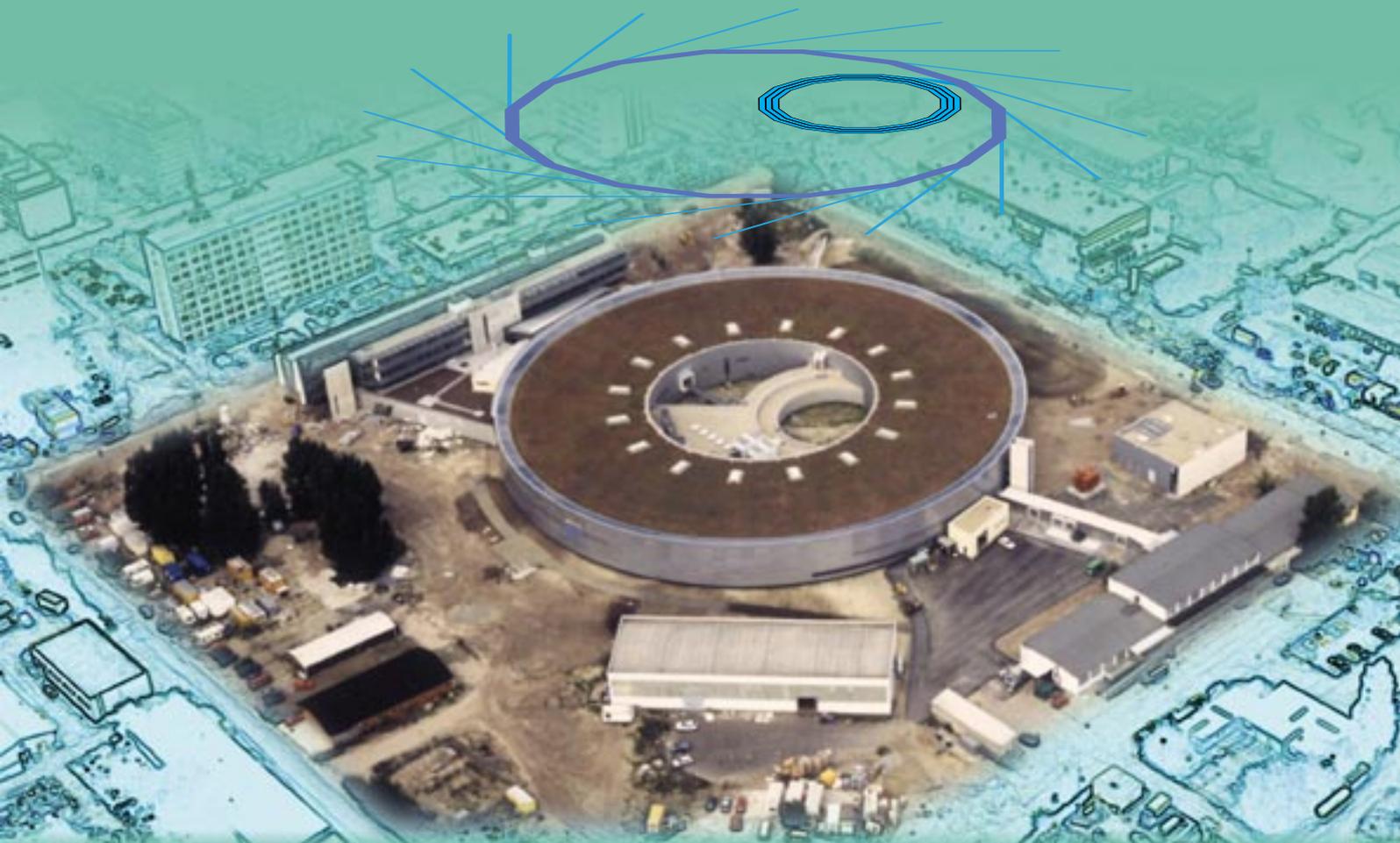
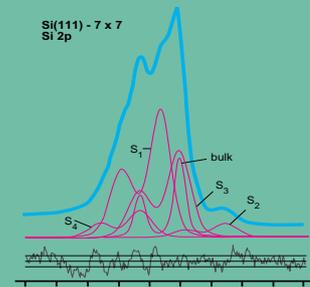
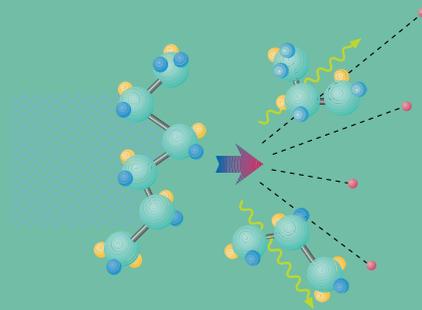


BESSY

Forschung und Entwicklung
mit Synchrotronstrahlung



BESSY- Service für Forschung und Entwicklung



BESSY, die Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung mbH, wurde 1979 gegründet. Satzungsgemäßes Ziel der GmbH sind der Bau, der Betrieb und die Weiterentwicklung von Synchrotronstrahlungsquellen im Vakuum-Ultravioletten (VUV)- und weichen Röntgen (XUV)-Spektralbereich.



*BESSY I in Berlin-Wilmersdorf
(Quelle: Ullstein Verlag)*

Seit 1982 betreibt BESSY die Speicherringanlage in Berlin-Wilmersdorf als nutzerorientierte Strahlungsquelle. Seit 1992 wird das Nachfolgeprojekt BESSY II in Berlin-Adlershof realisiert. BESSY arbeitet eng mit der Max-Planck-Gesellschaft, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, der Fraunhofer-Gesellschaft und den Instituten der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft sowie den Universitäten zusammen.

VFFB

Der Verein der Freunde und Förderer von BESSY e.V. (VFFB) unterstützt die Forschung von jungen Wissenschaftlern bei BESSY, zum Beispiel durch Reisekostenzuschüsse und Stipendien. Jedes Jahr zeichnet der Verein eine hervorragende Dissertation, die auf der Nutzung von Synchrotronstrahlung bei BESSY oder dem Hamburger Schwesterlabor HASYLAB aufbaut, mit einem Preis aus. Der Preis wird in Erinnerung an den ehemaligen wissenschaftlichen Geschäftsführer Ernst-Eckhard Koch verliehen. Interessenten an einer Mitgliedschaft bzw. an einer Förderung wenden sich an den Vorsitzenden des Vereins c/o BESSY.



Blick in die Experimentierhalle von BESSY I mit den Meßplätzen der Wissenschaftler



*BESSY-Mitarbeiter
Dr. Ch. Jung an der
HIRES-Meßapparatur*

□ Gesellschafter der BESSY GmbH

- Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (MPG)
- Hahn-Meitner-Institut Berlin GmbH (HMI)
- Deutsches Elektronensynchrotron Hamburg (DESY)
- Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (FhG)
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt (FZK)
- Forschungszentrum Jülich GmbH
- Siemens AG München

Im Aufsichtsrat sind die Gesellschafter, das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, das Bundesministerium für Wirtschaft, das Land Berlin, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) sowie Repräsentanten der Grundlagenforschung vertreten.

□ BESSY - Zahlen, Fakten

- Struktur:
 - Experimentelle Nutzung
 - Beschleuniger (Maschine)
 - Administration
- 170 Mitarbeiter (August 1997), davon ist jeder zweite in das Projekt BESSY II eingebunden
- Jahresetat (BESSY I): etwa 15 Mio DM
- Finanzierung: Strahlzeitgebühren mit ca. 200 DM pro Stunde und Meßplatz
- Finanzstatus für BESSY II (vorgesehen): „Blaue Liste“-Institut; neben Bund und Land Berlin werden die anderen Bundesländer an der Finanzierung beteiligt
- Nutzer: mehr als 170 Arbeitsgruppen aus Universitäten, Forschungsgesellschaften (MPG, FhG) und Forschungseinrichtungen wie das Radiometrielabor der PTB
- Kooperationen mit Schwestereinrichtungen: HASYLAB (DESY) in Hamburg, European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble, ELETTRA in Triest, Advanced Light Source (ALS) in Berkeley, Advanced Photon Source (APS) in Chicago, Budker Institute of Nuclear Physics (BINP) in Novosibirsk, Center of Advanced Technology (CAT) in Indore (Indien), MAX-LAB in Lund, Schweden

Impressum: Herausgeber:

Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft m.b.H. BESSY
Lentzeallee 100; 14195 Berlin
Tel.: +49 (30) 8 20 04 -0
Fax: +49 (30) 8 20 04 -1 03

Redaktionsschluß: August 1997

Redaktion: Text, Grafik und Layout

WiTec, Public Relations für Wissenschaft & Technologie
Dr. Ritschel & Partner
Alte Kreisstraße 42; 76149 Karlsruhe
Tel.: +49 (721) 9 78 75 -0
Fax: +49 (721) 9 78 75 -75

Druck: ENGELHARDT & BAUER, Karlsruhe

Synchrotronstrahlung

Grundprinzip

Synchrotronstrahlung entsteht, wenn leichte, geladene Teilchen (Elektronen) auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und von einem Magneten radial abgelenkt werden. Die Synchrotronstrahlung wird in einem engen Kegel entlang der momentanen Bewegungsrichtung der Elektronen abgegeben. Diese Strahlung enthält auch sichtbares Licht. Je höher die Elektronenenergie und je stärker das ablenkende Magnetfeld ist, desto energiereicher und stärker gebündelt wird das Synchrotronlicht.

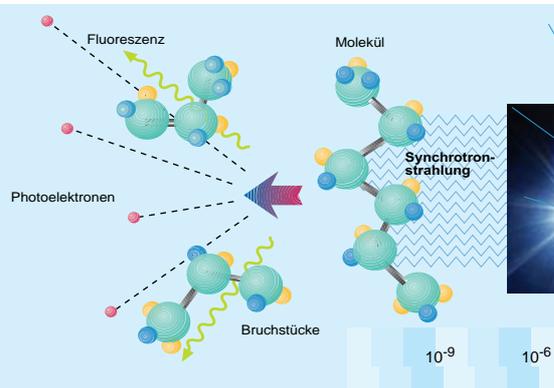
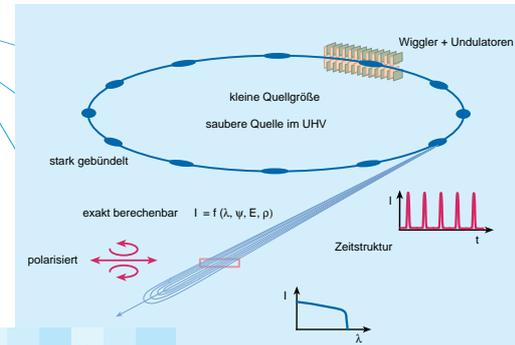
Eigenschaften

- sehr hohe Intensität, kurze Meßzeiten
- Wellenlängenspektrum: Vakuum-Ultraviolett bis harte Röntgenstrahlung
- stark gebündelt; sehr kleines Quellvolumen
- exakt berechenbar: erlaubt Kalibrierung von Detektoren bzw. Strahlungsquellen
- spezifische Zeitstruktur: atomare Vorgänge im Nanosekunden-Bereich sind verfolgbar
- hoher linearer Polarisationsgrad liefert richtungsabhängige Informationen
- zirkular polarisiertes Licht; wichtig für magnetische Materialstudien
- Messung im Ultrahochvakuum verhindert Verschmutzung der Proben.

Experimentierhalle

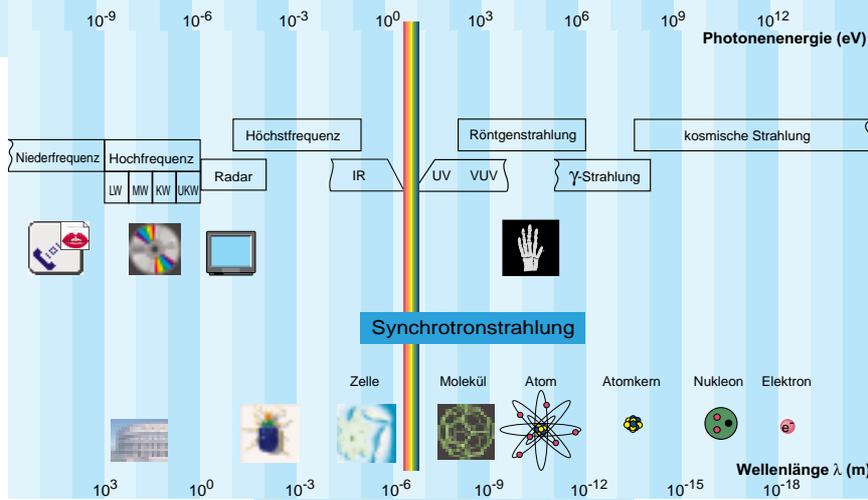


Mikrotron, Synchrotron und Speicherring



Synchrotronlicht trifft auf ein Molekül

Eigenschaften der Synchrotronstrahlung



Elektromagnetisches Spektrum

Bedeutung

Das BESSY-„Licht“ wird zur Untersuchung der Struktur und der Zusammensetzung unterschiedlichster Materialien genutzt. Kenntnisse zur Elektronenstruktur, die die physikalisch-chemische Natur der Atome und Moleküle bestimmt, lassen die gezielte Beeinflussung von Werkstoffeigenschaften zu. Die präzise Berechenbarkeit der Strahlung ermöglicht den Betrieb eines Radiometrielabors (PTB). Außerdem spielen spektroskopische Methoden und zunehmend die Mikrotechnologie eine wichtige Rolle.

Materialien und Methodik

Viele Analysetechniken beruhen auf dem Prinzip der Photoemission. Mit ihrer Hilfe lassen sich Systeme untersuchen, in denen die Atome über makroskopische Bereiche unregelmäßig angeordnet sind, also keine ausgeprägte Fernordnung besitzen. Mit der Synchrotronstrahlung können deshalb nicht nur die Strukturen kristalliner Materialien bestimmt werden, sondern ebenso die von amorphen Festkörpern, Adsorbaten, Flüssigkeiten und die Molekülstrukturen der Gasphase.

BESSY - Forschung & Entwicklung

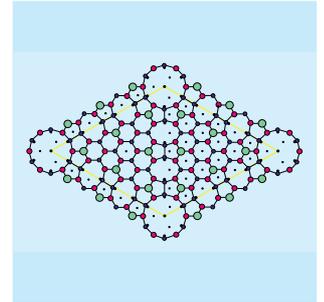
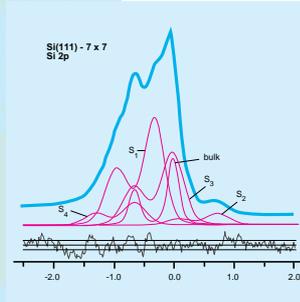
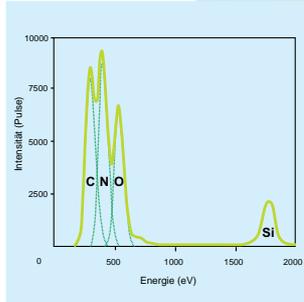


Die Synchrotronstrahlung ist eine flexible Lichtquelle - aus einem großen Spektralbereich läßt sich die experimentell benötigte Wellenlänge auswählen. Besonders gute Voraussetzungen hat BESSY im VUV- und XUV-Spektralbereich. Etwa 600 Forscher bearbeiten in oft international zusammengesetzten Gruppen mit unterschiedlichen Methoden Fragestellungen aus Physik, Chemie und Biologie, in der Werkstoffforschung und der Umwelttechnik.

☐ Photoelektronen-Spektroskopie (PES)

Diese Technik basiert auf der Emission und Detektion von Elektronen. Dadurch sind Aussagen zur Oberflächen- oder Grenzflächenstruktur möglich. Bei BESSY konnten an Si-Einkristallen bisher unbekannte Oberflächenzustände nachgewiesen werden, die für die Si-Halbleiter-Entwicklung bedeutend sind.

Fluoreszenzspektrum einer mit Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) verunreinigten Si_3N_4 -Schicht; die 4 Elemente sind mit Synchrotronstrahlung getrennt nachweisbar (BESSY)



☐ Fluoreszenzanalyse

Mit der bei BESSY verfügbaren Photonenenergie erhält man Informationen aus einer Probentiefe von bis zu 0,2 mm. Dadurch lassen sich von einem Oberflächenfilm verdeckte Schichten spektroskopisch untersuchen; so sind Fremdatome (in Festkörpern) auch mit ppm-Konzentration (Verhältnis 1:1.000.000) nachweisbar.

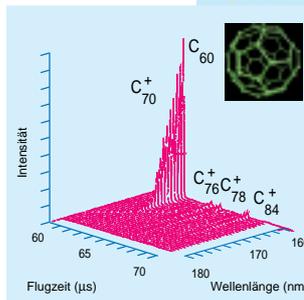
PES-Linienformanalyse der Si(111)-Oberfläche; S_1 bis S_4 : ungleiche atomare Umgebungen

Die Struktur der Si(111)-Oberfläche weicht von der würfelförmigen Atomordnung im Kristallinneren ab. (FHI, Berlin)

Für den Einsatz in der Mikroelektronik werden Silizium-Stickstoff(Si_3N_4)-Schichten mittels Ionenimplantation hergestellt. Neue Erkenntnisse zum Einfluß der bei diesem Ionenbeschuß wirkenden Mechanismen auf die Mikrostruktur der Schichten lieferten bei BESSY durchgeführte Fluoreszenz-Nahkantenabsorptionsmessungen.

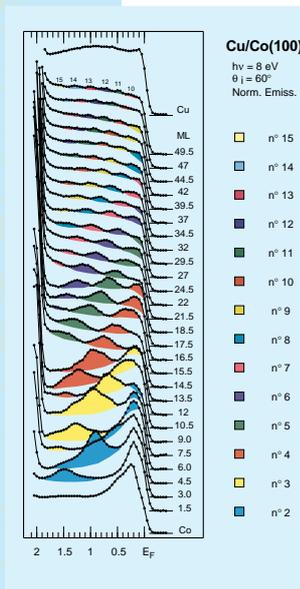
Bei der Entwicklung neuer Leseköpfe für die Datenspeicherung werden magnetische Schichtsysteme eingesetzt. Zur Untersuchung der Grenzflächen dieser Schichtsysteme nutzt man einen quantenmechanischen Effekt, bei dem die Wellenfunktion von Elektronen an der Oberfläche eines Metallfilms reflektiert wird und sich stehende Wellen, die „Quantum well“-Zustände, ausbilden. Die Analyse dieser Zustände ermöglicht Aussagen u.a. zur Schichtdicke.

Ionisationsschwellenbereich der Fullerene C_{70} , C_{76} , C_{78} und C_{84} (Uni Freiburg)



☐ Massenspektroskopie

Die massenspektroskopische Analyse ist für die Erweiterung unseres Wissens über die chemische Zusammensetzung der Materie eine wichtige Methode. Mit ihrer Hilfe konnten bei BESSY Fortschritte zur Charakterisierung der Fullerene erzielt werden. Fullerene, erst vor zehn Jahren als dritte Modifikation des Kohlenstoffs entdeckt, zeigen Eigenschaften, deren technologische Nutzung angestrebt wird.



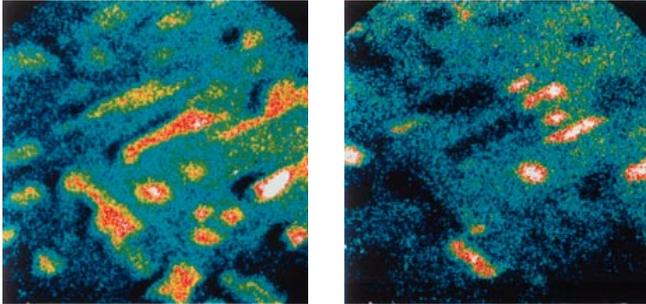
PES von unterschiedlichen Schichtdicken Cu auf Co(100); die „Quantum well“-Zustände sind durch farbige Bereiche markiert (FZ Jülich)

BESSY - Forschung & Entwicklung



Spektro-Mikroskopie

Diese Methoden verbinden spektroskopisches Trennvermögen mit einer hohen räumlichen Auflösung; Energie und Bildungsort der aus der Probe gelösten Photoelektronen werden analysiert. Am Undulatorstrahl von BESSY I ist das Auflösungsvermögen besser als $0,1 \mu\text{m}$; bei BESSY II wird eine Steigerung erwartet, dann sind dynamische Experimente durchführbar.

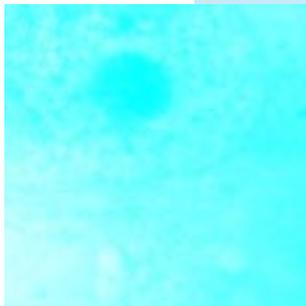


Ag- und Pb-Koabscheidung auf Mo(110); Bildausschnittgröße: $9 \mu\text{m}$; links: Pb-5d-Photoelektronen rechts: Ag-Valenzelektronen (Uni Clausthal-Zellerfeld)

Röntgenmikroskopie

Ein Röntgenmikroskop der Universität Göttingen nutzt Synchrotronstrahlung mit der Wellenlänge von $2,4 \text{ nm}$ und erreicht eine höhere Auflösung als Lichtmikroskope. Röntgenstrahlen durchdringen Wasser gut und bilden dabei andere anorganische und organische Strukturen kontrastreich ab. Untersucht werden organische Zellen ohne strukturverändernde Präparationen oder Fragestellungen kolloidaler Systeme (kontaminierte Böden).

Röntgenmikroskopische Aufnahme einer PtK2-Zelle in Interphase; erkennbar sind Zellkern mit Nukleolus im Innern, Kernhülle sowie verschiedene Komponenten im Cytoplasma der Zelle (Uni Göttingen, DKFZ Heidelberg)



Strukturänderung von Tonmineralien durch Tenside: vor (links) und nach (rechts) der Tensid-Behandlung zur Dekontamination von Aromaten (Uni Göttingen)

Radiometrische Kalibrierung

Mit der präzise berechenbaren Synchrotronstrahlung können Spektrometer und Detektoren kalibriert werden. Im PTB-Labor bei BESSY wurden so Standards zur Kalibrierung der Spektrometer SUMER und CDS der Raumsonde SOHO entwickelt. Dabei wurden durch Vergleich mit dem BESSY-Primärnormal hohe Zuverlässigkeiten erreicht.



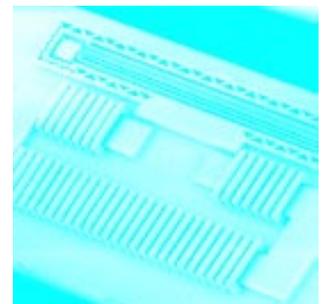
Vergleichsmeßplatz im Radiometrielabor der PTB bei BESSY; SUMER und CDS wurden unter extremen Reinraumbedingungen am Standort des Sonnenforschungsprojekts SOHO kalibriert (PTB). Start der Sonde war am 02.12.1995.

Mikrotechniken

Für Komponenten der Mikrosystemtechnik wird die LIGA-Technik, eine Kombination von Lithographie, Galvanoformung und Abformung, genutzt. Extrem präzise Strukturen im Sub-Mikrometer-Bereich aus einer breiten Materialpalette (Kunststoffe, Metalle, Keramiken) können in hoher Stückzahl hergestellt werden. Im Rahmen einer Zusammenarbeit (ALIGA-Kooperation) mit anderen Forschungseinrichtungen (u.a. Forschungszentrum Karlsruhe) arbeitet BESSY an der Entwicklung von Prototypen für mikrotechnologische Produkte und an Verbesserungen der Prozessschritte des LIGA-Verfahrens mit. Für die Zusammenarbeit mit regionalen Unternehmen ist bei BESSY II in Berlin-Adlershof ein Anwenderzentrum Mikrotechnologie geplant.



Optomechanischer Modul (FZK, Karlsruhe)



Elektromagnetischer Mikroaktor (FZK, Karlsruhe)

Innovation bei BESSY



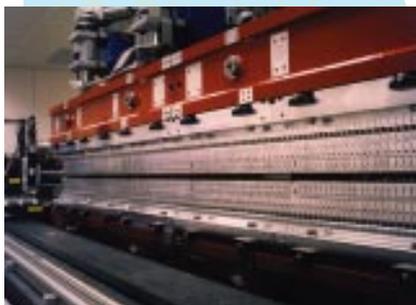
Instrumentarium

Grundelemente:

- Beschleuniger
- Dipolmagnete
- Wiggler, Undulatoren
- Spiegelsysteme, Strahlrohre
- Monochromatoren
- Experimentierstationen
- elektronische Meßwerterfassung und Auswertung

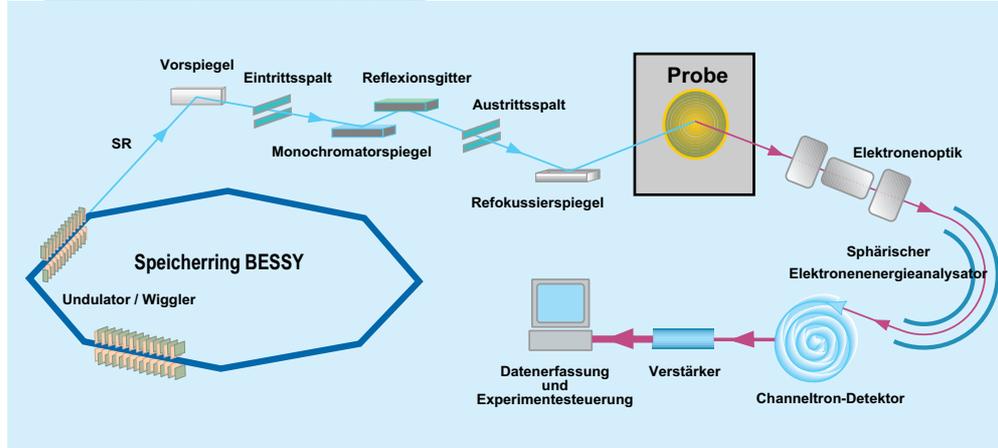
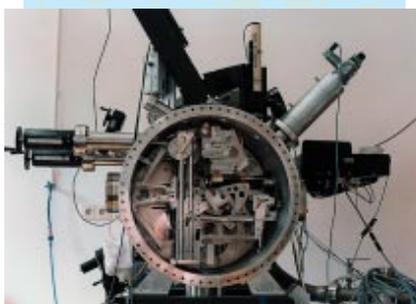
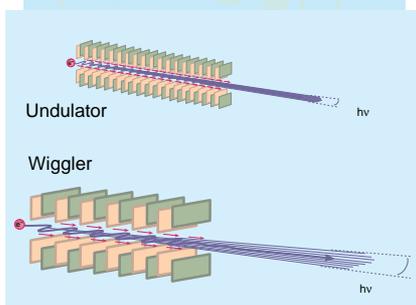
□ Beschleuniger- und Speicherringanlage

Bei BESSY werden im Mikrotron erzeugte Elektronen im Synchrotron, einem ringförmigen Vakuumrohr von 36 m Umfang, durch starke elektrische Hochfrequenzfelder bis auf eine Endenergie von 800 Mio eV beschleunigt. Die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit fliegenden Elektronen laufen dann in dem von einer Strahlenschutzmauer umgebenen Speicherring (62,4 m Umfang) mehrere Stunden lang mit konstanter Geschwindigkeit um; etwa 5 Mio mal in der Sekunde. Der BESSY-Speicherring enthält etwa $5 \cdot 10^{11}$ Elektronen bei voller Einspeisung. Die Beschleunigeranlage von BESSY II besteht wie bei BESSY I aus Mikrotron-Injektor, Synchrotron und Speicherring. Die Energie der Elektronen ist hier jedoch mit 1900 MeV fast 2,5fach höher als bei BESSY I. Die innovative flexibel verwendbare Elektronenoptik des im Umfang 240 m messenden Speicherrings garantiert, daß die in 14 geraden Strecken des Rings einbaubaren Insertion Devices Synchrotronstrahlung mit einer um das 10.000fache gesteigerten Qualität (Brillanz) liefern werden.



□ Wiggler und Undulatoren

Je intensiver die Synchrotronstrahlung ist, desto vorteilhafter für den Experimentator: Kürzere Meßzeiten, die gleichzeitige Messung mehrerer physikalischer Größen, die Untersuchung kleinster Substanzmengen und eine höhere Auflösung sind möglich. Die Intensitätserhöhung wird durch eine neue Technik erzielt. Die Lichterzeugung erfolgt in periodisch angeordneten Permanentmagneten, den sogenannten Wiggler und Undulatoren. Alle modernen Synchrotronstrahlungs-Quellen, zu denen auch BESSY II gehört, setzen diese Magnetstrukturen ein. In ihnen sind die Funktion des Speicherns von Elektronen und die Funktion der Erzeugung von Licht voneinander getrennt - und somit ist jede für sich optimierbar.



Typische Experimentieranordnung bei BESSY:

Die Synchrotronstrahlung eines Undulators verläßt den Speicherring geradlinig durch Strahlrohre und gelangt über Spiegelsysteme und Monochromatoren zu den einzelnen Experimentierstationen. Hier können die Forschergruppen gleichzeitig und unabhängig voneinander unterschiedliche Untersuchungen ausführen.

□ Magnete

Im Speicherring halten starke Magnete die Elektronen auf einer stabilen Umlaufbahn. Die Synchrotronstrahlung selbst entsteht in den durch die Ablenkmagnete bestimmten Kreis-segmenten und bei BESSY II in den Wiggler und Undulatoren.

Die Abbildungen (Mitte) zeigen von oben nach unten:

- Dipolmagnet BESSY II
- Undulator BESSY II
- Wiggler und Undulatoren (Funktionsschema)
- Doppel-Kristall-Monochromator

□ Monochromatoren und Spiegel

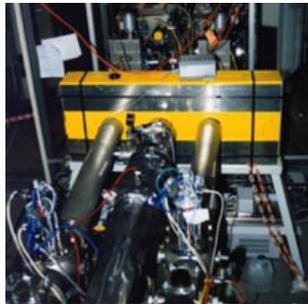
Zu jeder experimentellen Anordnung gehört ein Monochromator, der innerhalb eines bestimmten Bereiches die gewünschte Wellenlänge selektieren kann. Auf diese Weise erhält man im Zusammenhang mit dem Elektronenspeicherring eine kontinuierlich durchstimmbare, intensive, gepulste, zeitlich stabile Lichtquelle. Bei vielen Anwendungen der Synchrotronstrahlung ist die Fokussierung des Photonenstrahles auf einen kleinen Fleck von wesentlicher Bedeutung. Dafür werden hochpräzise Spiegel mit gekrümmten Oberflächen eingesetzt. Diese Spiegeloberflächen weichen von der idealen Form um höchstens einige Tausend Atomlagen ab.

Perspektiven der Forschung bei BESSY



BESSY II, eine Hochbrillanz-Synchrotronstrahlungsquelle modernster Technologie, wird 1998 in Berlin-Adlershof den Betrieb aufnehmen. Dies wird neue Perspektiven für unterschiedlichste grundlagenorientierte und anwendungsbezogene Forschungen und Entwicklungen eröffnen.

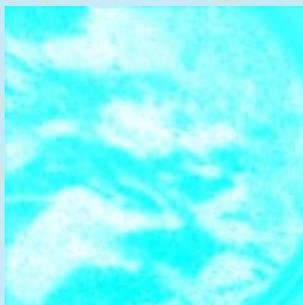
Außenansicht von BESSY II



Strahlrohre am Wellenlängenschieber im LIGA-Labor BESSY I



Segment des Speicherrings von BESSY II: Dipole, Quadrupole und Sextupole



Die neue Strahlungsquelle für den VUV- und XUV-Bereich bietet wesentlich bessere Forschungsbedingungen. Durch den Einbau von speziellen Magnetstrukturen (Wiggler und Undulatoren) wird sogar eine bis zu 10.000fach höhere Leuchtdichte geliefert. Optimierte optische Strahlungsführung und Monochromatoren ergeben eine hohe spektrale und räumliche Auflösung bei hoher Intensität. Die Spitzenstellung von Berlin als eines der internationalen Zentren für Forschung mit Synchrotronstrahlung wird damit gestärkt.



Die bestehende enge Zusammenarbeit mit Hochschulen und Forschungsinstituten, mit der Max-Planck-Gesellschaft und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wird fortgesetzt; ebenso wie bei BESSY I wird bei BESSY II die Physikalisch-Technische Bundesanstalt ein Radiometrielabor betreiben. Zahlreiche Forschungsinstitute und Hochschulgruppen werden sich beim Ausbau von BESSY II mit eigenen Investitionen in Experimentierstationen beteiligen.

Arbeitsschwerpunkte:

- ◆ Atom- und Molekülphysik
- ◆ Oberflächen-, Werkstoff- und Strukturfor-schung
- ◆ Röntgenmikroskopie; Beobachtung leben-der Organismen in natürlicher Umgebung (Biologie, Medizin, Kolloidchemie)
- ◆ Analytik (Spektroskopie); räumliche Auflö-sung bis zu 0,01 Mikrometer (Mikroelektronik, Kompositwerkstoffe, Schichtsysteme)
- ◆ Industriebezogene Aktivitäten; Nutzung z.B. der LIGA-Technik (Anwenderzentrum für Mikrotechnik)
- ◆ BESSY-eigene Forschungsaktivitäten:
 - Beschleunigerphysik
 - Experimentelle Nutzung von Synchrotronlicht
 - Entwicklung Meß- und Experimentiertechnik

BESSY II in Berlin-Adlershof wird Teil einer erneuerten Forschungs- und Technologieland-schaft sein, von der vielfältige Impulse für For-schung und Entwicklung ausgehen werden. Zum wirtschaftlichen Fortschritt werden auch gemeinsame Projekte, Zulieferaufträge und Know-how-Austausch mit Technologieunter-nehmen der Region beitragen. Der neue Cam-pus in Berlin-Adlershof, der künftig auch die naturwissenschaftlichen Institute der Humboldt-Universität aufnehmen wird, besitzt dafür sehr gute Voraussetzungen.

Die Abbildungen (Mitte) zeigen von oben nach unten:

- *Strukturdetail eines Linearaktors, hergestellt durch Röntgentiefenlithographie, kleinste laterale Abmessung 1µm (FZK, Karlsruhe)*
- *LIGA-Mikroturbine, Ø=1,4 mm (FZK, Karlsruhe)*
- *Dreidimensionale Mikrostrukturen aus Plexi-glas, Höhe 500 µm (IMM, Mainz)*
- *BESSY-Mitarbeiter Dr. A. Gaupp am Elektronenspektroskop für chemische Analysen*
- *Magnetische Domänen in Edelstahl (TU Clausthal)*
- *Röntgenscanner (JENOPTIK, Jena)*

