

Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB

Leiter: J. R. Schneider, DESY

Das Jahr 2003 war für die Wissenschaftler, die Forschung mit Synchrotronstrahlung durchführen, von besonderer Bedeutung, wie bereits in der Übersicht beschrieben. Im Februar kündigte die Bundesregierung den Bau von zwei neuen Großgeräten bei DESY an, die in diesem Bereich überaus spannende Perspektiven eröffnen:

- **PETRA III:** eine Speicherring-Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation für harte Röntgenstrahlung;
- Das **europäische Röntgenlaserlabor XFEL** in TESLA-Technologie. Die Bundesregierung hat sich bereit erklärt, 50% der Baukosten für die Anlage zu übernehmen.

Als Synchrotronstrahlungsquelle für harte Röntgenstrahlung mit der weltweit kleinsten Emittanz wird der Ausbau des PETRA Speicherrings zu **PETRA III** Strahlung höchster Brillanz mit einem Grad an Kohärenz liefern, der wesentlich höher ist als heutzutage möglich. Besondere Bemühungen werden dabei darauf verwendet, den Strahl auf Querschnitte im Nanometerbereich zu fokussieren, um Strukturuntersuchungen von Materialien zu ermöglichen, deren physikalische Eigenschaften sich auf diesen Längenskalen verändern. Die geringen Strahlquerschnitte werden es außerdem erlauben, Proteinkristallographie an extrem kleinen Kristallen, wie zum Beispiel Membran-Molekülen, durchzuführen.

Das **europäische Röntgenlaserlabor XFEL** beruht auf einem in supraleitender Technologie gebauten Linearbeschleuniger. Die Undulatoren werden lateral kohärente Röntgenstrahlen mit Wellenlängen von ca. 0,1 nm liefern. Die Spitzenbrillanz des Freie-Elektronen Lasers ist dabei etwa neun Größenordnungen höher als diejenige von Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation. Da die Photonen in Blitzen von etwa 50 Femtosekunden Dauer abgegeben werden, wird es diese An-

lage erstmals erlauben, Änderungen der lokalen Struktur von Materie mit atomarer Auflösung in Echtzeit zu untersuchen. Damit hat sie das Potenzial, die Forschung mit kurzwelligen Photonen zu revolutionieren.

Auf der Grundlage dieser Entscheidungen der Bundesregierung hat DESY sein Programm für die Forschung mit Photonen in den Jahren 2005 bis 2009 ausgearbeitet. Dieses wird im Rahmen der **Programmorientierten Förderung der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF)**, in der 15 Forschungszentren zusammengeschlossen sind, im Frühjahr 2004 einer strategischen Begutachtung durch einen internen Gutachterausschuss unterzogen. Die Forschung mit Photonen bei DESY in den Jahren 2005 bis 2009 beruht auf vier Säulen:

- dem Speicherring DORIS III, vor allem für Experimente, die einen hohen Photonenfluss benötigen;
- dem Speicherring PETRA III, der für kleinste Emittanz und höchste Brillanz optimiert ist;
- der Freie-Elektronen Laser VUV-FEL, der lateral kohärente, extrem intensive Laserstrahlung im Wellenlängenbereich von 6 bis 100 nm mit Pulsdauern von ca. 100 fs liefern wird;
- dem europäischen Röntgenlaserprojekt XFEL, dessen Bau voraussichtlich 2006 beginnen wird und dessen Strahlführungen im Jahr 2012 in Betrieb genommen werden können.

Damit wird DESY nationalen und internationalen Wissenschaftlern ein einzigartiges Spektrum von herausragenden Anlagen für die Forschung mit Photonen bieten. Der Beschleuniger-Bereich bei DESY wird sich mehr und mehr auf die Entwicklung, den Bau und den Betrieb von beschleunigerbasierten Lichtquellen konzentrieren. Gestützt auf das starke Engagement der Nutzerschaft verfügt DESY zusammen mit seinen internationalen Partnern über außergewöhnliche Möglichkeiten, Fortschritte im Bereich von beschleunigerbasier-

ten Lichtquellen und der Forschung mit Photonen zu erzielen.

In Vorbereitung auf die strategische Evaluierung durch die Helmholtz-Gemeinschaft hat ein Unterkomitee des Erweiterten Wissenschaftlichen Rats (ESC) von DESY die DESY-Aktivitäten im Bereich des Baus und der Nutzung von beschleunigerbasierten Photonenquellen in der Zeit von 2000 bis 2003 begutachtet und das für den Zeitraum 2005–2009 vorgeschlagene Programm evaluiert. Zusätzlich begutachtete das *Machine Advisory Committee* (MAC) von DESY im Juni 2003 die Aktivitäten des Beschleuniger-Bereichs. Beide Beurteilungen fielen sehr positiv und anregend aus, sie waren überaus hilfreich für die Ausarbeitung der DESY-Strategie für die Zeit bis 2009. An dieser Stelle sei den Mitgliedern beider Gutachtergruppen für ihr beeindruckendes Engagement und ihre Hilfe gedankt.

DESY wird **DORIS III** weiterhin mit den gleichen grundlegenden Parametern betreiben, dabei jedoch versuchen, die Brillanz durch Verringerung der Kopplung zu erhöhen. Wartungsarbeiten und stufenweise Verbesserungen der Leistung der Maschine sollen im Bereich der Strahlstabilität durchgeführt werden; zudem werden ältere Beschleunigerkomponenten und Infrastrukturelemente rechtzeitig ausgetauscht, um die Effizienz des Betriebes bei über 95% zu halten. Im Jahr 2003 lieferte DORIS III 4891 Stunden planmäßiger dedizierter Messzeit für Nutzer bei einer Betriebseffizienz von 95,9%. Für Experimente, die eine spezielle Zeitstruktur benötigen, wurde der Speicherring während etwa 11% der Betriebszeit mit reduzierter Bunchanzahl betrieben. Im Frühjahr wurden in einer Betriebsunterbrechung von 16 Wochen Arbeiten am Linearbeschleuniger des Injektors und am Interlock-System durchgeführt und drei neue Injektions-Kickermagnete im DORIS-III-Speicherring installiert. Damit sind nun alle Quadrupolmagnete von den Vakuumkammern entkoppelt. Dank einer neuen globalen Kontrolle der Strahlposition konnte die Stabilität des Strahls deutlich verbessert werden. Der Betrieb von **PETRA II** als Synchrotronstrahlungsquelle für Testexperimente war auf etwa 915 Stunden begrenzt.

Der Technische Design Report für **PETRA III** wird das Injektionssystem, den Aufbau des Speicherrings und der Experimentierhalle sowie die vorgeschlagenen Strahlführungen und Instrumente beschreiben. Der Bericht soll ab Februar 2004 verfügbar sein. Im Rahmen

des PETRA-III-Projekts plant DESY, sieben von 13 verfügbaren Undulatorstrahlführungen zu bauen und zu betreiben. Es wird damit gerechnet, dass der Bau und der Betrieb der übrigen sechs Strahlführungen durch andere Forschungseinrichtungen wie GKSS, EMBL und die Max-Planck-Gesellschaft finanziert und durchgeführt werden. Im Jahr 2007 wird der Umbau des PETRA-Rings beginnen, die Inbetriebnahme von Speicherring und Strahlführungen ist für Herbst 2008 vorgesehen. Der Nutzerbetrieb wird voraussichtlich im Frühjahr 2009 beginnen. Eine mit Experten von kürzlich gebauten Speicherring-Synchrotronstrahlungsquellen besetzte Untergruppe des *Machine Advisory Committee* von DESY wird den Technischen Design Report evaluieren und den Bau und die Inbetriebnahme von PETRA III begleiten. Nach einer ersten Begutachtung von PETRA III beschrieb die MAC-Untergruppe das Projekt als ein konzeptuell sehr kluges Design und eine kosteneffiziente Lösung für eine Weltklasse-Speicherringanlage der dritten Generation im Bereich der harten Röntgenstrahlung. Anfang 2004 soll ein externes Gutachterkomitee gebildet werden, das eine Empfehlung für die in der ersten Phase von PETRA III zu realisierenden Strahlführungen und Instrumente ausarbeiten soll. Laufende Diskussionen mit dem Management der ESRF werden sicherstellen, dass sich die beiden Anlagen weitgehend ergänzen.

Am **VUV-FEL** an der TESLA-Testanlage (TTF) richteten sich die wesentlichen Bemühungen in der Phase I auf den Bau und den verlässlichen Betrieb des in TESLA-Technologie gebauten Linearbeschleunigers und auf die Realisierung der Photonendiagnostik mit einer Puls-zu-Puls Messung der Intensität, der spektralen Verteilung sowie des Kohärenzgrades. Theoretische Simulationen beschreiben alle gemessenen Größen mit großer Präzision. Das vollständige theoretische Verständnis der statistischen Intensitätsschwankungen des SASE-FEL-Strahls erlaubt es, die Dauer der Photonenpulse zuverlässig auf indirekte Art und Weise zu bestimmen. In Zusammenarbeit mit einigen Gruppen werden weitere direkte Diagnoseinstrumente entwickelt. Ein erfolgreiches Experiment, in dem die Coulomb-Explosion von Xenon-Edelgasclustern unterschiedlicher Größe bei unterschiedlichen Intensitäten untersucht wurde, stellte einen Meilenstein für SASE-FELs dar. Es regte eine Reihe von theoretischen Arbeiten zur Erklärung der Ergebnisse an und wird in der wissenschaftlichen Gemeinschaft breit diskutiert.

Es wird erwartet, dass der **VUV-FEL in Phase II**, der sich derzeit im Bau befindet, zu einem Durchbruch sowohl bei der Technologie als auch bei den wissenschaftlichen Anwendungen führt. Erstes Ziel ist es, mit Hilfe des SASE-Prinzips Laserstrahlung im Wellenlängenbereich von 100 bis 6 nm zu erzeugen; die Sättigung bei 30 nm wird im Frühjahr 2005 erwartet. Für fast alle zu testenden technischen Komponenten werden rasche Fortschritte erwartet. Anfangs wird ein wesentlicher Teil der Betriebszeit für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Beschleuniger und FEL benötigt werden. Hauptziel ist es jedoch, den Nutzern in festgelegten Zeitintervallen den bestmöglichen Laserstrahl zur Verfügung zu stellen. Die Wissenschaftler sind sich einig darüber, dass diese neuartigen Experimente, die die außerordentlichen Eigenschaften von Freie-Elektronen-Lasern nutzen, ebenso neue technische Ansätze erfordern. Demzufolge ist es notwendig, auch verstärkt Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Röntgenoptik, der Photonenstrahldiagnostik, der Detektoren und der Datenverarbeitung durchzuführen.

Der Erfolg der SASE-FELs hängt stark von der Leistung des Elektronen-Injektors ab, der kurze Pulse mit hoher Ladungsdichte und sehr kleiner transversaler Emittanz erzeugen muss. Verschiedene Einrichtungen weltweit verfolgen diesbezüglich ein rigores Forschungs- und Entwicklungsprogramm, und auch DESY hat entschieden, in seinem zweiten Standort in Zeuthen bei Berlin eine Photoinjektor-Testanlage (**PITZ**) aufzubauen und zu betreiben. In enger Zusammenarbeit ist es DESY, dem Max-Born-Institut, BESSY und der TU Darmstadt bereits gelungen, eine erste Elektronenquelle erfolgreich zu entwickeln. Mit einer normierten mittleren Emittanz von 1,7 mm mrad entspricht sie den Spezifikationen für die VUV-FEL-Anlage.

Das **europäische Röntgenlaserprojekt XFEL** ist im Ergänzungsband zum Technischen Design Report für den TESLA-XFEL, der unter http://tesla.desy.de/new_pages/tdr_update/start.html zu finden ist, beschrieben. Derzeit wird das XFEL Projekt zusammen mit europäischen Partnern diskutiert, Änderungen im Vergleich zum ursprünglichen Vorschlag sind dabei zu erwarten. Im Auftrag des Europäischen Strategieforschums zur Forschungsinfrastruktur (*European Strategy Forum on Research Infrastructure* ESFRI) organisierte

DESY am 30. und 31. Oktober einen Workshop zu den „Herausforderungen des vorgeschlagenen europäischen Röntgenlaserlabors XFEL“. An dem Workshop nahmen 30, von acht ESFRI-Delegationen nominierte Experten aus dem Ausland teil. Sie kamen zu dem Schluss, dass zwar noch mehr Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sind, die technischen Lösungen jedoch in Reichweite sind, um die Parameter des vorgeschlagenen europäischen Röntgenlaserlabors XFEL zu gegebener Zeit zu erreichen. Am Vorabend des Workshops wurde der neue Standort für den XFEL im Hamburger Rathaus der Öffentlichkeit vorgestellt. Beginnend mit dem Injektor, der sich auf dem DESY-Gelände befindet, erstreckt sich die ungefähr 3,3 Kilometer lange Anlage in nordwestlicher Richtung bis zur Stadt Schenefeld in Schleswig-Holstein, in deren Süden die Experimentierhalle errichtet wird. Dieser Standort wird die Bildung von Synergien zwischen DESY und dem europäischen XFEL Röntgenlaserlabor begünstigen und es ermöglichen, die bestehende Infrastruktur zu nutzen. Das Gelände ist groß genug für spätere mögliche Erweiterungen der Anlage, und die Bodenvibrationen im Bereich des Switchyards und der Experimentierhalle sind sehr gering.

Der Bau und die wissenschaftliche Anwendung von Freie-Elektronen-Lasern im Röntgenbereich stellen eine große und spannende Herausforderung sowohl für die Beschleunigerspezialisten als auch für den potenziellen Nutzer dar. Deshalb verfolgt DESY für die Realisierung des europäischen Röntgenlaserlabors XFEL ein schrittweises Vorgehen, das in enger Zusammenarbeit mit dem *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC) erfolgt. Bei SLAC befindet sich die Strahlungsquelle *Linac Coherent Light Source* (LCLS) im Bau, ein SASE-FEL, der Röntgenstrahlen von 0,15 nm erzeugen und im Oktober 2008 betriebsbereit sein soll. Ein Vorläufer dieser Anlage ist die *Sub-Picosecond Light Source* (SPPS), die Röntgenstrahlungspulse von 80 fs Dauer erzeugt. An dieser Anlage wurden bereits erste Experimente erfolgreich durchgeführt, an denen auch Wissenschaftler von DESY beteiligt waren. Insgesamt werden bis Ende 2005 17 Monate Strahlzeit zur Verfügung stehen.

Die Gründung eines neuen **Zentrums für XFEL-Wissenschaften bei DESY** wird die hausinternen Forschungsaktivitäten im Bereich der Forschung mit Photonen in der bis 2009 laufenden Förderperiode

wesentlich verstärken. Dieses Zentrum wird als Ankerpunkt für die Vorbereitung der wissenschaftlichen Programme am VUV-FEL und dem geplanten europäischen XFEL Röntgenlaserlabor dienen und die Koordination der notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Undulatoren, Strahlführungen, Instrumentierung, Detektoren und Datenverarbeitung übernehmen. Die aktuellen Planungen sehen vor, bis zu 55 Wissenschaftler und Ingenieure einzustellen, darunter weitere Leitende Wissenschaftler (C4-äquivalent).

Neben der Realisierung der neuen Projekte PETRA III und XFEL behält der **HASYLAB-Nutzerbetrieb** inklusive der Aktivitäten am VUV-FEL höchste Priorität. Da die Fördergelder für den Betrieb bestehender Experimentierstationen durch die Verbundforschung drastisch gekürzt wurden, hat sich DESY bereit erklärt, den Betrieb einiger der Experimentierstationen zu übernehmen, die bisher sehr erfolgreich von externen Einrichtungen betrieben wurden. Das Forschungszentrum Geesthacht (GKSS) hat seine Außenstelle bei DESY eingerichtet und mit dem Bau des Zentrums für Materialforschung an der neuen HARWI-Strahlführung begonnen. An dieser errichtet das Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) außerdem eine Anlage zur Untersuchung von großvolumigen Proben bei hohen Drücken. Auf dem DESY-Gelände gab es noch weitere Bauaktivitäten: die EMBL-Außenstelle hat die Erweiterung ihrer Gebäude fertig gestellt und das Laserinstitut der Universität Hamburg ist in ihr neues Gebäude gezogen.

Im Jahr 2003 wurde eine Reihe von äußerst erfolgreichen **Workshops** und Fortbildungskursen für Studierende durchgeführt. Im Rahmen einer Serie von Forschungskursen über neue Forschung mit Röntgenstrahlung zog ein Kurs zur *Plasmaphysik mit Röntgenstrahlung* 42 junge Wissenschaftler und 13 hochkarätige Vortragende an. Das DESY-Sommerstudentenprogramm wurde 2003 in zwei Teile geteilt, deren Schwerpunkt jeweils auf der Elementarteilchenphysik bzw. der Forschung mit Photonen lag. Zu HASYLAB kamen 24 Studierende von insgesamt 56 Bewerbern, die sich für die Forschung mit Synchrotronstrahlung interessiert hatten. Ein internationaler Workshop zum *Einsatz von harter Synchrotron-Röntgenstrahlung für die Textur- und Spannungsanalyse*, ein DESY-ESRF-Treffen zu *Röntgendetektoren* sowie ein Industrieforum zur *In-Situ-Charakterisierung*

von katalytischen Prozessen wurden von HASYLAB-Wissenschaftlern organisiert.

Dr. Andreas S. Schwarz, Leitender Wissenschaftler bei DESY auf dem Gebiet der Teilchenphysik, übernahm wesentliche Verantwortlichkeiten im Projektmanagement des europäischen Röntgenlaserlabors XFEL, darunter die Vorbereitung für das Planfeststellungsverfahren für den neuen Standort. Dr. Gerhard Grübel von der ESRF in Grenoble wechselte zu DESY auf eine Stelle als Leitender Wissenschaftler im Bereich der Forschung mit Photonen. Sein Interesse gilt der Erforschung der Struktur und Dynamik von Systemen aus kondensierter Materie mit Hilfe von kohärenten Röntgenstrahlen, insbesondere der Untersuchung von langsamer Dynamik in komplexen Flüssigkeiten. Sein Aufgabenfeld umfasst dabei auch die Entwicklung von kohärenten Techniken und ihre Anpassung an Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation und FELs.

Die im Jahr 2003 erzielten Erfolge waren nur möglich dank der hohen Motivation der HASYLAB-Mitarbeiter, aller Kollegen bei DESY und der Mitarbeiter der verschiedenen Außenstationen bei DORIS. Die Zusammenarbeit mit unseren Nutzern und deren starkes Engagement für die Forschungseinrichtung sind entscheidend für den Erfolg des Labors und werden von uns hoch geschätzt. Gemeinsam sehen wir faszinierenden Zeiten für die Forschung mit Photonen bei DESY entgegen.

Präzisionsmessung der Gitterparameter von Saphir ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) im Temperaturbereich 4,5 K bis 250 K mit dem Mößbauer-Wellenlängenstandard

Saphir ist ein viel versprechendes neues Material für Röntgenoptik, besonders attraktiv für Anwendungen wie exakt rückreflektierende Spiegel in Interferometern, Monochromatoren und Analysatoren mit hoher Energieauflösung. Aus Gründen der Kristallgittersymmetrie ermöglicht Saphir, im Gegensatz zu Silizium, exakte Rückstreuung mit hoher Reflektivität für Röntgenstrahlen im Energiebereich von 10 bis 50 keV.

Um reflektierte Strahlung mit einer bestimmten, vorgegebenen Energie zu erhalten, ist es erforderlich, die Gitterparameter des Saphirs und ihre Temperaturabhängigkeit genau zu kennen. Die bisherigen Messungen hierzu weisen jedoch große Abweichungen bis zu 10^{-4} auf. Damit ist die Vorauswahl der geeigneten Reflexe und der erforderlichen Kristalltemperatur recht unsicher. Das bei PETRA II durchgeführte Experiment [1] der Forschungsgruppe von Yu. V. Shvyd'ko (Universität Hamburg) erweitert die früheren Ergebnisse der Gitterparameter für den Bereich von 286 K bis 374 K [2] zu tieferen Temperaturen. Die Messungen haben eine Unsicherheit von weniger als 6×10^{-6} und ermöglichen daher eine wesentlich präzisere Vorauswahl geeigneter Reflexe. Der Temperaturbereich unterhalb 250 K ist besonders interessant, weil hier die thermische Ausdehnung von Saphir wesentlich geringer ist als bei Raumtemperatur. Dies führt zu weniger strengen Anforderungen an die Temperaturregelung, was vor allem für den Energiebereich oberhalb 30 keV wichtig ist. Weiterhin steigt die Wärmeleitfähigkeit von Saphir bei tiefen Temperaturen sehr stark an, mehr als bei jedem anderen für Kristalloptik geeigneten Material. Dadurch wird Saphir interessant als Material für Monochromatoren, die auch unter großer Wärmebelastung stabil arbeiten müssen. Solche werden bei den Synchrotronstrahlungsquellen der 4. Generation (XFEL, LCLS) erforderlich sein.

Die experimentelle Methode nutzt aus, dass der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge λ der reflektierten Strahlung und dem Abstand der Gitterebenen d_{hkl} im Kristall durch das Bragg'sche Gesetz $\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$ gegeben ist, welches sich bei exakter Rückstreuung, d.h. Reflexionswinkel $\theta = 90^\circ$ vereinfacht zu $\lambda = 2d_{hkl}$. Die Gitterparameter werden ermittelt aus Messungen der Wellenlänge exakt rückreflektierter Strahlung. Zu diesem Zweck verwenden wir im Experiment einen *channel-cut*-Kristall aus Silizium, das so genannte λ -meter. Durch Rotation dieses Kristalls um den Winkel ψ ändert sich die Wellenlänge der transmittierten Strahlung. Dieses Instrument wird während des Experiments in Einheiten der Wellenlänge λ_M der Mößbauer-Strahlung des Eisenisotops ^{57}Fe [2] kalibriert. Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 59 gezeigt (Yu. V. Shvyd'ko et al., *J. Synchrotron Rad.* 9, 17 (2002)). In dem Experiment sind 3 unbekannte Größen zu bestimmen: die beiden Gitterparameter a und c des Saphir-Kristalls, sowie der Gitterebenenabstand im *channel-cut*-Kristall.

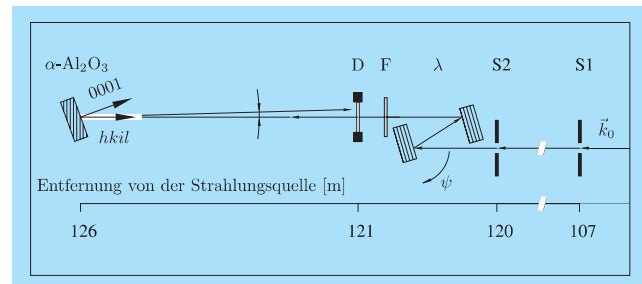


Abbildung 59: Aufbau des Experiments. \vec{k}_0 : einfallende Synchrotronstrahlung; S1, S2: Spalte zur Kollimierung des Stahls; λ : *channel-cut*-Kristall aus Silizium (λ -meter); ψ : Rotationswinkel des λ -meters; F: ^{57}Fe -Folie; D: semitransparenter Detektor; Al_2O_3 : Saphir-Einkristall; 0001: parallel zur Oberfläche stehende Gitterebenen, $hkil$: senkrecht zum Strahl stehende Gitterebenen.

Daher sind mindestens drei Messungen der Differenz der Rotationswinkel, bei denen das λ -meter die rückreflektierte Strahlung von drei verschiedenen Bragg-Reflexen mit unterschiedlichem d_{hkl}^1 im Saphir oder die Mößbauer-Strahlung des ^{57}Fe durchlässt, erforderlich.

Man erhält ein nichtlineares Gleichungssystem, aus dem mittels numerischer Verfahren die drei Unbekannten aus den drei Winkeldifferenzen berechnet werden können. Die Messungen und Berechnungen werden für mehrere Temperaturen im gewünschten Bereich wiederholt. Als Ergebnis erhält man zunächst den jeweiligen Gitterparameter in Einheiten der Mößbauer-Wellenlänge λ_M . Zur Umrechnung in SI-Einheiten wird der bekannte Wert $\lambda_M = 86,025474(16)$ pm verwendet (Yu. V. Shvyd'ko et al., *Phys. Rev. Lett.* 85, 495 (2000)). Die Ergebnisse sind in Abbildung 60 gezeigt. Die relativen Messfehler sind kleiner als 6×10^{-6} . Im Rahmen der Messgenauigkeit folgt die thermische Ausdehnung dem Debye-Modell, nach welchem der lineare Ausdehnungskoeffizient bei tiefen Temperaturen proportional zu T^3 und bei hohen Temperaturen konstant ist. Die Ergebnisse ermöglichen die Auswahl von Bragg-Reflexen und geeigneten Temperaturen für einen hochauflösenden rückstreuenden Saphir-Monochromator. Für Temperaturen oberhalb 50 K ist es nun möglich, durch Auswahl eines Reflexes mit $2d_{hkl}$ in der Nähe der

¹In der hexagonalen Gitterstruktur gibt man üblicherweise vier Indizes an, wobei gilt $h+k+i=0$.

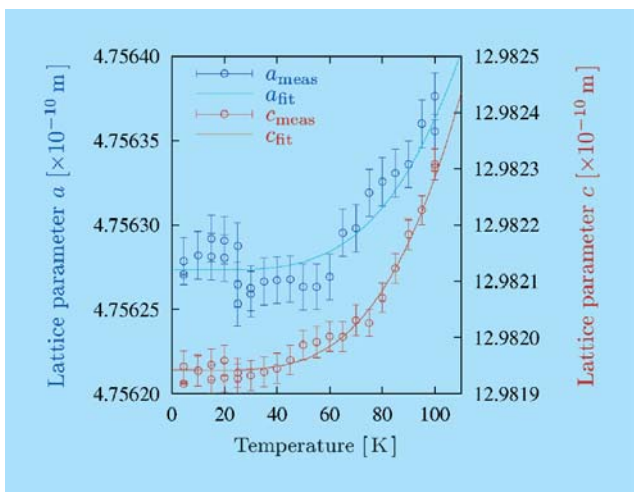


Abbildung 60: Gitterparameter von Saphir im Temperaturbereich unterhalb 100 K. Durchgezogene Linien: Debye-Modell der thermischen Ausdehnung.

gewünschten Wellenlänge λ und Feineinstellung der Temperatur, jede beliebige Energie zwischen 10 keV und 50 keV auszuwählen. Bei Temperaturen unterhalb 40 K sind die Gitterparameter von Saphir annähernd konstant, so dass man einen Satz fester Wellenlängen erhält, welche selbst bei größeren Temperaturschwankungen oder hoher Wärmebelastung stabil reflektiert werden.

- [1] M. Lucht et al., J. Appl. Cryst. 36, 1975 (2003)
- [2] Yu.V. Shvyd'ko et al., J. Synchrotron Rad. 9, 17 (2002)
- [3] Yu.V. Shvyd'ko et al., Phys. Rev. Lett. 85, 495 (2000)

Status des VUV-FEL

Nach Abschluss der Experimente an der Phase I der TESLA Test Facility (TTF) im November 2002 ist die gesamte Beschleunigeranlage für den Betrieb des VUV-FEL neu aufgebaut worden. Der VUV-FEL wird der erste Freie-Elektronen-Laser weltweit sein, der ultrakurze Strahlungspulse vom Vakuum-Ultraviolett (VUV) bis in den weichen Röntgenbereich mit Wellenlängen zwischen etwa 100 und 6 nm erzeugt und für wissenschaftliche Anwendungen zur Verfügung stellt.

Der Aufbau des Beschleunigers und des FEL ist schematisch in Abbildung 61 dargestellt, umgeben von einer Reihe von Photographien, die im Oktober und November 2003 entlang des Beschleunigers aufgenommen wurden und den Stand der Aufbauarbeiten zeigen. Abbildung 62 ist eine Photographie eines 1:50-Modells der Experimentierhalle und vermittelt einen Eindruck davon, wie es gegen Ende 2005 im Inneren der Experimentierhalle mit ihren fünf Experimentierplätzen aussehen wird.

Der gesamte Beschleuniger ist neu aufgebaut worden und enthält nun eine Reihe von wesentlichen Neuentwicklungen: Für die Injektion und Kompression der Elektronenpakete wurde ein völlig neues Konzept entwickelt, ein speziell entwickeltes Kollimatorsystem schützt den Undulator vor Beschädigung durch Strahlverlust, die Fokussierung des Elektronenstrahls im FEL erfolgt durch separate Quadrupoleinheiten zwischen den Undulator-Modulen und ist nicht mehr in die Magnetstrukturen der Undulatoren integriert, und für den Elektronen- und den Photonenstrahl wurden verbesserte und teilweise standardisierte Diagnostikeinheiten entwickelt. Nähere Einzelheiten finden sich in den HASYLAB Jahresberichten 2001 bis 2003.

Die neue Elektronenkanone wurde vor dem Einbau intensiv am Photoinjektor Teststand bei DESY Zeuthen (PITZ) getestet. Sie wurde bei maximalem Strom und den für den VUV-FEL nötigen Feldgradienten betrieben, und es wurde eine normierte mittlere Emittanz von 1,7 mm mrad gemessen. Dies ist deutlich kleiner als der Wert von 2 mm mrad, der für den VUV-FEL benötigt wird. Das Lasersystem für den Photoinjektor wurde ebenfalls erheblich verbessert, um einen stabilen, zuverlässigen Dauerbetrieb zu gewährleisten. Der Injektor wird zunächst ohne das 3,9 GHz-Beschleunigermodul betrieben werden, das für eine optimale Bunch-Kompression benötigt wird; es wird z. Zt. am Fermi National Laboratory entwickelt und voraussichtlich Anfang 2006 nachgerüstet. Dadurch wird der Wellenlängenbereich des FEL zunächst auf etwa 20–60 nm beschränkt sein. Aus diesem Grund wird anfangs auch nicht die volle Elektronenstrahlenergie benötigt, und es wurde daher beschlossen, zunächst nur fünf Beschleunigermodule einzubauen und das sechste ausschließlich mit den besten Hochgradienten-Resonatoren auszurüsten und dann später zusammen mit dem 3,9 GHz-Modul einzubauen.

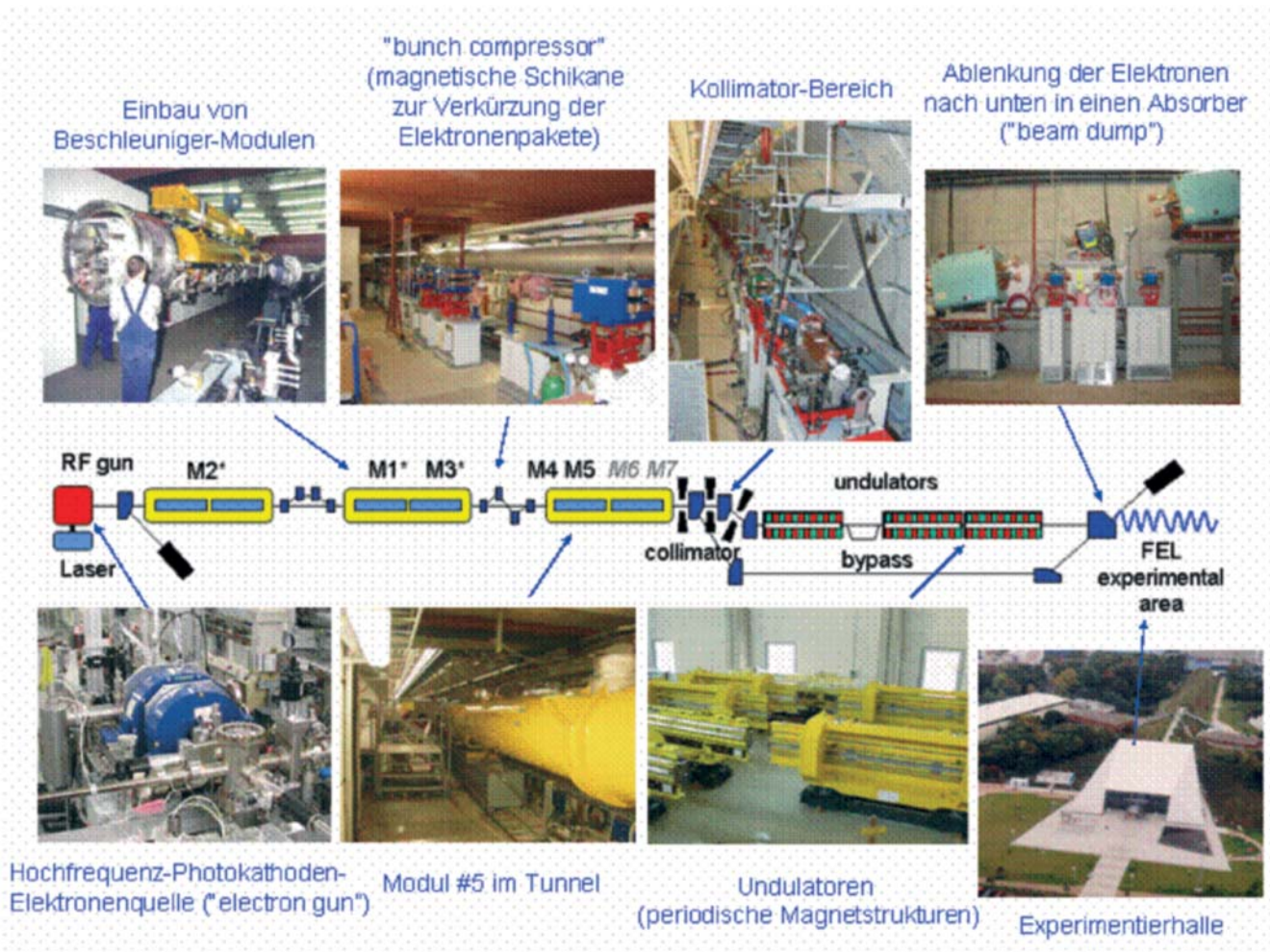


Abbildung 61: Schematischer Aufbau des Linearbeschleunigers und des FEL (Mitte) mit Photographien einzelner Komponenten und Abschnitte in der Einbauphase (Stand: Oktober 2003).

Die Komponenten der Photonenstrahldiagnostik, die schon in der Phase I zur Messung der Strahlintensität und des Strahlprofils benutzt wurden, sind für den VUV-FEL modifiziert worden und werden ganz am Ende des Beschleunigertunnels eingebaut, um die Inbetriebnahme des FEL zu erleichtern. Zusätzlich wird an dieser Stelle für die Inbetriebnahmephase ein Gitterspektrometer eingebaut, das den neuen Spektralbereich abdeckt und von der Universität Padua entsprechend umgebaut und leihweise zur Verfügung gestellt wird. Sobald der FEL stabil läuft, wird die Strahlung in die Experimentierhalle zu den Experimenten geführt. Die Strahlintensität und Position wird dort dann mit einem neu entwickelten Gas-Ionisationsdetektor gemessen, der den FEL-Strahl kaum merklich absorbiert

und praktisch unverändert zum Experiment durchlässt. Ebenso wird einer der Ablenkspiegel durch ein Beugungsgitter ersetzt, das 90% der Strahlung unverändert zum Experiment ablenkt und den Rest dispergiert und fokussiert, so dass gleichzeitig die spektrale Verteilung der Strahlung gemessen werden kann. Weitere Apparaturen zur Messung der Zeitstruktur sind in der Entwicklung.

Die Installationen werden im Sommer 2004 abgeschlossen, danach werden dann der Beschleuniger und der FEL in Betrieb genommen. Es wird erwartet, dass der FEL gegen Ende 2004 zum ersten Mal Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von etwa 30 nm abstrahlt, so dass nach einer gründlichen Charakterisierung der Ei-

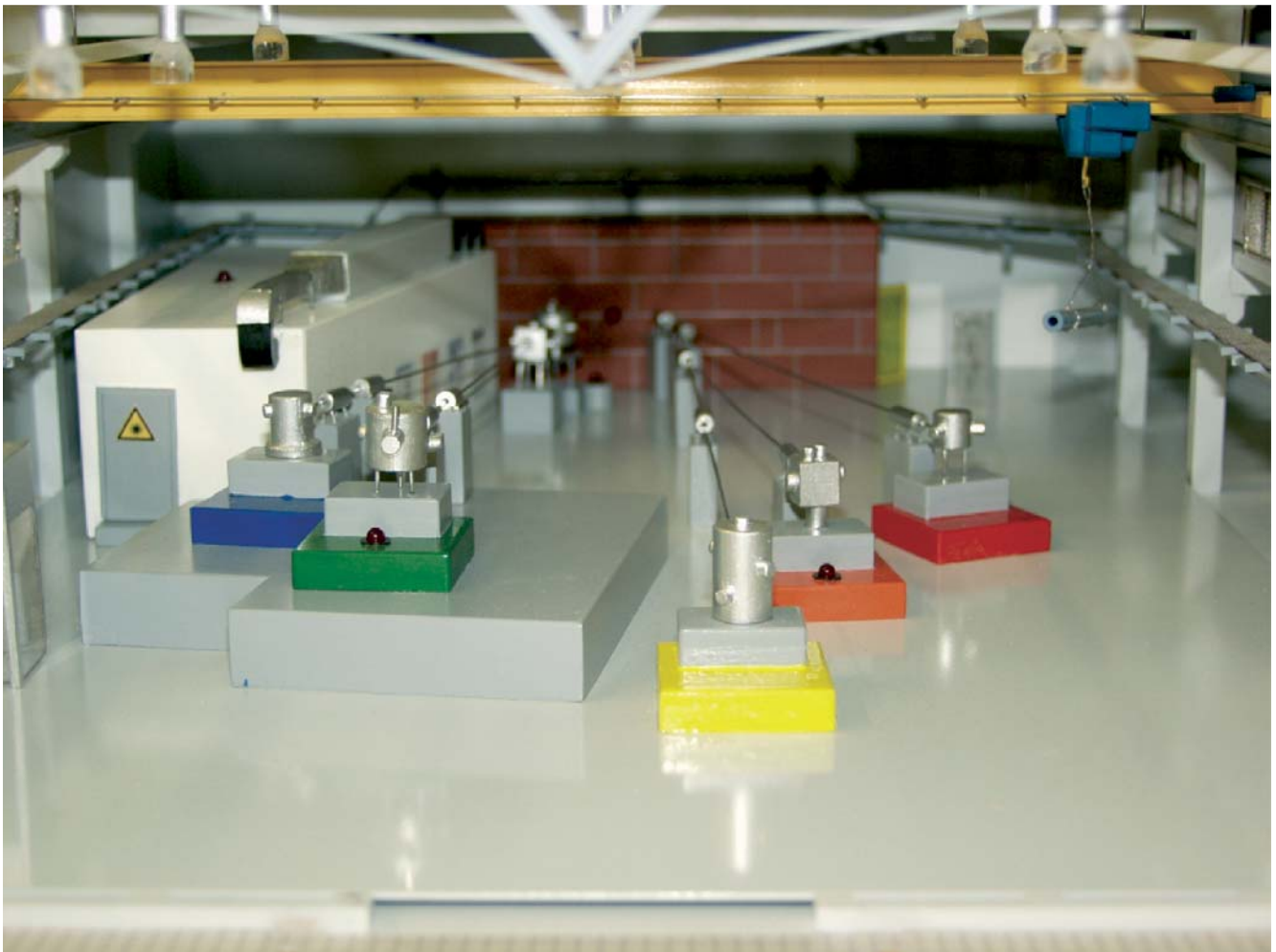


Abbildung 62: Blick in die Experimentierhalle (Photographie eines 1:50 Modells).

genschaften erste Nutzerexperimente im Frühjahr 2005 möglich wären. Bis dahin sollen zwei Experimentierstationen betriebsbereit sein: eine hinter einem hochauflösenden Plangitter-Monochromator und eine hinter einem Ellipsoidspiegel, der die Strahlung mit einem Durchmesser von etwa $20\ \mu\text{m}$ auf die Probe fokussiert. Zwei weitere Messplätze sollen bis Ende 2005 zur Verfügung stehen, um den FEL-Strahl optimal für verschiedene Experimente auszunutzen.

Status des PETRA III Projekts

Während des vergangenen Jahres wurden eine Reihe wichtiger Meilensteine auf dem Weg des Ausbaus

von PETRA III zu einer dedizierten Synchrotronstrahlungsquelle erreicht. Besonders hervorzuheben ist hier die Entscheidung des BMBF vom 5. Februar 2003, das PETRA III Projekt mit einer Fördersumme von 120 Mio. € zu unterstützen.

Die grundlegenden Parameter sowie das technische Design von PETRA III wurden bereits im Jahr 2002 festgelegt. In 2003 wurden die technische Planung des Speicherrings, der Strahlführungen und der Experimentierhalle im Detail ausgearbeitet und im PETRA III *Technical Design Report* (TDR) zusammengefasst, der Anfang 2004 fertiggestellt und veröffentlicht werden soll. Die Lage der neuen Experimentierhalle auf dem DESY-Gelände ist in Abbildung 63 skizziert.

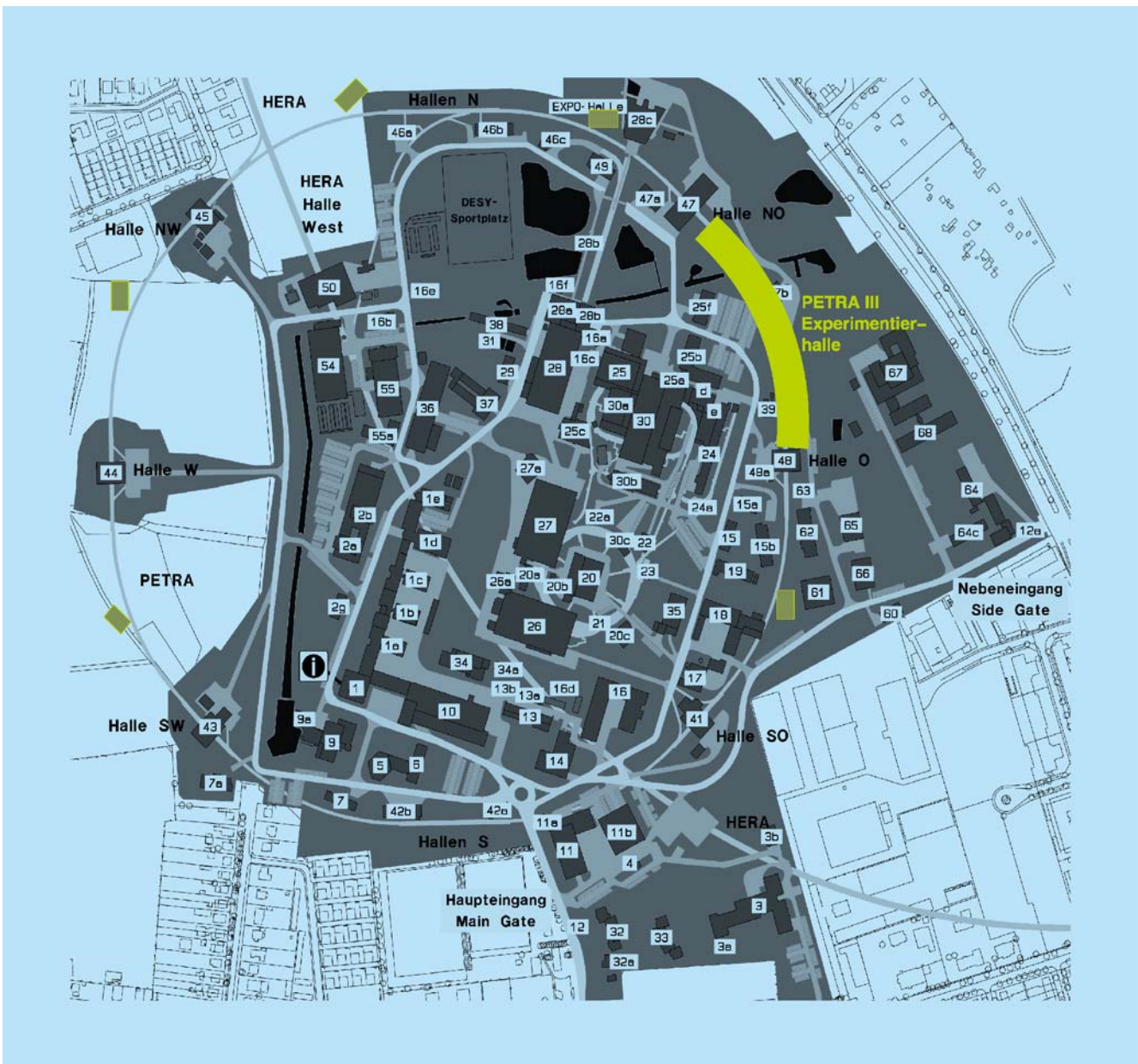


Abbildung 63: Lage der neuen Experimentierhalle von PETRA III zwischen den Gebäuden 47 und 48.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis für das PETRA III Projekt war die Festlegung der zukünftigen Stellenverteilung bei DESY im Rahmen des langfristigen Personalentwicklungsplans. Dies wird einen effizienten Betrieb der Strahlführungen und Experimente an PETRA III ermöglichen, ähnlich wie an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble.

Im November 2003 wurde das Konzept des zukünftigen PETRA III Speicherrings der DESY Beschleunigerkommission MAC sowie zwei auswärtigen Gutachtern von Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation vorgelegt und im Rahmen eines Workshops diskutiert. Nach dem Urteil dieses Gremiums ist der Ausbau des PETRA Speicherrings ein „konzeptionell sehr geschickter Entwurf sowie ein kostensparender

Entwurf für eine weltweit einzigartige Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation zur Erzeugung harter Röntgenstrahlung“. Die Kommission wird dem PETRA III Projekt während der Planungs- und Umbauphase beratend zur Seite stehen.

Vorschläge für Strahlführungen an PETRA III

Im Rahmen von fünf Workshops im Jahr 2002 wurden Arbeitsgruppen gebildet, um Vorschläge für künftige Strahlführungen auszuarbeiten. Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines großen Workshops mit dem Titel *PETRA III Workshop on Experimental Stations* zusammenfassend dargestellt, der vom 26.–28. Mai 2003 mit insgesamt 140 Teilnehmern abgehalten wurde. Das Ergebnis dieses Workshops sind die folgenden Strahlführungen und Messplätze, die im *Technical Design Report* (TDR) zur Realisierung an PETRA III vorgeschlagen werden, hier eingeteilt in fünf Kategorien:

1. **Röntgenbeugung und Bildgebende Verfahren:** Hochenergetische Röntgenbeugung, kohärente Röntgenstreuung, hochauflösende Röntgenbeugung, Mikro- und Nanotomographie
2. **Hochauflösende Spektroskopie:** Unelastische Röntgenstreuung, Kernresonanzstreuung
3. **Materialwissenschaften:** Untersuchungen mit hochenergetischer Röntgenstrahlung, Pulverdiffraktometrie, Kleinwinkelstreuung, mikrofokussierte Strahlen zur Untersuchung weicher Materie
4. **Röntgenabsorption und Resonante Streuung:** Absorptionsspektroskopie, hochenergetische Photoelektronenspektroskopie, Röntgen-Mikrosonden, weiche Röntgenstrahlung mit variabler Polarisierung
5. **Strukturelle Molekularbiologie:** Makromolekulare Kristallographie (3 Messplätze vorgeschlagen vom EMBL, 2 Messplätze vorgeschlagen von der MPG), Kleinwinkelstreuung und Absorptionsspektroskopie an biologischen Materialien.

Künftige Entwicklungen

Die Anzahl der im PETRA III *Technical Design Report* vorgeschlagenen Messplätze ist größer als die Anzahl der verfügbaren Undulatoren. Eine externe Gutachterkommission wird daher die Vorschläge bewert-

ten und Empfehlungen aussprechen, welche Messplätze vorrangig gebaut werden sollten und ob eventuell einzelne der oben aufgeführten Messplätze an einer Strahlführung zusammengefasst werden können. Da die ausgezeichneten Strahleigenschaften von PETRA III den Betrieb von mehreren Messplätzen entlang einer Strahlführung erlauben, können in einer zweiten Ausbauphase weitere Messplätze errichtet werden. Auf diese Weise entsteht eine hohe Flexibilität im Hinblick auf die Entwicklung neuer experimenteller Techniken.

Sobald die Empfehlung der Gutachterkommission vorliegt, wird mit der Planung der Messplätze im Detail begonnen. Um dabei die Anforderungen der Nutzerschaft zu berücksichtigen, werden in der zweiten Jahreshälfte 2004 eine Reihe von Workshops organisiert, in deren Rahmen das Design der einzelnen Strahlführungen erarbeitet und festgelegt werden soll. Parallel dazu werden alle kritischen Komponenten der generischen Strahlführung konzipiert und in Prototypen getestet. Bis Ende 2006 werden die detaillierten Entwürfe für alle Strahlführungen festliegen und es wird mit den Ausschreibungen für die Komponenten begonnen. Bei der Konstruktion wird ein hoher Grad an Standardisierung angestrebt. Auf diese Weise kann der Aufwand für die Entwicklung von Einzelkomponenten erheblich minimiert werden. Die Komponenten für alle Strahlführungen sollen im Jahr 2008 fertig zur Installation sein.

Nach der derzeitigen Planung soll im Jahr 2007 mit dem Umbau von PETRA begonnen werden. Die neue Experimentierhalle soll noch vor dem Winter 2007/2008 fertiggestellt sein. Die Inbetriebnahme des neuen Speicherrings soll Ende 2008 beginnen, sodass der Nutzerbetrieb im Jahr 2009 anlaufen kann, nachdem auch die Strahlführungen in Betrieb genommen wurden.

Das europäische Röntgenlaserprojekt XFEL

Am 5. Februar 2003 hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) entschieden, dass der Röntgenlaser XFEL bei DESY als europäisches Projekt realisiert werden soll. Das Ministerium teilte auch mit, dass Deutschland, Bezug nehmend auf den Stand-

ortvorteil bereit ist, die Hälfte der Investitions- und Personalkosten von 684 Mio. € (basierend auf dem Preisniveau des Jahres 2000) zu tragen. Dieser Betrag beinhaltet die Kosten für den supraleitenden Linearbeschleuniger, drei Freie Elektronen Laser Undulatorstrecken, zwei Undulatorstrecken für spontane Strahlung und 10 Messplätze [1]. Gleichzeitig wurde mit dieser Entscheidung festgestellt, dass eine Entscheidung zum TESLA Projekt auf eine unbestimmte Zeit verschoben wird.

In der Folge konzentrierte sich die Arbeit am DESY auf die folgenden Gebiete: die Einsetzung einer organisatorischen Struktur für die Vorbereitung des Projektes am DESY, Diskussionen mit europäischen Partnern auf den verschiedenen Ebenen, die Auswahl einer neuen Trasse für das XFEL Projekt, sowie vorbereitende Arbeiten für das Planfeststellungsverfahren zum XFEL.

Organisationsstruktur für die Vorbereitung des XFEL am DESY

Das Röntgenlaser Projekt XFEL wird als europäisches Projekt realisiert werden. Parallel zum politischen Entscheidungsprozess zur Formation einer Kollaboration mit europäischen Partnern wurde am DESY für die vorbereitenden Arbeiten zur Realisierung des Projektes eine lokale Organisationsstruktur ins Leben gerufen, mit dem Ziel, in naher Zukunft eine Bauentscheidung für die Anlage treffen zu können. Schematisch ist die Organisationsstruktur in Abbildung 64 dargestellt.

Das Projekt ist in 38 individuelle Arbeitspakete unterteilt [2]. Jedes Arbeitspaket wird von einem Leiter des Arbeitspaketes organisiert. Die Leiter der Arbeitspakete formen, zusammen mit der XFEL Projektleitung, die DESY XFEL Projektgruppe. Diese trifft sich einmal pro Woche, um den Status und Fortschritt der vorbereitenden Arbeiten für den XFEL zu diskutieren. Die XFEL Projektgruppe ist offen für Repräsentanten der TESLA Kollaboration und neue, internationale Gruppen. Zwei Projektleiter (mit den Schwerpunkten Beschleuniger bzw. Laborkomplex) leiten die XFEL Projektgruppe, initiieren die wöchentlichen Treffen und kontrollieren den allgemeinen Arbeitsfortschritt. Sie sind dem DESY Direktorium direkt verantwortlich.

Aspekte finanzieller, vertraulicher und politischer Natur werden in einer separaten Gruppe, der DESY

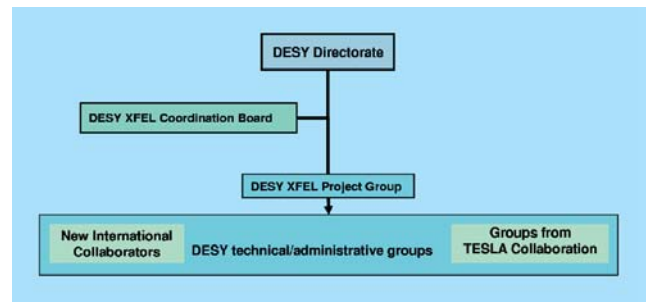


Abbildung 64: Schema der Organisationsstruktur am DESY für die Vorbereitung des Europäischen XFEL.

XFEL Koordinationsgruppe, diskutiert. Diese Gruppe wird gemeinsam geleitet von den DESY FS- und M-Bereichsleitern. Weitere Mitglieder sind: Repräsentanten des XFEL Projektmanagements, des VUV-FEL Projektmanagements, Vertreter der Nutzergruppen und Vertreter verschiedener DESY Dienstleistungsgruppen. Des Weiteren haben Vertreter internationaler Institutionen, die zu dem Projekt beitragen, einen Sitz in dieser Kommission.

Kontakt zu Potentiellen Europäischen Partnern

In enger Abstimmung mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) wurden mögliche internationale Partner auf verschiedenen politischen und wissenschaftlichen Ebenen kontaktiert. Die Ministerin für Bildung und Forschung Edelgard Bulmahn hat Briefe an ihre Kollegen in Kernländer der Europäischen Gemeinschaft sowie die Schweiz, Russland und die USA geschickt mit der Bitte, Repräsentanten für zwei hierarchisch hoch angesiedelte Gruppen zu entsenden. Die eine Gruppe soll sich im Wesentlichen um die administrativen Aspekte eines solchen internationalen Gemeinschaftsprojektes kümmern, die andere Gruppe soll im Wesentlichen die technischen und wissenschaftlichen Aspekte des XFEL bearbeiten. Erste positive Antworten der internationalen Partner sind eingegangen.

Zusätzlich zu diesen Aktivitäten haben mehrere Länder begonnen, Treffen für potentielle Nutzer eines Europäischen XFEL Labors zu organisieren. Auf einem Treffen des *European Strategy Forum for Research Infrastructures (ESFRI)* in Brüssel im April wurde das

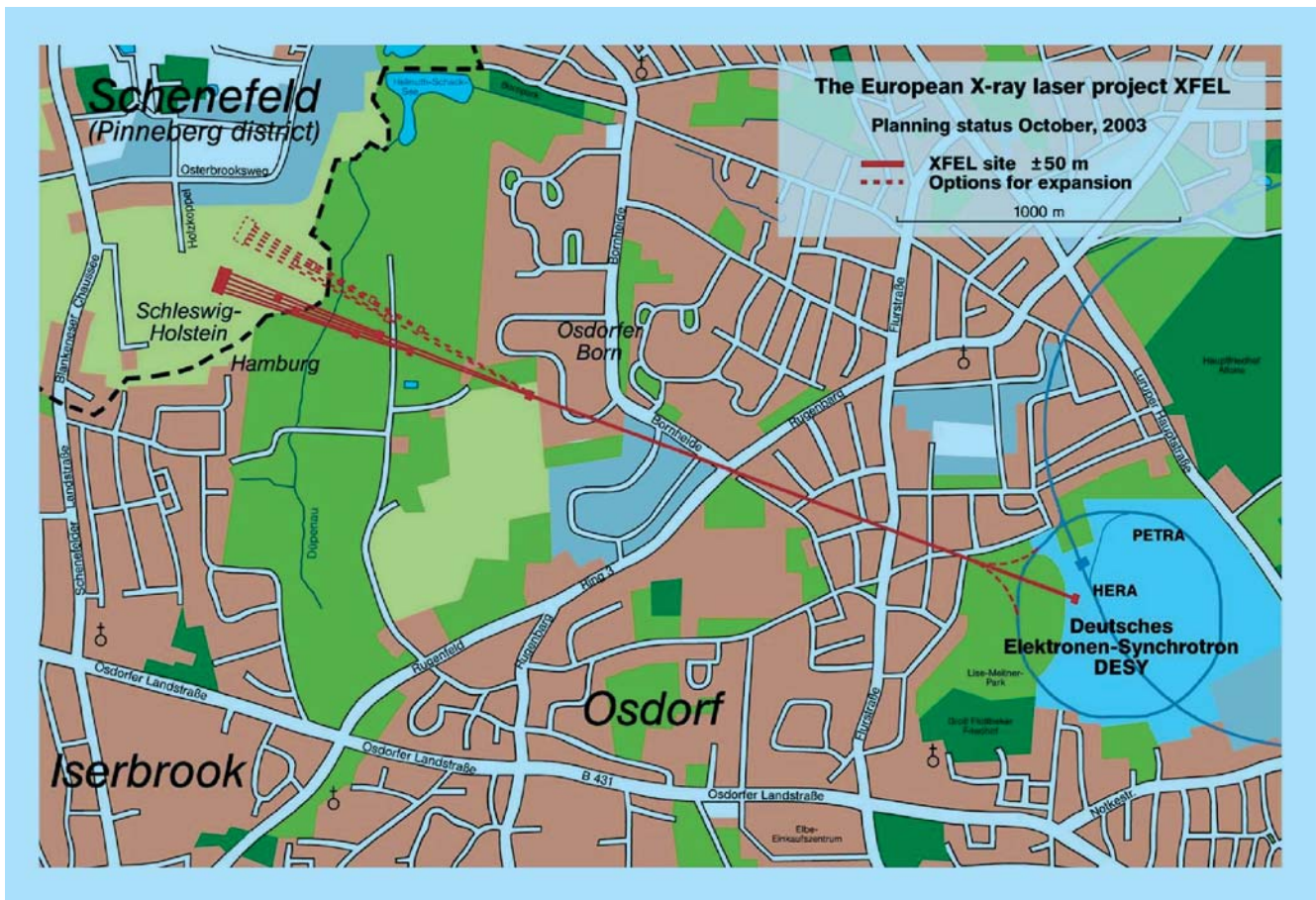


Abbildung 65: Die neue Trassenführung für das geplante XFEL Projekt.

XFEL Projekt vorgestellt und es wurde daraufhin vorgeschlagen, am 30. und 31. Oktober 2003 ein spezielles Arbeitstreffen am DESY zu organisieren, auf welchem die wesentlichen technischen Herausforderungen für die Realisierung des XFEL Projektes diskutiert werden sollten. Als ein wesentliches Ergebnis dieses Treffens unter Experten konnte festgestellt werden, dass im technischen Entwurf für den XFEL keine grundsätzlichen Hindernisse für die Realisierung des Projektes identifiziert werden konnten [3].

Auswahl einer neuen Trasse für den Europäischen XFEL

Die Entscheidung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Februar 2003 machte deutlich, dass der Freie Elektronen Laser XFEL und das TESLA Pro-

jekt nicht auf der gleichen Zeitskala realisiert werden können, wie dies ursprünglich vorgesehen war. Die wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Synergieeffekte eines gemeinsamen Forschungsgeländes 20 km entfernt vom DESY Gelände können somit zu diesem Zeitpunkt nicht realisiert werden. Aus diesem Grunde hat sich DESY entschieden, die Möglichkeiten einer neuen Trassenführung für die XFEL Anlage zu prüfen, welche eine möglichst enge Anbindung an das bestehende DESY Gelände mit seiner Infrastruktur ermöglichen sollte.

Auf einer Pressekonferenz am 29. Oktober 2003 gab DESY im Beisein von Ute Erdsiek-Rave, Wissenschaftsministerin des Landes Schleswig-Holstein und Jörg Dräger, Hamburger Wissenschaftssenator den neuen Vorschlag für die Trasse des geplanten XFEL Projektes bekannt. Die 3,3 km lange Anlage beginnt

am DESY Gelände in Hamburg-Bahrenfeld und verläuft in nordwestlicher Richtung zur Stadt Schenefeld (Kreis Pinneberg), welche an die Stadt Hamburg angrenzt (siehe Abb. 65). Auf einem Gelände südlich der Stadt Schenefeld wird die Experimentierhalle mit den Messstationen errichtet. Das geplante Gelände ist groß genug, eine weitere Experimentierhalle derselben Größe zu errichten, welche zu einem späteren Zeitpunkt gebaut werden könnte.

Vorbereitung des Planfeststellungsverfahrens

Zur Erlangung der Baugenehmigung der XFEL Anlage ist ein Planfeststellungsverfahren vorgesehen. Dies wird in einem Staatsvertrag zwischen den Bundesländern Hamburg und Schleswig-Holstein, welcher momentan in Vorbereitung ist, festgelegt. Für das Planfeststellungsverfahren muss eine relativ detaillierte Beschreibung der einzelnen Gebäude und Tunnelbauten

erstellt werden. Eine entsprechende Arbeitsgruppe ist am DESY eingerichtet worden. Es wird angestrebt, die Unterlagen für das Verfahren zum Ende des Jahres 2004 fertig gestellt zu haben. Die Begutachtung des Plans von den zuständigen Behörden wird dann voraussichtlich bis zum Ende des Jahres 2005 erfolgt sein, sodass erste Arbeiten zum Bau des europäischen Röntgenlasers XFEL im Jahre 2006 beginnen könnten.

[1] Pressemitteilung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung vom 5. Februar, 2003. <http://www.bmbf.de/presse01/798.html>

[2] Die Liste der einzelnen Arbeitspakete, die Protokolle der Treffen der XFEL Projektgruppe und viele andere Informationen über die Vorbereitung des Projektes können auf der Web Seite <http://xfel.desy.de> eingesehen werden.

[3] Weitere Informationen über das Treffen und das auf dem Treffen gezeigte Material sind unter <http://xfel.desy.de/content/xfel/e106/e293/> zu finden.