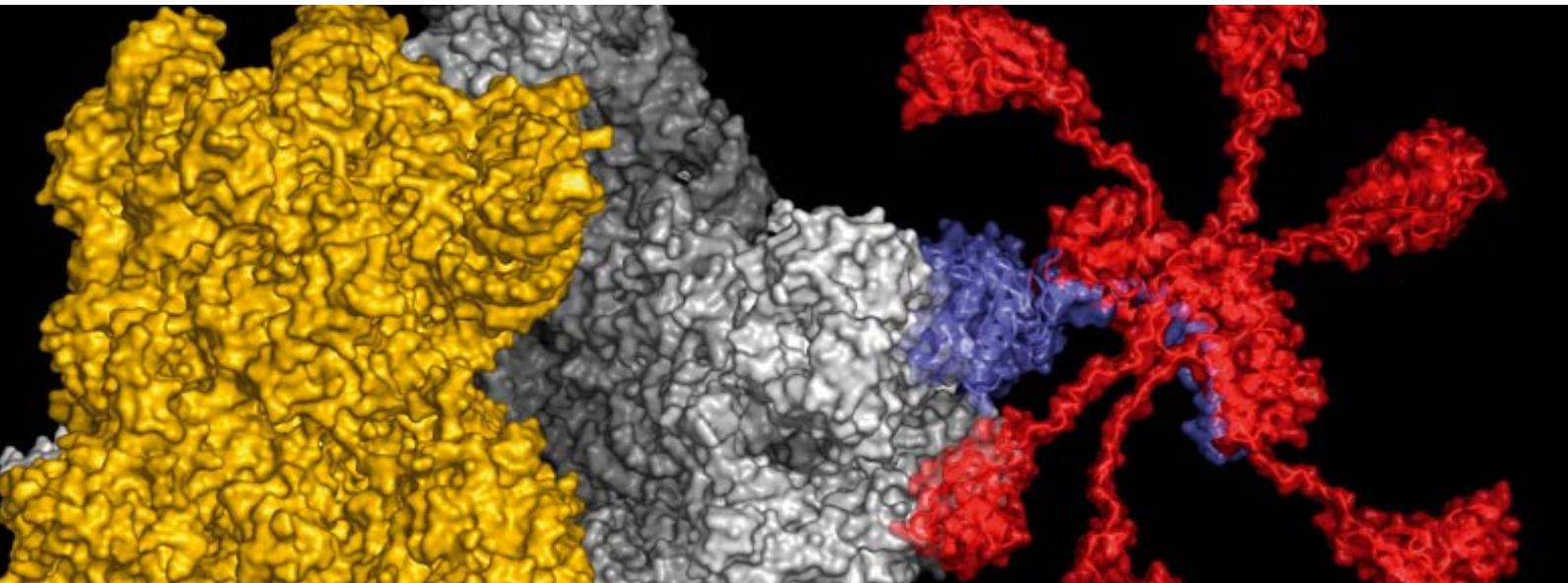
In diesen Zellen beobachteten die Forscher eine im Vergleich zu anderen Zellen 70-fach erhöhte Produktion von LipB – ein deutlicher Hinweis darauf, dass das Protein an der Pathogenese beteiligt ist. Dadurch wird es zu einem besonders interessanten Angriffspunkt in Fällen, in denen traditionelle Wirkstoffe 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

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
-

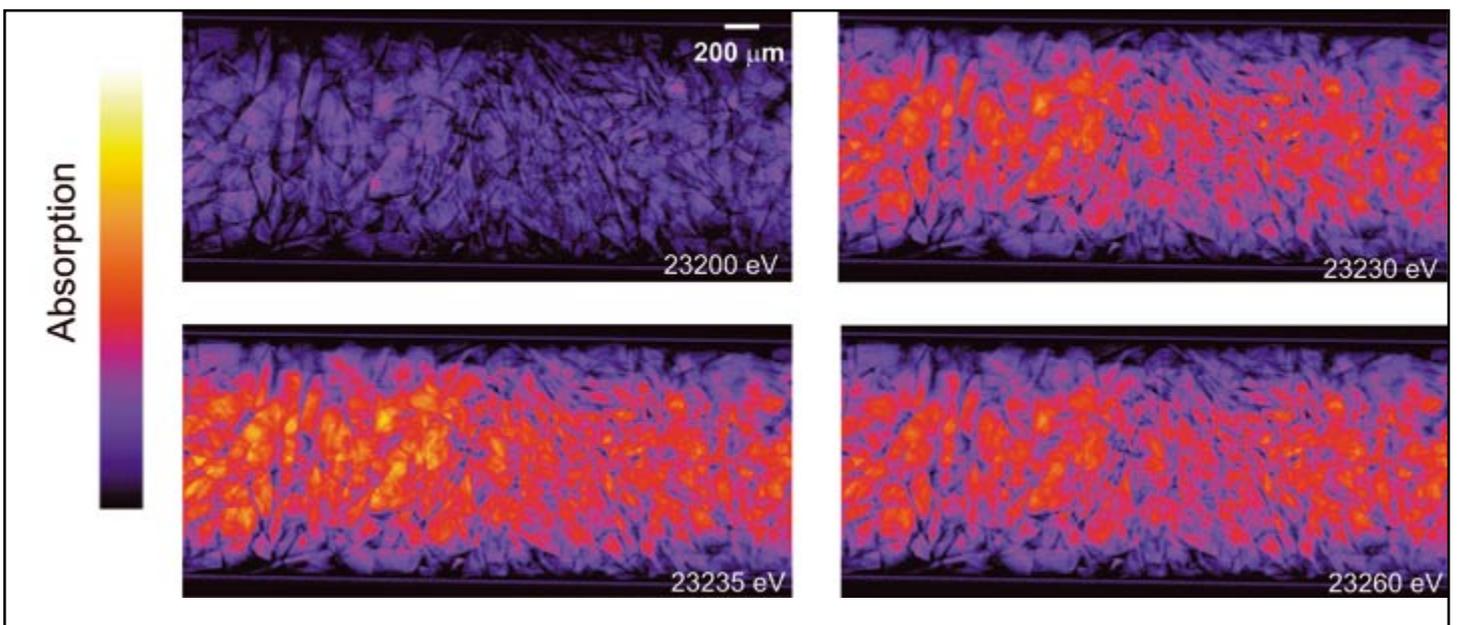
MIKRO REAKTOR.

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 nun 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

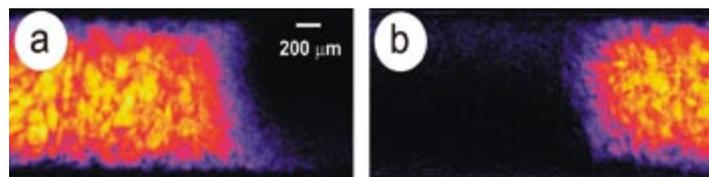
Ein Mikroreaktor, in dem Methangas mit Sauerstoff reagiert, im Licht der Röntgenstrahlung von DORIS III bei vier verschiedenen Energien



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.

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.

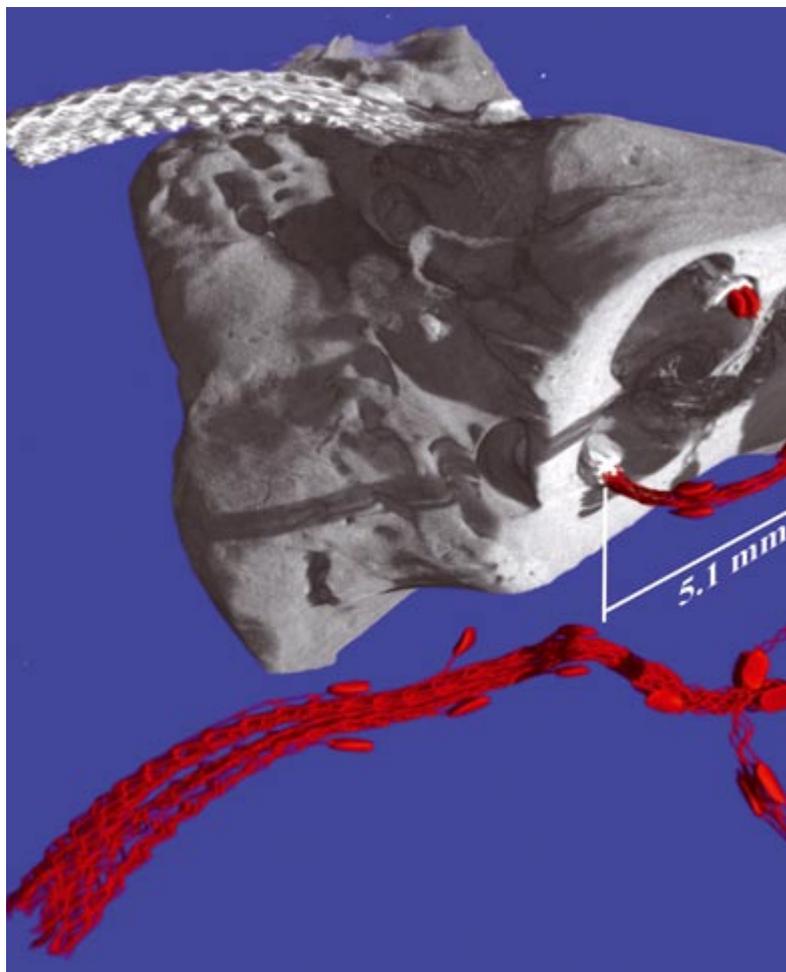
Für Ärzte ist es sehr schwierig, zuverlässige Daten über die Integration der Elektroden in den Knochen des Innenohrs – den härtesten Knochen im menschlichen Körper – zu erhalten. Herkömmliche histologische Untersuchungen, bei denen mikrometerdünne Gewebeschnitte am Mikroskop beurteilt werden, liefern 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 nun erstmals, das gesamte Elektrodensystem eines Cochlearimplantats, die Struktur des Innenohrs und das Schläfenbein gleichzeitig sichtbar zu machen – zerstörungsfrei und in 3D.

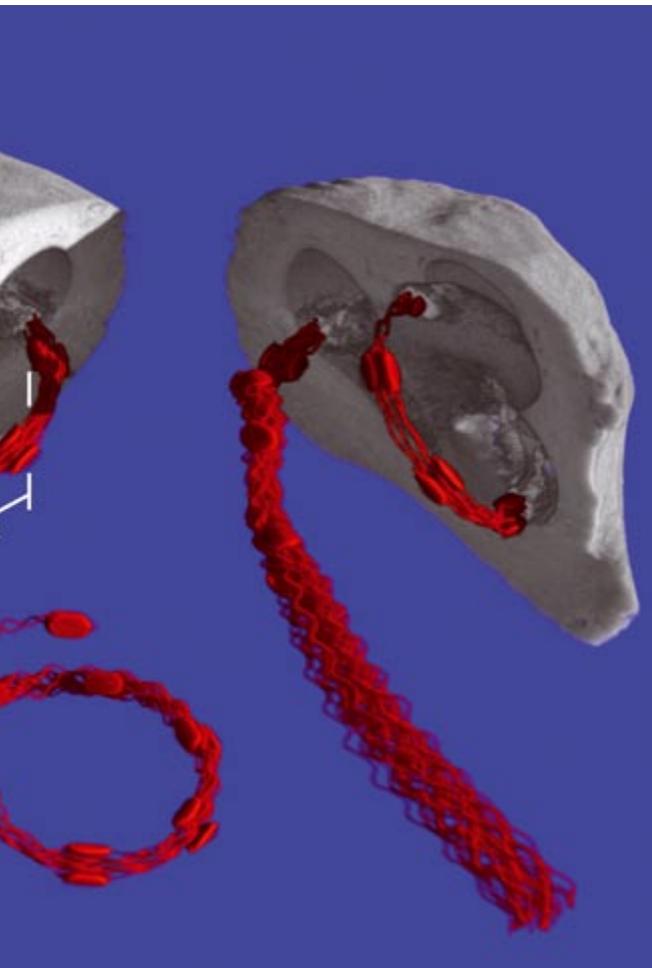
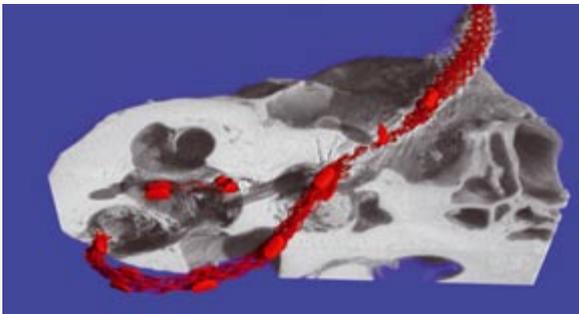
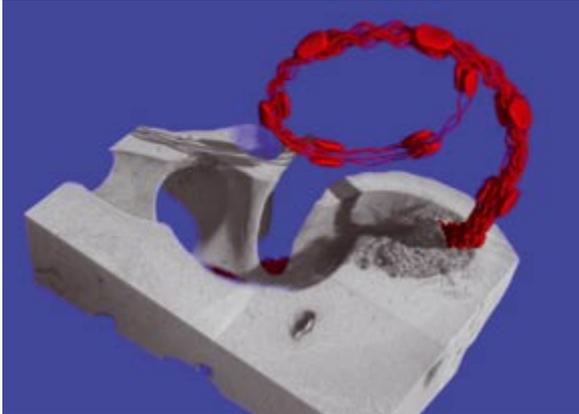
Dazu entfernten die Forscher das Implantat zusammen mit dem umliegenden Gewebe nach dem Tod des Patienten, fixierten die Probe und färbten sie ein, um die Dichteauflösung der weichen Gewebeteile zu verbessern. Dann untersuchten sie die Probe mit Hilfe der Röntgenstrahlung aus dem Speicherring DORIS III. 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
 - > GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 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.



MULTI TALENT.

Mit DORIS III den Eigenschaften vielseitiger Materialien auf der Spur

Ohne die Erfolge der Materialforschung gäbe es heute weder Mobiltelefone, Digitalkameras oder Laptops noch andere tragbare elektronische Geräte. Besonders bei der Entwicklung neuer Materialien für die Energieversorgung, die Datenspeicherung und die Datenverarbeitung wurden in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht. Dabei spielen magnetische Materialien eine wichtige Rolle. Doch auch Medien mit besonderen elektrischen Eigenschaften gewinnen immer mehr an Bedeutung.

Von großem Interesse sind neuartige Materialien, bei denen die magnetischen und elektrischen Eigenschaften auf besondere Weise kombiniert sind. Diese so genannten Multiferroika könnten den nächsten großen Durchbruch in der Speichertechnologie einläuten. Solche speziellen Materialien hat ein Team aus Forschern vom Hahn-Meitner-Institut (HMI) in Berlin, dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart und DESY mit Hilfe der Neutronenstreuung und der Röntgenstreuung mit dem intensiven Röntgenstrahl aus dem Speicherring DORIS III im Detail untersucht.

Ferromagnetische Materialien sind seit langem bekannt – die berühmtesten unter ihnen sind die Metalle Eisen, Kobalt und Nickel. Diese Materialien werden unterhalb einer bestimmten Temperatur magnetisch, d.h. sie besitzen eine spontane, stabile Magnetisierung. Diese lässt sich durch ein äußeres Magnetfeld beeinflussen und somit schalten. Bleibt diese Magnetisierung auch ohne äußeres Magnetfeld dauerhaft bestehen, spricht man von Permanentmagneten – bekannte Beispiele sind Hufeisenmagnete oder die Haftmagnete an der Kühlschranktür.

Ein analoges Phänomen zum Ferromagnetismus gibt es auch im elektrischen Bereich: Ferroelektrische Materialien besitzen unterhalb einer charakteristischen Temperatur eine spontane, stabile elektrische Polarisation, die durch ein äußeres elektrisches Feld geschaltet werden kann. Solche Materialien wurden Anfang des letzten Jahrhunderts entdeckt. Da die elektrische Polarisation meistens mit einer Veränderung der



● Der mit einem Hochfeldkryomagneten ausgestattete Messplatz am Speicherring DORIS III

Materialstruktur einhergeht, werden solche Materialien zunehmend als Sensoren oder Aktuatoren eingesetzt, zum Beispiel im Einspritzsystem von Dieselmotoren.

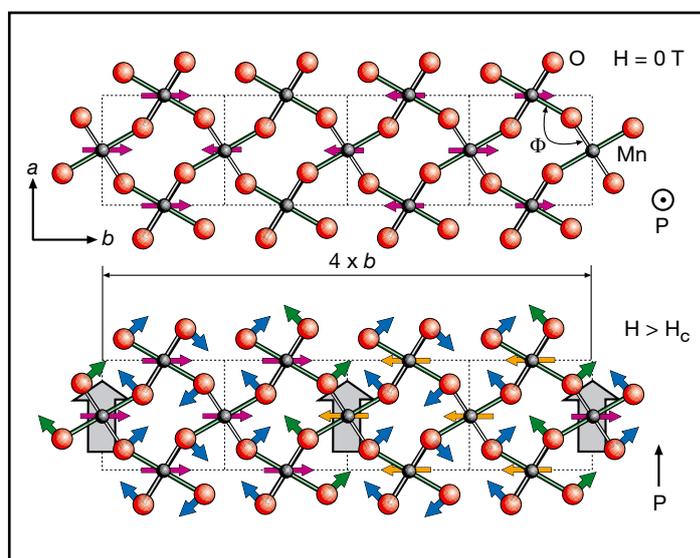
Der Magnetismus spielt insbesondere bei der Datenspeicherung auf Festplatten oder anderen Speichermedien eine grundlegende Rolle. Im Allgemeinen werden die Daten dabei mit Hilfe von Magnetfeldern auf ein magnetisches Speichermedium „geschrieben“. Anschließend können sie mit einem Lesekopf, der ebenfalls über ein externes Magnetfeld gesteuert wird, wieder ausgelesen werden. Seit kurzem gibt es allerdings auch nichtflüchtige Speichertypen auf ferroelektrischer Basis, FeRAM genannt (für *ferro-electric random access memory*). Hier kommen zwei verschiedene Polarisationszustände eines ferroelektrischen Kristalls zum Einsatz, die durch ein externes elektrisches Feld geschaltet werden. Der Vorteil: Der Schreibprozess ist bei diesen Medien deutlich schneller als bei den magnetischen Speichern.

Ließen sich die beiden Materialeigenschaften in einem einzigen Speichermedium koppeln, so könnte man durch die Kombination eines elektrischen Schreibvorgangs mit einem magnetischen Ausleseprozess die Vorteile beider Speichertypen vereinen und die jeweiligen Nachteile umgehen – um so einen nochmals deutlich schnelleren Datenspeicher zu realisieren.

Tatsächlich wurden mittlerweile Materialien entdeckt beziehungsweise entwickelt, die sowohl ferromagnetische als auch ferroelektrische Eigenschaften aufweisen. Zwei solche multiferroischen Materialien nahm das Forscherteam vom Hahn-Meitner-Institut, dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung und DESY unter die Lupe: die beiden Manganoxide TbMnO_3 (Terbiummanganit) und DyMnO_3 (Dysprosiummanganit). Sie untersuchten einerseits die Anordnung der magnetischen Momente – der „Spins“ – der Manganatome im Kristallgitter mit Hilfe der Neutronenbeugung am HMI, andererseits die Veränderungen der Kristallstruktur anhand der Röntgenbeugung am Speicherring DORIS III bei DESY.

Bei Abkühlung der Kristalle unterhalb einer bestimmten kritischen Temperatur ordnen sich die magnetischen Momente der Manganatome spiralförmig an, und die Struktur des Kristallgitters verändert sich. Dies ist verbunden mit der Entstehung charakteristischer Beugungsmuster in der vom Kristall reflektierten Neutronenstrahlung (von der Spinanordnung verursachte „magnetische“ Reflexe) beziehungsweise Röntgenstrahlung (von der Anordnung der Atome im Kristallgitter verursachte „strukturelle“ Reflexe). Gleichzeitig bildet sich die spontane ferroelektrische Polarisation aus. Die elektrische Polarisation ist somit eng an die strukturelle Verzerrung und die spiralförmige Spinanordnung gekoppelt.

Die Wissenschaftler legten nun bei festgehaltener Temperatur ein externes Magnetfeld an die Kristalle an. Hierbei zeigte sich, dass mit angelegtem Feld eine Änderung der Kopplung zwischen Polarisation und Verzerrung des Kristallgitters auftritt. Zusätzliche strukturelle Reflexe an Positionen der



Die Kristall- und Magnetstruktur von TbMnO_3 in der a - b -Ebene. Oben: Modell der Spinstruktur der Manganatome ohne äußeres Magnetfeld oberhalb der kritischen Temperatur. Die Polarisation P zeigt aus der Bildebene heraus. Unten: Modell der Spinstruktur der Manganatome in einem Magnetfeld, dessen Feldstärke den kritischen Wert überschritten hat. Die großen Pfeile in den ferroelektrisch aktiven Bereichen zeigen die neue Richtung der Polarisation an.

magnetischen Reflexe deuteten auf das Auftreten einer vorher nicht beobachteten linearen Kopplung hin. Bei wachsender Magnetfeldstärke blieben die Positionen der magnetischen und strukturellen Reflexe in den Beugungsmustern des TbMnO_3 -Kristalls zunächst konstant, bis sie sich bei einer bestimmten Feldstärke plötzlich sprunghaft änderten. Gleichzeitig klappte die Polarisation in eine andere Richtung um. Zunächst war vermutet worden, dass der Phasenübergang von einer bestimmten Kristallstruktur in eine andere das Umklappen der Polarisation verursachen könnte. Da ein solcher Phasenübergang beim DyMnO_3 -Kristall jedoch nicht auftrat, konnten die Forscher diese Hypothese widerlegen. Der strukturelle Phasenübergang scheint vielmehr ein Sekundäreffekt zu sein – die Intensität und Richtung der elektrischen Polarisation hängen offensichtlich direkt von der Anordnung der magnetischen Momente der Manganatome im Kristall ab, was auf einen magnetischen Phasenübergang bei hohen Magnetfeldern hindeutet.

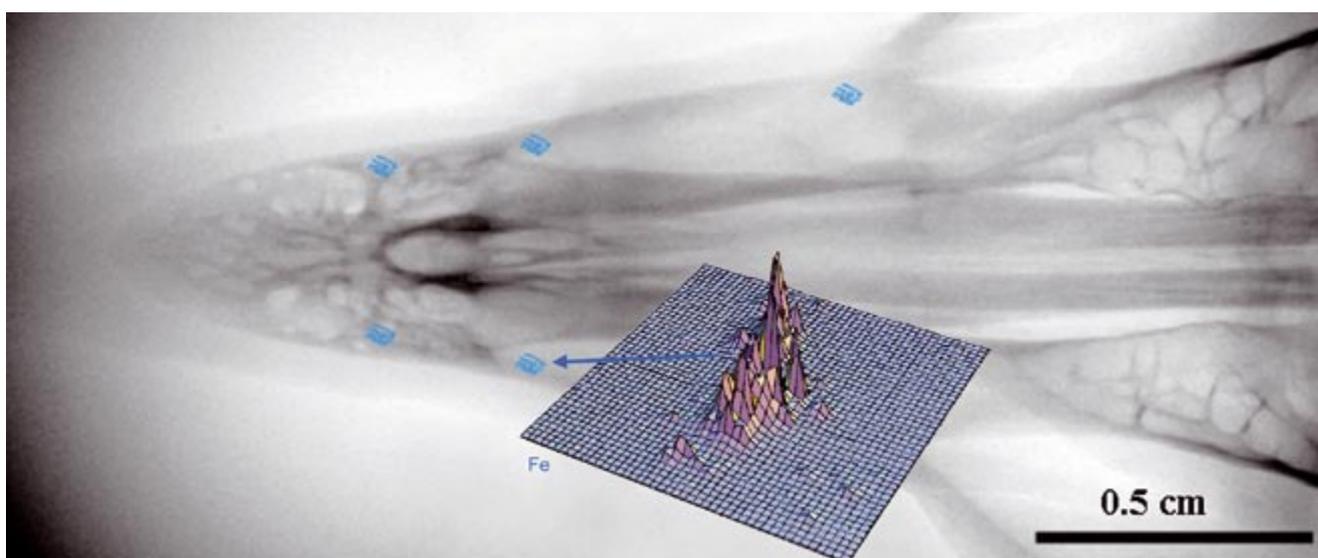
Bisher wurde die Kopplung von ferromagnetischen und ferroelektrischen Eigenschaften nur bei sehr niedrigen Temperaturen beobachtet, weshalb sich die entsprechenden Materialien noch nicht für konkrete Anwendungen eignen. Doch die Untersuchung solcher Multiferroika liefert vielversprechende Einsichten in die Zusammenhänge zwischen den beiden Effekten, die – so die Hoffnung der Materialforscher – auf lange Sicht zur Entwicklung von multiferroischen Materialien mit höheren kritischen Temperaturen führen und den ersehnten Durchbruch für neue Anwendungen bringen werden.

DORIS III enthüllt Navigationssystem im Taubenschnabel

Eine Brieftaube findet immer nach Hause. Der Stand der Sonne weist ihr die Richtung, und sogar Autobahnen und Straßenkreuzungen dienen als optische Hilfe. Um präzise Kurs zu halten, bedarf es jedoch mehr. Dafür haben Vögel einen Magnetsinn, dessen Mechanismus Forscher der Universität Frankfurt in Zusammenarbeit mit DESY und der Technischen Universität Darmstadt jetzt auf der Spur sind: Eisenkristalle im Schnabel könnten die Richtung und Stärke des Erdmagnetfelds messen und der Taube zielsicher den Weg weisen.

Erste Hinweise auf die Magnetrezeptoren im Schnabel erhielt das Forscherteam durch mikroskopische Untersuchungen von Gewebedünnschnitten. Wie sich herausstellte, ist die Haut des Oberschnabels von einem komplexen, fein verästelten Nervengeflecht durchzogen, so genannten sensorischen Dendriten. An sechs unterschiedlichen Stellen im Schnabel fanden die Forscher in diesen Dendriten Eisenoxide mit magnetischen Eigenschaften.

Bei DORIS III in Hamburg gingen die Untersuchungen weiter. Mit Hilfe der Röntgenstrahlung aus dem Speicherring bestimmte das Team die Verteilung und exakte Menge der Eisenoxide. Außerdem entschlüsselten sie deren chemische Zusammensetzung. Die Auswertung zeigte, dass in den Dendriten



Röntgenbild eines Taubenschnabels mit eingefügtem Röntgenfluoreszenzanalyse-Diagramm: Der Röntgenstrahl aus dem Beschleuniger DORIS III rastert den Gewebedünnschnitt ab und gibt z.B. Auskunft darüber, wie viel Eisen sich an welcher Stelle in der Schnabelhaut befindet.

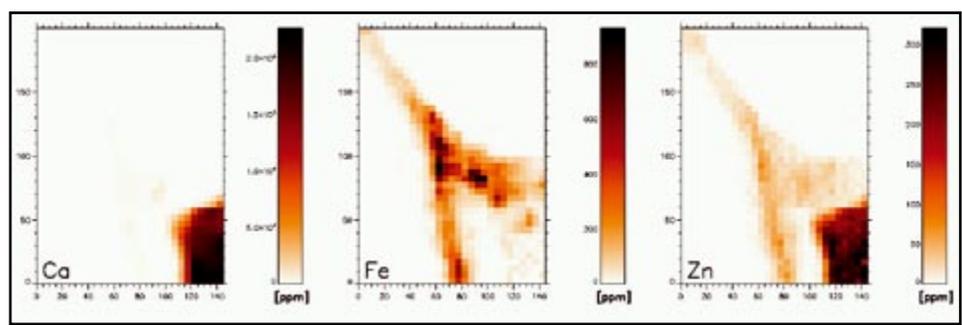


der Schnabelhaut kleine Metallplättchen aus Maghämite wie Dominosteine aneinander liegen. Zwischen diese Bänder schieben sich hin und wieder kleine Kügelchen, die Magnetit enthalten. Gemeinsam ergeben sie eine Funktionseinheit. Wie mit einem Drei-Achsen-Magnetometer registrieren die Brieftauben damit unabhängig von ihrer Bewegung oder Körperhaltung kleinste Schwankungen der Richtung und Stärke des Erdmagnetfelds. Da sich diese je nach geographischer Lage unterscheiden, können die Vögel so jederzeit ihre Position bestimmen – was ihnen erlaubt, über Tausende von Kilometern hinweg an einen bestimmten Ort zurückzufinden.

Eine mögliche Signalkette stellen sich die Forscher wie folgt vor: Kommt eine Taube vom Kurs ab, ändert sich wahrscheinlich das von den Maghämite-Plättchen verstärkte lokale, inhomogene Feld. Dabei wird auf die magnetithaltigen Kügelchen eine Zug- oder Druckkraft ausgeübt. Dies löst ein Signal in mechanischen Rezeptorkanälen aus, das zum Gehirn geleitet wird. So könnte die Taube die Richtungsänderung wahrnehmen und den Kurs korrigieren. Gleiche Ergebnisse fanden die Forscher in den Schnäbeln von Rotkehlchen, Gartengräsmücken und sogar Haushühnern. Möglicherweise stellt es sich als ein universelles Wahrnehmungssystem bei Vögeln heraus.

In weiterführenden Untersuchungen werden die Wissenschaftler diese Zusammenhänge noch detaillierter erforschen. Insbesondere werden die fokussierten Röntgenstrahlen der zukünftigen Lichtquelle PETRA III bei DESY klein genug sein, um die verschiedenen Kristalle einzeln zu vermessen und so dazu beizutragen, die Wirkungsweise des natürlichen Magnetfeldrezeptors und die Wechselwirkung der eisenhaltigen Zellkompartimente der Dendriten genauer zu verstehen. Die hier verwendete Messmethode lässt sich auch in zahlreichen anderen Bereichen mit Erfolg einsetzen, so zum Beispiel in der Biomedizin, der Umweltanalytik und den Materialwissenschaften.

Die Bedeutung der winzigen Eisenoxidkristalle geht weit über den verblüffenden Orientierungssinn der Vögel hinaus: Solche Partikel könnten zum Beispiel in der Nanotechnologie vielseitig eingesetzt werden, etwa für eine gezielte Medikamentengabe oder sogar als Datenspeicher. Bevor die potenziellen Anwendungsmöglichkeiten im Detail ausgelotet werden können, gilt es jedoch, ein wesentliches Problem aus dem Weg zu räumen: Obwohl die Vögel die Kristalle seit Jahrmillionen produzieren, ist es bisher noch nicht gelungen, die vielversprechenden Partikel künstlich herzustellen. ●



● Die Röntgenfluoreszenzanalyse erlaubt es, die Verteilung verschiedener chemischer Elemente in einer Probe mit hoher Auflösung zu messen – hier die Konzentration von Kalzium, Eisen und Zink in einem Dendriten im Taubenschnabel.

BRILLANT RING.

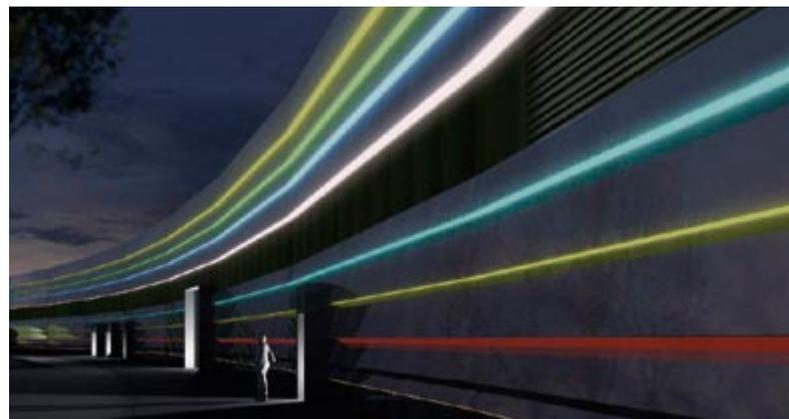
PETRA III – ein Juwel mit vielen Facetten

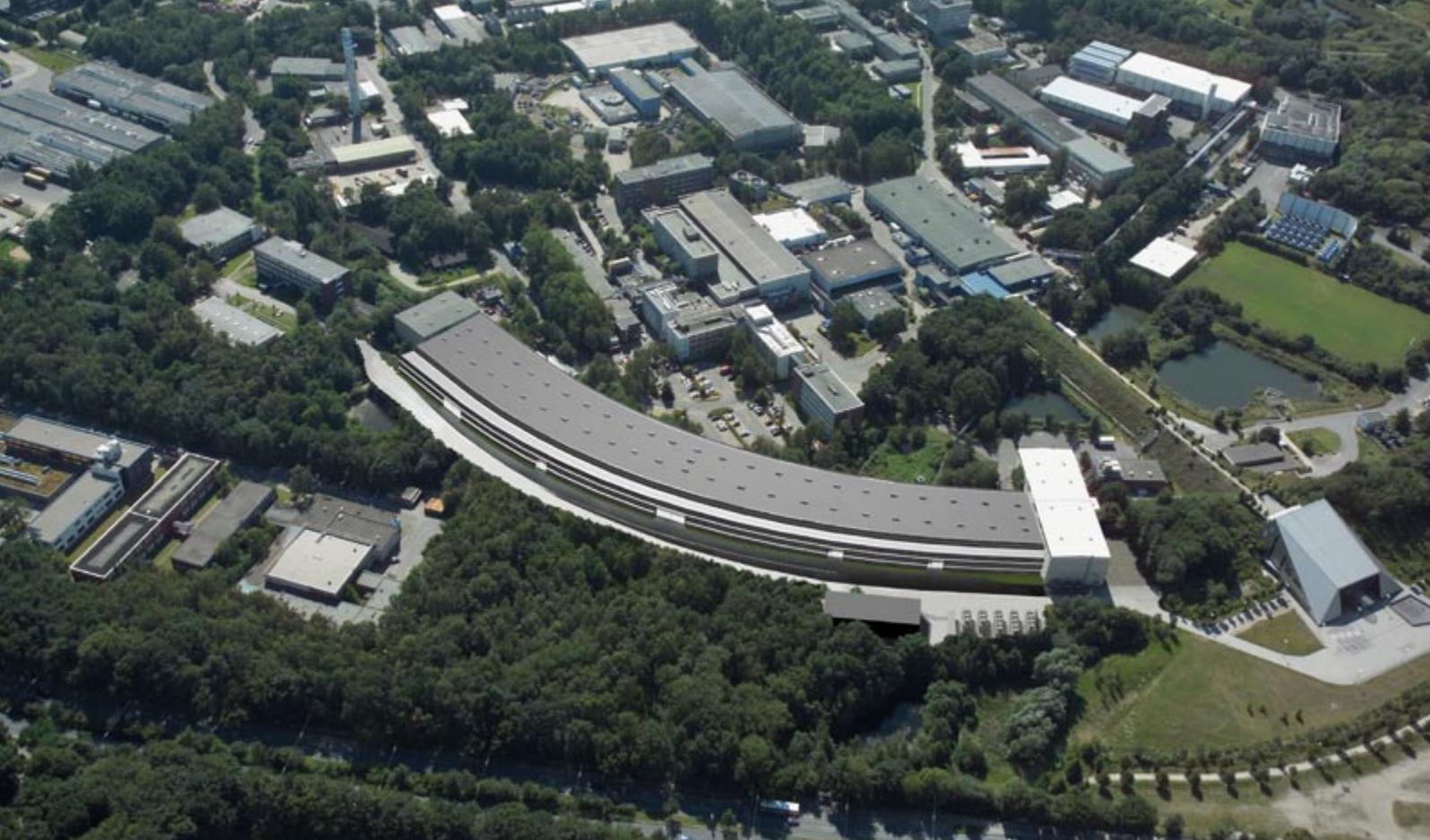
2009 soll sie fertig sein: PETRA III, eine der brillantesten Speicherring-Röntgenstrahlungsquellen der Welt. Als leistungsstärkste Lichtquelle ihrer Art wird sie den Wissenschaftlern exzellente Experimentiermöglichkeiten mit Röntgenstrahlung besonders hoher Brillanz bieten. Davon profitieren vor allem Forscher, die sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzwelliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen.

Rund 3000 Wissenschaftler nutzen die in Deutschland vorhandenen Quellen für Synchrotronstrahlung – über 2000 von ihnen pilgern jährlich nach Hamburg, um an den DESY-Lichtquellen zu forschen. Die seit Jahren bewährte, zuverlässige Synchrotronstrahlungsquelle DORIS III liefert millimeterdünne Lichtstrahlen mit hohem Photonenfluss, aber vergleichsweise niedriger Brillanz. Der Bedarf der Forscher an feineren, intensiven Röntgenstrahlen höherer Brillanz wächst jedoch immer mehr. In Europa steht hierfür insbesondere die Europäische Quelle für Synchrotronstrahlung (ESRF) in Grenoble in Frankreich zur Verfügung. Diese kann die große Nachfrage der Nutzer jedoch nicht decken.

Mit dem bei DESY seit 2005 betriebenen Freie-Elektronen-Laser FLASH und dem geplanten europäischen Röntgenlaser XFEL eröffnen sich den Wissenschaftlern noch nie da gewesene Experimentiermöglichkeiten. Zeitauflösung, Brillanz und Kohärenz der Röntgenlaserstrahlung setzen neue Maßstäbe. Diese neuartigen Strahlungsquellen sind jedoch nicht dazu geeignet, die wissenschaftliche Grundversorgung mit intensiver Röntgenstrahlung sicherzustellen. Eine weltweit steigende Zahl von Nutzern aus Naturwissenschaften und Industrie braucht für ihre Experimente auch künftig leistungsstarke Speicherring-Strahlungsquellen – und die müssen international konkurrenzfähig sein, um den hohen Standard der Forschungsstandorte Deutschland und Europa zu sichern.

DESY hat sich deshalb entschieden, den 2,3 Kilometer langen Speicherring PETRA, der lange Zeit für die Teilchenphysik eingesetzt wurde, zu einer leistungsfähigen Strahlungsquelle umzubauen. Diese wird insbesondere sehr brillante, kurzwellige Röntgenstrahlen erzeugen – und dabei in ihrer Leistungsfähigkeit sogar die weltweite Konkurrenz übertreffen. Damit fügt sich PETRA III perfekt in das Spektrum der bestehenden und geplanten europäischen Strahlungsquellen ein.





Architekturstudie für die neue Experimentierhalle von PETRA III

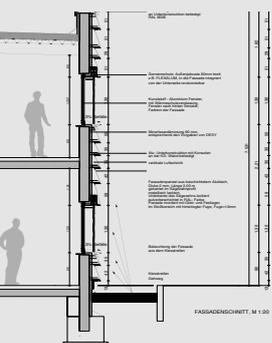
Umbau zur brillanten Lichtquelle

Brillanz

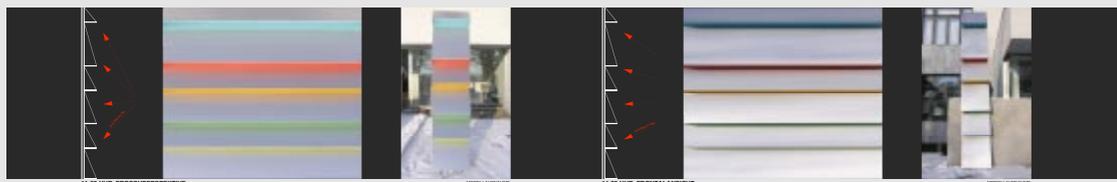
Die Brillanz oder Leuchtstärke kennzeichnet die Qualität der Strahlung und damit die Leistungsfähigkeit einer Lichtquelle. Sie ist ein Maß für die Anzahl der in einem bestimmten Wellenlängenbereich erzeugten Photonen (Lichtteilchen); die Brillanz ist umso größer, je kleiner die Lichtquelle und je enger gebündelt der ausgesandte Lichtstrahl ist.

Für die Umrüstung zur brillanten Lichtquelle müssen knapp 300 Meter des 2,3 Kilometer langen PETRA-Rings komplett umgebaut und eine neue Experimentierhalle errichtet werden. Geplant sind 14 Messplätze mit bis zu 30 Instrumenten. Exzellente Experimentiermöglichkeiten garantiert der Einbau von Undulatoren, langen Magnetanordnungen, 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 wird PETRA III auf einer Fläche von einem einzigen Quadratmillimeter einen ebenso hohen Photonenfluss liefern wie DORIS III heute auf einigen Quadratzentimetern! Die neue Lichtquelle wird im Jahr 2009 den Nutzerbetrieb aufnehmen. ➤

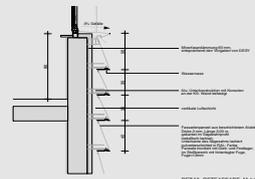
Fassadenstudie für PETRA III



FASSADENSCHNITT, M 1:50



MODELL DER BRISTOL TIER 11
 FÜR DIE FASSADENSCHNITT-
 STUDIE. DIE BRISTOL TIER 11
 GEDIENTEN ALLEINWÄRTIG
 BEI DER REINIGUNG DER
 STRAHLE. TROTZ DER GROSSEN
 HERGESTELLT, DIE BEDEUTET
 DIE GROSSE FLÄCHE DER
 FASSADE, DIE UNTERSCHIEDLICH
 FARBIGE FÄHIGKEITEN
 ANZUZEIGEN.
 BEI DER REINIGUNG DER
 STRAHLE, DIE BRISTOL TIER 11
 FÜR DIE FASSADENSCHNITT-
 STUDIE. DIE BRISTOL TIER 11
 GEDIENTEN ALLEINWÄRTIG
 BEI DER REINIGUNG DER
 STRAHLE. TROTZ DER GROSSEN
 HERGESTELLT, DIE BEDEUTET
 DIE GROSSE FLÄCHE DER
 FASSADE, DIE UNTERSCHIEDLICH
 FARBIGE FÄHIGKEITEN
 ANZUZEIGEN.



DETAIL OSTFASADE, M 1:5

Weltklasse-Forschung im futuristischen Gewand

Stolze 280 Meter wird die neue Experimentierhalle von PETRA III lang sein, die in ihrer geschwungenen Form dem Kreisbogen des Beschleunigerrings folgt. Auf etwa 10 000 Quadratmetern entstehen hier 14 Messplätze, an denen bis zu 30 Experimente aufgebaut werden können – die Messanlagen im Erdgeschoss, die Auswerteräume im Obergeschoss.

Damit die hochpräzisen Messapparaturen nicht durch mechanische Schwingungen gestört werden, kommt beim Bau der Experimentierhalle eine spezielle Technik zum Einsatz: Der Boden der Halle wird in Form einer einzigen, ein Meter dicken Betonplatte gegossen, die den Beschleuniger und die Experimente trägt. Diese Platte ist schwingungstechnisch vom Rest des Gebäudes entkoppelt. Um auch den Einfluss zu minimieren, den das Gebäude durch den Untergrund hindurch auf den Hallenboden ausüben könnte, wird es auf Fundamenten aus Hülsenpfählen errichtet, die 20 Meter tief im Erdboden verankert werden. Diese tief in die Erde betonierten Säulen sind von einer

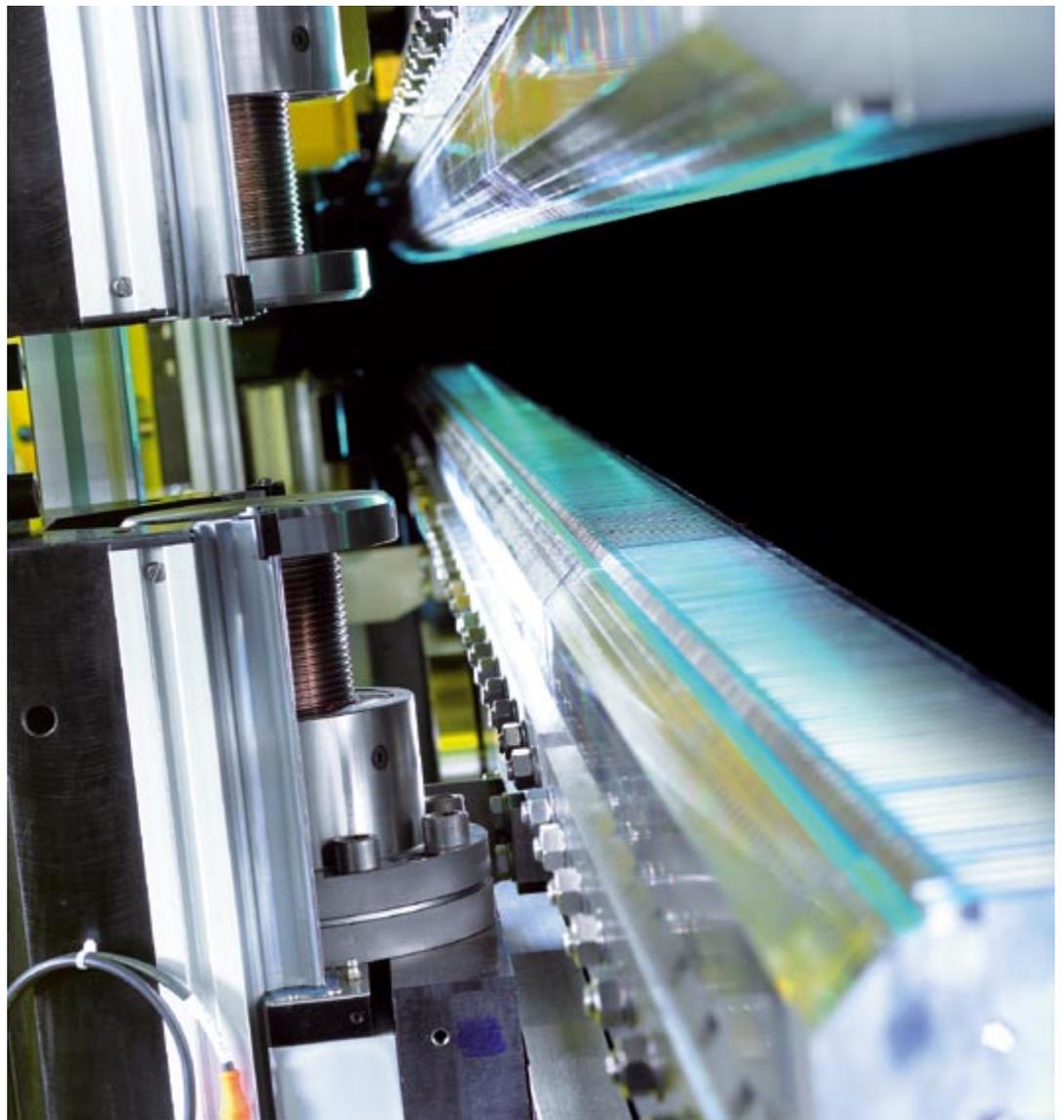
Gleitschicht – z.B. aus Teflon oder Bentonit – umgeben, so dass sie keinen direkten Kontakt zum Erdreich im oberen Bereich haben. Damit lassen sich die Kräfte auf den Pfahl sehr tief ins Erdreich einbringen, so dass weniger Verformungen an der Oberfläche stattfinden.

Für die Fassade sehen die Architekturpläne eine moderne Gestaltung vor, die die ungewöhnliche Gestalt der Halle unterstreicht. Die Fassade wird aus sägezahnartigen Leichtmetallpaneelen zusammengesetzt. Diese Alubleche sind oben glatt und in der typischen Silberfarbe, ihre Unterseiten sind jedoch farbig. So bewirkt der Lichteinfall je nach Tageszeit ein anderes Farbenspiel auf den blanken Metallschuppen. Durchlaufende Fensterbänder betonen zusätzlich die Bogenform des Gebäudes. Insgesamt entsteht der visuelle Eindruck eines 280 Meter langen Bogens, der je nach Blickwinkel mit verschiedenen Farbbändern durchzogen ist – ein interessanter Bau, der der zukunftsweisenden Forschung an PETRA III Rechnung trägt.

Fassadenelemente für die PETRA III-Halle



Blick entlang eines der
Undulatoren für PETRA III



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.

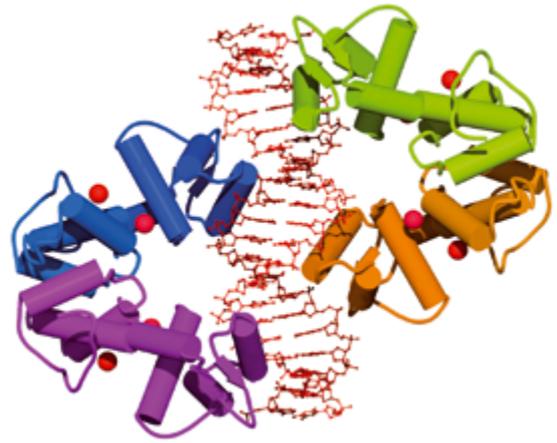
Aufgrund dieser exzellenten Perspektiven bauen das Europäische Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) und DESY ihre über 30-jährige Zusammenarbeit auch bei PETRA III weiter aus: Bis 2010 errichtet die Hamburger Außenstelle des EMBL bei DESY die integrierte Forschungsanlage für Strukturbiochemie EMBL@PETRA III. Deren hochmoderne Messstationen werden es den Forschern erlauben, die außergewöhnlichen Eigenschaften des Speicherrings für neuartige

Anwendungen in den Lebenswissenschaften zu nutzen – beispielsweise für Fortschritte in der Proteinkristallographie, der Kleinwinkelröntgenstreuung und der Röntgenabsorptionsspektroskopie 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 wird besonders energiereiche Strahlung bis über 100 000 Elektronenvolt mit hoher Leuchtstärke erzeugen – und damit ein entscheidendes Plus für viele Experimente bieten. ➤

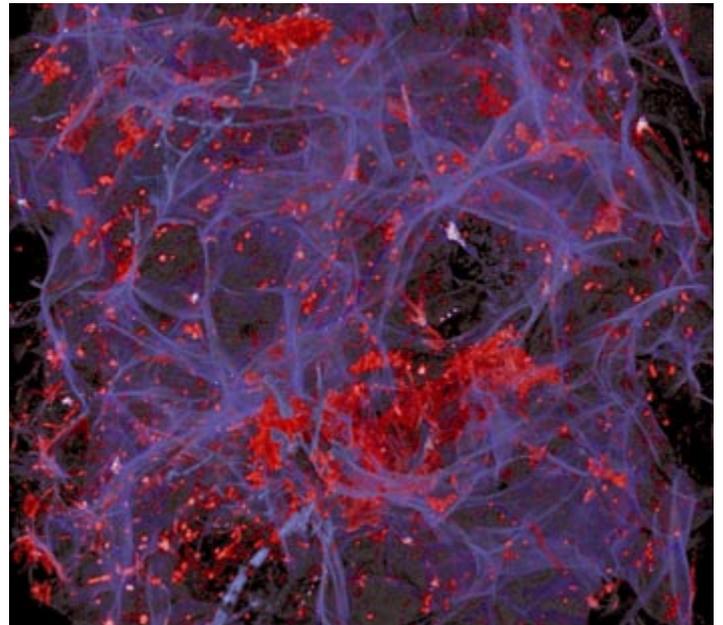
Herausforderung Strukturbioogie

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 26). 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 30) 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 wird es ermöglichen, 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 Einwachverhalten von Zellen in biokompatible Materialien zerstörungsfrei verfolgen und damit Erkenntnisse über den optimalen Herstellungsprozess der 3D-Zellsubstrate gewinnen.



Mikrotomogramm eines Materials, das in Zukunft als 3D-Substrat zur Züchtung von Zellkulturen dienen könnte. Die künstliche Knochenstruktur (blau) besteht aus einem proteinbasierten, offenporigen Keramikschaum. Rot markiert sind die nur wenige Mikrometer großen Zellen, die sich im Substrat angesiedelt haben.

Chemische Analysen im mikroskopischen Maßstab

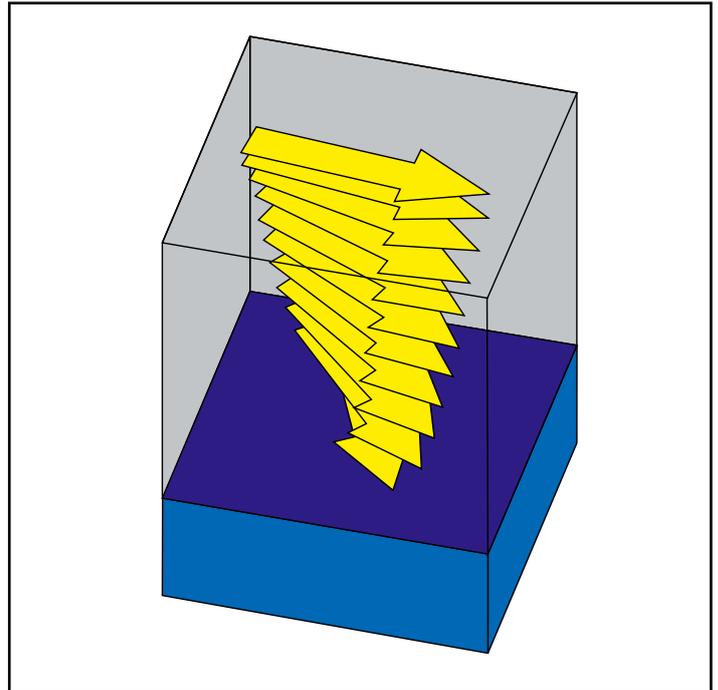
Das Lichtmikroskop eröffnet den Blick in den Mikrokosmos. In der Regel bleibt jedoch offen, aus welchen chemischen Elementen die unter dem Mikroskop sichtbaren Strukturen bestehen. Fokussierte Röntgenstrahlen an PETRA III werden die chemische Analyse einer Probe auf engstem Raum ermöglichen. Das Ergebnis 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.

Diese Methoden konnten beispielsweise dazu beitragen, dem Magnetsinn von Vögeln auf die Spur zu kommen (siehe Seite 34). Bisher konnten die daran beteiligten Kristalle aus zwei verschiedenen Eisenverbindungen nur gemeinsam gemessen werden. Fokussierte Röntgenstrahlen an PETRA III jedoch werden klein genug sein, um die verschiedenen Kristalle einzeln zu vermessen und den Magnetsinn noch genauer zu verstehen.

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 bis heute auf Werte von 20 Giga-Bit pro Quadratzentimeter angestiegen und ermöglicht so z.B. das Abspeichern und Wiedergeben kompletter Spielfilme auf Geräten im Scheckkartenformat. 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 wird mit den hochbrillanten Röntgenstrahlen von PETRA III möglich sein.

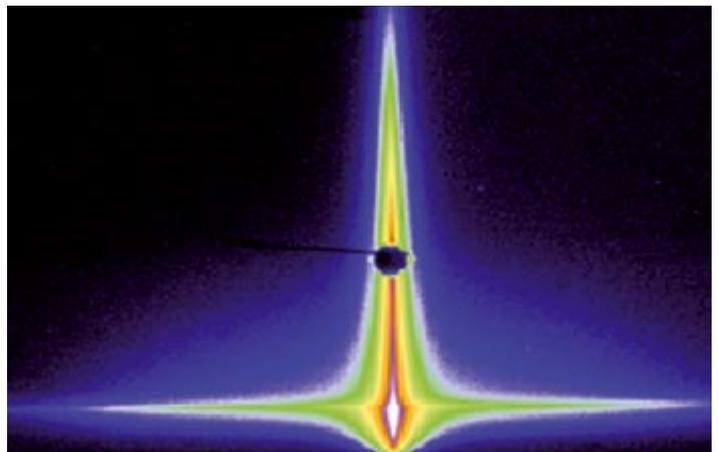


- Fächerartige Ausrichtung der magnetischen Momente innerhalb einer 10 Nanometer (milliardstel Meter) dicken Eisenschicht, die an eine hartmagnetische Schicht (blau) gekoppelt ist.

Maßgeschneiderte Oberflächen

Fokussierte Röntgenstrahlen an PETRA III werden bis zu 1000-mal feiner sein als ein menschliches Haar. Mit Hilfe solcher Nanostrahlen ergeben sich 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 werden es ermöglichen, 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. ●



- Räumliche Verteilung des von einer Oberfläche gestreuten Röntgenlichts. Aus solchen Messungen lassen sich die Form sowie die Anordnung von Nanoteilchen auf der Oberfläche rekonstruieren.

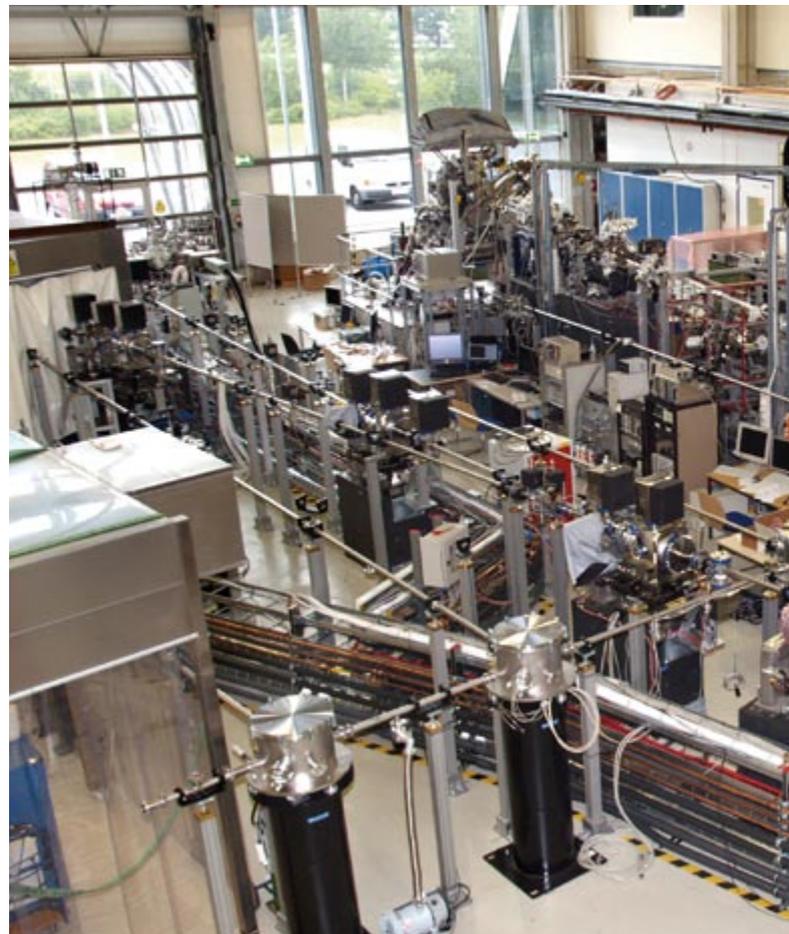
ZIEL GERADE.

FLASH – Weltrekord im Laserblitzen

Seit 2005 steht den Forschern bei DESY eine einmalige neue Lichtquelle zur Verfügung: FLASH, der weltweit erste und bis 2009 einzige Freie-Elektronen-Laser für den Bereich der weichen Röntgenstrahlung. Unter den modernen Lichtquellen spielt FLASH eine absolute Vorreiterrolle – und übertrifft dabei sowohl die besten Synchrotronstrahlungsquellen als auch die modernsten Lasersysteme im Röntgenbereich.

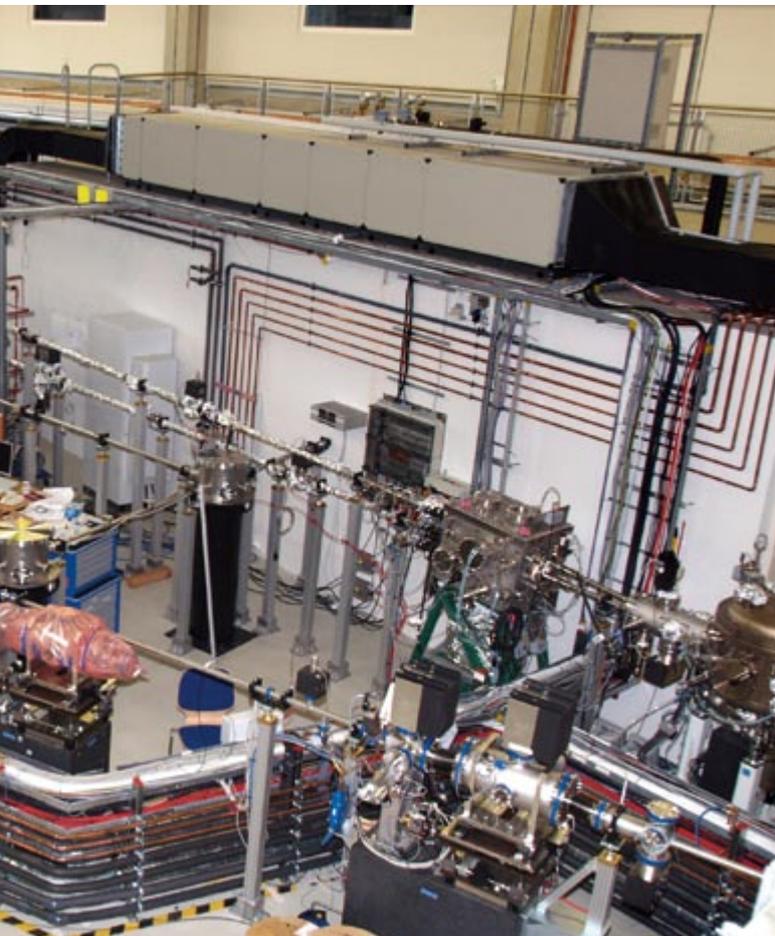
Während Synchrotronstrahlungsquellen zwar stark gebündelte Strahlung liefern, erzeugt FLASH Licht mit echten Lasereigenschaften, also perfekt gebündelte Strahlen. Herkömmliche Laser bieten im Röntgenbereich nur geringe Leistungen – die Spitzenleuchtstärke von FLASH ist um Größenordnungen höher, sogar als die moderner Synchrotronstrahlungsquellen. Da die Laserstrahlung bei FLASH außerdem in ultrakurzen Blitzen abgegeben wird, eröffnen sich den Forschern mit der neuen DESY-Anlage Experimentiermöglichkeiten, die derzeit an keiner anderen Lichtquelle der Welt gegeben sind.

Weltweit wetteifern die Strahlungsquellenbauer seit Jahren darum, den ersten Hochleistungslaser für den Röntgenbereich zu entwickeln. Dabei hat das internationale FLASH-Team eindeutig die Nase vorn: Der 260 Meter lange Freie-Elektronen-Laser bei DESY ist derzeit die einzige Laseranlage auf der Welt, die schnell gepulste, leistungsstarke und ultrakurze Lichtblitze im weichen Röntgenbereich liefert. Bereits während der ersten Messperiode 2005-2006 hielt FLASH mit 32 Nanometern (milliardstel Metern) den Rekord der kürzesten, je mit einem Freie-Elektronen-Laser erzeugten Wellenlänge. 2006 stellte die FLASH-Mannschaft mit einer Wellenlänge von nur 13,1 Nanometern einen neuen Rekord auf – und das bei Laserleistungen, die höher sind als alles, was heute selbst an den größten Plasma-Röntgenlaseranlagen der Welt erzeugt werden kann.





Strahlführungen und Messplätze in der FLASH-Halle



Im Sommer 2007 wurde FLASH weiter ausgebaut, mit dem Ziel, die Wellenlänge der erzeugten Strahlung auf den geplanten Wert von 6 Nanometern zu verkürzen. Damit wird DESY seine weltweite Spitzenposition weiter behaupten können, bis 2009 der Freie-Elektronen-Laser LCLS (*Linac Coherent Light Source*) in Stanford (USA) mit noch kürzeren Wellenlängen im harten Röntgenbereich in Betrieb geht.

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 anfangs vier von fünf Messplätzen ist heiß begehrt – ein Jahr nach Beginn des Nutzerbetriebs war die Anlage bereits dreifach überbucht. Schon während der ersten Messperiode bestätigten sich die großen Hoffnungen, die die Forscher in die revolutionär neuen Messmöglichkeiten an dem Freie-Elektronen-Laser gesetzt hatten (siehe Seite 16-23). Entsprechend gibt es zahlreiche Interessenten für weitere Projekte an FLASH, aus Bereichen wie zum Beispiel der Physik, Chemie oder Molekularbiologie.

Doch FLASH ist nicht nur als neuartiges Forschungsinstrument gefragt. Die Anlage spielt außerdem eine wichtige Pionierrolle für die künftigen größeren Freie-Elektronen-Laser, wie LCLS in Stanford und den europäischen Röntgenlaser XFEL, die Lichtblitze im harten Röntgenbereich erzeugen werden. An FLASH entwickeln und testen die Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure sowohl die supraleitende Beschleunigertechnologie, die beim XFEL zum Einsatz kommt, als auch die speziellen Magnetanordnungen zur Erzeugung der Röntgenblitze, die optischen Komponenten, Messaufbauten und Nachweisgeräte. Ebenso wertvolle Erfahrung sammeln sie beim Betrieb von FLASH mit der elektronischen Verarbeitung großer Datenmengen. Zudem ist FLASH derzeit die einzige Strahlungsquelle auf der Welt, an der die Forscher neuartige Experimentiermethoden für die künftigen Röntgenlaser studieren können.

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 derzeit 13, später 6 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

Erfolgsbilanz nach der ersten Messperiode

Der Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY ist ein absolutes Novum: Erstmals können Experimente mit intensiver, gepulster Laserstrahlung nun auch bei kurzen Wellenlängen im weichen Röntgenbereich durchgeführt werden. Damit betreten die Forscher völlig neues Neuland, für das es bislang keinerlei Erfahrungswerte gab.

Entsprechend reisten die meisten Gruppen zur ersten Messperiode (2005-2006) bei FLASH mit neu gebauten Instrumenten an, die speziell auf die besonderen Eigenschaften der Laserstrahlung zugeschnitten waren. Mit Erfolg: Trotz der Komplexität der Apparaturen und der anfänglichen Kinderkrankheiten einer neuen, noch nicht routinemäßig eingefahrenen Strahlungsquelle waren die Forscher sehr zufrieden, sie fuhren mit Speicherplatten voller Daten wieder nach Hause.

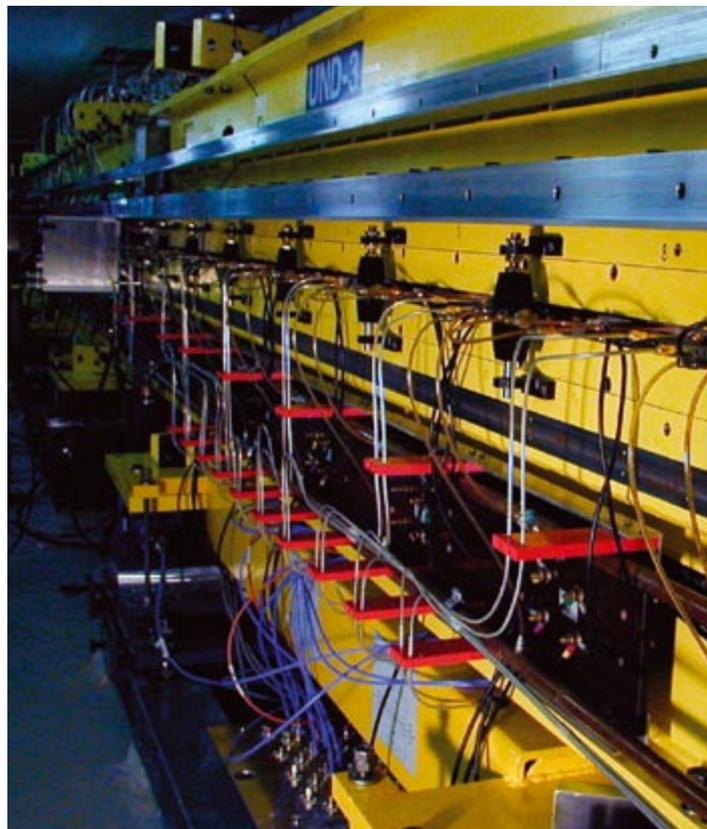
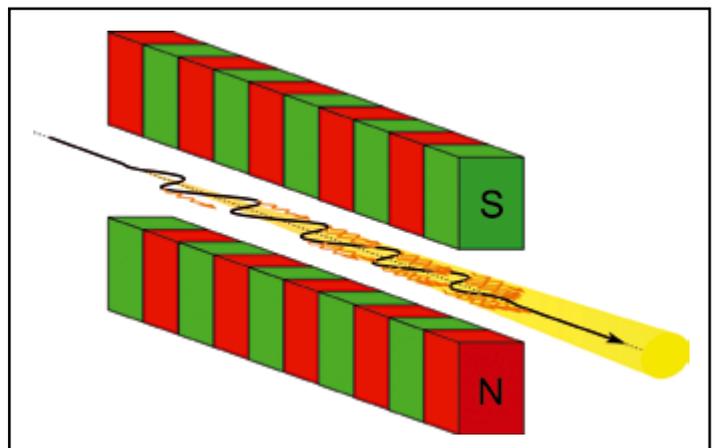
Die durchgeführten Experimente reichten von der Erzeugung und Vermessung von Plasmen über Studien an Gasen und Clustern bis hin zu ersten Untersuchungen von Experimentiermethoden für komplexe Biomoleküle, wie sie später zum Beispiel auch am europäischen Röntgenlaser XFEL zum Einsatz kommen sollen. Wie erwartet waren die Lichtblitze von FLASH kürzer als 50 Femtosekunden – einigen Gruppen gelang es mit ihrer Hilfe bereits, erste Prozesse auf extrem kurzen Zeitskalen zeitaufgelöst zu verfolgen, also quasi zu filmen. Die Untersuchung von solchen zeitaufgelösten Prozessen mit Strahlung kurzer Wellenlängen gehört zu den wichtigsten neuen Anwendungsmöglichkeiten, die Röntgenlaser dieser Art künftig bieten werden (siehe Seite 16-23).



Am HIXSS-Experiment wird das intensive Laserlicht von FLASH genutzt, um katalytische Prozesse an Festkörperoberflächen zu erforschen.

SASE – das Prinzip

Das Prinzip der Freie-Elektronen-Laser: 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.



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 einem speziellen, schwächeren Anteil der FLASH-Laserstrahlung abgedeckt, der so genannten dritten und fünften Harmonischen (d.h. Strahlung mit Wellenlängen, die dem entsprechenden Vielfachen der eingestrahlt Laserfrequenz entsprechen). Diese erreichen derzeit Wellenlängen von 4,4 beziehungsweise 2,8 Nanometern. Dadurch werden für die Biologen bisher undurchführbare Untersuchungen zugänglich, etwa holographische Aufnahmen von Zellsystemen mit Hilfe eines einzigen Lichtpulses aus der FLASH-Anlage.

Technologie für die Beschleuniger von morgen

Auch in technologischer Hinsicht dringt FLASH weit in Neuland vor. Der Freie-Elektronen-Laser funktioniert nach dem neuartigen 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 kurzwelligen, 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 europäischen Röntgenlaser 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 120 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 XFEL und den Bau weiterer Linearbeschleuniger weltweit qualifizieren können. ●

Die Undulatorstrecke im FLASH-Tunnel



GLANZ LEISTUNG.

XFEL – Europas Leuchtturm für die Wissenschaft

Er ist ein wahres Highlight: der Freie-Elektronen-Röntgenlaser XFEL, der derzeit als europäisches Projekt mit starker Beteiligung von DESY realisiert wird und 2013 in Betrieb gehen soll. Als einzige Lichtquelle dieser Art in Europa wird die XFEL-Anlage hochintensive, ultrakurze Laserlichtblitze im harten Röntgenbereich liefern – also mit Wellenlängen, die nochmals deutlich kürzer sind als die von FLASH. Auch die Leuchtstärke des Röntgenlasers XFEL wird neue Maßstäbe setzen. Damit eröffnet der XFEL völlig neue Forschungsmöglichkeiten, die für Naturwissenschaftler und industrielle Anwender aus aller Welt bisher unvorstellbar waren.

Die Erfindung von Lasern im infraroten und sichtbaren Bereich hat in den letzten 40 Jahren eine wahre Revolution in Wissenschaft und Technologie ausgelöst. 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 XFEL hoffen Naturwissenschaftler aller Fachrichtungen, die Erfolgsgeschichte des Lasers nun auch im Röntgenbereich fortzuschreiben – und damit die Forschung mit Röntgenstrahlung ebenso zu revolutionieren.

Heute werden leistungsstarke Röntgenlaser gebaut, deren Strahlung noch bessere Eigenschaften als die Synchrotronstrahlung hat: Sie ist um ein Vielfaches brillanter, kohärent, wird in Pulsen von unter 100 Femtosekunden (billiardstel Sekunden) Dauer und mit einer Spitzenleistung von mehreren Gigawatt abgestrahlt.



Blick in den Tunnel von FLASH, dem Prototypen für den XFEL, während einer Wartungspause



Das Hauptgebäude auf dem XFEL-Forschungsgelände mit der darunter liegenden Experimentierhalle in der Planung: In dieser unterirdischen Halle enden die Photonentunnel, aus denen die laserartigen Röntgenblitze der XFEL zu den Experimentierstationen geleitet werden.

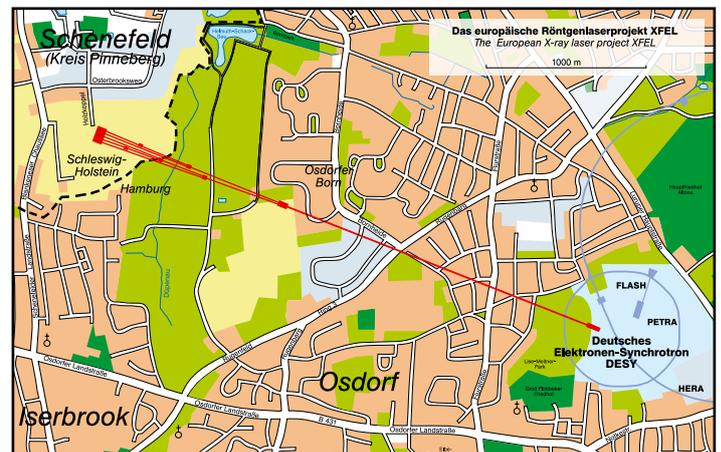
Hologramme von Molekülen

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. ➤

Der Standort des XFEL

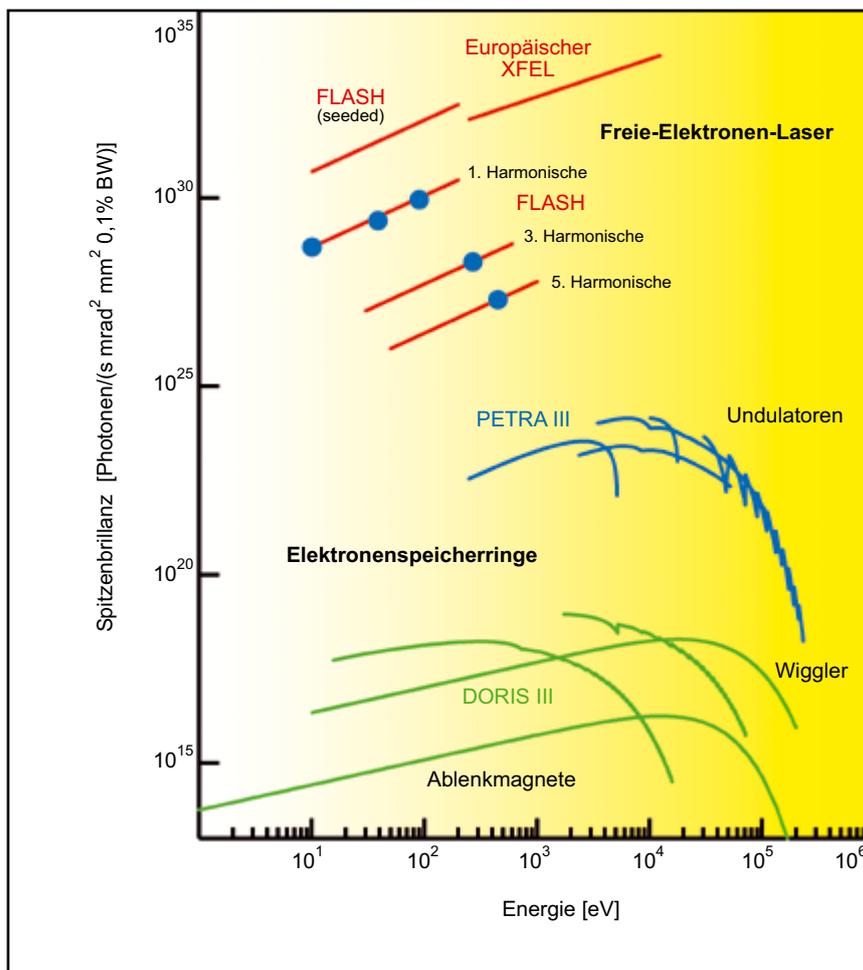
Die 3,4 Kilometer lange europäische XFEL-Anlage mit ihren drei Betriebsgeländen wird in den Bundesländern Hamburg und Schleswig-Holstein liegen. Der XFEL beginnt beim DESY-Gelände in Hamburg-Bahrenfeld, verläuft in nordwestlicher Richtung und endet in der an Hamburg grenzenden Stadt Schenefeld (Kreis Pinneberg, Schleswig-Holstein). Hier entsteht bis 2013 der neue Forschungscampus mit einer unterirdischen Experimentierhalle, die Platz für zehn Messstationen bietet. Der Standort ist so gewählt, dass bei Bedarf ein zweiter, gleich großer Experimentierkomplex errichtet werden könnte. Die zentrale Versorgungsstation wird auf dem DESY-Gelände in Hamburg errichtet, was eine effektive Nutzung der vorhandenen Infrastruktur ermöglicht. Hier beginnt auch der unterirdische Tunnel für den Linearbeschleuniger, der die lichtschnellen Elektronen zur Erzeugung der Röntgenstrahlung liefert.



Laserlicht der Superlative

Als Lichtquelle der Zukunft setzt der Röntgenlaser 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 im Bereich zwischen sechs und weniger als einem zehntel Nanometer (milliardstel Meter) variiert werden.
- > Seine Röntgenstrahlung hat die Eigenschaften von Laserlicht, d.h. sie ist kohärent. Damit sind beispielsweise holographische Experimente auf atomarer Ebene möglich.



Unerreichte Intensität

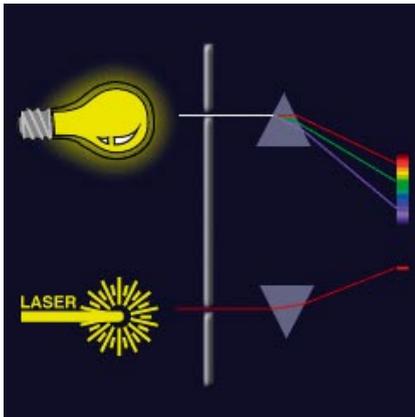
Die extrem hohe Intensität der Röntgenstrahlung aus dem XFEL bietet gleich mehrere Vorteile. Nicht nur, dass sich Messungen, die bislang mehrere Tage dauerten, am XFEL in Sekunden- oder gar Mikrosekundenschnelle durchführen lassen; auch sehr stark verdünnte Proben wie dünne Gasstrahlen bis hin zu einzelnen 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 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 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.

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.



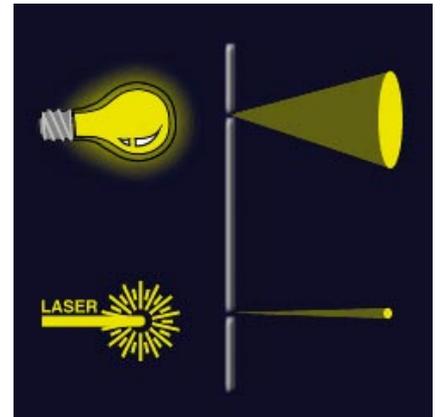
> Kohärenz (Laserartigkeit)

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.

Atome im Blitzlichtgewitter

Da die Lichtblitze aus dem europäischen Röntgenlaser 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 XFEL lassen sich solche Filme mit bislang unerreichter Zeitaufösung aufnehmen, wobei die reagierenden Moleküle mit atomarer räumlicher Auflösung abgebildet werden.

Licht der Zukunft

Mit den außergewöhnlichen Eigenschaften seiner Strahlung hebt sich der europäische Röntgenlaser 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. >

Ein Projekt im Werden

Nachdem das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Februar 2003 grünes Licht für die europäische XFEL-Anlage gegeben hatte, ging alles Schlag auf Schlag. Im selben Jahr wurde die 100 Meter lange TESLA-Testanlage bei DESY auf 260 Meter verlängert und zum Freie-Elektronen-Laser VUV-FEL ausgebaut – jener Nutzeranlage und Pilotanlage für den XFEL, die heute den Namen FLASH trägt. An dieser Anlage wurden alle technologischen Aspekte des XFEL entwickelt, getestet und auf Herz und Nieren überprüft. Als weltweit erster Freie-Elektronen-Laser für kurzwelliges Licht stellte FLASH einen Wellenlängenrekord nach dem anderen auf und bewies damit, dass das Prinzip des Freie-Elektronen-Lasers in der Tat dazu geeignet ist, intensives Laserlicht im Röntgenbereich zu erzeugen. Der erfolgreiche Nutzerbetrieb von FLASH seit Sommer 2005 und die ersten bahnbrechenden Experimenten haben sowohl die Realisierbarkeit als auch das Forschungspotenzial des „großen“ Röntgenlasers XFEL eindrucksvoll bestätigt.

Auch auf organisatorischer Seite kamen die Vorbereitungen für den XFEL schnell in Gang. Auf Initiative des BMBF wurde im Februar 2004 ein internationaler Lenkungsausschuss gegründet, der die Beteiligung europäischer Staaten an der XFEL-Anlage konkretisieren soll und mit hochrangigen Regierungsvertretern aus den an einer Beteiligung interessierten Ländern besetzt ist. Im April 2005 beantragte DESY das Planfeststellungsverfahren für den Bau und Betrieb des XFEL beim dafür zuständigen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) Clausthal-Zellerfeld, dem damaligen Landesbergamt Clausthal-Zellerfeld. Im Sommer 2005 wurde das europäische XFEL-Projektteam ernannt, das die Gründung einer unabhängigen europäischen XFEL-Organisation, der XFEL GmbH, vorbereitet. Im September 2005 unterzeichneten die ersten interessierten Länder ein *Memorandum of Understanding*, das bis zur Unterzeichnung



eines zwischenstaatlichen Abkommens die Grundlage für die internationale Zusammenarbeit bildet. Weitere Länder folgten, mittlerweile sind es Dänemark, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Italien, Polen, Russland, Schweden, Schweiz, Spanien, Ungarn und die Volksrepublik China. Derzeit finden auf Ebene der Regierungen zwischen Deutschland und dem jeweiligen Land bilaterale Verhandlungen über Art und Umfang der Beteiligung am XFEL statt.

Ganz konkret wurde es für den XFEL im Sommer 2006. Im Juli übergab das europäische XFEL-Projektteam den Technischen Design-Report an den internationalen Lenkungsausschuss: Auf 580 Seiten beschreiben etwa 300 Autoren von 71 Instituten aus 17 Ländern alle wissenschaftlichen und technischen Details der Forschungsanlage. In diesem Zusammenhang werden die Gesamtbaukosten für die Anlage einschließlich der ersten 10 Messstationen mit 986 Millionen Euro (Preisniveau des Jahres 2005) beziffert. Und am 20. Juli 2006

erließ das LBEG Clausthal-Zellerfeld den Planfeststellungsbeschluss für den XFEL. Dieser umfasst alle erforderlichen gesetzlich vorgeschriebenen Einzelgenehmigungen für den Bau und Betrieb der XFEL-Anlage.

Am 5. Juni 2007 erfolgte der eigentliche Startschuss für den XFEL: Die Realisierung einer Startversion mit vorerst sechs Messplätzen kann beginnen. Die dafür erforderlichen Baukosten von 850 Millionen Euro (Preisniveau des Jahres 2005) werden zu 75 Prozent von Deutschland getragen, den Rest übernehmen die internationalen Partnerländer. Die unabhängige europäische XFEL-Forschungsorganisation (XFEL GmbH), in der alle Partnerländer vertreten sind, soll im Jahr 2008 ihre Arbeit aufnehmen. An dem Ziel, den vollen Ausbau der Anlage zu realisieren, wird weiterhin festgehalten. Die Bauarbeiten werden auf allen drei Betriebsgeländen im Frühjahr 2008 beginnen, so dass die Inbetriebnahme des europäischen XFEL Ende 2013 starten kann.

Neue Technologien für neue Lichtquellen

Die Lichtquellen für die Forschung mit Photonen werden immer leistungstärker. Mit der Entwicklung von Röntgenlasern wie dem europäischen XFEL wird den Forschern in wenigen Jahren Strahlung zur Verfügung stehen, deren Brillanz die der heutigen Quellen um Größenordnungen übertrifft. Doch der hellste Lichtstrahl mit den kürzesten Lichtpulsen nützt wenig, wenn man ihn nicht genau dirigieren und bündeln, seine Eigenschaften gezielt beeinflussen und nach der Reaktion mit der Probe auch die erzeugten Reaktionsprodukte mit höchster Genauigkeit und Zeitauflösung nachweisen kann.

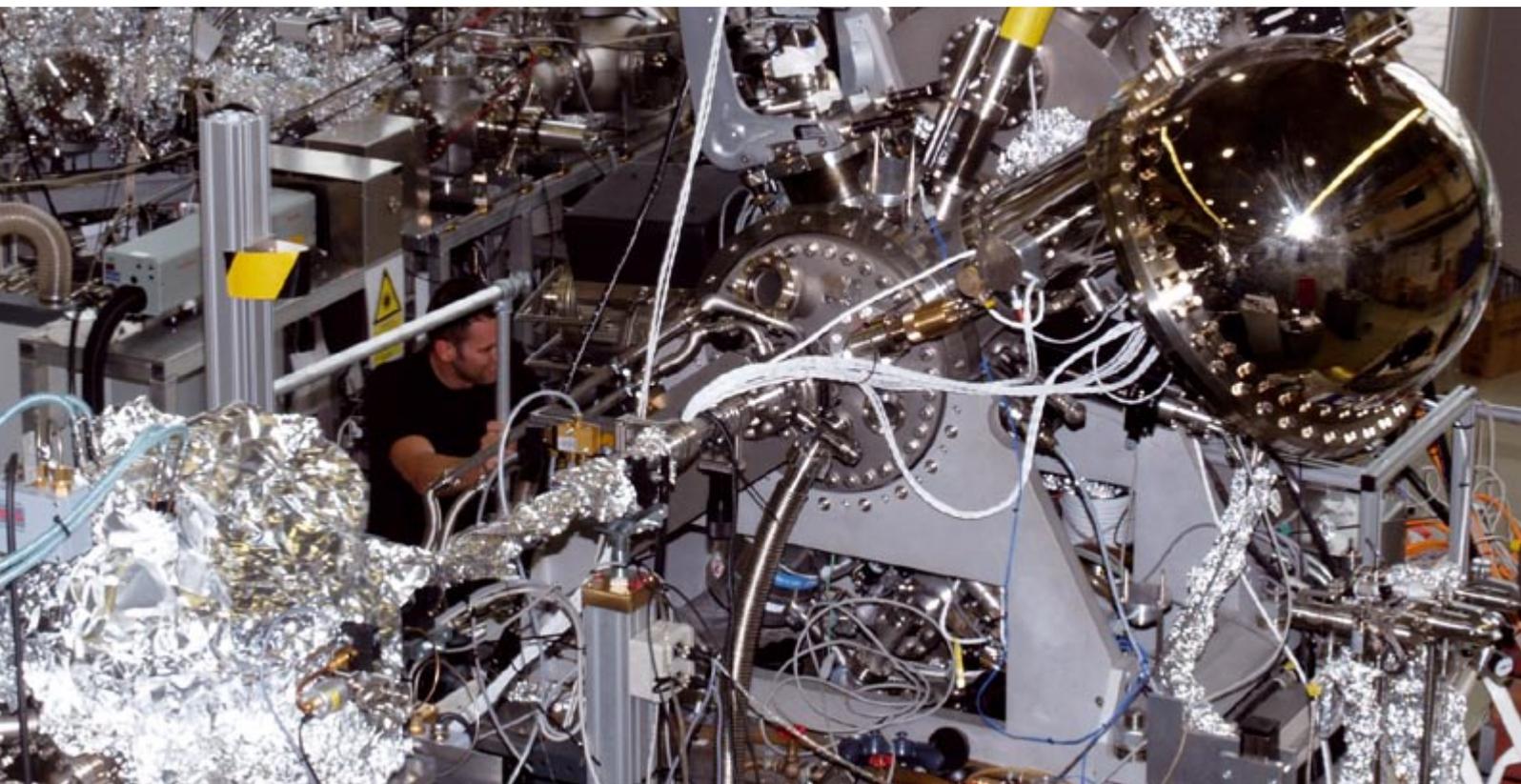
Gerade der enorme Sprung in der Leistungsfähigkeit der künftigen Quellen stellt die Forscher vor große Herausforderungen – denn bisher gibt es kaum Instrumente, die auf einen solchen Lichtstrahl ausgerichtet wären. Und das beste Experiment ist nur so gut wie das leistungsschwächste Bindeglied in der Kette, die von der Strahlungsquelle über die eigentliche Messapparatur bis in den Computer der Forscher führt.

Die Entwicklung solcher neuartiger Instrumente dauert oft Jahre. Deshalb wird bei DESY in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen weltweit schon jetzt auf Hochturen an neuen Konzepten für Strahlführungen und optische Elemente wie Monochromatoren, Gitter und Spiegel gearbeitet, die den Lichtstrahl vom Beschleuniger bis zum Experiment bringen. Eine ganz besondere Herausforderung stellen vor allem die Detektoren dar, mit denen sowohl die Röntgenstrahlen als auch die verschiedenen Reaktionsprodukte nachgewiesen werden sollen. Diese müssen eine extrem hohe Orts- und Zeitauflösung besitzen, um vollen Nutzen aus den besonderen Eigenschaften des XFEL-Laserstrahls zu ziehen.

Zehnmal pro Sekunde wird der XFEL einen Zug von 3000 Röntgenpulsen erzeugen, die jeweils nur 100 Femtosekunden kurz sind und 200 Nanosekunden auseinanderliegen. Zwischen diesen einzelnen Pulszügen herrscht 99,4 Millisekunden lang Ruhe. Ideal wären also Detektoren, die in der Lage sind, eine Wiederholrate von 5 MHz, also 5 Millionen Pulse pro Sekunde zu verarbeiten. Die Nachweisgeräte müssen dabei jeden einzelnen Röntgenpuls erkennen können und gleichzeitig den Experimenten erlauben, möglichst jeden der 30000 Pulse pro Sekunde auch zu nutzen – eine bisher noch ungelöste Herausforderung. Natürlich produzieren solche schnellen Detektoren auch entsprechende Datenmengen, die weit größer sind als alles, was bisher in der Forschung mit Photonen an der Tagesordnung war. Auch hier gilt es, neue Datennahme- und Auswertesysteme zu entwickeln, um der riesigen Datenflut Herr zu werden.

Um das intensive Licht aus den zukünftigen Röntgenlasern optimal nutzbar zu machen, müssen die Forscher bei der Entwicklung der benötigten Instrumente also ebenso Neuland betreten wie bei der Ausarbeitung der entsprechenden Experimentiermethoden. DESY hat dazu zusammen mit internationalen Partnern eine Reihe von Ausschreibungen gestartet und eigens eine Detektorgruppe ins Leben gerufen. Dabei kommen den Forschern insbesondere die Synergien mit der Teilchenphysik bei DESY zugute, da die Entwicklung von dezidierten Detektoren und Datennahmesystemen in der experimentellen Teilchenphysik schon immer eine zentrale Rolle gespielt hat. ●

Um das Potenzial der neuen Lichtquellen voll ausschöpfen zu können, müssen ebenso leistungsfähige Nachweisgeräte entwickelt werden:
im Bild ein Detektor an einem FLASH-Experiment. ●



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

IMPRESSUM.

Herausgeber

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Mitglied 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 77-0, Fax: +49 33762 77-413
desinfo.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

Heigener Europrint GmbH, Hamburg

Redaktionsschluss

August 2007

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

Fotos und Grafiken

DESY
Michael Bogumil, Hamburg
EMBL
Peter Ginter, Lohmar
Dirk Günther Grafik Design, Hamburg
Kontor B3, Hamburg
Max-Planck-Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie,
Hamburg
Option Z, Thomas Plettau, Frankfurt
Dirk Rathje, Hamburg
Christian Schmid, Hamburg
Manfred Schulze-Alex, Hamburg

Seite 3, 39: Babcock Noell GmbH, Würzburg
Seite 18-19: Henry N. Chapman et al., Nature Physics 2, 839
(2006)
Seite 20: Michael Meyer et al., Physical Review A 74,
011401(R) (2006)
Seite 22-23: Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
Seite 26: Max-Planck-Institut für Biophysikalische
Chemie, Göttingen
Seite 28-29: 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 30-31: Felix Beckmann, GKSS, Geesthacht
Seite 34: Gerta Fleissner, Jörg Habersetzer, Frankfurt
(Röntgenaufnahme); Gerta Fleissner, Frankfurt,
Gerald Falkenberg, DESY (Bildeinsatz)
Seite 35: Gerta Fleissner, Frankfurt, Gerald Falkenberg,
DESY, Gerta Fleissner et al., Naturwissen-
schaften 94:631 (2007)
Seite 36-38: dinsefeestzurl architekten, Hamburg
Seite 40: Astrid Haibel, GKSS, Geesthacht (Mikrotomo-
gramm, BAM/BESSY)
Seite 46: Antoine Devouard, Agentur R.E.A.



Deutsches Elektronen-Synchrotron Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

Die Helmholtz-Gemeinschaft leistet Beiträge zur Lösung großer und drängender Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft durch wissenschaftliche Spitzenleistungen in sechs Forschungsbereichen: Energie, Erde und Umwelt, Gesundheit, Schlüsseltechnologien, Struktur der Materie, Verkehr und Weltraum.

Die Helmholtz-Gemeinschaft ist mit 25 700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in 15 Forschungszentren und einem Jahresbudget von rund 2,3 Milliarden Euro die größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands. Ihre Arbeit steht in der Tradition des großen Naturforschers Hermann von Helmholtz (1821-1894).

www.helmholtz.de