

RENN MASCHINE.

DESY entwickelt, baut und betreibt Beschleuniger,
um Teilchen auf Höchstgeschwindigkeit zu bringen



Die Entwicklung von Teilchenbeschleunigern stellt Mensch und Maschine vor besondere Herausforderungen. Immer wieder gilt es, in technisches Neuland vorzustoßen und Pionierarbeit zu leisten. Eine enge Zusammenarbeit mit der Industrie spielt dabei eine wichtige Rolle. DESY hat in über 50 Jahren umfangreiche Erfahrungen in der Entwicklung, dem Bau und Betrieb von Beschleunigeranlagen gesammelt und gehört zur Weltspitze.

Beschleuniger | Forschung mit Photonen | Teilchenphysik

Deutsches Elektronen-Synchrotron
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft



Ein Beschleunigermodul wird in den Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY eingebaut. Es sorgt dafür, dass die FLASH-Anlage Elektronen auf eine Energie von 1,2 Gigaelektronenvolt beschleunigen und damit Laserlicht mit Wellenlängen von etwa 4,5 Nanometern erzeugen kann. Das Modul ist ein Prototyp für den Röntgenlaser European XFEL, der ab 2014 noch kürzere Wellenlängen im harten Röntgenbereich liefern wird.



INHALT.



DESY	Wir machen Erkenntnis möglich Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren zur Erforschung der Materie. DESY entwickelt, baut und nutzt Beschleuniger und Detektoren für die Forschung mit Photonen und die Teilchenphysik.	4
WELT KLASSE	Spitzenforschung an einem der führenden Beschleunigerzentren In über 50 Jahren hat sich DESY von einem relativ kleinen nationalen Labor zu einem der weltweit bedeutendsten Forschungszentren für Teilchenphysik und Forschung mit Röntgenstrahlung entwickelt. Der Schlüssel für diesen Erfolg: ...	6
TEMPO MACHER	Hochtechnologie für kleinste Teilchen Ursprünglich zur Erforschung der kleinsten Bausteine der Materie entwickelt, werden Teilchenbeschleuniger heute in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt. ...	8
FÜHRUNGS RIEGE	Teilchenbeschleuniger bei DESY Als eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren zur Erforschung der Materie entwickelt, baut und betreibt DESY seit über 50 Jahren große Teilchenbeschleuniger. Diese werden für zwei Forschungsrichtungen genutzt: ...	12
VOR RUNDE	DESY-Synchrotron und Co: Ein Anlassersystem von Vorbeschleunigern Hier pulsiert das Herz von DESY: Vom zentralen Beschleunigerkontrollraum aus werden alle Beschleuniger des Forschungszentrums gesteuert. ...	24
ERFOLGS STORY	DORIS III: Vom Elektron-Positron-Speicherring zur Lichtquelle DORIS war einer der ersten großen Speicherringe weltweit. Zunächst parallel für die Teilchenphysik und die Forschung mit Synchrotronstrahlung genutzt, wurde die Anlage 1990 zur damals hellsten Röntgenlampe Europas umgebaut. ...	26
BRILLANT RING	PETRA III: Ein Juwel mit vielen Facetten Am DESY-Speicherring PETRA, dem weltweit größten und leistungsfähigsten Elektronenbeschleuniger seiner Zeit, wurde 1979 das Gluon entdeckt – das Träger- teilchen der starken Kraft, einer der vier Grundkräfte der Natur. ...	28



WEG WEISER

HERA: Das Super-Elektronenmikroskop

32

HERA war der größte Teilchenbeschleuniger bei DESY und Deutschlands größtes Forschungsinstrument: ein 6,3 Kilometer langes Super-Elektronenmikroskop, das den Physikern den weltweit schärfsten Blick ins Proton eröffnete. ...

ZIEL GERADE

FLASH: Weltrekord im Laserblitzen

36

Seit 2005 steht bei DESY eine einmalige, neuartige Lichtquelle zur Verfügung: FLASH, der weltweit einzige Freie-Elektronen-Laser im Vakuum-Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich. ...

GLANZ LEISTUNG

European XFEL: Europas Leuchtturm für die Wissenschaft

40

Er ist ein Highlight im wahrsten Sinne des Wortes: der Freie-Elektronen-Röntgenlaser European XFEL, der derzeit als europäisches Projekt mit starker Beteiligung von DESY in der Metropolregion Hamburg entsteht und 2014 anlaufen soll. ...

QUELL GEBIET

PITZ: Elektronenquellen für Röntgenlaser und ILC

44

Atome im Blitzlichtgewitter, Filmen in der Nanowelt, Hologramme von Molekülen, Sternenmaterie im Röntgenlicht – eine wachsende Zahl von Experimenten benötigt Röntgenstrahlung extrem hoher Intensität und Qualität. ...

NEU LAND

ILC: Das Zukunftsprojekt der Teilchenphysik

46

Leistungsfähigster Beschleuniger der Welt ist derzeit der Protonenbeschleuniger LHC in Genf. Die großen Rätsel des Universums werden sich jedoch nur in Verbindung mit einer weiteren „Präzisionsmaschine“ lösen lassen. ...

KALT FRONT

TESLA-Technologie: Beschleunigertechnologie der Zukunft

48

Anfang der 1990er Jahre begannen bei DESY gemeinsam mit internationalen Partnern Entwicklungsarbeiten für eine bahnbrechende supraleitende Beschleunigertechnologie. ...

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

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

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

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

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



Steckbrief DESY

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



Computersimulation der Teilchenbeschleunigung

Beschleuniger

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

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

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

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

Forschung mit Photonen

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

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

Katalysatoren oder Halbleiterkristalle analysiert.

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

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

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

Teilchenphysik

Auf den Spuren von Quarks, Supersymmetrie und 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, bieten den Forschern die nächsten Großprojekte 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 dem Neutrinoobservatorium IceCube im Eis des Südpols, auf der Suche nach flüchtigen Geisterteilchen aus dem Weltall.

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

WELT KLASSE.

Spitzenforschung an einem der führenden Beschleunigerzentren

In über 50 Jahren hat sich DESY von einem relativ kleinen nationalen Labor zu einem der weltweit bedeutendsten Forschungszentren für Teilchenphysik und Forschung mit Röntgenstrahlung entwickelt. Der Schlüssel für diesen Erfolg: DESYs Kompetenz in der Entwicklung, dem Bau und Betrieb großer Teilchenbeschleuniger. Erst diese hochkomplexen Hightech-Anlagen machen die Spitzenforschung bei DESY überhaupt möglich.



Service für die Forschung

Um den Geheimnissen der kleinsten Bausteine unserer Welt auf die Spur zu kommen, sind Teilchenbeschleuniger unentbehrliche Werkzeuge. Diese für Wissenschaftler aus Deutschland und der Welt bereitzustellen, ist Aufgabe des Forschungszentrums DESY – so wurde es bereits bei der Gründung des Deutschen Elektronen-Synchrotrons 1959 in der Satzung festgelegt: „Der Zweck der Stiftung DESY ist die Förderung der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung vor allem durch den Bau und Betrieb von Teilchenbeschleunigern und deren wissenschaftliche Nutzung, insbesondere die Forschung mit Teilchen und Synchrotronstrahlung, sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die damit in Zusammenhang stehen.“

Herausforderung Beschleuniger

Nahezu alle Forschung, die bei DESY betrieben wird – ob in der Teilchenphysik oder der Forschung mit dem intensiven Licht, das an Beschleunigern produziert wird –, steht und fällt mit der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der zur Verfügung stehenden Teilchenbeschleuniger. Deshalb ist der Bereich „Beschleuniger“ bei DESY auch der personell stärkste des Forschungszentrums: Etwa 600 Menschen in 18 Fachgruppen arbeiten hier an der Entwicklung, dem Bau und dem Betrieb von Beschleunigern, in enger Zusammenarbeit mit Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industriefirmen in Deutschland und weltweit. Denn solche ausgeklügelten, gewaltigen Hightech-Maschinen zu entwerfen, zu bauen und jahrzehntelang erfolgreich zu betreiben, ist nur mit den vereinten Kräften zahlreicher Experten aus den unterschiedlichsten Spezialgebieten möglich.



Beschleunigerzentrum der Spitzenklasse

Mit über einem halben Jahrhundert Erfahrung gehört DESY zur Weltspitze der Beschleunigerzentren. Bereits kurz nach der Gründung des Forschungszentrums gelang es der damals noch unerfahrenen DESY-Mannschaft, eines der leistungsfähigsten Elektronen-Synchrotrons der 1960er Jahre zu realisieren. Die daran erzielten Forschungsergebnisse etablierten DESY in der Riege der internationalen Teilchenphysikzentren. Gleichzeitig wurde hier die Grundlage für das zweite Standbein von DESY gelegt: den Einsatz von Beschleunigern als intensive Lichtquellen.

Anfang der 1970er Jahre folgte mit DORIS einer der weltweit ersten großen Speicherringe, der heute noch Forscherteams aus aller Welt als zuverlässige Röntgenquelle dient. Größter und leistungsfähigster Elektronenbeschleuniger seiner Zeit war der PETRA-Speicherring: ein Meisterwerk des Beschleunigerbaus, das DESY 1978 an die Weltspitze in der Teilchenforschung mit Elektron-Positron-Kollisionen brachte. Heute ist die Anlage als beste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle der Welt wieder am Start.

Internationale Zusammenarbeit hat bei DESY eine lange Tradition – auch auf dem Gebiet der Beschleunigerphysik. Ein herausragendes Beispiel war Deutschlands bislang größtes Forschungsinstrument, der von 1990 bis 2007 bei DESY betriebene Elektron-Proton-Speicherring HERA, an dessen Bau insgesamt elf Länder mitgewirkt haben.

Über 50 Institute aus zwölf Ländern sind heute unter der Federführung von DESY an der Entwicklung der zukunftsweisenden TESLA-Technologie beteiligt, die auf supraleitende Beschleunigungsstrukturen setzt und erstmals bei DESYs jüngster Lichtquelle, dem Freie-Elektronen-Laser FLASH, zum Einsatz kommt.

Als eines der weltweit führenden Zentren auf diesem Gebiet ist DESY für laufende und zukünftige internationale Projekte – wie den Röntgenlaser European XFEL, der derzeit in der Metropolregion Hamburg entsteht, oder das Zukunftsprojekt der Teilchenphysik, den geplanten Linearbeschleuniger ILC – hervorragend aufgestellt.

„Die Beschleunigerphysik ist ein äußerst dynamisches Forschungsgebiet bei DESY. Seit über 50 Jahren werden hier innovative Konzepte und Technologien entwickelt, die immer wieder dazu beitragen, die wissenschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten der Beschleunigeranlagen zu verbessern und zum Teil gänzlich neue Forschungsmöglichkeiten zu erschaffen.“

Dr. Reinhard Brinkmann
DESY-Direktor für den Beschleunigerbereich



TEMPO MACHER.

Hochtechnologie für kleinste Teilchen

Ursprünglich zur Erforschung der kleinsten Bausteine der Materie entwickelt, werden Teilchenbeschleuniger heute in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt. Während Teilchenphysiker mit großen Hochenergiebeschleunigern nach Higgs-Bosonen und Extradimensionen fahnden, nutzen Wissenschaftler zahlreicher Fachrichtungen – von der Materialforschung über die Molekularbiologie bis zur Medizin – die an Beschleunigern erzeugte Strahlung als vielseitiges Forschungsinstrument. Kleinere Anlagen dienen unterschiedlichsten Anwendungen wie Strahlentherapie oder Chipherstellung.

Ein Beschleuniger im Wohnzimmer

Bis vor kurzem befand sich in fast jedem Haushalt ein Teilchenbeschleuniger: der (Röhren-)Fernseher. Die von der Glühwendel in der Vakuumröhre des Fernsehers freigesetzten Elektronen werden durch elektrische Felder beschleunigt und durch magnetische Felder abgelenkt, um schließlich an der vorgesehenen Stelle auf den Teilchendetektor – die Mattscheibe – zu prallen und dort einen Bildpunkt zu erzeugen. Ein solches elektrisches Feld herrscht zum Beispiel zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Metallplatten. Ein negativ geladenes Teilchen, das sich in diesem Zwischenraum befindet, wird von der positiv geladenen Platte angezogen und von der negativ geladenen abgestoßen. Ein positiv geladenes Teilchen wird in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt.

Mit statischen elektrischen Feldern wie im Fernseher gelangt man bei der Teilchenbeschleunigung schnell an technische Grenzen. Deshalb werden in Beschleunigern hochfrequente elektromagnetische Wechselfelder eingesetzt, auf denen die Teilchen – ähnlich wie Surfer auf einer Wasserwelle – mitgeführt und beschleunigt werden. Moderne Anlagen arbeiten als Mehrfachbeschleuniger, in denen den Teilchen immer wieder Energie zugeführt wird. In Linearbeschleunigern sind

die Beschleunigungsstrecken dazu hintereinander angeordnet, in Ringbeschleunigern werden dieselben Beschleunigungsstrecken immer wieder, viele tausendmal in der Sekunde, durchlaufen. Dabei werden die Teilchen mit Magnetfeldern auf ihrer Kreisbahn gehalten.

Supermikroskope

Seit ihrer Erfindung in den 1920er Jahren werden Beschleuniger in der Teilchenphysik eingesetzt, um den kleinsten Bausteinen der Materie auf die Spur zu kommen: Mit ihrer Hilfe können die Teilchenphysiker enträtseln, „was die Welt im Innersten zusammenhält“. Dazu werden die auf hohe Energien beschleunigten Teilchen entweder auf ein festes Ziel (Target) gelenkt, oder es werden zwei in entgegengesetzter Richtung umlaufende Teilchenstrahlen direkt im Ringbeschleuniger zur Kollision gebracht. Gemäß Einsteins $E = mc^2$ wird dabei Materie in einen Energieblitz umgewandelt, aus dem innerhalb von Sekundenbruchteilen neue, exotische Partikel entstehen. Diese fliegen in alle Richtungen auseinander und werden in riesigen Nachweisgeräten (Detektoren) registriert, die den Kollisionspunkt umschließen. Damit wirken die Hochenergiebeschleuniger mit ihren hausgroßen



Experimenten wie Supermikroskope, die den Forschern Einblick in die Welt der kleinsten Teilchen und der Kräfte, die sie zusammenhalten, gewähren.

Ein Maß für die Leistungsfähigkeit eines Beschleunigers ist die maximal erreichbare Teilchenenergie: Je höher diese ist, umso kleinere Materiestrukturen lassen sich untersuchen. Allerdings ist sie aus technischen Gründen begrenzt. Wenn sich elektrisch geladene Teilchen wie Elektronen auf gekrümmten Bahnen bewegen, senden sie so genannte Synchrotronstrahlung aus und verlieren dadurch Energie, die immer wieder zugeführt werden muss. Selbst in Speicherringen, in denen die Teilchenstrahlen über Stunden hinweg umlaufen, müssen die Teilchen ständig etwas beschleunigt werden, um diese Verluste auszugleichen. Das schränkt die in Ringbeschleunigern erreichbare Maximalenergie ein. Deshalb basiert eines der großen Zukunftsprojekte der Teilchenphysik, der International Linear Collider ILC, auf zwei gegeneinander gerichteten Linearbeschleunigern.

Lichtquellen

Für die Teilchenphysik ist die in Ringbeschleunigern erzeugte Synchrotronstrahlung ein Nachteil. Doch schon bald nach ihrer Entdeckung stellte sich heraus, dass sich die Strahlung hervorragend für eine breite Palette von Untersuchungsmöglichkeiten eignet – ob in Physik, Chemie, Geologie, Biologie, Materialforschung oder Medizin. Der Störeffekt wurde zum Forscherhit: An die 50 Teilchenbeschleuniger sind heute weltweit als Synchrotronstrahlungsquellen im Einsatz; etwa 40 000 Wissenschaftler durchleuchten mit dem außergewöhnlichen Licht die verschiedensten Materialien – Tendenz steigend. Die Entwicklung neuer, international konkurrenzfähiger Strahlungsquellen steht deshalb ganz oben auf der Prioritätenliste der Beschleunigerzentren.

In den heutigen Speicherring-Lichtquellen wird die Synchrotronstrahlung nicht mehr nur in den Ablenkmagneten erzeugt, die die Teilchen auf ihrer Kreisbahn halten. Zusätzlich werden meterlange spezielle Magnetstrukturen eingebaut, so genannte Wiggler und Undulatoren, die aus einer Folge von abwechselnden Nord- und Südpolen bestehen. Dieser Magnet-

parcours zwingt die lichtschnellen Elektronen auf einen Slalomkurs, auf dem sie einen weitaus intensiveren Lichtstrahl aussenden als in einem einzelnen Ablenkmagneten. Hochintensive Strahlung ganz neuer Qualität wird von den Lichtquellen der nächsten Generation erzeugt, den Freielektronen-Lasern (FEL). Die FEL-Strahlung besitzt die Eigenschaften von Laserlicht und wird in ultrakurzen Pulsen geliefert, was einzigartige Experimente ermöglicht.

Vielseitig einsetzbar

Von den über 17 000 Teilchenbeschleunigern auf der Welt dienen nur etwa 100 der Grundlagenforschung in der Kern- und Teilchenphysik, für die sie ursprünglich entwickelt wurden. Beschleuniger mittlerer und niedriger Energie leisten mittlerweile in den verschiedensten Anwendungsbereichen wertvolle Dienste – von der Medizin bis zur Lebensmittelindustrie.

In Krankenhäusern werden Linearbeschleuniger für die Strahlentherapie und Radiochirurgie verwendet: Etwa 200 Beschleuniger weltweit produzieren die für Diagnosezwecke benötigten Radioisotope, und ganze 7500 sind für die Strahlentherapie im Einsatz. Medizinische Einwegartikel werden mit Strahlung aus Teilchenbeschleunigern sterilisiert. Auch Lebensmittel lassen sich mit ionisierenden Strahlen aus Beschleunigern konservieren: Durch unterschiedlich hohe Bestrahlungsdosen werden Insekten und Parasiten bekämpft, die Haltbarkeit erhöht und Krankheitserreger abgetötet. Elektronenstrahlschweißanlagen, in denen Werkstücke mit Hilfe von beschleunigten Elektronen geschweißt werden, kommen bei der Massenfertigung von Getriebebauteilen in der Automobilindustrie zum Einsatz, auch Bauteile für die Luft- und Raumfahrt, den Schienenverkehr und die Nahrungsmittelindustrie werden mit Elektronenstrahlen geschweißt. Die in der Chipherstellung benötigten Fotomasken werden mittels Elektronenstrahlolithografie hergestellt, die dazu verwendeten Elektronenstrahlen in Teilchenbeschleunigern erzeugt. Auch an vielversprechenden künftigen Anwendungsmöglichkeiten mangelt es nicht: So könnten Beschleuniger in Zukunft zum Beispiel eingesetzt werden, um radioaktiven Abfall zu beseitigen. ●

Prinzip eines Teilchenbeschleunigers

Fokussierungsmagnet

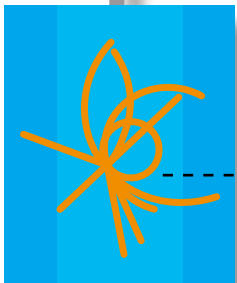
Ein Teilchenstrahl besteht aus kleinen „Paketen“, deren Teilchen alle die gleiche Ladung tragen. Da die einzelnen Teilchen nicht exakt in die gleiche Richtung fliegen, laufen die Pakete über längere Strecken auseinander. Deshalb durchfliegen sie in regelmäßigen Abständen Fokussierungsmagnete (Quadrupolmagnete), deren Felder wie magnetische Linsen wirken und die Teilchen wieder zusammenführen.

Vakuumrohr

Die Teilchenstrahlen fliegen durch Vakuumrohre, in denen ein Druck von typischerweise einem hundertmillionstel (10^{-8}) Millibar herrscht. So gehen möglichst wenig Teilchen durch Zusammenstöße mit Luftmolekülen verloren.

Detektor

Für die Experimente der Teilchenphysik werden an bestimmten Stellen des Beschleunigers entweder zwei gegenläufige Teilchenstrahlen frontal aufeinander oder ein Teilchenstrahl auf ein ruhendes Ziel (Target) gelenkt. Die Kollisionen werden von hausgroßen, hochkomplexen Nachweisgeräten, den Detektoren, aufgezeichnet und anschließend von den internationalen Forscherteams, die die Detektoren betreiben, analysiert und ausgewertet.



Beschleunigungsstrecke

Den nötigen Kick erhalten die Teilchen in den Beschleunigungsstrecken: In Ringbeschleunigern und langen Hochenergie-Linearbeschleunigern werden dazu Hohlraumresonatoren (Kavitäten) eingesetzt, in denen hochfrequente elektromagnetische Felder schwingen. Die Schwingung ist so synchronisiert, dass die Teilchen immer ein beschleunigendes Feld mit richtigem Vorzeichen sehen und wie Surfer auf einer Wasserwelle mitgeführt und beschleunigt werden.

Ablenkmagnet

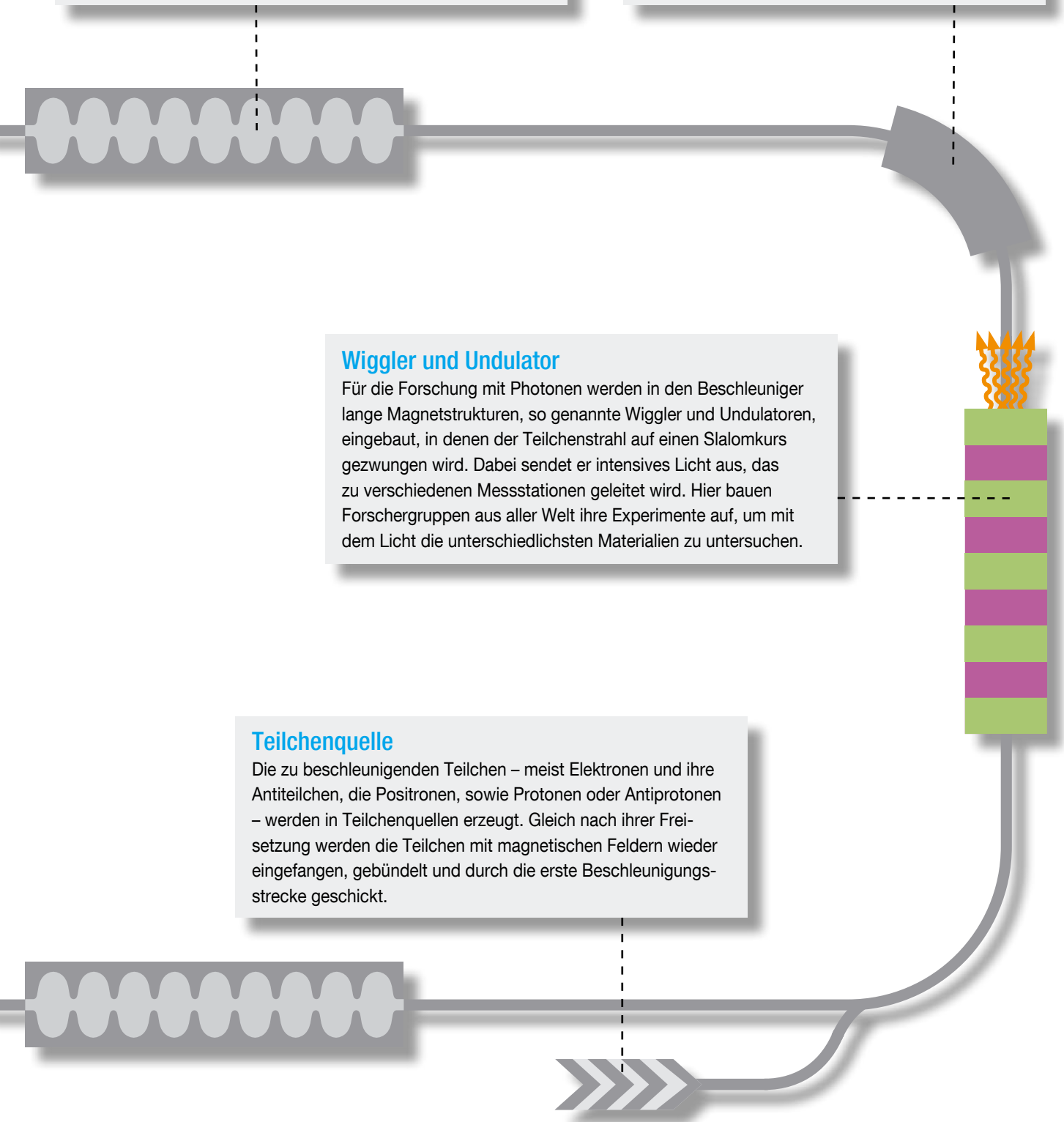
Innerhalb eines Ringes oder zwischen zwei Beschleunigern werden die Teilchen durch Führungs- bzw. Ablenkmagnete auf dem richtigen Weg gehalten. Hierzu kommen Dipolmagnete zum Einsatz, deren Magnetfeld die Teilchen auf eine gekrümmte Bahn zwingt.

Wiggler und Undulator

Für die Forschung mit Photonen werden in den Beschleuniger lange Magnetstrukturen, so genannte Wiggler und Undulatoren, eingebaut, in denen der Teilchenstrahl auf einen Slalomkurs gezwungen wird. Dabei sendet er intensives Licht aus, das zu verschiedenen Messstationen geleitet wird. Hier bauen Forschergruppen aus aller Welt ihre Experimente auf, um mit dem Licht die unterschiedlichsten Materialien zu untersuchen.

Teilchenquelle

Die zu beschleunigenden Teilchen – meist Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, sowie Protonen oder Antiprotonen – werden in Teilchenquellen erzeugt. Gleich nach ihrer Freisetzung werden die Teilchen mit magnetischen Feldern wieder eingefangen, gebündelt und durch die erste Beschleunigungsstrecke geschickt.



FÜHRUNGS RIEGE.

Teilchenbeschleuniger bei DESY

Als eines der weltweit führenden Beschleunigerzentren zur Erforschung der Materie entwickelt, baut und betreibt DESY seit über 50 Jahren große Teilchenbeschleuniger. Diese werden für zwei Forschungsrichtungen genutzt: Für die Forschung mit Photonen dienen sie als brillante Lichtquellen, mit deren Strahlung die unterschiedlichsten Proben untersucht werden. In der Teilchenphysik fungieren sie als gewaltige Mikroskope, mit denen die Physiker die Grundbausteine der Materie und die Kräfte, die sie zusammenhalten, erforschen.

Lichtquellen für die Forschung mit Photonen

Für die Forschung mit Photonen (Lichtteilchen) 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.

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 zukünftigen Lichtquellen auf ideale Weise: Die bewährte Synchrotronstrahlungsquelle DORIS III liefert millimetergroße Lichtstrahlen mit hohem Photonenfluss. Die weltweit brillanteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle PETRA III erzeugt intensive Strahlung, deren Spektrum weit in den harten Röntgenbereich hinein reicht. Der Freie-Elektronen-Laser FLASH bietet extrem intensive, ultrakurze Laserlichtpulse im Ultraviolett und im weichen Röntgenbereich. Und ab 2014 wird der Röntgenlaser European XFEL, der als europäisches Projekt mit maßgeblicher Beteiligung von DESY realisiert wird, Laserlichtblitze höchster Brillanz im harten Röntgenbereich erzeugen. So erhalten die Wissenschaftler bei DESY



exakt die Strahlung, die sie für ihre Experimente brauchen – im weltweiten Vergleich ein entscheidender Wettbewerbsvorteil für die Forschung mit Photonen in Europa.

Supermikroskope für die Teilchenphysik

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.

Bis 2007 waren bei DESY große Hochenergiebeschleuniger für die Teilchenphysik in Betrieb, zuletzt das einzigartige Super-Elektronenmikroskop HERA. Ähnlich wie in der Astronomie, wo Forscher aus aller Welt mit einigen wenigen, in internationaler Zusammenarbeit gebauten und betriebenen Teleskopen arbeiten, verschiebt sich der Schwerpunkt in der Teilchenphysik heutzutage hin zu einigen wenigen Großgeräten, die nicht mehr von einem Land alleine getragen werden können, sondern nur noch als breit aufgestellte internationale Projekte zu realisieren sind. Bei DESY hat diese länderübergreifende Zusammenarbeit eine lange Tradition. Daher bringen die Teilchenphysiker bei DESY ihr Wissen heute bei einer Reihe solcher großer internationaler Anlagen ein. Insbesondere beteiligen sie sich an den Experimenten am leistungsstärksten Beschleuniger der Welt, dem Large

Hadron Collider LHC in Genf, und leisten wichtige Entwicklungsarbeiten für den geplanten Linearbeschleuniger der Zukunft, den International Linear Collider ILC.

Technologieentwicklung

Eine besondere Herausforderung ist die Entwicklung der Beschleunigertechnologie für das große Zukunftsprojekt der Teilchenphysik, den Linearbeschleuniger ILC. Gemeinsam mit internationalen Partnern hat DESY dazu die TESLA-Technologie entwickelt und getestet, die auf supraleitende Beschleunigungsmodule setzt. Nach einem Beschluss der weltweiten Gemeinschaft der Teilchenphysiker soll die TESLA-Technologie nunmehr für den ILC eingesetzt werden. Zudem ermöglicht diese Beschleunigertechnologie den Betrieb von neuartigen Röntgenlasern. Die erste Lichtquelle dieser Art ist der Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY, der Röntgenlaser European XFEL ist im Bau.

In Zeuthen betreibt DESY den Photoinjektor-Teststand PITZ, an dem spezielle Elektronenquellen entwickelt und optimiert werden, die für die neue Generation von Freie-Elektronen-Lasern gebraucht werden.

Durch die Entwicklung immer besserer Beschleunigeranlagen verschieben sich ständig die Grenzen des technisch Machbaren. Die Zusammenarbeit von DESY mit Industrieunternehmen führt zu wichtigen Innovationen in Bereichen wie Elektronik, Hochfrequenz-, Vakuum- und Kältetechnik sowie dem Betrieb von komplexen supraleitenden Systemen.

50 Jahre Teilchenbeschleuniger bei DESY

Seit über einem halben Jahrhundert entwickelt, baut und betreibt DESY große Teilchenbeschleuniger. Die meisten wurden in verschiedenen Ausbaustufen für unterschiedliche Forschungszwecke eingesetzt – die Suche nach den kleinsten Bausteinen der Materie in der Teilchenphysik und die vielfältigen Untersuchungen mit brilliantem Licht im Bereich der Forschung mit Photonen. Genügt einer der Beschleuniger nach jahrzehntelangem Einsatz nicht mehr den Anforderungen der Spitzenforschung, hat er trotzdem noch lange nicht ausgedient. Er fungiert fortan als Vorbeschleuniger für eine größere Anlage oder liefert Teststrahlen für die Entwicklung von Folgeprojekten.

So war der dienstälteste Beschleuniger und Namensgeber von DESY, das Deutsche Elektronen-Synchrotron „DESY“, ganze 43 Jahre in Betrieb – von 1964 bis 2007: zunächst für die Teilchenphysik, dann parallel für die Forschung mit Synchrotronstrahlung und schließlich ab 1987 als Vorbeschleuniger für den Speicherring HERA.



● Einbau eines supraleitenden Beschleunigermoduls in den Freie-Elektronen-Laser FLASH

Beschleuniger bei DESY

HERA

- > Elektron-Proton-Speicherring für die Teilchenphysik
- > Länge: 6336 m
- > Forschungsbetrieb: 1992 bis 2007
- > Datenauswertung läuft noch
- > Experimente: H1, ZEUS, HERMES, HERA-B

European XFEL

- > europäisches Projekt mit starker DESY-Beteiligung
- > Freie-Elektronen-Laser mit supraleitendem Linearbeschleuniger
- > Länge: ca. 3,4 km
- > im Bau, Beginn der Inbetriebnahme: 2014
- > Röntgenlaser für die Forschung mit Photonen

PETRA III

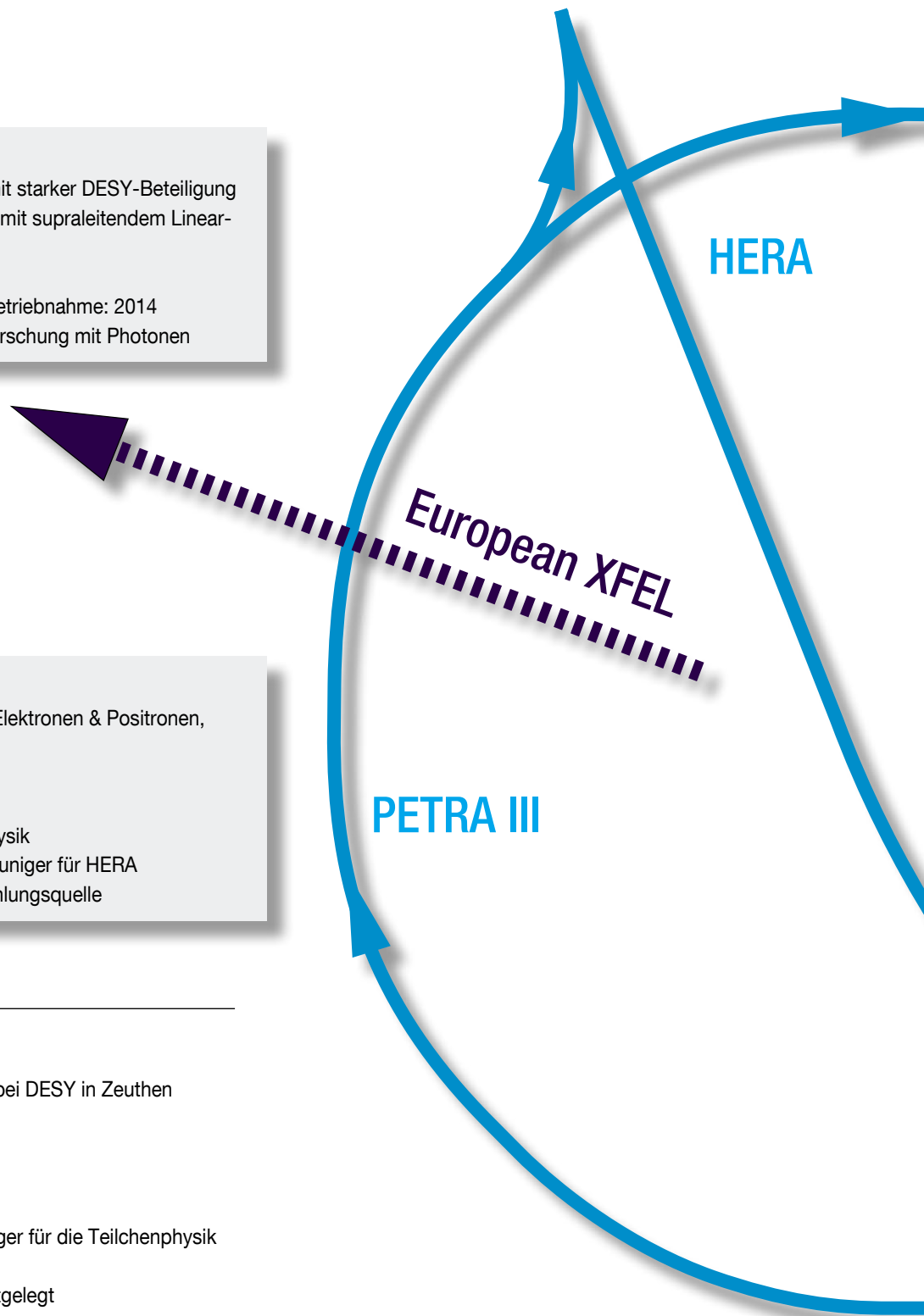
- > Ringbeschleuniger für Elektronen & Positronen, später auch Protonen
- > Länge: 2304 m
- > Inbetriebnahme: 1978
- > 1978-1986: Teilchenphysik
- > 1987-2007: Vorbeschleuniger für HERA
- > seit 2009: Röntgenstrahlungsquelle

PITZ

- > Teststand mit Linearbeschleuniger bei DESY in Zeuthen
- > Länge: ca. 12 m
- > Inbetriebnahme: 2002

ILC

- > Elektron-Positron-Linearbeschleuniger für die Teilchenphysik
- > Länge: ca. 35 km
- > in Planung, Standort noch nicht festgelegt
- > zwei Experimente an einer Kollisionszone



FLASH

- > Freie-Elektronen-Laser mit supraleitendem Linearbeschleuniger
- > Länge: 260 m
- > 1992-2005: Testanlage für Beschleuniger- und FEL-Technologie
- > seit 2005: Forschung mit Photonen

DORIS III

- > Ringbeschleuniger für Elektronen & Positronen
- > Länge: 289 m
- > Inbetriebnahme: 1974
- > 1974-1992: Teilchenphysik und Forschung mit Synchrotronstrahlung
- > seit 1993: Quelle für Synchrotronstrahlung

LINAC II

- > Linearbeschleuniger für Elektronen & Positronen
- > Länge: 70 m
- > Inbetriebnahme: 1971
- > Vorbeschleuniger

LINAC III

- > Linearbeschleuniger für Protonen
- > Länge: 32 m
- > Inbetriebnahme: 1988, Stilllegung: 2007
- > Vorbeschleuniger

PIA

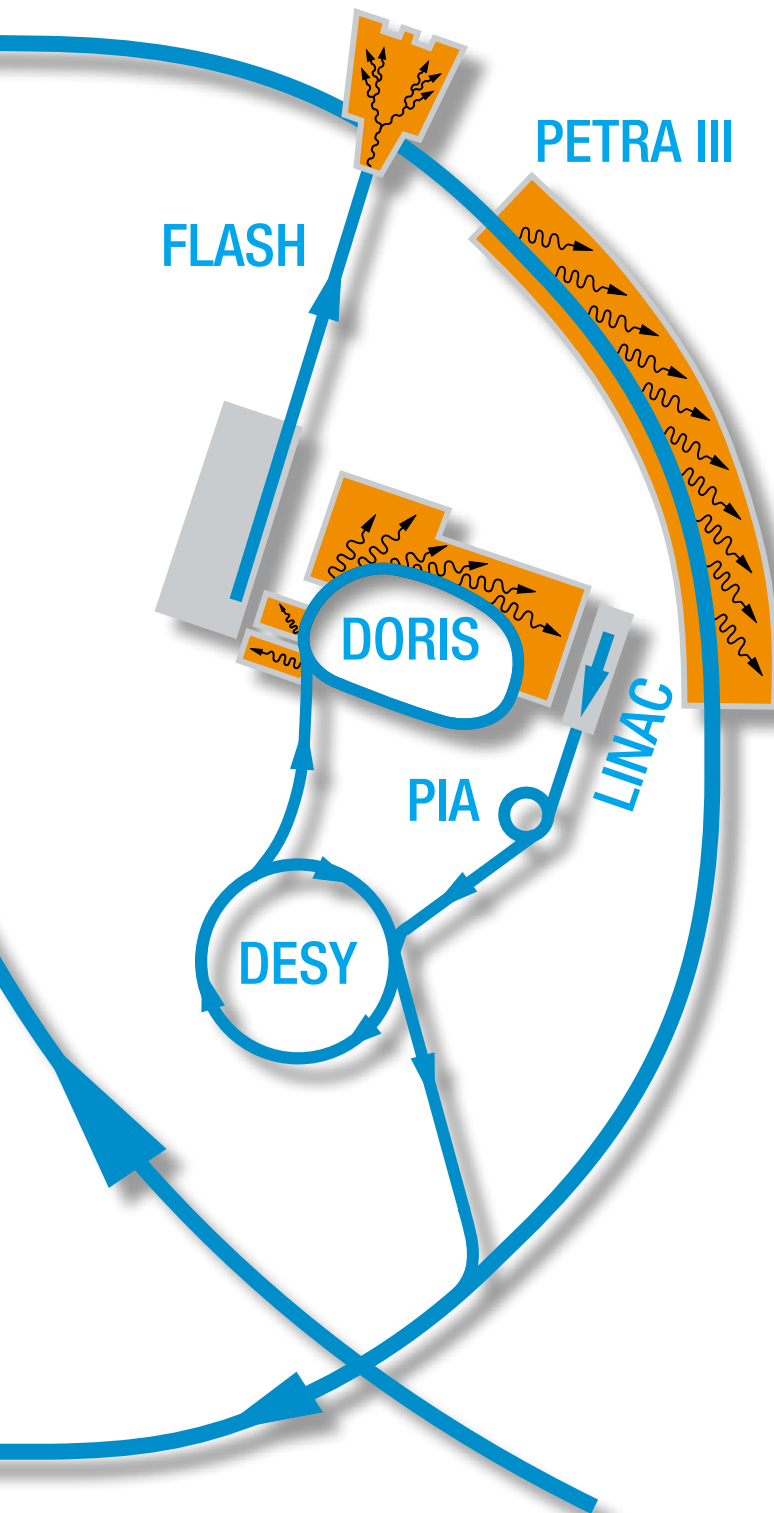
- > Akkumulator für Elektronen & Positronen
- > Länge: 29 m
- > Inbetriebnahme: 1979
- > Vorbeschleuniger

DESY I/III

- > Ringbeschleuniger für Elektronen & Positronen, ab 1987 für Protonen
- > Länge: 317 m
- > Inbetriebnahme: 1964, Stilllegung: 2007
- > 1964-1978: Forschungsbetrieb
- > ab 1973: Vorbeschleuniger

DESY II

- > Ringbeschleuniger für Elektronen & Positronen
- > Länge: 293 m
- > Inbetriebnahme: 1987
- > Vorbeschleuniger



ENTWICKLUNG

Vom nationalen Beschleunigerlabor zur Weltspitze

Erste Rekordmaschine

Als die Gründungsväter von DESY Mitte der 1950er Jahre die Pläne für das neue Teilchenphysik-Forschungszentrum ausarbeiteten, gingen sie gleich aufs Ganze. In Hamburg sollte ein ringförmiger Beschleuniger vom Typ Synchrotron entstehen, mit einem Umfang von 300 Metern, der Elektronen auf eine Energie von 6 GeV (Gigaelektronenvolt = Milliarden Elektronenvolt) beschleunigen sollte – ein neuer Rekordwert und die höchste Energie, die man damals mit einem Elektronen-Synchrotron zu erreichen hoffte. Eine solche Maschine würde die großen Protonenbeschleuniger, die zu der Zeit bei CERN in Genf und in den USA im Bau waren, optimal ergänzen.

Dass dieser erste Teilchenbeschleuniger bei DESY tatsächlich zügig und ohne größere Probleme zum Laufen gebracht werden konnte, war alles andere als selbstverständlich. Denn die jungen Physiker und Ingenieure, die DESY-Direktor Willibald Jentschke damals um sich scharte, waren zwar äußerst begeistert, im Beschleunigerbau jedoch zumeist völlig unerfahren. Glücklicherweise konnten sie den Beschleunigerkonstrukteuren in den USA und Genf ausgiebig über die

Triumph der Speicherringe

Ende der 1960er Jahre traf man bei DESY erneut eine wagemutige Entscheidung. Als Nachfolger des ersten Synchrotrons sollte nicht etwa ein größerer Beschleuniger vom gleichen Typ gebaut werden; stattdessen setzten die DESY-Verantwortlichen auf eine zwar vielversprechende, aber noch sehr junge, unausgereifte Technologie. Die nächste Maschine sollte ein Speicherring werden: eine Beschleunigeranlage, in der die Teilchenstrahlen über Stunden hinweg umlaufen und an bestimmten Stellen im Flug frontal zusammenstoßen. Der Clou an dem neuen Konzept: Damit lassen sich deutlich höhere Kollisionsenergien erreichen als mit einem Strahl, der auf ein ruhendes Ziel (Target) geschossen wird. Auch diese riskante Aufgabe meisterte die DESY-Beschleunigermannschaft mit Bravour. Nach vielen Jahren als Kollisionsmaschine ist der DORIS-Speicherring in seiner mittlerweile dritten Ausbaustufe als leistungsfähige Lichtquelle heute noch in Betrieb.

Nach der ersten, überaus positiven Erfahrung mit dem neuen Beschleunigertyp war klar, dass die nächste Anlage bei DESY wieder ein Speicherring werden sollte – und zwar der weltweit



Schulter schauen, ihre Unerfahrenheit machten sie durch enormen Enthusiasmus wieder wett. So gelang es der jungen DESY-Mannschaft schließlich, eines der leistungsfähigsten Elektronen-Synchrotrons der 1960er Jahre zu realisieren. Dieser Erfolg war maßgeblich dem Führungsstil des ersten DESY-Direktors, Willibald Jentschke, zu verdanken. Er sorgte bei DESY schon in den Anfangszeiten für eine Atmosphäre der Toleranz und des Zusammenhaltens – einen Geist, der DESY zahlreiche weitere Erfolge bescherte und das Forschungszentrum auch heute noch prägt.

größte seiner Art. Mit seinen 2,3 Kilometern Umfang erreichte PETRA eine Kollisionsenergie von 38 GeV, später sogar 47 GeV – etwa das Vier- bis Fünffache der vorangegangenen Beschleunigergeneration. Bei der Konstruktion brach die DESY-Beschleunigermannschaft alle Rekorde: Keine drei Jahre nach der Bewilligung von PETRA kreisten 1978 die ersten Elektronen im Ring. Damit hatten die PETRA-Konstrukteure den Terminplan um mehr als ein Jahr unterschritten und 20 Millionen DM weniger ausgegeben als geplant! Der weltweite Vorsprung zahlte sich aus: Bereits ein Jahr später spür-

ten die PETRA-Physiker das Gluon auf – das „Klebeteilchen“ zwischen den Quarks. Diese Entdeckung etablierte DESY endgültig in der weltweiten Spitzenforschung.

Mit dem Bau des größten Beschleunigers bei DESY, der 6,3 Kilometer langen HERA-Speicherringanlage, wagten sich die Hamburger in den 1980er Jahren nochmals in absolutes Neuland. Nicht nur, dass HERA die erste und einzige Anlage auf der Welt sein sollte, die unterschiedliche Teilchensorten – Elektronen und Protonen – aufeinander feuerte. Auch die überaus anspruchsvolle Technologie für die supraleitenden Magnete, welche die Protonen auf ihrer Kreisbahn halten, musste erst speziell entwickelt werden. Und noch nirgendwo auf der Welt hatte jemand gewagt, einen so großen Beschleuniger unter den Wohngebieten einer Stadt zu bauen. Damit war HERA die größte und schwierigste Aufgabe, die DESY je angegangen war. Doch das Konzept ging auf: Fünfzehn Jahre lang lief HERA äußerst zuverlässig und lieferte als „Super-Elektronenmikroskop“ eine Fülle von Daten zum Innenleben des Protons und den darin wirkenden Kräften.

war bei DESY angestellt. Die meisten kamen von Instituten und Universitäten aus Deutschland, aber auch aus China, England, Frankreich, Israel, Japan, den Niederlanden, Norwegen und den USA. Neu war, dass jedes Team für Bau, Betrieb und Finanzierung seines Detektors komplett selbst verantwortlich war, dafür aber weitgehend autonom agieren konnte. Dieses Konzept setzte sich fortan bei vielen anderen Projekten in der Teilchenphysik durch.

In den 1980er Jahren wurde der Bau von HERA bei DESY zu einem Paradebeispiel für erfolgreiche internationale Zusammenarbeit. Insgesamt elf Länder trugen dazu bei – ein Novum in der Geschichte der Teilchenforschung. Bis dahin wurden zwar die Detektoren in internationaler Zusammenarbeit gebaut, der Beschleuniger war jedoch Aufgabe des Gastgeberinstituts. Das internationale Interesse an HERA dagegen war so groß, dass zahlreiche renommierte Institute aus dem Ausland, unter anderem aus Frankreich, Großbritannien, Israel, Italien, Kanada, den Niederlanden und den USA, Personal entsandten und wichtige Teile des Beschleunigers bauten. Allein Italien lieferte rund die Hälfte der 400 supra-



Internationale Verbindungen

Mit dem Bau und Betrieb des PETRA-Speicherrings Mitte der 1970er Jahre begann zugleich eine wichtige Entwicklung, die die Arbeit von DESY und der anderen Beschleunigerinstitute weltweit heute mehr denn je bestimmt: die zunehmende Internationalisierung der Teilchenphysikprojekte. Die Teilchenkollisionen an PETRA wurden damals von einigen hundert Physikern mit Hilfe von fünf großen, um den Ring verteilten Detektoren beobachtet. Nur ein kleiner Teil dieser Forscher

leitenden Ablenkmagnete. So wurde der HERA-Beschleuniger zu über 20 Prozent aus dem Ausland finanziert, die vier HERA-Experimente, die wie üblich von großen internationalen Teams von Physikern aus aller Welt betrieben wurden, zu etwa 60 Prozent. Dieses „HERA-Modell“ der internationalen Zusammenarbeit funktionierte so gut, dass es zum Vorbild für die Durchführung großer, internationaler Forschungsprojekte wurde.

Beschleunigerbau heute – ein globales Unterfangen

Auch nach der Abschaltung von HERA kommen DESY die über Jahrzehnte aufgebauten nationalen wie internationalen Verbindungen zugute. Denn die Großprojekte der Teilchenphysik sind mittlerweile so komplex und aufwendig, dass sie nur noch in einer breit angelegten Zusammenarbeit von zahlreichen weltweit verteilten Instituten, Universitäten und Forschungszentren realisiert und betrieben werden können. Dadurch entstehen neue Formen der Zusammenarbeit auf nationaler und internationaler Ebene.

So haben sich unter der Federführung von DESY alle deutschen Universitäten und Institute, die an Experimenten am Protonenbeschleuniger LHC in Genf und am geplanten Linearbeschleuniger ILC mitarbeiten, zur Helmholtz-Allianz „Physik an der Teraskala“ zusammengeschlossen. Gemeinsam wollen die Partner der Allianz das in Deutschland vorhandene Expertenwissen in der Teilchenphysik bündeln und langfristig stärken. Auch im Bereich der Beschleunigerentwicklung trägt DESY durch das umfangreiche Know-how der DESY-Belegschaft und wichtige Infrastrukturen maßgeblich zu den Aktivitäten der Allianz bei.

Auf dem internationalen Parkett ist DESY mehr denn je ein gefragter Partner in Sachen Beschleunigerbau. Anfang der

1990er Jahre formierte sich unter der Federführung des Forschungszentrums die internationale TESLA Collaboration (heute: TESLA Technology Collaboration), um ein Konzept für das nächste große Zukunftsprojekt der Teilchenphysik, einen Elektron-Positron-Linearbeschleuniger, auszuarbeiten. Mit Erfolg: Die von der TESLA Collaboration entwickelte supraleitende Beschleunigertechnologie wurde 2004 als Basis für den geplanten Linearbeschleuniger ILC ausgewählt. Damit ist DESY einer der maßgeblichen Akteure bei den Entwicklungsarbeiten für den ILC, an denen insgesamt über 2000 Wissenschaftler von mehr als 300 Universitäten und Instituten aus über 25 Ländern beteiligt sind.

Darüber hinaus kommt die supraleitende TESLA-Beschleunigertechnologie bei zwei Lichtquellen der neuesten Generation zum Einsatz, die ebenfalls in breiter internationaler Zusammenarbeit realisiert bzw. genutzt werden: dem Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY sowie dem im Bau befindlichen Röntgenlaser European XFEL, an dem neben der durch DESY vertretenen Bundesrepublik Deutschland derzeit 12 weitere Länder mitwirken. Beim European XFEL koordiniert DESY insbesondere das aus 17 Instituten bestehende internationale Konsortium, welches das Herzstück der Röntgenlaseranlage, den knapp zwei Kilometer langen Beschleunigerkomplex, baut.

Beschleunigermodule im Tunnel des Freie-Elektronen-Lasers FLASH



ZUSAMMENSPIEL

Herausforderung Hochenergiebeschleuniger

Hochenergiebeschleuniger sind komplexe Hightechanlagen von teils gigantischen Ausmaßen, deren Technologie an der Grenze des Machbaren meist erst eigens entwickelt werden muss. Solche ausgeklügelten Maschinen zu entwerfen, zu bauen und über Jahre hinweg erfolgreich zu betreiben, erfordert die reibungslose Zusammenarbeit hunderter Fachkräfte aus den unterschiedlichsten Spezialgebieten. Knapp 600 Menschen meistern diese Aufgabe bei DESY – in enger Zusammenarbeit mit Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industriefirmen in Deutschland und weltweit.

Eine Herausforderung ersten Ranges

Bedenkt man, wie häufig allein im Büro die Kaffeemaschine ausfällt oder der Rasenmäher zuhause den Dienst verweigert, so grenzt der Bau und jahrelange reibungslose Betrieb eines Hochenergiebeschleunigers an ein technisches Wunder. DESYs größter Beschleuniger zum Beispiel, die Speicherringanlage HERA, bestand aus zwei je 6,3 Kilometer langen Beschleunigerringen, die auf Bruchteile von Millimetern genau übereinander in einem Tunnel aufgestellt waren. Insgesamt waren das über 800 Ablenkmagnete, 1340 Fokussierungsmagnete, 1200 Netzgeräte und 1500 Vakuumpumpen, die alle über kilometerlange Kabel angesteuert wurden.

Doch damit nicht genug: Zum eigentlichen Hochenergiebeschleuniger kommt außerdem ein komplexes Geflecht von kleineren Vorbeschleunigern – bei HERA waren es insgesamt sechs Stück. Der größte von ihnen, PETRA II, brachte es dabei alleine schon auf einen Umfang von 2,3 Kilometern und entsprechend viele Einzelkomponenten. Und nicht nur, dass die einzelnen Maschinen an sich überaus komplex sind – auch ihr Zusammenspiel muss auf Bruchteile von Sekunden und Millimetern genau zuverlässig funktionieren. Nur so ist garantiert, dass die haarfeinen Teilchenstrahlen ordnungsgemäß im Zentrum der Teilchenphysikdetektoren zusammenprallen, und dass die über 2000 Gastwissenschaftler aus aller Welt, die jährlich die DESY-Lichtquellen nutzen, die optimale Strahlung für ihre Experimente vorfinden.

Beschleunigerexperten bei DESY

Die Bereitstellung von großen Beschleunigeranlagen als Serviceleistung für Teilchenphysiker und Synchrotronstrahlungsnutzer aus Deutschland und der Welt wurde bereits 1959 bei der Gründung von DESY in der Satzung des Forschungszentrums festgeschrieben. Was damals im kleinen Maßstab begann, hat mittlerweile beträchtliche Ausmaße angenommen: Heute arbeiten bei DESY etwa 600 Menschen in insgesamt 18 Fachgruppen an der Entwicklung, dem Bau und dem Betrieb von Beschleunigern. Damit ist der Beschleu-

nigerbereich der personell größte Bereich bei DESY – denn eine solche Herausforderung lässt sich nur mit den vereinten Kräften zahlreicher Experten aus den unterschiedlichsten Berufsgruppen meistern.



Was alles dazugehört

Insgesamt 18 Fachgruppen sind bei DESY für den Bau und Betrieb der Teilchenbeschleuniger zuständig.

Diagnose und Instrumentierung -MDI-

- > Messung der Strahleigenschaften in nahezu allen Beschleunigern bei DESY

Strahlenschutz -D3-

- > Umsetzung der gesetzlichen Vorschriften, der Strahlenschutzverordnung, der Röntgenverordnung sowie der behördlichen Genehmigungen und Auflagen

Aufbau von Beschleunigern und Experimenten -MEA-

- > technische Projektierung neuer Beschleuniger und Experimente
- > Unterhaltung der vorhandenen Anlagen



HERA



FLASH

Beschleunigerbetrieb -MBB-

- > Betrieb aller Beschleuniger bei DESY im Schichtdienst rund um die Uhr, 7 Tage pro Woche
- > Im Fehlerfall schnelle Diagnose und Reparatur

Hochfrequenztechnik -MHF-

- > Betrieb und Entwicklung aller Hochfrequenzanlagen bei DESY
- > Entwicklung und Bau des Hochfrequenzsystems für den European XFEL, mit Beteiligung technischer Gruppen in Zeuthen

Injektion / Ejektion -MIN-

- > Betrieb und Weiterentwicklung von LINAC II und PIA
- > Strahltransportwege zu DESY II
- > alle Injektions- und Ejektionselemente
- > Koordination des Betriebs von FLASH

Kontrollsysteme -MCS-

- > Betrieb und Weiterentwicklung der Kontrollsysteme für alle Beschleuniger bei DESY in Hamburg
- > Konzeption und Realisation der Kontrollsysteme für den European XFEL

Personen-Sicherheitssysteme -MPS-

- > Sicherheitssysteme zum Schutz von Personen vor ionisierender Strahlung
- > Sicherheitssysteme für den Magnetstrombetrieb



PETRA

Kryogenik und Supraleitung -MKS-

- > Entwicklung von Kryogenik- und Supraleitungstechnologie, insbesondere für FLASH und den European XFEL
- > Helium-Kälteversorgung für FLASH und zahlreiche Testanlagen bei DESY, in Zukunft auch für den European XFEL

Vakuum -MVS-

- > Vakuumsysteme aller Beschleuniger bei DESY in Hamburg
- > Beschleunigervakuumsysteme für den European XFEL

Strahlkontrollen -MSK-

- > Kontroll- und Instrumentierungsaufgaben im Zusammenhang mit der Strahldynamik in allen Beschleunigern bei DESY

Beschleunigerphysik -MPY-

- > Entwicklung, Betrieb und Verbesserung aller Beschleuniger bei DESY
- > Studien zur Strahl- und FEL-Physik

Beschleunigerkoordination -MDE-, -MDO-, -MPE-

- > Koordination des Betriebs von DESY II, DORIS III und PETRA III

Maschinenplanung -MPL-

- > Berechnungen, Konstruktionen und Fertigungsunterlagen für verschiedene Beschleuniger bei DESY
- > Materialuntersuchungen und Betreuung der Fertigung supraleitender Resonatoren

-PITZ-

- > Betrieb und Weiterentwicklung des Photoinjektor-Teststands in Zeuthen

Energieversorgung -MKK-

- > Energieversorgung aller Beschleuniger und Gebäude bei DESY
- > Magnet- und Senderstromversorgung
- > Wasserkühlung, Kaltwasser- und Druckluft-erzeugung
- > Beheizung und Belüftung

TRANSFERLEISTUNG

Technologietransfer in die Industrie

Der Bau leistungsfähiger Beschleunigeranlagen für die Spitzenforschung ist eine enorme technologische Herausforderung. Oft sind die benötigten Geräte und Techniken so anspruchsvoll, dass die Beschleunigerexperten sie erst selber entwickeln und konstruieren müssen. Diese Pionierarbeit leisten die Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker von DESY in enger Kooperation mit externen Spezialisten und Industrieunternehmen. Nicht selten führt sie zu wahren Paradigmenwechseln – zum Beispiel in der Elektronik, der Hochfrequenz-, Vakuum- und Kältetechnik sowie dem Betrieb von komplexen supraleitenden Systemen – mit weitreichenden Anwendungsmöglichkeiten auch in anderen Bereichen, wie der Medizin oder Materialforschung.

Die Herausforderung, in Zusammenarbeit mit DESY den Stand der Technik immer weiter zu verschieben, regt auch die mitwirkenden Industriefirmen zu innovativen Entwicklungsleistungen und dem Erlernen neuer Techniken an, die sie anschließend in andere Bereiche übertragen. So führen die von DESY für die Grundlagenforschung angestoßenen Entwicklungen zu zahlreichen praktisch nutzbaren Innovationen, die der Industrie neue Geschäftsfelder erschließen. Und nicht zuletzt geben auch die bei DESY ausgebildeten Physiker, Techniker und Informatiker, die in die freie Wirtschaft wechseln, dort mit ihrem Wissen entscheidende neue Impulse.

Innovationen aus der Grundlagenforschung

Eine der wichtigsten, in den letzten Jahren von DESY zusammen mit internationalen Partnern aus Forschung und Industrie vorangetriebenen Entwicklungen ist die supraleitende TESLA-Beschleunigertechnologie, auf der die Freie-Elektronen-Laser FLASH und European XFEL sowie der Linearbeschleuniger ILC basieren. Im Rahmen einer Studie zur wirtschaftlichen Bedeutung des European XFEL befragte das Institut für Allokation und Wettbewerb der Universität Hamburg 57 Unternehmen, die an der Ausrüstung der TESLA-Testanlage bei DESY beteiligt waren – jener Anlage, an der die zukunftsweisende TESLA-Technologie entwickelt und erprobt wurde. Wie sich herausstellte, lohnten sich die Entwicklungsarbeiten für die Unternehmen gleich in mehrerer Hinsicht:

- Insgesamt entwickelten 67 % von ihnen im Rahmen der Zusammenarbeit mit DESY neue Produkte, Verfahren oder Dienstleistungen.
- 38 % der Firmen erzielten dadurch „bedeutende“ oder „sehr bedeutende“ Innovationen, weitere 29 % erzielten „mittlere“ Innovationen.
- 79 % von ihnen gelang es, für diese Produkte auch andere Kunden zu finden, oder sie erwarten dies in Zukunft.
- 60 % stellten Einflüsse auf ihr übriges Produktsortiment

fest, insbesondere im Hinblick auf die Verbesserung der Produktqualität und die Kostensenkung für Entwicklung, Herstellung oder Wartung.

- 82 % gaben an, dass DESY ein wichtiger Referenzkunde für sie ist. Bei der Zusammenarbeit mit DESY spielte im Schnitt die Schaffung von Innovationen die größte Rolle – noch vor dem Erzielen von Umsatz.

Weiterentwicklungen ergaben sich insbesondere in der Hochfrequenztechnik, in Bereichen wie Elektronik, Energietechnik und Puls-Power-Technik. Ein weiteres Beispiel ist die Kältetechnik: Die supraleitenden Teilchenbeschleuniger für die Freie-Elektronen-Laser arbeiten bei minus 271 Grad Celsius. Die dazu entwickelten Verbundwerkstoffe sind sehr strahlungsresistent und auch in anderen Bereichen einsetzbar. Der Bau der Beschleunigungselemente führte zu Innovationen in mechanischen Fertigungsprozessen, chemischer Verfahrenstechnik, Metallurgie, Maschinenbau sowie Mess- und Regeltechnik. Die neuen Erkenntnisse finden unter anderem Anwendung in der Medizintechnik, Analytik, Radar- und Satellitentechnik, Nachrichtentechnik und im chemischen Anlagenbau.

Einmalige Chance für die Industrie

Mittlerweile ist der Bau des European XFEL in vollem Gange. Damit läuft auch die Serienproduktion der Beschleunigerkomponenten an: Beim europäischen Röntgenlaser wird die TESLA-Technologie zum ersten Mal im großen Maßstab zum Einsatz kommen. Rund 800 supraleitende Resonatoren gilt es unter höchsten Reinheitsbedingungen industriell zu fertigen und mit zahlreichen weiteren, von Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen aus aller Welt hergestellten Komponenten zu 100 Beschleunigermodulen zusammenzufügen, die den Teilchenstrahl des European XFEL auf Trab bringen.

Seit Jahren arbeitet man deshalb bei DESY daran, das Expertenwissen zur supraleitenden Technologie weiterzugeben und auszuloten, wie sich der Fertigungsprozess für die Serienproduktion vereinfachen und verbessern lässt. Hier zahlt sich aus, dass die Industrie frühzeitig in die Entwicklungsarbeiten einbezogen wurde. Unterstützende Initiativen wie das 2005 von DESY initiierte Europäische Industrieforum für supraleitende Beschleunigertechnologie EIFast tragen ebenfalls dazu bei, die ausgezeichnete Position der europäischen Wissenschaftseinrichtungen und Industrieunternehmen auf diesem Gebiet zu sichern und auszubauen. Damit hat die europäische Industrie die einmalige Chance, exklusive Fachkompetenz im Bereich der supraleitenden Technologie zu gewinnen, die sie für weitere Großaufträge – wie den 35 Kilometer langen ILC mit knapp 2000 Beschleunigermodulen – hervorragend qualifiziert.

VERBINDUNG

Enge Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg

Besonders enge Verbindungen unterhält DESY seit seiner Gründung zur Universität Hamburg – auch im Bereich der Beschleunigerphysik. Dadurch ergeben sich für beide Seiten zahlreiche Vorteile. Den Studierenden bietet diese Zusammenarbeit Möglichkeiten, die weltweit ihresgleichen suchen. Schon vor dem Abschluss ihres Exams können sie am Bau und Betrieb von Großbeschleunigern der Spitzenklasse mitarbeiten. Dabei werden sie nicht nur von den zuständigen Professoren der Universität Hamburg betreut, sondern können sich Rat und Hilfe von den Beschleunigerexperten bei DESY holen. Nicht selten wird ihnen dabei bereits die Verantwortung für wichtige Teilbereiche übertragen. Diese sind so ausgewählt, dass die Studierenden nicht nur von der praxisorientierten Ausbildung profitieren, sie erwerben zudem Kompetenz in den heute so wichtigen Soft skills: Sie lernen, in einem internationalen Umfeld selbstständig, verantwortlich und ergebnisorientiert zu arbeiten.

Dank der breit gefächerten Ausbildung, des detaillierten Einblicks in die Arbeitsmethoden der technischen Gruppen bei DESY und der vielfältigen internationalen Kontakte haben die Absolventen anschließend hervorragende Berufsaussichten – und zwar nicht nur bei großen Beschleunigerzentren in aller Welt, sondern auch in Industriebetrieben. Dies belegt auch die beachtliche Zahl nationaler und internationaler Preise, mit denen die Absolventen der Universität in diesem Bereich in den vergangenen Jahren ausgezeichnet wurden.

Auch DESY profitiert von der engen Verzahnung mit der Universität Hamburg: Die Studierenden sind hochmotiviert, tragen unzählige neue Ideen bei und sorgen für ständig „frischen Wind“ im Forschungszentrum. Nicht zuletzt trägt DESY dadurch mehr als viele andere große Institute dazu bei, regelmäßig hochqualifiziertes Personal auszubilden, das auf dem heiß umkämpften internationalen Arbeitsmarkt schwer zu gewinnen ist.

Die im Rahmen der Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg behandelten Themen orientieren sich vor allem an neuen Fragestellungen und Methoden, die über die Alltagsarbeit bei DESY hinausgehen, aber trotzdem eng mit den bei DESY betriebenen oder geplanten Beschleunigern zusammenhängen. Während in früheren Jahren die Entwicklung supraleitender Beschleunigerelemente mit höchstmöglicher Feldstärke im Vordergrund stand (siehe Seite 48), geht es heute vor allem um die extremen Anforderungen der Freielektronen-Laser, jener neuartigen Lichtquellen, in denen ein auf hohe Energien beschleunigter Elektronenstrahl intensive, ultrakurze Laserlichtblitze erzeugt. ●

VOR RUNDE.

DESY-Synchrotron und Co. Ein Anlassersystem von Vorbeschleunigern

Hier pulsiert das Herz von DESY: Vom zentralen Beschleunigerkontrollraum aus werden alle Beschleuniger des Forschungszentrums gesteuert. Denn die Teilchen werden nicht etwa in einer einzigen Anlage von Null auf knapp Lichtgeschwindigkeit gebracht. Die Beschleunigung erfolgt Schritt für Schritt in einem komplexen Geflecht von Vorbeschleunigern, in dem nahezu alle Anlagen vertreten sind, die im Laufe der über 50-jährigen DESY-Geschichte gebaut wurden.

Acht Beschleuniger für HERA

Ähnlich wie man mit einem Auto im ersten Gang anfährt und hochschaltet, bis man schließlich im sechsten Gang auf der Autobahn die Pferdestärken voll ausfahren kann, werden auch die Teilchen zunächst in kleineren Anlagen stufenweise vorbeschleunigt, bevor sie in den großen Hochenergiebeschleunigern auf die angestrebte Endenergie gebracht werden. Kommen unterschiedliche Teilchensorten zum Einsatz, wie es beim größten DESY-Beschleuniger, der Elektron-Proton-Speicherringanlage HERA, der Fall war, müssen die Teilchenstrahlen zudem in verschiedenen Anlagen auf Touren gebracht werden. Dabei kommt einiges zusammen: So waren während des Betriebs von HERA insgesamt acht verschiedene Beschleuniger im Einsatz, um die Elektronen und Protonen auf die für die HERA-Experimente erforderlichen hohen Energien zu bringen (siehe Seite 14).

Die beiden Teilchenstrahlen von HERA wurden zunächst in sechs Vorbeschleunigern – sowohl Linear- als auch Ringbeschleunigern – getrennt voneinander vorbereitet und stufenweise auf Energien von 12 Milliarden Elektronenvolt (Gigaelektronenvolt, GeV) für die Elektronen und 40 GeV für die Protonen gebracht. Anschließend wurden die Teilchenstrahlen in die beiden Beschleunigerringe von HERA eingefädelt, in denen sie schließlich ihre Endenergie von 27,5 GeV für die Elektronen beziehungsweise 920 GeV für die Protonen erreichten. In den HERA-Ringen wurden die Teilchen dann über Stunden hinweg gespeichert und in den Experimentierbereichen, in denen die beiden Strahlrohre zusammengeführt wurden, zur Kollision gebracht.

Methusalem mit bewegter Geschichte

Das älteste Glied in der Vorbeschleunigerkette der DESY-Anlagen ist das Synchrotron „DESY“ (Deutsches Elektronen-Synchrotron), der erste Teilchenbeschleuniger in Hamburg und Namensgeber des Forschungszentrums. Der Bau des Synchrotrons begann 1960, kurz nach der Gründung des Zentrums. Die Herausforderungen waren enorm: So mussten zum Beispiel die Magnete, die die Elektronen auf ihrer Kreisbahn halten, mit einer Genauigkeit von einigen zehntel Millimetern aufgestellt werden. Obwohl die junge DESY-Mannschaft kaum Erfahrung im Beschleunigerbau besaß, gelang es ihr, eines der damals leistungsfähigsten Elektronen-Synchrotrons zu konstruieren. Am 25. Februar 1964 beschleunigte die Anlage ihre ersten Elektronen; bis Ende 1978 war sie für die Forschung im Einsatz.

Der etwa 300 Meter lange DESY-Ringbeschleuniger war 1964 die weltweit größte Anlage ihrer Art. Gemeinsam mit einer Maschine in Boston bot sie die mit Abstand höchste Elektronenenergie der Welt: 6 GeV. Indem die Physiker die Elektronen aus dem Synchrotron auf eine ruhende „Zielscheibe“ lenkten, waren sie unter anderem in der Lage, Protonen mit unerreichter Genauigkeit zu erforschen. So konnten sie zeigen, dass im Proton kein harter, fest umrissener Kern auszumachen ist, und dass, sollte das Proton aus kleineren Bausteinen bestehen, diese extrem klein sein müssen – diese Frage war in den frühen 1960er Jahren noch völlig offen. Die Ergebnisse der Experimente am ersten Synchrotron etablierten DESY als ernstzunehmenden Akteur in der Riege der internationalen Teilchenphysik-Forschungszentren.



Das DESY-Synchrotron aus der Luft

Im Jahr 1967 begannen am DESY-Beschleuniger auch erste Experimente mit der Synchrotronstrahlung, die die Elektronen auf ihrer Kreisbahn aussenden. Wie sich damals zeigte, ließen sich mit dem intensiven Licht aus dem Ring die unterschiedlichsten Materialien viel genauer durchleuchten und analysieren als mit herkömmlichen Röntgenröhren. Diese ersten Experimente mit Synchrotronstrahlung legten die Grundlage für das zukunftssträchtige zweite Standbein von DESY: den Einsatz von Beschleunigern als intensive Lichtquellen für die Forschung mit Photonen.

Vorbeschleuniger bei DESY

Nach Beendigung der Experimente am DESY-Synchrotron 1978 wurde die Anlage nicht etwa abgeschaltet. Mehrfach umgebaut und erneuert diente sie als Vorbeschleuniger für die anderen Ringe in Hamburg, seit 1973 schon für DORIS, ab 1978 hauptsächlich für PETRA. Nach einem grundlegenden Umbau zum Protonenbeschleuniger DESY III ging sie dann 1987 als Vorbeschleuniger für HERA wieder an den Start, zusammen mit dem neu gebauten Elektronen-Synchrotron DESY II. Erst mit der Abschaltung von HERA im Sommer 2007 wurde DESY III endgültig stillgelegt – nach 43 Betriebsjahren. DESY II fungiert weiterhin als Elektronenvorbeschleuniger für DORIS III und PETRA III und liefert Teststrahlen, um neue Komponenten für Teilchendetektoren zu erproben.

Der mit 2,3 Kilometern Umfang größte Vorbeschleuniger von HERA, PETRA II, wurde von 2007 bis 2009 aufwendig umgebaut. Als eine der weltweit brilliantesten Röntgenstrahlungsquellen vervollständigt PETRA III nun das Spektrum der Licht-

quellen bei DESY. Weiterhin als Vorbeschleuniger im Einsatz sind der 70 Meter lange Linearbeschleuniger LINAC II für Elektronen und Positronen sowie der 29 Meter lange, ringförmige Akkumulator für Elektronen und Positronen PIA (siehe Seite 14). Der 32 Meter lange Linearbeschleuniger LINAC III, der ab 1988 als Vorbeschleuniger für Protonen für HERA diente, wurde im Sommer 2007 ebenfalls abgeschaltet; die Protonenquelle wird weiterhin zu Testzwecken verwendet. ●

DESY I/III

- Ringbeschleuniger für Elektronen und Positronen, ab 1987 für Protonen
- Länge: 317 m
- Inbetriebnahme: 1964, Stilllegung: 2007
- 1964-1978: Teilchenphysik und Forschung mit Synchrotronstrahlung
- ab 1973: Vorbeschleuniger für DORIS, PETRA und HERA (ab 1987)

DESY II

- Ringbeschleuniger für Elektronen und Positronen
 - Länge: 293 m
 - Inbetriebnahme: 1987
 - Vorbeschleuniger für DORIS, PETRA und HERA, seit 2009 für PETRA III
-

ERFOLGS STORY.

DORIS III

Vom Elektron-Positron-Speicherring zur Lichtquelle

DORIS war einer der ersten großen Speicherringe weltweit. Zunächst parallel für die Teilchenphysik und die Forschung mit Synchrotronstrahlung genutzt, wurde die Anlage 1990 zur damals hellsten Röntgenlampe Europas umgebaut. Heute dient der Speicherring als zuverlässiges „Arbeitspferd“ unter den Lichtquellen bei DESY. In über 35 Betriebsjahren hat DORIS sowohl in der Teilchenphysik als auch der Forschung mit Photonen bahnbrechende Erkenntnisse ermöglicht.

Neuer Beschleunigertyp mit Zukunft

Während die Teilchen in einem Synchrotron nur kurz beschleunigt und auf ein ruhendes Ziel (Target) gelenkt werden, kreisen in einem Speicherring zwei gegenläufige Teilchenstrahlen über Stunden mit Maximalenergie. An bestimmten Stellen des Rings prallen sie im Flug mit voller Wucht aufeinander. Dabei können deutlich höhere Kollisionsenergien erreicht werden als mit einem Einzelstrahl und einem Target. Aus dieser hohen Energie können dann gemäß Einsteins Formel $E = mc^2$ neue Teilchen mit entsprechend großer Masse entstehen.

In den 1960er Jahren war die Speicherringtechnik noch brandneu und wenig erprobt. Erst 1962 war in Italien der erste Elektron-Positron-Speicherring gebaut worden, mit nur wenigen Metern Umfang. Einen großen Speicherring mit Hunderten Metern Umfang gab es noch nicht. Ob wirklich etwas wissenschaftlich Interessantes bei so einer Maschine herauskommen würde, war höchst ungewiss. Die DESY-Verantwortlichen jedoch setzten darauf – zu Recht, wie sich bald herausstellte.

Schwere Quarks bei DORIS

Der Bau des knapp 300 Meter langen Speicherrings DORIS (Doppel-Ring-Speicher) begann 1969; fünf Jahre später ging die Anlage in Betrieb. Ihren Namen verdankte sie den ursprünglich zwei übereinander liegenden Beschleunigerrohren, in denen Elektronen bzw. Positronen, die Antiteilchen der Elektronen, getrennt beschleunigt wurden. Kurz bevor die Messungen an DORIS begannen, gelang Forschern in den

Blick in den DORIS-Beschleunigertunnel



USA eine spektakuläre Entdeckung: Sie fanden ein neues Quark, das charm-Quark. Zu dem daraufhin einsetzenden Teilchengoldrausch trugen auch die Forscher an DORIS entscheidend bei. Die Experimente in den USA und Hamburg lieferten den endgültigen Beweis dafür, dass Protonen, Neutronen und ähnliche Teilchen aus noch kleineren Bausteinen, den Quarks, zusammengesetzt sind.

Nachdem US-Forscher 1977 das fünfte Quark, das bottom-Quark, entdeckten, wurde DORIS umgebaut, um die Eigenschaften dieses neuen Quarks zu erforschen. So gelang den DORIS-Physikern 1987 eine weitere aufsehenerregende Beobachtung: B-Mesonen – das sind Teilchen, die ein bottom-Quark enthalten – können sich mit überraschend hoher Umwandlungsrate in ihre Antiteilchen verwandeln. Da dabei das damals noch nicht entdeckte sechste Quark, das top-Quark, eine wichtige Rolle spielt, ließ sich aus den Ergebnissen ableiten, dass es viel schwerer sein musste als erwartet. In der Tat wurde das top-Quark erst 1995 am damals leistungsstärksten Beschleuniger Tevatron in den USA entdeckt.

Die hellste Röntgenquelle Europas

Auch die Nutzer der Synchrotronstrahlung profitierten von Anfang an von dem neuen Speicherring, denn DORIS erzeugte einen viel stabileren Lichtstrahl als das DESY-Synchrotron. Schon bald wurde das ursprüngliche Labor zu klein. Daraufhin baute DESY 1980 das Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB mit einer großen Experimentierhalle an DORIS, um die Synchrotronstrahlung im großen Stil Forschern aus aller Welt zur Verfügung zu stellen. 1990 und 1991 wurde DORIS dann zur damals hellsten Röntgenquelle Europas ausgebaut. Die Anlage erhielt eine „Ausbeulung“, in die sieben Wiggler und

Undulatoren eingesetzt wurden: spezielle Magnetstrukturen, in denen die Positronen nochmals weitaus intensivere Strahlung aussenden. Die umgebaute Anlage DORIS III dient seit 1993 ausschließlich als Quelle für Synchrotronstrahlung.

Seit über 35 Jahren wird an DORIS mit Synchrotronstrahlung geforscht. Die Bilanz dieser Zeit kann sich sehen lassen. Immer wieder gelang es den Wissenschaftlern und Ingenieuren, neue Methoden und Instrumente zu entwickeln und neue Forschungsfelder zu eröffnen. Was oft als laborinternes Testexperiment begann, entwickelte sich zur erfolgreichen Experimentiermethode, die sich weltweit in Forschung und Industrie als Standardverfahren etablierte. Die Spannweite der Experimente reicht dabei von effektiven Katalysatoren über feinere Analysemethoden zum Nachweis von Schadstoffen bis hin zu innovativen Wirkstoffen für die Medizin oder leichten und doch stabilen neuen Werkstoffen.

Wachablösung

Heute ist DORIS III die letzte Lichtquelle der zweiten Generation in Europa. Ihr ziemlich breiter Lichtstrahl eignet sich hervorragend für die Untersuchung von zentimeter- oder millimetergroßen Proben oder ganzen Werkstücken, wie sie zum Beispiel in der Materialforschung üblich sind. Wollen die Forscher jedoch kleinere Proben untersuchen, so müssen sie auf die Quellen der dritten Generation zurückgreifen: eigens für die Lichterzeugung gebaute Speicherringe, die stark gebündelte Strahlung mit einer um mehrere Größenordnungen höheren Leuchtstärke liefern. Damit lässt sich eine räumliche Auflösung von weniger als einem Mikrometer erreichen.

Mit der neuen Lichtquelle PETRA III steht bei DESY seit 2009 die weltbeste Strahlungsquelle der dritten Generation für harte Röntgenstrahlung zur Verfügung. Damit ist auch das Ende der DORIS-Ära abzusehen. Der Speicherring wird zunächst weiterbetrieben, bis PETRA III zuverlässig im Routinebetrieb läuft. Dann soll die Zahl der Messplätze an DORIS III reduziert werden, um den Fokus auf jene Experimentiermöglichkeiten zu legen, die zu PETRA III komplementär sind. Langfristig ist schließlich geplant, die wichtigsten DORIS-Technologien auch an PETRA III zur Verfügung zu stellen, so dass DORIS III ganz abgeschaltet werden kann. Damit würde die über 35-jährige Erfolgsgeschichte des ersten großen Speicherrings in Hamburg endgültig zu Ende gehen. ●



DORIS III

- > Ringbeschleuniger für Elektronen und Positronen
 - > Länge: 289 m
 - > Inbetriebnahme: 1974
 - > 1974-1992: Teilchenphysik und Forschung mit Synchrotronstrahlung
 - > seit 1993: Quelle für Synchrotronstrahlung
 - > 36 Messplätze mit 45 im Wechsel betriebenen Instrumenten
-

BRILLANT RING.

PETRA III Ein Juwel mit vielen Facetten

Am DESY-Speicherring PETRA, dem weltweit größten und leistungsfähigsten Elektronenbeschleuniger seiner Zeit, wurde 1979 das Gluon entdeckt – das Trägerteilchen der starken Kraft, einer der vier Grundkräfte der Natur. Die Zukunft des Rings steht ganz im Zeichen der Lichterzeugung: Im Jahr 2009 ging der PETRA-Beschleuniger in seiner mittlerweile dritten Ausbaustufe als beste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle der Welt wieder an den Start.

Rekordanlage PETRA

Als der Speicherring PETRA (Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage) 1978 bei DESY in Betrieb ging, war er mit 2,3 Kilometern Umfang die größte Anlage dieser Art auf der Welt. Bereits beim Bau hatten die DESY-Konstrukteure Rekordverdächtiges geleistet: Der neue Speicherring war in weniger als drei Jahren fertig geworden – über ein Jahr früher als geplant – und hatte ganze 20 Millionen DM weniger gekostet als die ursprünglich veranschlagten 100 Millionen DM. Damit hatten die DESY-Physiker weltweit die Nase vorn, denn die Konkurrenzanlage beim Forschungszentrum SLAC in Kalifornien wurde erst zwei Jahre später fertig.

Schon 1979 gelang den Physikern an den PETRA-Experimenten ihre wichtigste Entdeckung: Sie konnten erstmals das Gluon direkt beobachten – das Trägerteilchen der starken Kraft, welche die Grundbausteine aller Materie, die Quarks, aneinander bindet und zu den vier Naturkräften gehört. Damit hatte sich DESY endgültig in der internationalen Spitzenforschung etabliert und zählte fortan zu den weltweit ersten Adressen in der Teilchenphysik. Als das Forschungsprogramm an PETRA 1986 beendet wurde, hatten die PETRA-Experimente maßgeblich dazu beigetragen, die heute gängige Teilchentheorie, das Standardmodell der Teilchenphysik, auf eine gesicherte Grundlage zu stellen.

Messplatz in der PETRA III-Experimentierhalle





Die PETRA III-Experimentierhalle in besonderem Licht.

Auch für eine andere wichtige Entwicklung gab PETRA den Anstoß: die intensive internationale Zusammenarbeit über politische und kulturelle Grenzen hinweg, die heute aus der Arbeit aller Beschleunigerzentren auf der Welt nicht mehr wegzudenken ist. Die PETRA-Experimente wurden von Teams aus jeweils 50 bis 100 Wissenschaftlern aus neun Ländern betrieben, die erstmals für Bau, Betrieb und Finanzierung ihres Detektors komplett selbst verantwortlich waren. Das Konzept war so erfolgreich, dass es sich weltweit durchsetzte – mittlerweile im ganz großen Maßstab: Die „Kollaborationen“, die heute die Detektoren am LHC-Beschleuniger in Genf bauen und betreiben, umfassen bis zu 3000 Menschen aus 38 Ländern.

Zukunft als brillante Lichtquelle

Nach Beendigung der Teilchenphysikexperimente hatte der PETRA-Beschleuniger keineswegs ausgedient. Die Anlage wurde umgebaut und nahm 1988 unter dem Namen PETRA II den Betrieb als Vorbeschleuniger von Elektronen bzw. Positronen und ab 1990 auch von Protonen für den neuen Speicherring HERA auf, den bisher größten Beschleuniger bei DESY. Auch die Nutzer der Synchrotronstrahlung kamen zum Zuge: 1995 wurde PETRA II mit einem Undulator bestückt, um Synchrotronstrahlung mit intensivem Röntgenlichtanteil zu erzeugen. Seitdem standen an PETRA II für die Forschung mit Photonen Testmessplätze für Experimente mit harter Röntgenstrahlung zur Verfügung.

Sein großes Comeback feierte der PETRA-Speicherring schließlich im Jahr 2009: Nach der Abschaltung von HERA verwandelten die DESY-Konstrukteure den ehemaligen Vorbeschleuniger innerhalb von weniger als zwei Jahren in die weltbeste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle, PETRA III.

Dazu wurde die Anlage komplett umgebaut und modernisiert. Auf einem Achtel ihres Umfangs wurde eine 300 Meter lange Experimentierhalle errichtet, in der an 14 Strahlführungen bis zu 30 Experimente stattfinden können. Für den Hallenboden kam eine spezielle Technik zum Einsatz: Er wurde in Form einer einzigen, ein Meter dicken Betonplatte gegossen, die den Beschleuniger und die Experimente trägt – die längste am Stück gefertigte Betonplatte der Welt. Diese Platte ist schwingungstechnisch vom Rest des Gebäudes entkoppelt, so dass die hochpräzisen Messapparaturen nicht durch mechanische Schwingungen gestört werden. Sie trägt nun die neuen Komponenten des Beschleunigers, dessen Magnetanordnung in diesem Achtel speziell für den Einsatz als Synchrotronstrahlungsquelle optimiert ist, sowie die bis zu 20 Meter langen Undulatoren, in denen der Teilchenstrahl die intensive Röntgenstrahlung erzeugt. Auch die restlichen sieben Achtel des PETRA-Speicherrings wurden von Grund auf renoviert, der PETRA-Tunnel dazu fast komplett ausgeräumt und neu bestückt.

Die neue Lichtquelle bei DESY zeichnet sich insbesondere durch mehrere maßgeschneiderte Undulatoren aus, die Röntgenstrahlung mit besonders hoher Brillanz liefern. Das bedeutet vereinfacht: Sehr viele Photonen (Lichtteilchen) 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. Das garantiert den Nutzern aus aller Welt exzellente Forschungsmöglichkeiten: An 30 Messplätzen wird eine Vielzahl von Experimenten möglich sein, die von der Untersuchung neuer Werkstoffe über die Molekularbiologie bis zur Medizin reichen. Von der neuen Lichtquelle profitieren Nutzer aus deutschen und internationalen Forschungseinrichtungen



Die PETRA III-Experimentierhalle (links) aus der Luft

sowie industrielle Forscher und Entwickler, die insbesondere sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzwelliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen.

Ein Speicherring mit herausragenden Eigenschaften

Als weltbeste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle setzt PETRA III unter den Lichtquellen der dritten Generation neue Maßstäbe. Die Qualität einer Synchrotronstrahlungsquelle wird maßgeblich durch die Emittanz des Teilchenstrahls bestimmt, die als das Produkt aus Größe und Auffächerung des Strahls definiert ist. Je kleiner die Emittanz, desto besser ist der Strahl gebündelt und desto brillanteres Synchrotron-

licht lässt sich damit erzeugen. PETRA III besitzt im weltweiten Vergleich der Lichtquellen eine drei- bis viermal kleinere horizontale Emittanz als andere Hochenergiespeicherringe und ist damit die weltweit brillianteste Strahlungsquelle ihrer Art. Die äußerst niedrige Emittanz wurde über den Einbau von 20 Dämpfungswiggeln im Westen und Norden des Rings erreicht. In diesen je vier Meter langen Magnetanordnungen senden die gespeicherten Teilchen Strahlung aus, wodurch ihre Bewegung in der waagerechten Ebene „gedämpft“ und somit der Strahl enger gebündelt wird – was wiederum dazu führt, dass auch die erzeugten Lichtstrahlen enger fokussiert und somit brillanter sind.

PETRA III zeichnet sich zudem durch einen besonderen Betriebsmodus aus, der den wissenschaftlichen Nutzern optimale Experimentierbedingungen bietet: Bei den meisten Speicherringen, die als Lichtquellen fungieren, wird während der so genannten Injektion ein Teilchenstrahl mit einer bestimmten Anzahl von Teilchenpaketen in den Ring eingefädelt. Dieser Strahl kreist dann mehrere Stunden lang im Beschleuniger, erzeugt in den Ablenkmagneten sowie den Wiggeln und Undulatoren Synchrotronstrahlung und verliert dabei nach und nach an Intensität – so lange, bis der Strahlstrom so gering geworden ist, dass keine angemessene Strahlungserzeugung mehr stattfinden kann. Der Teilchenstrahl wird dann aus dem Beschleuniger in einen speziellen Strahlauffänger gelenkt und vernichtet; anschließend wird der Ring mit einem neuen Teilchenstrahl gefüllt und die Prozedur beginnt von neuem.

Blick entlang des Strahlrohrs zwischen der Magnetstruktur eines Undulators im Speicherring PETRA III



Im Gegensatz dazu wird PETRA III im so genannten Top-up-Modus betrieben, d.h. der Teilchenstrom im Speicherring wird durch häufige Injektion von neuen Teilchen, die auf die bestehenden Teilchenpakete „aufgesattelt“ werden, im Bereich von nur einem Prozent konstant gehalten. Diese Betriebsart ist für die wissenschaftlichen Nutzer der Anlage von großem Vorteil, da sie ihre Messungen unter stets gleichbleibenden Bedingungen durchführen können und nicht ständig wechselnde Strahlungsintensitäten berücksichtigen müssen. Da solche Top-up-Injektionen bei einer Füllung des Speicherrings mit 40 Teilchenpaketen in sehr kurzen Zeitabständen von bis zu gerade einmal 70 Sekunden erfolgen, müssen auch die Injektor- und Vorbeschleunigersysteme höchst zuverlässig funktionieren. Für die Umrüstung des PETRA-Beschleunigers mussten deshalb auch diese Systeme grundlegend überholt werden, um die erforderliche hohe Zuverlässigkeit garantieren zu können.

Ring frei für PETRA III

Der Umbau des PETRA-Beschleunigers zur modernsten Synchrotronquelle der dritten Generation kam einem kompletten Neubau sehr nahe. Umso erfreulicher war es, dass die Arbeiten im vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmen beendet werden konnten und die Inbetriebnahme der hochkomplexen Maschine nahezu reibungslos gelang. Bereits im Dezember 2008 begann die PETRA-Crew damit, alle Systeme im Tunnel auf Herz und Nieren zu überprüfen. Sektorenweise wurden die etwa 700 Magnete, die den Teilchenstrahl führen, ablenken und fokussieren, zum ersten Mal eingeschaltet, auf die richtige Polarität und Kurzschlüsse untersucht und unter normalen Betriebsbedingungen getestet. Die Vakuumpumpen wurden ebenso geprüft wie die verschiedenen Steuerungssysteme und Sicherheitseinrichtungen, das Hochfrequenzsystem, die Wasserkühlung sowie Temperatur- und Drucksensoren.

Mitte April 2009 war der knapp zweijährige Umbau von PETRA endgültig beendet: Am Ostermontag kreisten zum ersten Mal seit Juni 2007 wieder Teilchen durch den PETRA-Ring. Erst nur wenige Runden, doch nach kurzer Zeit flogen sie schon minutenlang auf der berechneten Bahn um den Beschleunigerring, 130 000 Mal pro Sekunde. Die schwierigste Passage für den Neustart waren die 300 Meter in der neuen Experimentierhalle. Dort stehen die Undulatoren, deren Magnetanordnungen zur Lichterzeugung ganz dicht an den Teilchenstrahl herangefahren werden müssen. Deshalb hat das Strahlrohr in der Halle zahlreiche Engpässe von nur wenigen Millimetern Höhe, durch die der Strahl gefädelt werden muss.

Wie Testpiloten loteten die Beschleunigerexperten dabei die Grenzen der neuen Maschine aus: Wie viel Abweichung im Vakuumrohr kann der Strahl vertragen, ohne an der Wand zu „kratzen“? Wie reagieren die Teilchen auf verschiedene Steuerimpulse aus dem Kontrollraum? Gleichzeitig wurde der Teilchenstrahl genutzt, um das Vakuum im Beschleuniger zu verbessern. Denn durch das von den Positronen abgestrahlte

Synchrotronlicht werden Gasmoleküle von der Wand der Vakuumkammer abgelöst. So können restliche Gasteilchen im Ring besser durch die Vakuumpumpen abgesaugt werden, und der Druck im Strahlrohr wird geringer.

Mitte Juli 2009 war es schließlich soweit: Die Magnethälften der ersten Undulatoren wurden zusammengefahren, um die Positronen auf Slalomkurs zu bringen – PETRA III erzeugte erstmals Röntgenlicht! Parallel zur weiteren Optimierung von Beschleunigerbetrieb und Lichterzeugung geht in der Experimentierhalle der Aufbau der 14 Strahlführungen weiter, an denen die Wissenschaftler ihre Experimentierplätze errichten. Die ersten Testexperimente mit dem Röntgenlicht aus PETRA III fanden im Herbst 2009 statt, der reguläre Experimentierbetrieb der modernsten Synchrotronquelle der dritten Generation mit Nutzern aus aller Welt startet 2010. ●



●
Blick entlang des Speicherrings PETRA III im Bereich der Experimentierhalle, mit Ablenkmagneten (blau), Fokussierungsmagneten (rot) und Undulatoren (gelb)

PETRA III

- > Ringbeschleuniger für Elektronen und Positronen, später auch Protonen
- > Länge: 2304 m
- > Inbetriebnahme: 1978
- > 1978-1986: Teilchenphysik
- > 1987-2007: Vorbeschleuniger für HERA und Quelle für Röntgenstrahlung
- > seit 2009: weltweit brillianteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle
- > 14 Messplätze mit bis zu 30 Instrumenten

WEG WEISER.

HERA Das Super-Elektronenmikroskop

Die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA war der größte Teilchenbeschleuniger bei DESY und Deutschlands größtes Forschungsinstrument: ein 6,3 Kilometer langes Super-Elektronenmikroskop, das den Physikern den weltweit schärfsten Blick ins Proton eröffnete. Im Sommer 2007 endete der Forschungsbetrieb, doch die Auswertung der Daten dauert an. Auch die beim Bau und Betrieb von HERA gewonnenen Erkenntnisse finden Anwendung in neuen Beschleunigerprojekten.

Ein ehrgeiziger Plan

Als DESYs Physiker nach dem Bau von PETRA die weitere Zukunft planten, stand eines fest: Das nächste Projekt sollte einmalig sein und radikal neue Wege bei der Erforschung des Mikrokosmos eröffnen. Da die anderen Beschleunigerzentren mit Teilchen und deren Antiteilchen arbeiteten, entschloss man sich bei DESY, ein Super-Elektronenmikroskop für Protonen zu bauen – eine Maschine, die Einblick in den innersten Aufbau der Materie gewähren würde.

Anfang der 1980er Jahre war der Entwurf für die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA ausgearbeitet, die weltweit einzige Speicherringanlage, in der zwei unterschiedliche

Teilchenarten im Flug frontal kollidieren sollten: die leichten, punktförmigen Elektronen mit den fast 2000-mal schwereren Wasserstoffkernen, den Protonen aus der Familie der Hadronen. Bei diesen Zusammenstößen wirkt das Elektron wie eine winzige Sonde, die das Innenleben des Protons abtastet. Je höher die Energie beim Zusammenstoß der Teilchen ist, desto tiefer können die Physiker in das Proton hineinblicken, desto schärfer können sie die Details erkennen.

Dazu benötigt man allerdings zwei verschiedene, technisch höchst anspruchsvolle Beschleuniger. Denn während sich Teilchen und Antiteilchen – die sich im Wesentlichen nur



durch ihre entgegengesetzte Ladung unterscheiden – hervorragend gleichzeitig in einem einzigen Ringbeschleuniger speichern lassen, müssen zwei so unterschiedliche Teilchensorten wie Elektronen und Protonen in zwei getrennten Ringen beschleunigt und dann bei höchsten Energien über ausgeklügelte Strahlführungen zum Zusammenstoß gebracht werden. So etwas hatte zuvor noch keiner versucht. Doch der Plan ging auf: Im April 1984 wurde HERA genehmigt, im November 1990 feierte DESY die symbolische Inbetriebnahme. Trotz der enormen technischen Herausforderungen war HERA innerhalb des vorgegebenen Termin- und Kostenrahmens fertiggestellt worden.

Pionierarbeit für HERA

Eine besondere Herausforderung war der Bau des Protonenbeschleunigers von HERA. Denn damit die schweren Protonen bei den hohen Energien von HERA die Kurve kriegen, sind sehr starke Magnetfelder nötig: dreimal höhere Felder, als normale Magnete aus Eisenjoch und Kupferspule erzeugen können. Solche Felder lassen sich sinnvoll nur mit Hilfe der Supraleitung realisieren – also der Eigenschaft ausgewählter Materialien, Strom bei sehr tiefen Temperaturen verlustfrei zu leiten. Hier musste sich DESY weit in technisches Neuland vorwagen. Als HERA geplant wurde, war der weltweit einzige weitere supraleitende Großbeschleuniger, der Proton-Antiproton-Speicherring Tevatron bei Fermilab in Chicago, noch im Bau, und die dortigen Physiker und Ingenieure mussten einige Schwierigkeiten bei der Magnettechnologie überwinden. Es galt also, die Beschleunigertechnologie für die Protonen bei HERA weitgehend neu zu entwerfen.

Das Konzept, das DESY für die 650 supraleitenden Magnete des HERA-Protonenrings entwickelte, war auf Anhieb so erfolgreich, dass es sich inzwischen weltweit durchgesetzt hat. Auch die Magnete für den weltweit leistungsstärksten Beschleuniger, den Large Hadron Collider LHC in Genf, verwenden wesentliche Teile des HERA-Konzepts. Für die europäische Industrie war der Bau von HERA eine einmalige Chance, denn für HERA wurden zum ersten Mal alle Magnete von der Industrie gebaut. Damit bekamen die Unternehmen erstmals die Gelegenheit, großtechnische Erfahrungen in der Supraleitungs- und Tieftemperaturtechnik zu sammeln.

Der größte Kühltank Europas ...

Bei supraleitenden Magneten steht der Aufwand für die Kühlung der Magnetspulen im Vordergrund. Um diese über die 6,3 Kilometer des HERA-Beschleunigers auf ihrer Betriebstemperatur von minus 269 Grad Celsius (ein Grad mehr als im Weltraum!) zu halten, baute DESY 1986 in einer 2500 Quadratmeter großen Halle die damals größte Kälteanlage Europas. Im Prinzip arbeitet diese wie ein Kühltank oder das Kälteaggregat einer Klimaanlage, nur mit Helium als Kältemittel. Das Gas wird zunächst verdichtet, gereinigt und dann in Wärmetauschern und Turbinen expandiert, gekühlt und verflüssigt. Anschließend wurde das flüssige Helium in den HERA-Ring geleitet, wo es die Magnete durchströmte und kühlte.

... im Dienste von FLASH und European XFEL

Im Sommer 2007 wurde HERA abgeschaltet, doch die Abteilung „Kryogenik und Supraleitung“ – eine der größten Gruppen des Beschleunigerbereichs bei DESY – ist damit nicht etwa arbeitslos. Auch hier fließt die langjährige Erfahrung direkt in die neuen Projekte des Forschungszentrums ein, insbesondere bei der Entwicklung und Bereitstellung der supraleitenden Beschleunigertechnologie für die Freie-Elektronen-Laser FLASH und European XFEL sowie den Linearbeschleuniger der Zukunft ILC (siehe Seite 48).

Bereits seit einigen Jahren stellt eine der drei „Straßen“ der ehemaligen HERA-Kälteanlage das flüssige Helium für den Linearbeschleuniger des Freie-Elektronen-Lasers FLASH bereit. Hier dient das Helium dazu, die sieben 12 Meter langen supraleitenden Beschleunigermodule, in denen die Elektronen auf hohe Energien gebracht werden, auf ihre Betriebstemperatur von minus 271 Grad Celsius zu kühlen. Die anderen beiden Kältestraßen werden in Zukunft das flüssige Helium für den 1,7 Kilometer langen Linearbeschleuniger des Röntgenlasers European XFEL liefern, der auf der gleichen Beschleunigertechnologie basiert wie FLASH und 2014 anläuft. Rund 100 supraleitende Beschleunigermodule müssen hier zuverlässig auf minus 271 Grad Celsius gekühlt werden – eine beachtliche Aufgabe selbst für die routinierten Supraleitungsexperten von DESY.



LAUFBAHN

HERA im Betrieb

Da bei HERA zwei unterschiedliche Teilchensorten zum Einsatz kamen, die in getrennten Ringen beschleunigt und über komplexe Magnetsysteme zusammengeführt werden mussten, war der HERA-Betrieb eine einzigartige Herausforderung. Bei Anlagen, in denen Teilchen und ihre Antiteilchen kollidieren, können die Teilchenstrahlen in einem einzelnen Strahlrohr umlaufen. Da sie sich nur in ihrer elektrischen Ladung unterscheiden, spüren Teilchen und Antiteilchen die gleichen Kräfte und treffen automatisch im gleichen Moment am gleichen Ort ein. HERA dagegen – mit ihren zwei 6,3 Kilometer langen Beschleunigern mit über 800 Ablenkmagneten, 1340 Fokussierungsmagneten, 1200 Netzgeräten und 1500 Vakuumpumpen – musste erst mühsam auf diese Aufgabe getrimmt werden.

Zudem war HERA damals der einzige Beschleuniger, an dem gleichzeitig mehrere Experimente von unterschiedlichem Typ betrieben wurden: zwei Kollisionsexperimente (H1 und ZEUS) und zwei Strahl-Target-Experimente (HERMES und HERA-B), bei denen nur einer der Teilchenstrahlen auf ein ruhendes Ziel gelenkt wird. Anders als bei Beschleunigern mit gleichartigen Detektoren musste der Betrieb von HERA also zusätzlich auf die grundverschiedenen Bedürfnisse der Experimente abgestimmt werden.

Haarfeine Teilchenstrahlen

Ein Teilchenstrahl ist kein zusammenhängendes Gebilde. Er besteht vielmehr aus einzelnen Paketen, die Milliarden von Teilchen enthalten. Der Verantwortliche im Kontrollraum muss also dafür sorgen, dass die Pakete zusammengehalten werden, dass er sie genau auf der vorgeschriebenen Bahn um die Kurve lenkt, dass die Teilchen nicht durch Zusammenstöße mit Restgas im Vakuumrohr gestört werden, dass Elektronen- und Protonenstrahl in den Wechselwirkungspunkten auf Bruchteile von Millimetern genau aufeinander zufliegen und dass die einzelnen Elektronen- und Protonenpakete auch tatsächlich gleichzeitig dort eintreffen.

Bedenkt man, dass die Teilchenstrahlen an den Kollisionspunkten Durchmesser von nur Bruchteilen von Millimetern haben, also so fein sind wie ein menschliches Haar, wird das ganze Ausmaß dieser Aufgabe deutlich. Bis eine technisch derart anspruchsvolle Anlage wie HERA auf Knopfdruck so funktioniert, dass die Experimente optimale Bedingungen vorfinden, können deshalb einige Jahre vergehen.



Optimierung für mehr Leistung

HERA war von 1992 bis 2007 im Forschungsbetrieb. In dieser Zeit konnte die Mannschaft die Leistung und Effizienz der Speicherringanlage immer weiter steigern. In einigen Parametern – wie der Luminosität, der Anzahl der Teilchenkollisionen, die die Anlage liefert – übertraf HERA sogar die geplanten Werte.

Um mit der hohen Protonenenergie von 820 Milliarden Elektronenvolt (Gigaelektronenvolt, GeV) umgehen zu lernen, begann das HERA-Team zunächst mit kleinen Intensitäten der Teilchenstrahlen und kleiner Luminosität, um dann den Querschnitt der Teilchenstrahlen schrittweise zu verringern und den Ring mit immer mehr Teilchenpaketen zu füllen. 1997 übertraf die über eine Messperiode integrierte Luminosität erstmals den geplanten Wert. 1999 erreichte HERA im Elektronenbetrieb die gleiche Trefferrate wie 1997 mit Positronen, wobei die Energie der Protonen zwischenzeitlich von 820 auf 920 GeV erhöht worden war – eine Umstellung, die trotz größerer Belastung der Komponenten der Anlage problemlos gelang.

Nach einem ausgezeichneten Betriebsjahr 2000, in dem HERA so viele Kollisionen lieferte wie in keinem Jahr zuvor, standen ab Herbst 2000 umfassende Umbauten der Beschleunigeranlage und Detektoren an mit dem Ziel, HERAs Luminosität auf das Vierfache zu steigern und die beiden Kollisionsexperimente mit polarisierten Elektronen zu versorgen. Dazu wurden knapp 80 Magnete neu konstruiert und eingebaut und die beiden Kollisionszonen aufwendig neugestaltet. HERA nach diesem „Lumi-Upgrade“ wieder in Betrieb zu nehmen, stellte sich jedoch als Herausforderung ersten Ranges heraus, denn die umgebaute Maschine



entsprach quasi einem neuen Beschleuniger, dessen Kinderkrankheit es erst wieder zu beseitigen galt. Unterstützt von externen und internen Beratungsgremien identifizierten und lösten die HERA-Mannschaft und die Teams der Experimente ein Problem nach dem anderen, bis die Kollisionsexperimente schließlich Anfang 2004 bei den geplanten Strahlströmen Daten nehmen konnten.

HERA auf Höhenflug

Von da an ging es steil aufwärts: Die HERA-Mannschaft konzentrierte sich darauf, die Strahlströme kontinuierlich zu steigern, während die Experimenteteams gleichzeitig die Effizienz der Datennahme ihrer Detektoren verbesserten. Zur sommerlichen Betriebsunterbrechung 2004 hatte HERA die höchste Luminosität der ersten Betriebsphase übertroffen und als erster Speicherring weltweit longitudinal polarisierte, hochenergetische Positronen für Kollisionen zur Verfügung gestellt. 2005 übertraf die spezifische Luminosität deutlich den geplanten Wert. Dank unermüdlicher Optimierungsarbeiten gelang es der HERA-Mannschaft, die Verfügbarkeit der Anlage, die Spitzenluminosität und die Untergrundbedingungen Jahr für Jahr weiter zu verbessern und für die HERA-Experimente bis zuletzt ideale Messbedingungen bei höchster Luminosität herzustellen.

Am 30. Juni 2007 um 23:30 Uhr endete der Betrieb von HERA, der mit den ersten Teilchenkollisionen am 19. Oktober 1991 begonnen hatte. Das „Abenteuer HERA“ ist damit jedoch noch nicht vorbei: Die Auswertung der umfangreichen Datenmenge, die die HERA-Experimente in 16 Betriebsjahren aufgezeichnet haben, wird die Teilchenphysiker geraume Zeit

in Atem halten. Viele der mit HERA gewonnenen Erkenntnisse haben bereits Eingang in die Lehrbücher gefunden und gehören zum Grundlagenwissen über den Aufbau unserer Welt. Die Auswertung der restlichen Messdaten wird noch jahrelang einzigartige Einsichten in das Innenleben des Protons und die Natur der fundamentalen Kräfte liefern. Damit wird sich den HERA-Physikern schließlich ein globales Bild des Protons offenbaren, das es in dieser Präzision und Vielseitigkeit noch nie gab – und das aufgrund der Einzigartigkeit von HERA über Jahre und womöglich Jahrzehnte unangefochten Bestand haben wird.

Zwar sind die großen HERA-Detektoren mittlerweile abgebaut, doch der Beschleuniger selbst wird weiterhin instand gehalten. Zu zukünftigen Nutzungsmöglichkeiten gibt es verschiedene Ideen – sollte eine von ihnen umgesetzt werden, ließe sich HERA mit entsprechend geringem Aufwand wiederbeleben. ●

HERA

- > Elektron-Proton-Speicherring für die Teilchenphysik
 - > Länge: 6336 m
 - > Forschungsbetrieb: 1992 bis 2007
 - > Datenauswertung läuft noch
 - > Experimente: H1, ZEUS, HERMES, HERA-B
-

ZIEL GERADE.

FLASH

Weltrekord im Laserblitzen

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

Einmalige Pionieranlage

Anfang der 1990er Jahre begannen die DESY-Beschleunigerbauer gemeinsam mit internationalen Partnern, im Rahmen des TESLA-Projekts ein Konzept für einen neuen Linearbeschleuniger für die Teilchenphysik auszuarbeiten (siehe Seite 48). Um die höchst anspruchsvolle supraleitende Technologie, die dabei zum Einsatz kommen sollte, unter realistischen Bedingungen zu erproben, bauten sie bei DESY die 100 Meter lange TESLA-Testanlage TTF auf. An dieser Anlage konnte das Team alle wesentlichen, für einen solchen Beschleuniger notwendigen Komponenten testen und damit die technische Machbarkeit eines supraleitenden Elektron-Positron-Linearbeschleunigers eindrucksvoll beweisen. Auch die Realisierbarkeit von leistungsstarken Lasern im Röntgenbereich wurde hier weltweit zum ersten Mal demonstriert, als die zum Freie-Elektronen-Laser umgebaute Anlage Anfang 2000 erstmals Laserstrahlung mit Wellenlängen unter 100 Nanometern erzeugte.

Damit hatte die TTF-Anlage ihre Pionieraufgabe der ersten Betriebsphase glänzend erfüllt. 2003 wurde sie daraufhin auf 260 Meter verlängert und zu einem Freie-Elektronen-Laser im weichen Röntgenbereich für die Forschung mit Photonen bei DESY ausgebaut. Anlässlich des offiziellen Starts der Nutzeranlage im Jahr 2005 wurde sie auf den Namen FLASH

getauft (Freie-Elektronen-Laser in Hamburg). Seither steht den Forschern bei DESY eine einzigartige Lichtquelle zur Verfügung – der erste Freie-Elektronen-Laser der Welt, dessen Wellenlängen bis in den weichen Röntgenbereich hinein reichen.

Rekordlaser im Röntgenbereich

Seit Jahren wetteiferten die Strahlungsquellenbauer weltweit darum, den ersten Hochleistungslaser für den Röntgenbereich zu entwickeln. Das internationale FLASH-Team stellte dabei einen Weltrekord nach dem anderen auf. Die FLASH-Experten verkürzten die Wellenlänge der erzeugten Laserstrahlung immer weiter, bis 2007 schließlich der Zielwert von 6,5 Nanometern erreicht war.

Zwei Jahre lang blieb FLASH damit unübertroffen. Erst 2009 ging in Kalifornien mit der LCLS-Anlage ein Freie-Elektronen-Laser in Betrieb, der noch kürzere Wellenlängen im harten Röntgenbereich um 0,15 Nanometern liefert. Dennoch bleibt FLASH weiterhin einmalig: Der Freie-Elektronen-Laser bei DESY ist weiterhin die einzige Laseranlage auf der Welt, die leistungsstarke und ultrakurze Lichtblitze im Vakuum-Ultravioletten und im weichen Röntgenbereich liefert.

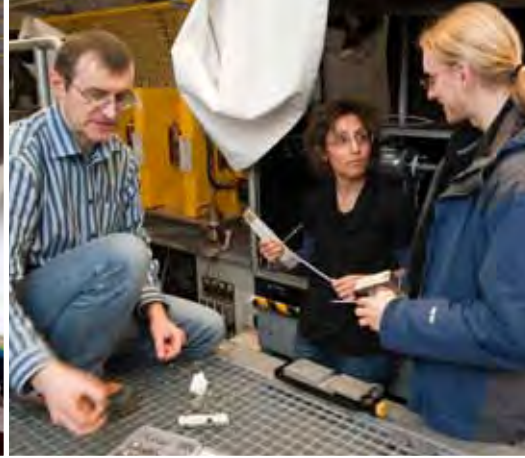
Dabei übertrifft FLASH sowohl die besten Synchrotronstrahlungsquellen als auch die modernsten herkömmlichen Lasersysteme im Röntgenbereich. So liefern heutige Speicherring-Synchrotronstrahlungsquellen zwar stark gebündelte Strahlung, FLASH jedoch erzeugt Licht mit echten Lasereigenschaften, also perfekt gebündelte Strahlen. Und während herkömmliche Laser im Röntgenbereich nur geringe Leistungen bieten, ist die Spitzenleuchtstärke von FLASH um Größenordnungen höher, sogar als die moderner Synchrotronstrahlungsquellen. Da die Laserstrahlung außerdem in ultrakurzen Blitzen abgegeben wird, eröffnen sich den Forschern mit FLASH einzigartige Experimentiermöglichkeiten.

Revolutionäre Experimentiermöglichkeiten

Die FLASH-Anlage besteht aus einem etwa 150 Meter langen Linearbeschleuniger mit supraleitenden Beschleunigungselementen, die Elektronen auf eine Milliarde Elektronenvolt (1 Gigaelektronenvolt, GeV) beschleunigen. Anschließend durchläuft der Elektronenstrahl eine 30 Meter lange Magnetanordnung – einen Undulator –, in der er Strahlung nach dem SASE-Prinzip der selbstverstärkten spontanen Emission erzeugt: Bei dem rasanten Slalomkurs durch den Undulator senden die Teilchen Licht aus, das sich zu kurzwelligen, intensiven Laserlichtblitzen verstärkt. Diese werden in die FLASH-Experimentierhalle geleitet und auf fünf Messplätze verteilt, wo sie internationalen Wissenschaftlerteams für ihre Forschungen zur Verfügung stehen. Für die Zukunft plant DESY in enger Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin die Erweiterung von FLASH um eine zweite Undulatorstrecke in einem separaten Tunnel samt neuer Experimentierhalle, die Platz für weitere sechs Messplätze bietet (FLASH II).

Denn die Messzeit an FLASH ist heiß begehrt – ein Jahr nach Beginn des Nutzerbetriebs war die Anlage bereits dreifach überbucht. Schon in der ersten Messperiode bestätigten sich die großen Hoffnungen, die die Forscher in die revolutionär neuen Messmöglichkeiten gesetzt hatten. 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 auch am European XFEL eingesetzt werden sollen. Einigen Gruppen gelang es mit den ultrakurzen Lichtblitzen von FLASH bereits, erste Prozesse auf extrem kurzen Zeitskalen zeitaufgelöst zu verfolgen, also quasi zu filmen. Die Untersuchung solcher Prozesse mit Strahlung kurzer Wellenlängen gehört zu den wichtigsten neuen Anwendungsmöglichkeiten von Röntgenlasern dieser Art.





Vorreiter für Röntgenlaser und Linearbeschleuniger

Doch FLASH ist nicht nur als neuartiges Forschungsinstrument gefragt. Die Anlage spielt weiterhin eine wichtige Pionierrolle – sowohl für den Freie-Elektronen-Röntgenlaser European XFEL, der sich in Hamburg und im benachbarten Schenefeld im Bau befindet und noch kürzere Wellenlängen bis hinunter zu einem zehntel Nanometer erzeugen wird, als auch für den International Linear Collider ILC, den Linearbeschleuniger der Zukunft für die Teilchenphysik. Die Linearbeschleuniger von FLASH, European XFEL und ILC beruhen alle auf der supraleitenden TESLA-Beschleunigertechnologie. Deshalb bietet FLASH ideale Bedingungen, um diese Technologie in all den erforderlichen Komponenten bis zur industriellen Serienreife voranzutreiben.

Darüber hinaus entwickeln und testen die Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure an FLASH auch die Undulatoren, jene speziellen Magnetanordnungen zur Erzeugung der Röntgenblitze, sowie die optischen Komponenten, Messaufbauten und Nachweisgeräte für den European XFEL. Ebenso wertvolle Erfahrung sammeln sie beim Betrieb der Anlage mit der elektronischen Verarbeitung großer Datenmengen. Nicht zuletzt können die Forscher an FLASH neuartige Experimentiermethoden für die künftigen Röntgenlaser studieren. Auch für Industrieunternehmen ist die Beteiligung an der FLASH-Anlage langfristig sehr attraktiv, da sie sich durch das erworbene technische Know-how für den European XFEL und den Bau weiterer Linearbeschleuniger weltweit qualifizieren können.

An der Grenze des technisch Machbaren

Während FLASH seit 2005 zuverlässig Laserlicht produziert, das von Forschergruppen aus aller Welt für Experimente genutzt wird, arbeitet das FLASH-Team daran, die Anlage fortwährend zu optimieren – und verschiebt dabei ständig die Grenzen des technisch Machbaren. Denn zu den Eigenschaften einer Schlüsseltechnologie – und die Freielektronen-Laser sind eine solche – gehört es, dass sie sich rasant entwickelt und die Konstrukteure immer schon mit den Herausforderungen von morgen und übermorgen beschäftigt sind.

So stand ab September 2009 ein umfassender Umbau an, bei dem ein großer Teil des Beschleunigers erneuert wurde. Insbesondere wurde die Elektronenquelle ausgetauscht, der so genannte Photoinjektor. Die neue Teilchenquelle, die bei DESY in Zeuthen am Photoinjektor-Teststand PITZ entwickelt wurde, erzeugt deutlich weniger störenden Dunkelstrom und besser geordnete Teilchenpakete (siehe Seite 44), was die Qualität des erzeugten Laserlichts maßgeblich verbessert.

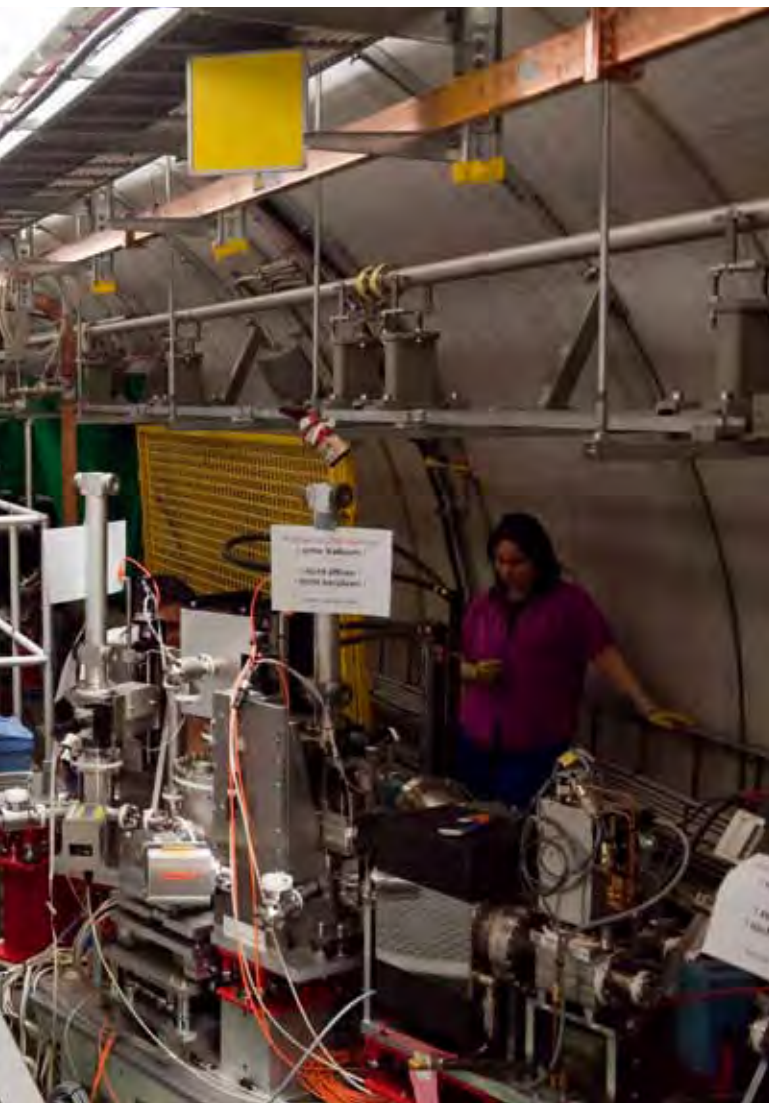
Außerdem baute das FLASH-Team ein zusätzliches Beschleunigermodul ein, das insgesamt siebte, um den Elektronenstrahl von bisher 1,0 GeV auf eine Energie von 1,2 GeV bringen zu können. Damit ist die Anlage dann in der





Lage, Laserlicht mit Wellenlängen unter fünf Nanometern zu produzieren. Ein weiteres wesentliches Element war der Einbau eines am Forschungszentrum Fermilab in Chicago gefertigten Beschleunigermoduls mit vier supraleitenden Resonatoren, die bei einer Frequenz von 3,9 Gigahertz (GHz) statt der bei FLASH sonst üblichen 1,3 GHz arbeiten. Damit können Form und Länge der Laserpulse gezielt beeinflusst werden, um den FLASH-Nutzern genau die Strahlung zur Verfügung zu stellen, die sie für ihre Experimente benötigen. Der Einsatz dieses Beschleunigermoduls ist gleichzeitig ein wichtiger Test für den Röntgenlaser European XFEL, der mit vergleichbaren Modulen ausgestattet werden soll.

Gemeinsam mit der Universität Hamburg baute das FLASH-Team zudem auf 40 Metern Tunnelstrecke das Experiment sFLASH auf. Hier geht es darum, das so genannte Seeding zu erproben, das später bei FLASH II zum Einsatz kommen soll. Bisher wird die Lichtverstärkung bei FLASH durch das von den Teilchenpaketen im Undulator abgestrahlte Licht selbst ausgelöst. Beim Seeding dagegen wird dieser Verstärkungsprozess gezielt mit dem Licht eines normalen Lasers gestartet, dessen Wellenlänge derjenigen der FLASH-Strahlung entspricht. Dadurch wird es möglich sein, die Intensitätsschwankungen, die bisher von Lichtblitz zu Lichtblitz auftreten, deutlich zu verringern und auch die Lasereigenschaften der Strahlung weiter zu verbessern.



Das FLASH-Team will zunächst die Machbarkeit des Seeding-Prozesses bei einer Wellenlänge von 30 Nanometern demonstrieren und anschließend zu kürzeren Wellenlängen übergehen. Die erzeugte Strahlung soll den wissenschaftlichen Nutzern an einer gesonderten Strahlführung zur Verfügung gestellt werden, ohne den restlichen FLASH-Betrieb zu beeinträchtigen. Nach dem umfassenden, fünfmonatigen Umbau finden die Nutzer damit eine optimierte FLASH-Anlage vor, die getreu ihrer bisherigen Pionierrolle zahlreiche neue, einmalige Experimentieroptionen bietet. ●

●
Blick in den FLASH-Tunnel während des Umbaus

FLASH

- > Freie-Elektronen-Laser mit supraleitendem Linearbeschleuniger
- > Länge: 260 m
- > 1992-2005: Testanlage für supraleitende Beschleunigertechnologie und FEL-Technologie
- > seit 2005: FEL-Anlage für die Forschung mit Photonen
- > erzeugt extrem brillante Laserstrahlung mit Wellenlängen zwischen 5 und 60 Nanometern nach dem SASE-Prinzip
- > fünf Messplätze

GLANZ LEISTUNG.

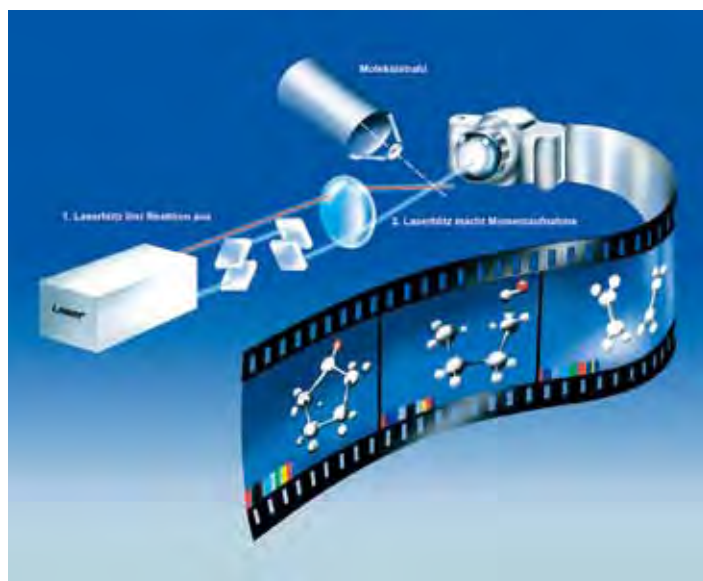
European XFEL Europas Leuchtturm für die Wissenschaft

Er ist ein Highlight im wahrsten Sinne des Wortes: der Freie-Elektronen-Röntgenlaser European XFEL, der derzeit als europäisches Projekt mit maßgeblicher Beteiligung von DESY in der Metropolregion Hamburg entsteht und 2014 anlaufen soll. Als einzige Lichtquelle dieser Art in Europa wird der European XFEL hochintensive, ultrakurze Laserlichtblitze im harten Röntgenbereich erzeugen. Damit eröffnet der European XFEL völlig neue Forschungsmöglichkeiten für Naturwissenschaftler und industrielle Anwender aus aller Welt.

Röntgenlaser in der Metropolregion Hamburg

Wie sein „kleiner Bruder“ FLASH, der seit 2005 bei DESY in Betrieb ist, entstand auch der Röntgenlaser European XFEL aus den Entwicklungsarbeiten für die supraleitende TESLA-Beschleunigertechnologie, die DESY mit seinen internationalen Partnern Anfang der 1990er Jahre initiiert hat (siehe Seite 48). Wie sich damals herausstellte, ist die TESLA-Technologie ideal geeignet, einen Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich anzutreiben. Anfang 2003 genehmigte das Bundesforschungsministerium den Bau eines solchen Röntgenlasers im Grundsatz als eigenständige europäische Einrichtung. Die Anlage wird derzeit unter dem Namen European XFEL mit starker DESY-Beteiligung in Hamburg und Schleswig-Holstein realisiert.

Die Bauarbeiten starteten im Januar 2009. Die 3,4 Kilometer lange Anlage reicht vom DESY-Gelände in Hamburg bis in die schleswig-holsteinische Stadt Schenefeld, wo der Forschungscampus mit einer Experimentierhalle mit Platz für zehn Messstationen entsteht. Der European XFEL wird von einer eigenständigen, gemeinnützigen Forschungsorganisation, der European XFEL GmbH, gebaut und



● Mit ultraschnellen Lasern wie dem European XFEL lassen sich chemische Reaktionen filmen.

betrieben. An dem Projekt beteiligen sich zurzeit 12 Länder; China plant den Beitritt. Als Vertreter Deutschlands koordiniert DESY insbesondere das aus 17 Instituten bestehende internationale Konsortium, das den Beschleunigerkomplex für die Anlage baut. Der Beginn der Inbetriebnahme ist für 2014 geplant.

Revolution in der Röntgenforschung

In den letzten 40 Jahren hat die Erfindung von Lasern im infraroten und sichtbaren Bereich eine wahre Revolution in Wissenschaft und Technologie ausgelöst. Laser sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken – ihre Anwendungen reichen vom Laserpointer über die Datenspeicherung und Drucktechnik bis hin zur Entfernungsmessung, Schneid- und Schweißwerkzeugen oder Laserskalpellen. Parallel dazu hat auch die Nutzung der an Ringbeschleunigern erzeugten Synchrotronstrahlung im Ultravioletten sowie im weichen und harten Röntgenbereich seit den 1960er Jahren große experimentelle Fortschritte und Entdeckungen in nahezu allen Naturwissenschaften ermöglicht. Mit dem Bau leistungsstarker Röntgenlaser wie dem European XFEL hoffen Naturwissenschaftler aller Fachrichtungen, die Erfolgsgeschichte des Lasers nun auch im Röntgenbereich fortzuschreiben – und damit die Forschung mit Röntgenstrahlung ebenso zu revolutionieren.

Die Strahlung der Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich übertrifft die Synchrotronstrahlung nochmals deutlich: Sie ist um ein Vielfaches brillanter, kohärent, d.h. laserlichtartig, und wird in Pulsen von unter 100 Femtosekunden (billiardstel Sekunden) Dauer und mit einer Spitzenleistung von mehreren Gigawatt abgestrahlt. Damit erschließen sich Forschungsfelder, von denen Wissenschaftler bisher nur träumen konnten. Mit den Röntgenblitzen des European XFEL lassen sich atomare Details von Viren und Zellen entschlüsseln, dreidimensionale Aufnahmen aus dem Nanokosmos machen, chemische Reaktionen filmen und Vorgänge unter Extrembedingungen untersuchen, wie sie etwa im Inneren von Planeten vorherrschen. Damit ermöglicht die Anlage neue Erkenntnisse in nahezu allen technisch-wissenschaftlichen Bereichen, die für die Alltagswelt von zentraler Bedeutung sind – darunter Medizin, Pharmazie, Chemie, Materialwissenschaft, Nanotechnologie, Energietechnik und Elektronik.

European XFEL und FLASH

Der 3,4 Kilometer lange European XFEL nutzt dasselbe Prinzip und dieselbe Technologie wie der kleinere Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY – allerdings im weit größeren Maßstab. Während die Elektronen bei FLASH in einem etwa 150 Meter langen Linearbeschleuniger auf 1,2 Milliarden Elektronenvolt (1,2 GeV) gebracht werden, bringt der 1,7 Kilometer lange Beschleuniger des European XFEL die Teilchen auf 17,5 GeV. Anschließend durchfliegen die Elektronen lange Magnetstrukturen, die Undulatoren, in denen sie zur Aussendung von hochintensiven Laserblitzen veranlasst werden. Diese werden in eine Experimentierhalle geleitet und auf verschiedene Messplätze verteilt, an denen Wissenschaftler aus aller Welt mit dem Laserlicht forschen.

Die von den beiden Anlagen erzeugte Strahlung unterscheidet sich insbesondere in der Wellenlänge. Während FLASH als kleinste Wellenlänge rund fünf Nanometer, also den weichen Röntgenbereich, erreicht, wird der European XFEL Laserlicht mit über 50-fach kürzeren Wellenlängen, d.h. im harten Rönt-

genbereich produzieren. Damit macht der European XFEL noch kleinere Strukturen sichtbar als FLASH: Lassen sich mit dem Licht von FLASH bereits einzelne Moleküle erkennen, werden am European XFEL sogar deren atomare Strukturen beobachtbar sein.

Im internationalen Vergleich

Weltweit gibt es zwei weitere Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich: LCLS ging 2009 in Kalifornien in Betrieb, SCSS in Japan ist im Bau. Die Funktionsprinzipien der Anlagen sind ähnlich. Doch während bei LCLS und SCSS konventionelle, normalleitende Beschleunigertechnologien zum Einsatz kommen, arbeitet der Linearbeschleuniger des European XFEL genau wie der von FLASH supraleitend bei minus 271 Grad Celsius. Die Nutzung der TESLA-Beschleunigertechnologie bringt dabei entscheidende Vorteile.

Insbesondere ermöglicht der Einsatz supraleitender Beschleunigungsstrukturen, einen Elektronenstrahl zu produzieren, der aus vielen hintereinander gereihten Elektronenpaketen besteht und von besonders hoher Qualität ist. Dadurch lassen sich am European XFEL weit mehr Lichtblitze pro Sekunde erzeugen als an den beiden anderen Standorten: Während LCLS und SCSS jeweils nur 120 bzw. 60 Röntgenblitze pro Sekunde produzieren, bringt es der European XFEL auf 27 000 Blitze pro Sekunde. Bestimmte Experimente werden daher nur am European XFEL möglich sein, andere können weitaus schneller durchgeführt werden. Auch lassen sich mit der höheren Anzahl von Elektronenpaketen mehr Messplätze gleichzeitig bedienen.

Der European XFEL wird zwar erst nach den beiden anderen Anlagen den Messbetrieb aufnehmen, auf diese Weise lassen sich jedoch noch Erfahrungen berücksichtigen, die bereits in Japan und den USA gemacht wurden. Zudem ermöglichen am European XFEL eigens entwickelte Messinstrumente und eine hochwertige technisch-wissenschaftliche Infrastruktur einen optimalen Forschungsbetrieb. Nicht zuletzt kommen auch die Erfahrungen, die DESY und seine internationalen Partner mit der Pionieranlage FLASH in Hamburg gewonnen haben, dem Bau und Betrieb des European XFEL direkt zugute. ●

European XFEL

- europäisches Projekt mit starker DESY-Beteiligung
 - Bau und Betrieb: European XFEL GmbH (gemeinnützig)
 - Freie-Elektronen-Laser mit supraleitendem Linearbeschleuniger
 - Länge: ca. 3,4 km
 - erzeugt extrem brillante Laserstrahlung mit Wellenlängen zwischen 0,1 und 6 Nanometern nach dem SASE-Prinzip
 - im Bau, Beginn der Inbetriebnahme: 2014
 - eine unterirdische Experimentierhalle mit Platz für 10 Messplätze
 - Möglichkeit für einen zweiten Experimentierkomplex
-

Der europäische Röntgenlaser European XFEL

In der Metropolregion Hamburg entsteht eine Forschungsanlage der Superlative: Der European XFEL wird ultrakurze Laserlichtblitze im Röntgenbereich erzeugen – 27 000 Mal in der Sekunde und mit einer Leuchtstärke, die milliardenfach höher ist als die der besten Röntgenstrahlungsquellen herkömmlicher Art. Die Anlage hat weltweit einzigartige Eigenschaften und eröffnet völlig neue Forschungsmöglichkeiten für Naturwissenschaftler und industrielle Anwender.

Der European XFEL verläuft größtenteils in Tunneln unter der Erde, zu denen drei Betriebsgelände Zugang ermöglichen. Die 3,4 Kilometer lange Anlage erstreckt sich von DESY in

Hamburg bis in die schleswig-holsteinische Stadt Schenefeld (Kreis Pinneberg). Dort entsteht ein Forschungscampus, auf dem ab 2015 internationale Teams von Wissenschaftlern mit den intensiven Röntgenblitzen experimentieren werden.

Um die Röntgenblitze zu erzeugen, werden Elektronen in einem 1,7 Kilometer langen supraleitenden Linearbeschleuniger auf hohe Energien gebracht und dann durch spezielle Magnetanordnungen (Undulatoren) gelenkt, die sie auf einen engen Slalomkurs bringen. Dabei senden die Teilchen Strahlung aus, die sich immer mehr verstärkt, bis schließlich ein extrem kurzer und intensiver Röntgenblitz entsteht.



DESY – ein starker Partner

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



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



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



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



**Betriebsgelände
Osdorfer Born**

**Betriebsgelände
DESY-Bahrenfeld**

Der Tunnel im Bereich des Elektronenbeschleunigers: In den gelben Modulen befinden sich die Resonatoren, in denen die Teilchen beschleunigt werden.

QUELL GEBIET.

PITZ Elektronenquellen für Röntgenlaser und ILC

Atome im Blitzlichtgewitter, Filmen in der Nanowelt, Hologramme von Molekülen, Sternenmaterie im Röntgenlicht – eine stetig wachsende Anzahl von Experimenten naturwissenschaftlicher oder industrieller Art benötigt Röntgenstrahlung extrem hoher Intensität und Qualität. Um diese zu erzeugen, sind Elektronenquellen mit besonderen Eigenschaften erforderlich. Diese entwickeln die DESY-Forscher am Photoinjektor-Teststand PITZ am Standort in Zeuthen.



Teststand für Elektronenquellen

Seit Januar 2002 betreibt DESY auch in Zeuthen einen eigenen kleinen Linearbeschleuniger: den Photoinjektor-Teststand PITZ. Er dient zur Entwicklung und Optimierung von lasergetriebenen Hochfrequenz-Elektronenquellen, wie sie beispielsweise beim Röntgenlaser European XFEL und dem International Linear Collider ILC zum Einsatz kommen sollen.

Der Betrieb dieser Anlagen stellt sehr hohe Anforderungen an die Qualität der Elektronenstrahlen. Die Elektronenpakete eines Strahls müssen gleichzeitig sehr kurz sein und eine extrem kleine Emittanz besitzen. Die Emittanz hängt von Größe und Öffnungswinkel des Strahls ab, sie ist ein wichtiges Maß für die Qualität eines Teilchenstrahls: Je niedriger die Emittanz, umso besser lässt sich der Strahl fokussieren.

Am Teststand PITZ werden Elektronenquellen entwickelt und getestet, die einen Teilchenstrahl mit dieser erforderlichen hohen Qualität erzeugen können. Ergänzend zu Simulationsrechnungen und der Weiterentwicklung theoretischer Ansätze untersuchen die Wissenschaftler am Teststand PITZ die Prozesse, die bei der Erzeugung, Beschleunigung und Formung der Elektronenpakete eine Rolle spielen. Ihr Ziel: Strahlqualität und Betriebsparameter der Teilchenquellen, beispielsweise die Betriebszuverlässigkeit, zu optimieren.

Neuer Laser für schlanke Teilchenpakete

Um Elektronenstrahlen mit der für den European XFEL benötigten Qualität zu erzeugen, lenken die Wissenschaftler bei PITZ hochpräzise, ultraviolette Lichtblitze aus einem Laser auf eine Photokathode, die sich an der Stirnseite eines Hohlraumresonators befindet. Entsprechend dem photoelektrischen Effekt setzen die Laserblitze aus der Kathode Elektronen frei, die mit Hilfe eines hochfrequenten elektromagnetischen Feldes abgezogen und beschleunigt werden.

Die Qualität der erzeugten Elektronenpakete wird hauptsächlich dadurch beeinträchtigt, dass sich die Teilchen aufgrund ihrer gleichen Ladung gegenseitig abstoßen. Nur durch eine schnelle Beschleunigung der Elektronen und die Anwendung eines externen Magnetfeldes, das wie eine Linse wirkt, können die Teilchen ausreichend gebündelt werden. Sie verlassen dann den Hohlraumresonator als dichtes Paket.

Entlang des anschließenden Strahlrohres werden die Eigenschaften der Elektronenpakete sehr genau vermessen, damit ein genaues Bild von den physikalischen Prozessen bei ihrer Erzeugung entsteht und die Elektronenquelle optimiert werden kann. Unter anderem werden die zeitliche Länge, Energieverteilung und räumliche Ausdehnung der Elektronenpakete gemessen; zudem wird bestimmt, wie gut die Flugbahnen der einzelnen Teilchen parallel verlaufen. Je besser man diese Parameter optimieren kann, umso intensiver ist das Licht, das später in den Undulatoren des European XFEL erzeugt wird.

Ende 2008 wurde an PITZ ein neuer, vom Max-Born-Institut in Berlin entwickelter Photokathodenlaser installiert. Dieser liefert jene besonderen ultravioletten Lichtblitze, so genannte Flat-top-Pulse, die optimal auf die Strahldynamik des Injektors zugeschnitten sind. Hinzu kommt eine ebenfalls neue Elektronenquelle, deren Kupferresonator dank eines speziellen, in Hamburg entwickelten Reinigungsverfahrens mit Trockeneis wesentlich bessere Vakuumeigenschaften aufweist. Insbesondere ist der unerwünschte Dunkelstrom weitaus geringer als bei der vorherigen Quelle. So lassen sich nun Elektronenstrahlen mit besonders kleiner transversaler Emittanz erzeugen – die also, wie für den European XFEL erforderlich, einen besonders kleinen Durchmesser besitzen und nicht auseinanderlaufen. ●



● Die PITZ-Gruppe neben der Beschleunigeranlage

● Montage eines Kamerasystems



● Im Kontrollraum von PITZ werden die Eigenschaften des Elektronenstrahls rund um die Uhr vermessen.



PITZ

- Teststand mit Linearbeschleuniger bei DESY in Zeuthen
 - dient der Entwicklung und Optimierung von Elektronenquellen
 - Länge: ca. 12 m
 - Inbetriebnahme: 2002
-

ILC

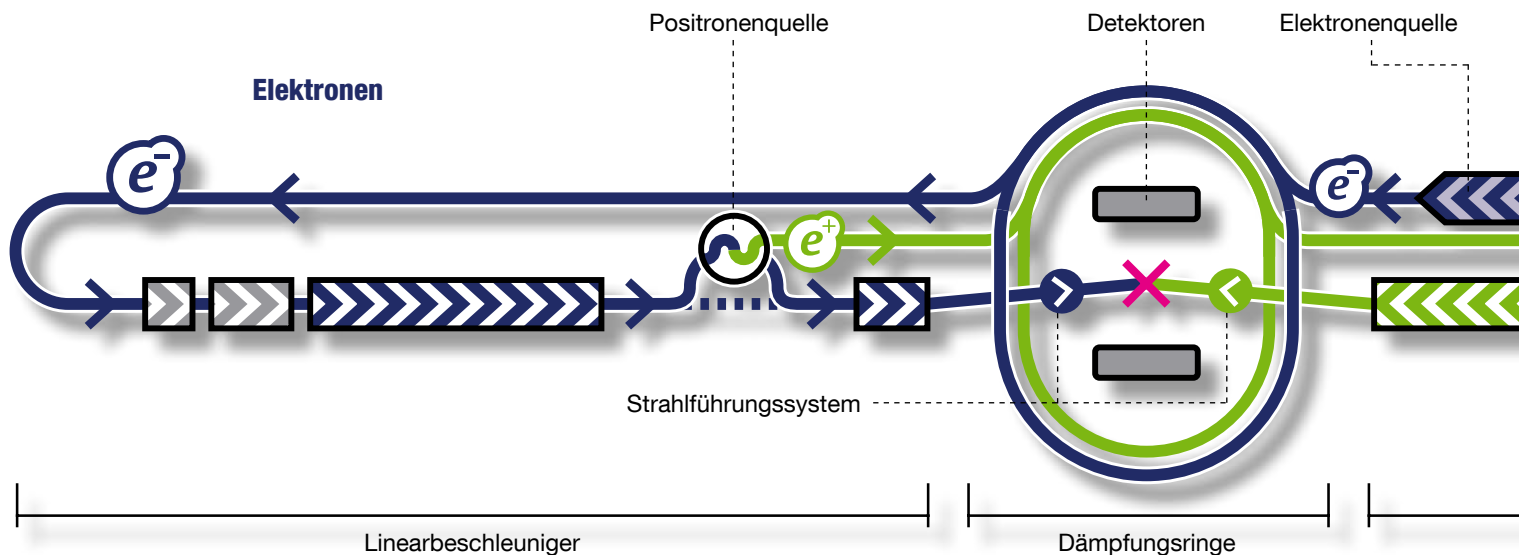
Das Zukunftsprojekt der Teilchenphysik

Leistungstärkster Beschleuniger der Welt ist der Protonenbeschleuniger LHC in Genf. Als „Entdeckungsmaschine“ wird der LHC erste Einsichten in das Neuland hoher Energien liefern. Die großen Rätsel des Universums werden sich jedoch nur in Verbindung mit einer weiteren „Präzisionsmaschine“ lösen lassen – einem Linearbeschleuniger, in dem Elektronen und Positronen bei höchsten Energien zusammenstoßen. DESY beteiligt sich maßgeblich an der Entwicklung eines solchen Beschleunigers, dem International Linear Collider ILC, der die Entdeckungen des LHC vervollständigen wird.

Präzisionswerkzeug bei höchsten Energien

Die Teilchenphysiker weltweit sind sich einig, dass die Entdeckungen des derzeit leistungsstärksten Beschleunigers der Welt, des Large Hadron Collider LHC beim Forschungszentrum CERN in Genf, nur durch einen Elektron-Positron-Beschleuniger vervollständigt werden können. Mit seinen einzigartigen Präzisionsmessungen würde ein solcher Beschleuniger es ermöglichen, die Geheimnisse der Tera-skala – jenem Energiebereich von Billionen Elektronenvolt

(Teraelektronenvolt), in dem die Physiker entscheidende neue Entdeckungen erwarten – in all ihren Facetten auszuleuchten. Ein solches Zukunftsprojekt ist der International Linear Collider ILC, an dessen Entwicklung auch DESY mitwirkt: ein etwa 35 Kilometer langer Linearbeschleuniger, in dem Elektronen und Positronen mit Energien von 500 bis etwa 1000 Milliarden Elektronenvolt (Gigaelektronenvolt, GeV) kollidieren.



Der ILC besteht aus zwei sich gegenüber liegenden Linearbeschleunigern, in denen die Elektronen und ihre Antiteilchen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinander zurasen. Supraleitende Resonatoren bringen die Teilchen auf immer höhere Energien, bis sie in der Mitte der Rennstrecke mit großer Wucht aufeinander prallen. Die Teilchenstrahlen kollidieren 14 000 Mal pro Sekunde mit Elektronen-Rekordenergien von 500 GeV. Jede dieser Kollisionen produziert zahlreiche neue Teilchen, die von zwei großen Detektoren registriert werden. Die derzeitige Planungsgrundlage sieht eine Erweiterung des ILC auf 50 Kilometer Länge und eine Energie von 1000 GeV in der zweiten Phase des Projekts vor.

Im Gegensatz zu Protonenbeschleunigern wie dem LHC in Genf, in dem zusammengesetzte Teilchen miteinander kollidieren, prallen im ILC punktförmige Elektronen auf ihre Antiteilchen, die ebenfalls punktförmigen Positronen. Sie vernichten sich gegenseitig und verwandeln sich in Energie, aus der neue Teilchen entstehen. Zwar sind die dabei erreichbaren Energien geringer als bei Protonenkollisionen, doch da die Anfangsbedingungen bei der Teilchenerzeugung im ILC genau bekannt sind und keine „Reste“ der Stoßpartner verbleiben, ist das Ergebnis viel einfacher auszuwerten als beim LHC. Der ILC ist damit eine echte Präzisionsmaschine und ergänzt den Protonenbeschleuniger LHC, der eher darauf spezialisiert ist, neue Teilchen überhaupt erst aufzuspüren, auf ideale Weise.

Rätselhaftes Universum

In jüngster Vergangenheit haben Experimente und Beobachtungen eine überraschende Erkenntnis zutage gebracht: Wir können nur vier Prozent des Universums erklären. Die Wissenschaftler nehmen an, dass die verbleibenden 96 Prozent aus unbekannter dunkler Materie und dunkler Energie bestehen und das Universum somit viel rätselhafter und vielfältiger ist als ursprünglich vermutet.

Dank seiner hohen Energien und seiner unerreichten Präzision wird der ILC einen völlig neuen Zugang zu den Geheimnissen

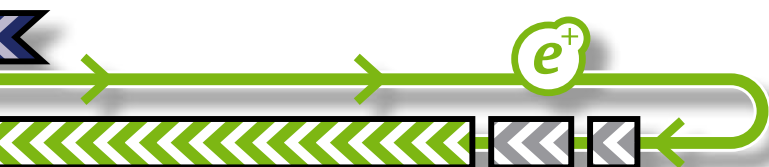
des Kosmos ermöglichen, der mit heutigen Anlagen unerreichbar ist. Gemeinsam könnten LHC und ILC einige der größten Rätsel des Universums lösen. Mit den Entdeckungen des LHC als Wegbereiter würde der ILC die fehlenden Teile des Puzzles liefern – und Antwort geben auf die zentralen Fragen unseres Jahrhunderts zur Natur von Materie, Energie, Raum und Zeit sowie zur dunklen Materie, dunklen Energie und Existenz von Extradimensionen.

DESY in Spitzenposition

Der ILC soll als globales Projekt gebaut und betrieben werden. Weltweit gab es mehrere Vorschläge für eine solche Anlage, die sich durch die Wahl der Beschleunigertechnologie unterschieden. Nach intensiver Begutachtung entschied das Komitee, das die Teilchenphysik weltweit vertritt: Für den künftigen Linearbeschleuniger wird die supraleitende TESLA-Technologie eingesetzt, die DESY und seine internationalen Partner gemeinsam entwickelt haben (siehe Seite 48). Diese Technologie kommt auch bei dem Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY und dem Röntgenlaser European XFEL zum Einsatz, der derzeit in Hamburg und Schleswig-Holstein gebaut wird – ein Beispiel für erfolgreiche Synergien bei der Mehrfachnutzung einer komplett neuen Technologie. Die Voraussetzungen bei DESY sind also ausgezeichnet, um bei der Weiterentwicklung der supraleitenden Beschleunigertechnologie weiterhin an vorderster Front mitzuwirken.

Darüber hinaus beteiligen sich die DESY-Forscher auch an der Entwicklung weiterer wichtiger Elemente des ILC-Beschleunigers, zumeist im Rahmen internationaler Projekte wie der TESLA Technology Collaboration oder von EU-Projekten wie EUROTeV oder ILC-HiGrade, die von DESY koordiniert werden. Das Spektrum reicht von der Entwicklung von Dämpfungsringen und polarisierten Positronenquellen über Studien zur Strahldiagnostik, -dynamik und -stabilisation sowie Luminositätsoptimierung bis hin zur Vermessung von Bodenbewegungen und der Entwicklung eines globalen Beschleunigernetzwerks für die Fernkontrolle und -steuerung des Beschleunigers. Auch an der Konzeption und Entwicklung der Hochpräzisionsdetektoren, die die Teilchenkollisionen im ILC aufzeichnen sollen, wirken die DESY-Forscher maßgeblich mit. ●

Positronen



Linearbeschleuniger

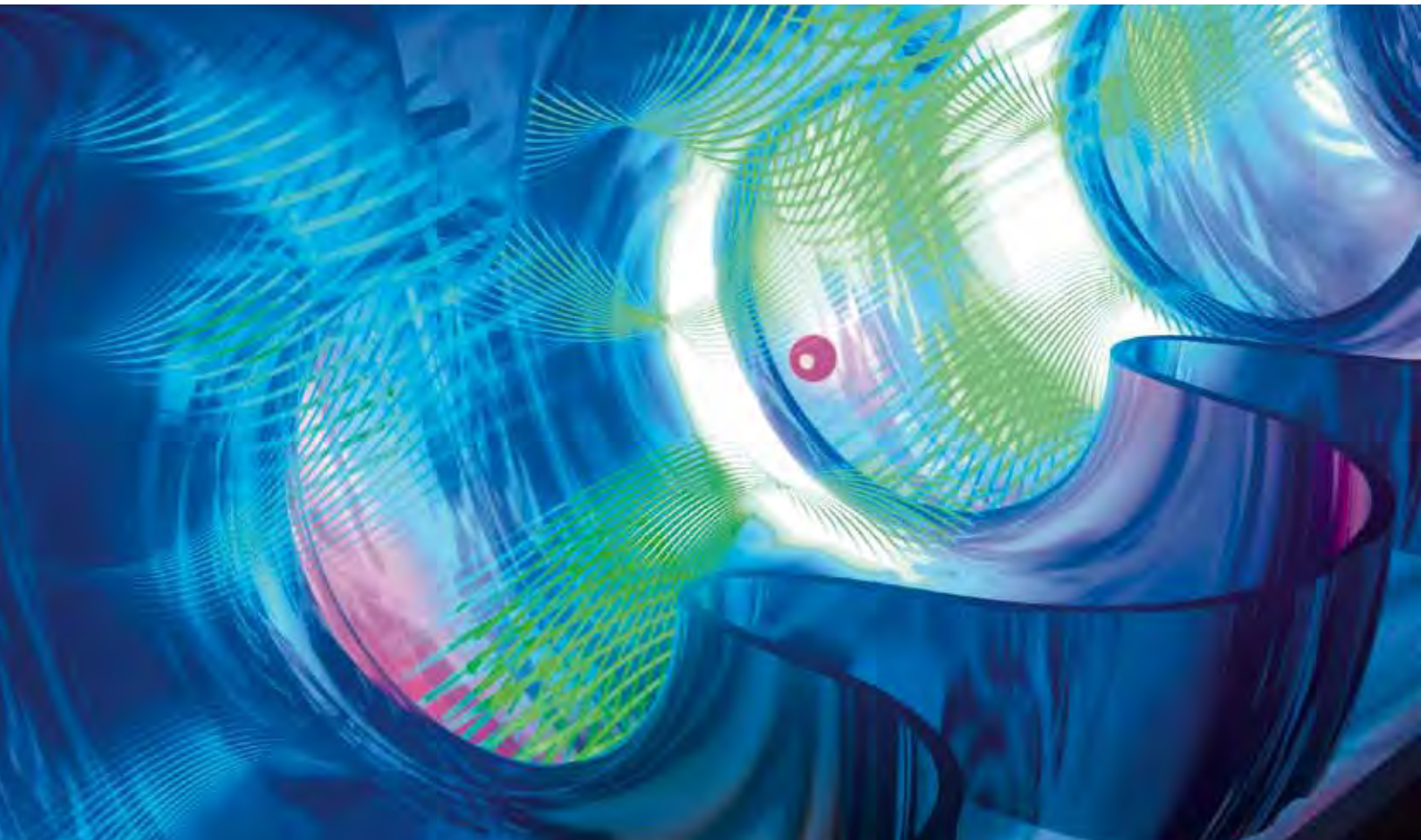
ILC

- > Elektron-Positron-Linearbeschleuniger
- > Länge: ca. 35 km
- > in Planung, Standort noch nicht festgelegt
- > zwei Experimente an einer Kollisionszone
- > Beteiligung: 2000 Wissenschaftler aus über 25 Ländern

KALT FRONT.

TESLA-Technologie Beschleunigertechnologie der Zukunft

Anfang der 1990er Jahre begannen bei DESY gemeinsam mit internationalen Partnern Entwicklungsarbeiten für eine bahnbrechende supraleitende Beschleunigertechnologie. Das Konzept war so erfolgreich, dass es bei der Technologieauswahl für das Zukunftsprojekt der Teilchenphysik, den Linearbeschleuniger ILC, das Rennen machte. Es ist gleichzeitig ideal für den Betrieb von Freie-Elektronen-Lasern im Röntgenbereich geeignet. Als einer der Hauptakteure spielt DESY bei der Weiterentwicklung der supraleitenden TESLA-Technologie eine zentrale Rolle.





Das TESLA-Projekt

Vor knapp 20 Jahren starteten weltweit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die nächste große Anlage für die Teilchenphysik: einen Linearbeschleuniger, der in der Lage sein soll, Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, bei Energien von 500 bis 1000 Milliarden Elektronenvolt (Gigaelektronenvolt, GeV) zum Zusammenstoß zu bringen. Unter der Federführung von DESY entwickelte die internationale TESLA Collaboration dazu ein Konzept, das auf supraleitende, aus dem Metall Niob gefertigte Resonatoren setzt. Diese supraleitende Technologie bietet bei der Beschleunigung der Teilchen entscheidende Vorteile – sie bedeutete allerdings gleichzeitig einen enormen Vorstoß in technologisches Neuland.

Damit unterschied sich das TESLA-Projekt deutlich von anderen Konkurrenzprojekten, bei denen Beschleunigungsstrecken in herkömmlicher, normalleitender Technologie zum Einsatz kommen sollten. Im Zuge der Entwicklungsarbeiten für TESLA stellte sich außerdem heraus, dass ein solcher supraleitender Linearbeschleuniger sich optimal als Treiber für einen Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich eignet. TESLA wurde deshalb als kombinierte Anlage geplant, die einen Linearcollider für die Teilchenphysik und einen integrierten Röntgenlaser für die Forschung mit Photonen beinhaltet.

Pionierarbeiten für TESLA

Um die Zukunftstechnologie für TESLA unter realistischen Bedingungen zu erproben, baute die TESLA Collaboration bei DESY einen funktionsfähigen Testbeschleuniger auf, an dem alle für den Betrieb eines supraleitenden Linearbeschleunigers notwendigen Komponenten getestet werden konnten: die 100 Meter lange TESLA-Testanlage TTF. Der fliegende Start der Anlage 1997 bestätigte den Erfolg der Entwicklungsarbeiten. Auf Anhieb übertrafen die ersten acht supraleitenden Niob-Resonatoren die ursprünglich vorgesehene Beschleunigungsfeldstärke von 15 Megavolt pro Meter (MV/m) – eine Weltpremiere und ein entscheidender Fortschritt, denn zu Beginn der Entwicklungsarbeiten erreichten supraleitende Resonatoren im Strahlbetrieb allenfalls 5 bis 8 MV/m. Bis heute konnte dieser Wert nochmals auf über das Doppelte gesteigert werden. Damit konnte die TESLA Colla-

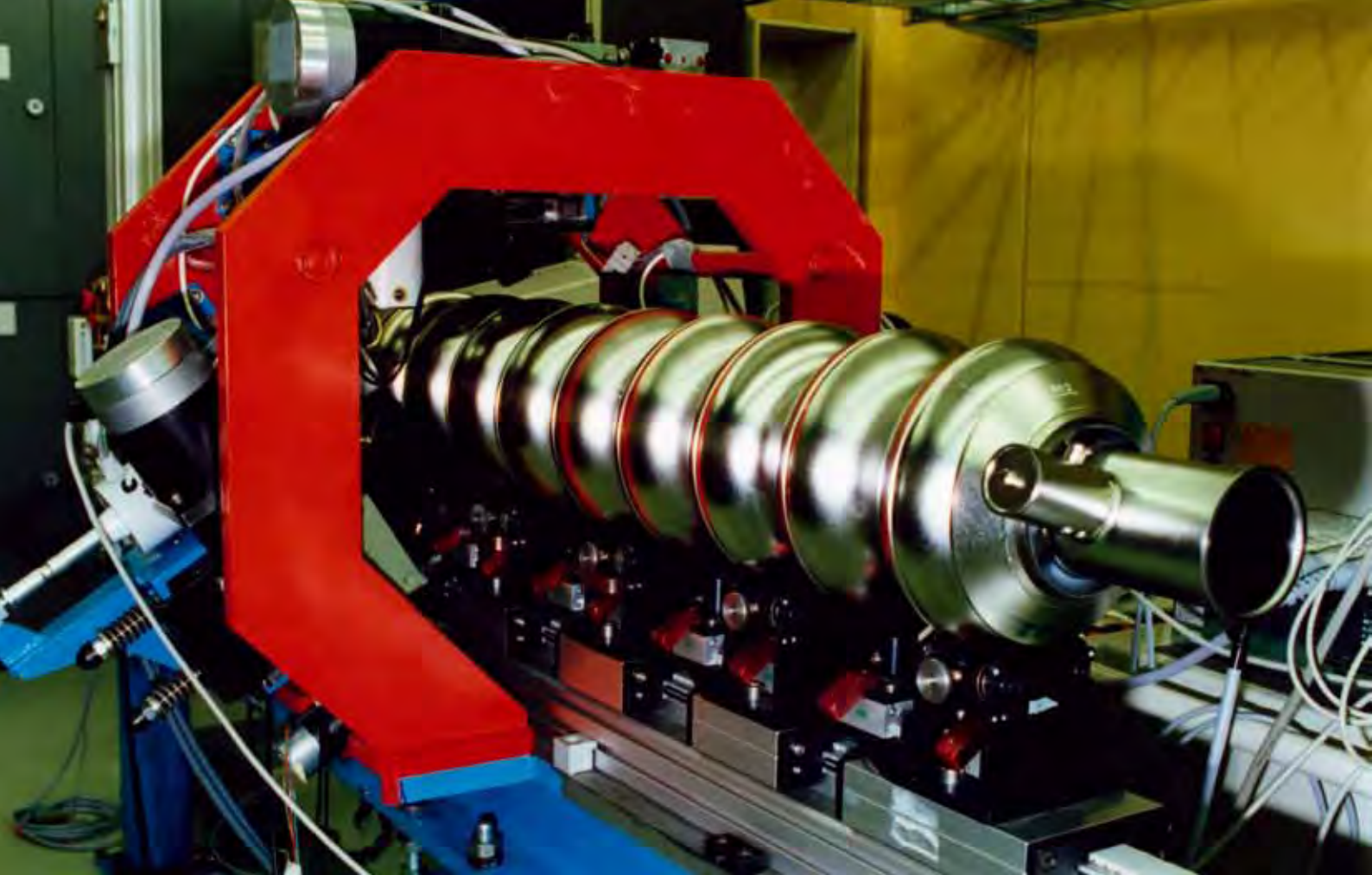
laboration die technische Machbarkeit eines supraleitenden Elektron-Positron-Linearbeschleunigers klar belegen.

Im nächsten Schritt demonstrierte das TTF-Team, dass auch der zweite Teil des TESLA-Projekts, der supraleitende Röntgenlaser, tatsächlich realisierbar ist. Der Beweis gelang Anfang 2000, als die zum Freie-Elektronen-Laser umgebaute Anlage erstmals Laserlichtblitze mit Wellenlängen unter 100 Nanometern erzeugte. Nachdem sie ihre Mission somit glänzend erfüllt hatte, wurde die Anlage zu FLASH, dem weltweit ersten Freie-Elektronen-Laser im weichen Röntgenbereich, ausgebaut. Seit 2005 steht sie Wissenschaftlern aus aller Welt für ihre Experimente zur Verfügung (siehe Seite 36).

Von TESLA zu European XFEL und ILC

Als Anfang 2003 die Entscheidung des Bundesforschungsministeriums anstand, fiel sie für den Röntgenlaser-Teil des TESLA-Projekts überaus positiv aus: Der Röntgenlaser wurde als eigenständige europäische Einrichtung im Grundsatz genehmigt; für den Linearcollider sollten dagegen erst die globalen Entwicklungen abgewartet werden. Faktisch wurden damit beide Projekte getrennt: Der Röntgenlaser wird unter dem Namen European XFEL mit starker Beteiligung von DESY in Hamburg und Schleswig-Holstein realisiert (siehe Seite 40); die Verantwortung für das Linearcolliderprojekt verschob sich auf das internationale Parkett.

Nach Begutachtung der verschiedenen eingereichten Beschleunigerkonzepte, unter ihnen auch TESLA, beschloss die zuständige internationale Kommission im Sommer 2004: Der zukünftige Linearbeschleuniger – nun offiziell als International Linear Collider ILC bezeichnet – wird in der von DESY und seinen Partnern entwickelten TESLA-Technologie realisiert. Seither laufen die Entwicklungs- und Planungsarbeiten für den ILC in weltweiter Zusammenarbeit auf Hochtouren. Über 2000 Wissenschaftler aus über 25 Ländern sind mittlerweile daran beteiligt. Als Experten auf dem Gebiet der supraleitenden Beschleunigertechnologie tragen DESY und seine internationalen Partner der – mittlerweile umbenannten – TESLA Technology Collaboration maßgeblich dazu bei.



● Test eines supraleitenden Niob-Resonators

Spitzenforschung bei DESY

Auf der supraleitenden TESLA-Beschleunigertechnologie beruhen also gleich drei verschiedene Anlagen: der knapp 300 Meter lange Freie-Elektronen-Laser FLASH, der 3,4 Kilometer lange Röntgenlaser European XFEL und der etwa 35 Kilometer lange Linearbeschleuniger ILC. So liefern auch der Betrieb von FLASH sowie der Bau und spätere Betrieb des European XFEL unentbehrliche Einsichten für den ILC – zum Beispiel zur Herausforderung, die anspruchsvolle Beschleunigertechnologie in Zusammenarbeit mit der Industrie bis zur Serienreife zu führen und in der erforderlichen hohen Qualität in großen Stückzahlen industriell zu fertigen.

Auch die Erfahrungen, die beim Bau des Tunnels für den European XFEL und dem Aufbau der Anlage in seinem Inneren gesammelt werden, kommen den Entwicklungsarbeiten für den ILC zugute. Insgesamt arbeiten über 200 Menschen bei DESY an FLASH, dem European XFEL und den Vorbereitungen für den ILC, und viele von ihnen sind in alle drei Projekte involviert – das schafft wichtige Synergieeffekte, die DESY unter den am ILC beteiligten Forschungszentren auszeichnen.

Vorteil Supraleitung

Die TESLA-Technologie basiert auf speziellen Beschleunigungsstrukturen (Resonatoren oder Kavitäten genannt) aus dem Metall Niob. Wenn dieses kälter als minus 264 Grad Celsius ist – Kälte, wie sie sonst nur im Weltraum herrscht –, verliert es seinen elektrischen Widerstand und leitet den Strom ohne Energieverlust, es wird supraleitend. Diese Eigenschaft bietet bei der Teilchenbeschleunigung große Vorteile: Die Leistungsverluste in den Wänden von supraleitenden Resonatoren sind verschwindend gering und nahezu die gesamte Leistung kann auf den Teilchenstrahl übertragen werden. Dies reduziert den Energieverbrauch erheblich. Zudem wird ein Teilchenstrahl von extrem hoher Qualität erzeugt, da die Resonatoren wegen des verschwindenden elektrischen Widerstands größer als bei normalleitender Bauweise gemacht werden können und dadurch weniger Störfelder auftreten. Die Elektronen können zu feinen, hochpräzisen Bündeln geschnürt werden, gleichzeitig lassen sich viele Elektronenpakete in schneller Folge beschleunigen.

Das Ergebnis ist ein Teilchenstrahl mit einem sehr kleinen Strahlquerschnitt und hoher Strahlleistung. Damit lässt sich eine besonders hohe Kollisionsrate der beschleunigten Elektronen und Positronen erzielen – beste Voraussetzungen also für neue Entdeckungen in der Teilchenphysik. Gleichzeitig ist

ein Teilchenstrahl mit sehr hoher Folgerate der Elektronenpakete optimal geeignet, um einen Freie-Elektronen-Laser im Röntgenbereich zu betreiben.

Allerdings ist die TESLA-Technologie überaus anspruchsvoll. Um die Beschleunigungsstrecke supraleitend zu machen, muss sie auf ganzer Länge mit flüssigem Helium auf minus 271 Grad Celsius gekühlt werden. Dazu werden die Niob-Resonatoren in so genannte Kryostate eingebaut – meterdicke, extrem gut isolierende Metallröhren, die neben acht Resonatoren auch die Transportleitungen für das flüssige Helium sowie verschiedene Komponenten für die Strahlführung und -kontrolle beinhalten. Heikel ist auch die Fertigung der supraleitenden Resonatoren. Schon winzige Unebenheiten oder auch Staubkörnchen auf ihrer Oberfläche reichen aus, um die Supraleitung zusammenbrechen zu lassen und die Resonatoren unbrauchbar zu machen. Deshalb werden die Beschleunigermodule in einem Reinraum gefertigt und montiert, einem Arbeitsbereich, der hunderttausendmal weniger Staub enthält als normale Stadtluft.

Höchste Feldstärken

Bei der Weiterentwicklung der TESLA-Technologie für den zukünftigen Einsatz im ILC-Beschleuniger ist ein wesentliches Ziel, die Beschleunigungsfeldstärke (Gradient) der supraleitenden Niob-Resonatoren zu erhöhen. Im ILC sollen die Elektronen und Positronen entlang der gesamten Strecke zuverlässig mit 31,5 Megavolt pro Meter (MV/m) auf Touren gebracht werden, damit sie schließlich die erforderliche Endenergie erreichen. Theoretisch sollte die Grenze der supraleitenden Technologie bei etwa 50 MV/m liegen. Vereinzelt konnten bereits einzellige Resonatoren mit bis zu 43 MV/m hergestellt werden. Neunzellige Kavitäten, wie sie für den ILC vorgesehen sind, erreichen bisher im Einzeltest bis zu 40 MV/m, in Achtergruppen innerhalb der Beschleunigermodule rund 30 MV/m. Wie sich der Gradient zuverlässig reproduzieren lässt bis zum ILC-Wert steigern lässt, wird auch bei DESY intensiv studiert. Dabei spielen sowohl der Herstellungsprozess als auch die Oberflächenbehandlung der Niob-Resonatoren eine wichtige Rolle.

So müssen die Innenseiten der Resonatoren zum Beispiel extrem glatt und sauber sein. Schon eine Unebenheit von nur wenigen Mikrometern kann durch lokale Überhöhung des elektromagnetischen Feldes zu einer Wolke von Elektronen im Inneren der Kavität führen, die beim Auftreffen die Oberfläche erwärmt, bis schließlich die Supraleitung zusammenbricht. Zusammen mit internationalen Partnern entwickelten DESY-Wissenschaftler deshalb die Methode der Elektropolitur, bei der eine Säuremischung unter Stromfluss die Niob-Oberfläche spiegelblank poliert. Die Ergebnisse sind vielversprechend: Die elektropolierten Oberflächen sind wesentlich glatter und damit auch sauberer als diejenigen, deren Verunreinigungen mit dem konventionellen Verfahren der chemischen Beizung beseitigt werden, so dass die Supraleitung erst bei deutlich höheren Feldstärken verloren geht. Diese Technologie wurde inzwischen in die Industrie transferiert und wird bei der

Fertigung der Resonatoren für den European XFEL zum Einsatz kommen.

Neue Produktionsverfahren

Eine weitere Überlegung, wie sich die Qualität und damit der Gradient der Beschleunigungsstrukturen erhöhen lassen, ist, die Resonatoren aus großen Niob-Kristallen oder sogar Niob-Einkristallen zu fertigen. In herkömmlichem, polykristallinem Niob ist das Kristallgitter nicht gleichmäßig ausgebildet, was Brüche und unterschiedliche Orientierungen im Gitter verursacht. Diese Korngrenzen können die Leistungsfähigkeit eines Resonators reduzieren. Große Kristalle mit weniger Korngrenzen bzw. Einkristalle, bei denen alle Niob-Atome in einer homogenen, gleich ausgerichteten Schicht des Kristallgitters vorliegen, führen zu deutlich glatteren und saubereren Oberflächen. Diese Technologie könnte eine bessere Reproduzierbarkeit garantieren und die Schwankungsbreite der Gradienten unterschiedlicher Kavitäten verringern.

Bereits die ersten Prototypen, die aus großen Niob-Kristallen bzw. Niob-Einkristallscheiben gefertigt wurden, zeigten ausgezeichnete Ergebnisse. So ist es den DESY-Forschern in Zusammenarbeit mit der Firma ACCEL gelungen, aus einem Niob-Einkristall einen einzelligen Resonator zu bauen, der im Test Beschleunigungsgradienten von rund 40 MV/m erreichte. Eine besondere Herausforderung ist dabei das Zusammenschweißen der Resonatorhalbzellen: Die Niob-Atome in den Halbzellen müssen exakt die gleiche Orientierung besitzen, damit auch an den Schweißnähten keine Korngrenzen entstehen. So bleibt die einkristalline Struktur erhalten, die komplette Resonatorzelle besteht also aus einem Einkristall. Das von DESY/ACCEL entwickelte Fertigungsverfahren ist mittlerweile erfolgreich patentiert.

Da die Herstellung von Niob-Einkristallen allerdings immer noch sehr teuer ist, eignet sich die Einkristall-Technologie bisher nicht für die Serienfertigung der ILC-Resonatoren. Deshalb konzentrieren sich die Forscher derzeit auf die Fertigung und Optimierung von Kavitäten aus großen Niob-Kristallen, die sich einfacher und kostengünstiger produzieren lassen. Einige neunzellige Resonatoren gibt es hier bereits, der beste von ihnen erreicht vielversprechende 38 MV/m.

Beschleunigermodule auf der Testbank

Nur die Niob-Resonatoren zu optimieren, reicht natürlich nicht aus, um die ILC-Spezifikationen zu erreichen. Wie bei FLASH und dem European XFEL werden im ILC voraussichtlich jeweils acht Kavitäten zu einem Beschleunigermodul zusammengefügt, das nicht nur die Kühlung der Resonatoren auf minus 271 Grad Celsius erlaubt, sondern auch zahlreiche weitere wichtige Elemente enthält: Einkoppler für das hochfrequente elektromagnetische Feld, das die Teilchen beschleunigt, Antennen zur Dämpfung von störenden elektromagnetischen Schwingungen, Magnete zur Fokussierung des Strahls, Diagnoseinstrumente zur Messung von Strahlage und Strahlstrom, jede Menge Kabel usw. All diese Elemente



müssen Höchstleistungen erbringen, optimal aufeinander abgestimmt sein und stellenweise bis auf den zehntel Millimeter genau zusammenpassen.

Um die Beschleunigermodule für FLASH, den European XFEL und den ILC auch unabhängig vom Betrieb der FLASH-Anlage testen und optimieren zu können, wurde bei DESY 2007 ein neuer Teststand in Betrieb genommen, der im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprogramms für den European XFEL sowie teilweise mit EU-Mitteln des EUROFEL-Projekts finanziert wurde. Zum ersten Mal können hier die vollständigen, 12 Meter langen supraleitenden Module vor ihrem Einbau in den FLASH-Linearbeschleuniger untersucht und für den Betrieb vorbereitet werden. Das schafft nicht nur wertvolle Nutzerzeit an FLASH, die sonst für die Modulüberprüfung hätte aufgewendet werden müssen, sondern ermöglicht auch schnelle Prototypentests für den European XFEL und den ILC. Ein weiterer Vorteil: Die Experten sammeln Betriebserfahrung mit den Modulen, die ihnen später beim European XFEL und ILC zugute kommen wird.

Kälteschocks ...

Seit der Inbetriebnahme läuft der Teststand auf Hochtouren. Mit dem ersten überprüften Modul wurde unter anderem ein Test mit besonders vielen Warm-Kalt-Zyklen durchgeführt: Zehnmal wurde es auf minus 271 Grad Celsius gekühlt und wieder auf Raumtemperatur erwärmt, um das Verhalten aller Teile in seinem Inneren unter diesen extremen Bedingungen zu studieren. So stellen zum Beispiel die Einkoppler kältetechnische Wärmebrücken dar, da hier die Umgebungswärme leichter in das Modul hineingelangen kann. Wie der Test zeigte, liegt die zusätzliche Wärmelast der Koppler jedoch unterhalb der erlaubten Höchstwerte. Erfreulich war auch, dass die große Zahl von Vakuumverbindungen selbst unter der starken Belastung dieser thermischen Zyklen leckdicht blieb.

Schon kleinste Bewegungen der Modulkomponenten aufgrund der Temperaturveränderungen können die Qualität der beschleunigten Teilchenstrahlen verschlechtern – selbst wenn es sich nur um Bruchteile eines Millimeters handelt. Mit Sensoren im und auf dem Modul wurde deshalb gemessen, ob innerhalb des Moduls Schwingungen auftreten und wie sehr sich die Komponenten relativ zueinander verschieben – bei Raumtemperatur, bei minus 271 Grad Celsius, mit und ohne Hochfrequenz und sogar mit vorbeifahrenden Lastwagen.

Wie die Messungen zeigten, führen externe Anregungen aufgrund der Aufhängung der Module nicht zu Schwingungen der Beschleunigerstrukturen selbst. Das Design der Module ist in dieser Hinsicht ausgezeichnet, so der Schluss der Schwingungstestgruppe. Die durchgeführten Messungen sind auch für die Standortfrage für den ILC von großer Bedeutung: In Verbindung mit Bodenbewegungsdaten von verschiedenen möglichen Standorten lässt sich damit genau vorhersagen, wie sich der Beschleuniger am jeweiligen Standort bewegen würde – ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl eines geeigneten Standorts für den ILC.



● Vorbereiten der Endabnahmetests der supraleitenden Resonatoren



● Ein Beschleunigermodul enthält je acht auf minus 271 Grad Celsius gekühlte supraleitende Resonatoren.



Crash-Tests ...

Das Schlimmste, was bei einem auf tiefste Temperaturen gekühlten Beschleunigermodul unter Vakuum passieren kann, ist ein Zusammenbruch der verschiedenen Vakuumsysteme. 2008 stand deshalb eine weitere wichtige Untersuchung bei DESY an: eine Reihe von Crash-Tests, bei denen unterschiedliche Katastrophenszenarien unter kontrollierten Bedingungen durchgespielt wurden. Dabei wurden insbesondere kleine und große Vakuumschlecks in den Isolierschichten und im Strahlrohr des Moduls simuliert, indem beide mal mehr, mal weniger schnell mit Luft geflutet wurden. Ziel war es sicherzustellen, dass die Module den Bestimmungen der europäischen Druckbehälterrichtlinien entsprechen und eventuell auftretende Probleme im Falle eines Falles auf das Innere des Beschleunigermoduls beschränkt bleiben. Darüber hinaus sollte festgestellt werden, ob die vorgesehenen Sicherheitsmaßnahmen effizient sind – ob zum Beispiel die Sicherheitsventile an den richtigen Stellen angebracht sind – und welche Komponenten im Notfall Schaden nehmen würden und ersetzt werden müssten.

Erster Eindruck beim Crash-Test waren ein lauter Knall und eine große Wolke an den Sicherheitsventilen: Wenn Luft mit Raumtemperatur in das etwa 300 Grad Celsius kältere Beschleunigermodul strömt, so friert sie augenblicklich aus und kondensiert an den kalten Oberflächen. Die Kondensationsenergie wird auf das flüssige Helium übertragen, das die Resonatoren auf minus 271 Grad Celsius kühlt. Das Helium verdampft schlagartig und entweicht durch die Sicherheitsventile. Bei diesem Test strömt die Luft nahezu mit Schallgeschwindigkeit in das Modul ein, was den Lärm erklärt.

Der Crash-Test des Isoliervakuums verursachte erfreulicherweise nur geringe Schäden an den Außenhüllen der Isolierung und dem äußeren Kälteschild. Das Modul konnte sofort wieder heruntergekühlt werden, die Resonatoren zeigten keine Leistungsverluste. Besonders interessant für die Forscher war jedoch das Fluten des Strahlrohrs und der Kavitäten selbst. Dabei stellte sich heraus, dass die warme Luft immerhin fünf Sekunden braucht, um von einem Ende des Moduls zum anderen zu strömen. Dies bedeutet, dass im Fall eines Luft-einbruchs einige Sekunden Zeit bleibt, um die Strahlrohr-

ventile zu schließen und damit so viele Resonatoren wie möglich zu schützen. Auch die Auswirkungen auf das Kühlsystem waren deutlich geringer als befürchtet. Wie erwartet hatten sich die Gradienten der Resonatoren nach dem Fluten des Strahlvakuums bei der Wiederinbetriebnahme deutlich verringert. Dennoch zeigte der Test, dass ein Luft-einbruch dieses Ausmaßes den Beschleunigerbetrieb nicht komplett lahmlegen würde, solange nur einige Resonatoren betroffen bleiben. Nach einem solchen Vorfall könnte die Luft einfach wieder abgepumpt und die Anlage wieder eingeschaltet werden.





... und Bauanleitungen

Um die Serienproduktion der Beschleunigermodule für den European XFEL und später den ILC vorzubereiten, wird bei DESY intensiv daran gearbeitet, das über Jahrzehnte hinweg erworbene Wissen über den Bau der Module weiterzugeben. Schließlich wird der European XFEL rund 100 solcher Module benötigen, der ILC knapp 2000 – bald müssen also Teams aus der ganzen Welt in der Lage sein, Tausende Beschleunigermodule zusammenzubauen. Deshalb waren bereits zahlreiche Zaungäste aus Japan, Korea und den USA sowie Vertreter aus der Industrie bei DESY, um dem Montageteam über die Schulter zu schauen und den Zusammenbau der

Module mitzuverfolgen. Insbesondere für die Industrie stellt sich dabei die Frage, wie der Prozess in die Serienfertigung überführt werden kann bzw. welche Arbeitsschritte dazu verändert oder verbessert werden sollten.

Für den Zusammenbau der Module wurde eine detaillierte Bauanleitung erstellt. Sie ist hochkomplex: 1200 Einzelteile gilt es mit höchster Präzision und unter schärfsten Reinheitsbedingungen zusammenzufügen. Von der Produktion der supraleitenden Resonatoren über den Zusammenbau im Reinraum, das Montieren der Koppler, Antennen und Testgeräte muss alles bis ins Detail genau dokumentiert werden, denn jeder der vielen großen Arbeitsabschnitte umfasst Hunderte einzelne Arbeitspakete.

Erste Nutznießer der Bauanleitung waren im Herbst 2007 die Physiker, Techniker und Ingenieure bei Fermilab in den USA, die mit tatkräftiger Unterstützung der DESY-Experten lernten, die 1200 von DESY angelieferten Einzelteile zu einem Modul zusammenzusetzen – das erste Beschleunigermodul, das nicht bei DESY zusammengebaut wurde. Von dieser Zusammenarbeit profitierte nicht nur Fermilab. Auch die DESY-Mannschaft sammelte wertvolle Erfahrungen, wie sich ihr Spezialwissen am effizientesten vermitteln lässt.

Mittlerweile wurden die ersten beiden Prototyp-Kryostate – die „Hülle“ der Module mit einem Großteil der Kältetechnik – für den European XFEL in der Industrie gefertigt, ein weiterer Kryostat wurde vom chinesischen Forschungszentrum IHEP beigesteuert. Die vollständigen Module werden anschließend bei DESY zusammengebaut; später wird das Forschungszentrum CEA in Saclay, Frankreich, diese Aufgabe übernehmen. Damit beginnt die Serienfertigung für den European XFEL. Die Erfahrung, die DESY, die anderen Forschungszentren weltweit und die Industrie dabei gewinnen, wird auch dem ILC entscheidend zugute kommen. ●



● Einbau eines Beschleunigermoduls
in den Freie-Elektronen-Laser FLASH

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

IMPRESSUM.

Herausgeber

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

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

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

Autorin

Ilka Flegel, Textlabor, Jena

Realisation und Redaktion

Ute Wilhelmsen
Ilka Flegel, Textlabor, Jena

Design

Jung von Matt/brand identity GmbH, Hamburg

Layout

Heike Becker

Druck

HeigenerEuroprint GmbH, Hamburg

Redaktionsschluss

April 2010

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

Fotos und Grafiken

DESY
European XFEL
Lars Berg, Münster
Frank Bierstedt, Meine
form one visual communication
Peter Ginter, Lohmar
Marc Hermann, Tricklabor
Kontor B3, Hamburg
Rüdiger Nehmzow, Düsseldorf
David Parker, Science Photo Library, London
Dominik Reipka, Hamburg
Reimo Schaaf, Hamburg
Christian Schmid, Hamburg
Manfred Schulze-Alex, Hamburg
Thomas Schwörer, Hamburg
Option Z, Thomas Plettau, Frankfurt



Deutsches Elektronen-Synchrotron Ein Forschungszentrum 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.

Sie ist mit 30 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in 16 Forschungszentren und einem

Jahresbudget von rund 3 Milliarden Euro die größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands. Ihre Arbeit steht in der Tradition des großen Naturforschers Hermann von Helmholtz (1821–1894).

www.helmholtz.de