

Anstatt eines Vorwortes

Mit dieser Broschüre wenden wir uns an die interessierte Öffentlichkeit. Vorgestellt werden die Funktionsweise der BESSY-Anlage sowie die mit dem BESSY-Licht erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse anhand einiger weniger, von BESSY ausgewählten Beispiele. Die wissenschaftliche Arbeit bei BESSY wird überwiegend von Nutzern getragen, d.h. von Wissenschaftlern, die von ihren Heimatinstitutionen mit ihren Ideen, Apparaturen und Proben zu BESSY kommen, um ihre Untersuchungen durchführen zu können. Im Rahmen dieser Broschüre kann und soll nur ein sehr kleiner Ausschnitt der gesamten Breite der Anwendungen dargestellt werden, die mit dem Werkzeug „Synchrotronstrahlung“ bearbeitet werden. Die jährlich erscheinenden Ergebnisberichte vermitteln einen umfassenderen Einblick.

Wir danken allen Beteiligten für die geleistete Arbeit und für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieser Broschüre.

Berlin, im Juni 1996

Die Geschäftsführung der BESSY GmbH

Impressum

Herausgeber: Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft m.b.H. BESSY
Lentzeallee 100; 14195 Berlin
Tel.: +49 (30) 82004 - 0
Fax: +49 (30) 82004 - 103

Text, Grafik und Layout: WiTec, Public Relations für Wissenschaft & Technologie
Dr. Ritschel & Partner
Alte Kreisstr. 42; 76149 Karlsruhe
Tel.: +49 (721) 97875 - 0
Fax: +49 (721) 97875 - 75

Druck: ENGELHARDT & BAUER, Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis:



Die Institution BESSY

➤	BESSY-Service für Forschung und Entwicklung	4
➤	Innovation mit BESSY	7
➤	BESSY als GmbH	9
➤	BESSY und das regionale wissenschaftlich-technologische Umfeld	10
➤	Perspektiven der Forschung bei BESSY	11



Synchrotronstrahlung

➤	Was ist Synchrotronstrahlung?	12
➤	Eigenschaften von Synchrotronstrahlung	13
➤	Historische Entwicklung	14
➤	Synchrotronstrahlung als vielseitiges Werkzeug	16



BESSY - Stätte der Forschung und Entwicklung

➤	Grundbegriffe	17
	Elektromagnetische Strahlung	
	Bindungsenergie und Photoeffekt	
	Energieeinheit eV	
➤	Instrumentarium	19
	Beschleuniger und Speicherring	
	Wiggler und Undulatoren	
	Monochromatoren und Spiegel	
➤	Anwendungsbeispiele	23
	Atomphysik	
	Agglomeration von Teilchen	
	Halbleiter-Oberflächen	
	Adsorbate	
	Verdeckte Schichten	
	Magnetische Schichtsysteme	
	Polymere	
	Fullerene	
	Instrumentencharakterisierung	
	Röntgenmikroskopie	
	Lithographie und Mikrotechnik	



➤ BESSY-Service für Forschung und Entwicklung

Synchrotron-“Licht“ entsteht in Elektronenbeschleunigern und Speicherringen. In mehreren Spektralbereichen, beginnend vom Infrarot über Vakuum-Ultraviolett bis zum Röntgenbereich, wird dieses Licht für verschiedenartigste Zwecke in Forschung und Industrie genutzt.



*Der Eingangsbereich von
BESSY I in Berlin-
Wilmersdorf*

Die Elektronenspeicherringanlage in Berlin-Wilmersdorf entstand infolge des großen Bedarfs an Synchrotronstrahlung für naturwissenschaftlich-technische Untersuchungen und für anwendungsbezogene und industrieorientierte Aktivitäten. Das vorhandene wissenschaftliche und technologische Umfeld sowie das besondere Interesse der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) an einer Synchrotronlichtquelle speziell für metrologische Nutzungen begünstigte Berlin als Standort. Mit der Gründung der Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung mbH, kurz BESSY genannt, im Jahre 1979 und der Inbetriebnahme des Speicherringes nur knapp drei Jahre später, waren die Bedingungen für die Entwicklung eines Zentrums zur Anwendung von Synchrotronstrahlung gegeben.

BESSY ist eine Forschungseinrichtung, die durch die Bereitstellung von Synchrotronstrahlung Dienstleistungen für die Wissenschaft erbringt. Mit dem 800 MeV-Elektronenspeicherring und den dazugehörigen Instrumentarien hat BESSY besonders gute Voraussetzungen für Experimente im Vakuum-Ultravioletten(VUV)- und weichen Röntgen(XUV)-Bereich (Photonenenergie bis ca. 3 keV) geschaffen und stellt diese der Forschung und Entwicklung zur Verfügung. BESSY, als erste dedizierte Quelle für VUV- und XUV-Strahlung in Deutschland errichtet, hat in ihrer Entwicklung die an sie gestellten Erwartungen übertroffen. Damit wurde auch das Konzept von BESSY, nämlich die Konzentration auf den VUV- und XUV-Spektralbereich und die Festlegung auf den Service-Charakter, bestätigt. Zahlreiche Untersuchungen



fürten und führen zu herausragenden Resultaten. Einige davon sind in dieser Broschüre vorgestellt.

Die Nachfrage der Forschung nach „BESSY-Licht“ ist nach wie vor ungebrochen. Dabei steigen die Anforderungen an die Strahlungsquelle. Die Konsequenz ist der Bau der optimierten Lichtquelle BESSY II, die 1998 in Berlin-Adlershof den Betrieb aufnehmen wird. BESSY II wird neuartige Forschungsmöglichkeiten bieten und neue Entwicklungen erlauben.

Gegenwärtig bearbeiten bei BESSY etwa 600 Wissenschaftler in 150 oft international zusammengesetzten Nutzergruppen ihre Fragestellungen aus Physik, Chemie und Biologie sowie in der Werkstoffwissenschaft und der Umwelttechnik. Durch den Einsatz von supraleitenden Spezialmagneten, sogenannten Wellenlängenschiebern, eröffnen sich bei BESSY vielversprechende Perspektiven für eine industrie-relevante Entwicklung der Mikrotechnik.

BESSY ist aber nicht nur eine Stätte der Forschung und Entwicklung, sondern auch ein Ort der Ausbildung von hochqualifiziertem wissenschaftlichem Nachwuchs. Durch die enge Zusammenarbeit von BESSY mit Universitäten und Fachhochschulen bietet sich jungen Menschen die Möglichkeit, an nationalen und internationalen Forschungsprojekten mitzuarbeiten und somit ihren wissenschaftlich-technischen Kenntnisstand weiterzuentwickeln.

BESSY-Nutzer sind vorwiegend Forschungsgruppen aus Instituten der Universitäten, der Max-Planck-Gesellschaft, der Fraunhofer-Gesellschaft und von Großforschungseinrichtungen.

In einem eigenen Laboratorium bei BESSY nutzt die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) die Synchrotronstrahlung für radiometrische Untersuchungen. Aufgrund der berechenbaren Intensität der Synchrotronstrahlung realisierte die PTB bei BESSY das Europäische Strahlungsnormal im VUV, das für die Kalibrierung von



Blick in die Experimentierhalle von BESSY I

Spektrometern und Detektoren, zum Beispiel auch von Weltraumteleskopen, eingesetzt wird. Das PTB-Labor bei BESSY ist heute ein international genutztes Zentrum für absolute Strahlungsmessung im VUV- und XUV-Bereich.

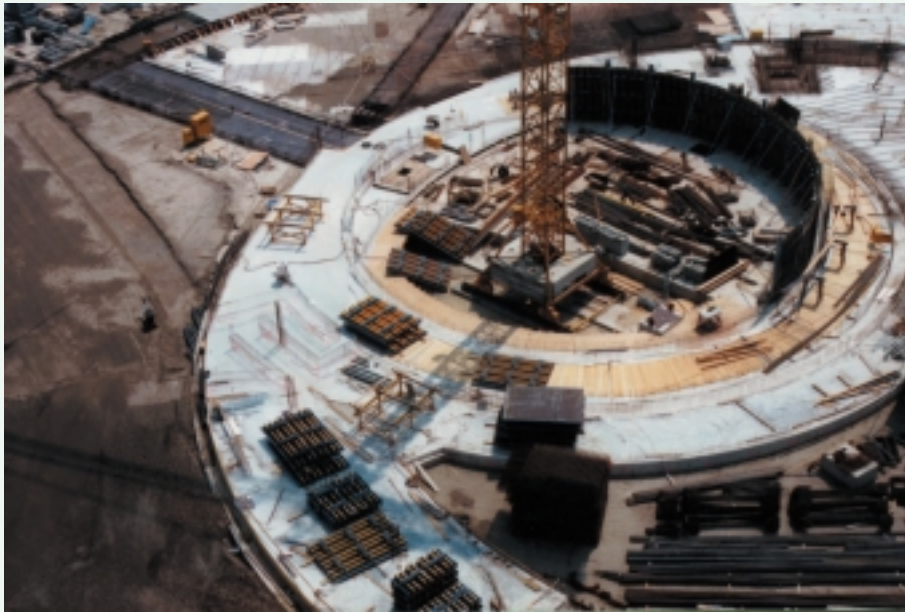
Die Kooperation mit Schwestereinrichtungen wie mit der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble und ELETTRA in Triest, mit der Advanced Light Source (ALS) in Berkeley und der Advanced Photon Source (APS) in Chicago oder mit dem Budker Institute of Nuclear Physics (BINP) in Novosibirsk und dem Center



of Advanced Technology (CAT) in Indore, Indien, zur Nutzung von Synchrotronstrahlung ist selbstverständlich.

Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten unter Anwendung von Synchrotronstrahlung werden zur Zeit

weltweit erweitert. Länder wie Indien, Südkorea, Taiwan oder Thailand verstärken ihre Bemühungen um eigene, nationale Forschungszentren. Dabei greifen sie häufig auf die langjährigen Erfahrungen von BESSY als Betreiber einer Synchrotronstrahlungsquelle zurück.



Die Baustelle BESSY II in Berlin-Adlershof im Januar 1995

Innovation mit BESSY

Anspruchsvolle wissenschaftliche Fragestellungen verlangen immer höhere Anforderungen an Intensität, Leuchtdichte und spektrale Auflösung des Synchrotronlichtes. Bereits Mitte der 80er Jahre begann die Planung für eine neue Synchrotronstrahlungsanlage. Diese Strahlungsquelle wird durch eine neue Technik, und zwar durch den Einbau spezieller Magnetstrukturen, den sogenannten Insertion Devices (Wiggler und Undulatoren), eine Leistungssteigerung um einen Faktor 1000 und mehr erfahren. Zahlreiche weitere Entwicklungen im Beschleuniger- und Speicherringbau sowie bei den Monochromatoren, die in vielen Fällen auf Fortschritte in der Materialwissenschaft und in den Bearbeitungstechniken beruhen, kommen ergänzend hinzu.

Dem Bedarf an einer leistungsfähigeren „Licht“-Quelle für den VUV- und XUV-Bereich wurde im Juli 1992 durch die Zustimmung des Bundes und des Landes Berlin zum Bau einer Hochbrillanz-Synchrotronstrahlungsquelle

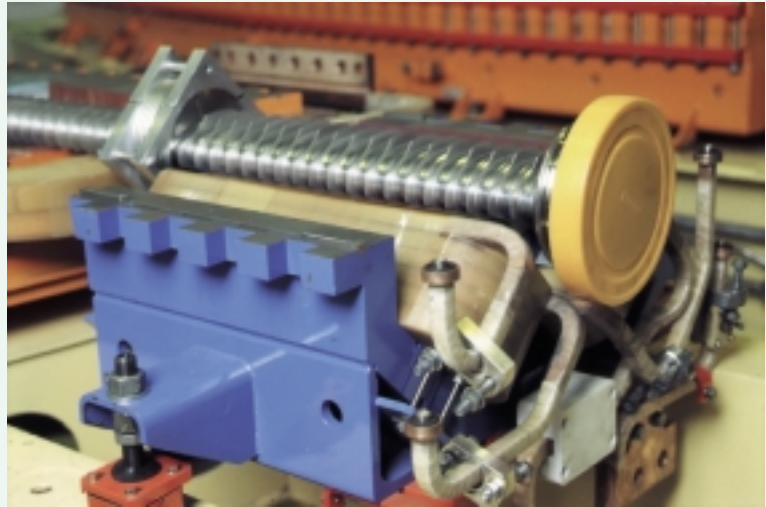
BESSY II modernster Technologie in Berlin-Adlershof Rechnung getragen. In der Umgebung von Hochschulen, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und technologieorientierten Unternehmen wird BESSY II ein neuer Wissenschaftsschwerpunkt mit innovativen Wirkungen für das nahe und weitere Umfeld sein. Zugleich bleibt damit die auf dem Gebiet der Synchrotronstrahlung erlangte nationale und internationale Spitzenstellung von Berlin erhalten.

Noch ist BESSY II eine Baustelle, doch für 1998 ist die Betriebsaufnahme vorgesehen. Die für höchste Brillanz ausgelegte neue Synchrotronstrahlungsquelle hat einen Speicherring mit 16 geraden Strecken. Injektionselemente und Hochfrequenzresonatoren benötigen davon jeweils eine. In den noch freien 14 geraden Wegstrecken des Speicherrings werden periodische Magnetstrukturen, Wiggler und Undulatoren genannt, installiert. Sie werden, verglichen mit der Strahlung aus den



Ablenkmagneten der Anlage BESSY I, eine bis zu 10.000fach größere Brillanz liefern. Optische Strahlungsführung und Monochromatoren sind für diese Lichtquelle optimiert und werden zu hoher spektraler und räumlicher Auflösung bei hoher Intensität führen. Dieser quantitative Fortschritt ermöglicht qualitativ neue Untersuchungen.

Damit ist BESSY in der Lage, hochintensive und hochbrillante Strahlung für unterschiedlichste grundlagenorientierte und anwendungsbezogene Forschungen und Entwicklungen bereitzustellen. Praxisbezogen bedeutet das, daß sich neue Perspektiven ergeben, z.B. für die Spektroskopie, wo man ein räumliches Auflösungsvermögen bis zu 0,01 Mikrometer erwartet, oder auch für die Mikrosystemtechnik, insbesondere bei Verfahren zur Miniaturisierung von Systemkomponenten.



Synchrotronmagnete für BESSY II (mit Vakuumkammer)

Tabelle der wichtigsten Parameter von BESSY I und BESSY II im Vergleich:

	BESSY I	BESSY II
Elektronenenergie (GeV)	0,8	1,7
Ringumfang (m)	62,4	240
Emittanz (horizontal) (rad.m)	$5 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-9}$
Anzahl von Dipolen / Quadrupolen / Sextupolen	12 / 36 / 16	32 / 144 / 112
Gerade Stücke	4	16
Strahlrohre: Dipole	ca. 40	ca. 40
Strahlrohre: Wiggler, Undulatoren, Wellenlängenschieber	5	ca. 30
Brillanz in $\frac{\text{Photonen}}{\text{sec mm}^2 \text{ mrad}^2 0,1 \% \text{ BW}^*}$	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{18}$

* BW: Spektrale Bandbreite



➤ BESSY als GmbH

Die Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung mbH wurde im Jahre 1979 gegründet. Satzungsgemäßes Ziel der GmbH ist der Bau, der Betrieb und die Weiterentwicklung von Synchrotronstrahlungsquellen im VUV- und XUV-Bereich. Dazu hat BESSY eine dedizierte Speicherringanlage in Berlin-Wilmersdorf gebaut und betreibt sie seit 1982 als nutzerorientierte Strahlungsquelle. Seit 1992 realisiert BESSY das Nachfolgeprojekt BESSY II in Berlin-Adlershof.

Die Gesellschafter der BESSY GmbH sind die Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (MPG), das Hahn-Meitner-Institut Berlin GmbH (HMI), das Deutsche Elektronensynchrotron Hamburg (DESY), die Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (FhG), das Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt (FZK), das Forschungszentrum Jülich GmbH (KFA) und die Siemens AG München.

Die Leitung von BESSY obliegt der Geschäftsführung. Der Aufsichtsrat übt Kontrollfunktionen aus und fällt Grundsatzentscheidungen, wobei er sich von Beratungsgremien unterstützen läßt. Neben den Gesellschaftern sind im Aufsichtsrat das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, das Bundesministerium für Wirtschaft, das Land Berlin, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) als ein wichtiger Nutzer der Strahlungsquelle sowie Repräsentanten aus dem Bereich der Grundlagenforschung vertreten.

Der Verein der Freunde und Förderer von BESSY

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.



BESSY in Berlin-Wilmersdorf, im Hintergrund das FhG-ISiT und das Max-Planck-Institut für Bildungsforschung

Gemäß ihrer Aufgabenstellung sind die BESSY-Mitarbeiter den drei Bereichen Experimentelle Nutzung, Beschleuniger (Maschine) und Administration zugeordnet. Zur Zeit sind 150 Mitarbeiter bei BESSY tätig, von denen mehr als die Hälfte im Projekt BESSY II, der zukünftigen Hochbrillanzquelle, eingebunden sind. Der Jahresetat für BESSY umfaßt etwa 15 Mio DM. Die Finanzierung der GmbH erfolgt über Strahlzeitgebühren (ca. 200 DM pro Stunde und Meßplatz), die die Nutzer direkt oder über öffentliche Zuschüsse aufbringen müssen.

Die wissenschaftliche Arbeit bei BESSY wird hauptsächlich von Forschern getragen, die von ihren Heimatinstitutionen nach Berlin kommen und die BESSY-Strahlung für ihre Untersuchungen nutzen. Die BESSY-eigene Forschung gewinnt indes an Bedeutung.

Die Firmen- und Gesellschafterstruktur von BESSY wird sich nach dem Umzug an den Standort Berlin-Adlershof nicht ändern. Allerdings ist für BESSY II eine institutionelle Finanzierung als sogenanntes „Blaue Liste“-Institut vorgesehen. Damit sollen der Nutzung entsprechend neben dem Bund und dem Land Berlin die anderen Bundesländer an der Finanzierung beteiligt werden.



BESSY und das regionale wissenschaftlich-technologische Umfeld

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Entscheidung für Berlin als Standort einer vorwiegend wissenschaftlich nutzbaren Synchrotronstrahlungsquelle war, daß der Berliner Raum mit seiner Vielzahl bereits bestehender wissenschaftlicher Einrichtungen und technologieorientierter Wirtschaftsunternehmen ein attraktives Umfeld bietet.

Das Wissenschaftsumfeld in Berlin und Brandenburg ist für BESSY sehr fruchtbar. Die Kooperation im Berliner Bereich beschränkt sich nicht nur auf die Hochschulen wie die Freie Universität Berlin (FUB), die Humboldt-Universität Berlin (HUB), die Technische Universität Berlin (TUB) und die Universität Potsdam, sondern schließt u.a. auch Forschungsinstitutionen wie das Fritz-Haber-Institut (FHI) der MPG, das Max-Born-Institut (MBI), die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), das Hahn-Meitner-Institut (HMI), das

Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik (PDI) und das Institut für Silizium-Technologie (ISIT) der FhG ein.

Die Umgebung von BESSY II im Forschungs- und Technologiepark Berlin-Adlershof (WISTA) ist vor allem durch Kooperation und durch die Nutzer in der unmittelbaren Nachbarschaft gekennzeichnet. In Berlin-Adlershof befinden sich beispielsweise die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, die Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), das Hahn-Meitner-Institut mit dem thematischen Schwerpunkt Photovoltaik und, als Keimzelle eines Photonik-Zentrums, das Max-Born-Institut.

Mit den Technologiefirmen am Standort ergeben sich über gemeinsame Projekte, Zulieferaufträge und Know-how-Austausch weitere Impulse für die wirtschaftliche Entwicklung.

Perspektiven der Forschung bei BESSY

Langfristige Zukunftsvorsorge für die Sicherung der gesellschaftlichen Bedürfnisse ist unabdingbar mit wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen verbunden. Mit dem Bau der Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation, BESSY II, werden die Voraussetzungen geschaffen, die zur Lösung anspruchsvoller, zukunftsorientierter Aufgaben beitragen und damit die Spitzenstellung von Berlin als eines der Zentren für Forschung mit Synchrotronstrahlung im VUV- und XUV-Bereich stärken werden. Noch mehr an Bedeutung werden bei BESSY II Kooperationen mit Institutionen in aller Welt und die weitere Einbindung von BESSY in die Strukturen der Forschungsförderung innerhalb der Europäischen Union gewinnen.

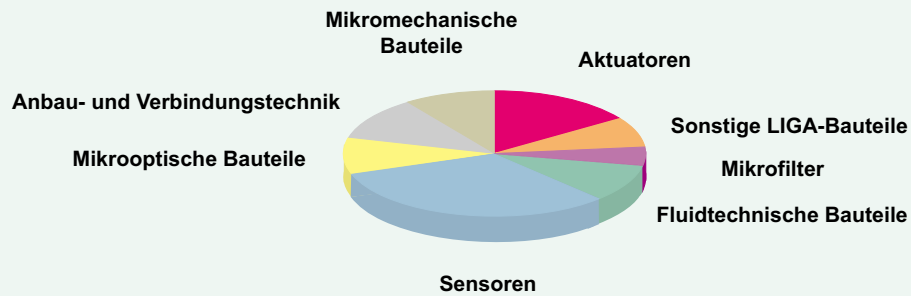
Die bestehende enge Zusammenarbeit mit Berliner Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft und der Max-Planck-Gesellschaft sowie mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wird erhalten bleiben. Beispielsweise betreibt die PTB bei BESSY II wieder

ein Radiometrielabor, wobei die Bearbeitung des höherenergetischen Spektralbereiches (Röntgenstrahlung mit Photonenenergien bis 200 keV) und die Entwicklung der Strahlungsmeßtechnik mit Undulator- und Wigglerstrahlung im Mittelpunkt stehen werden. Zahlreiche Forschungsinstitute und Hochschulgruppen werden sich beim Ausbau von BESSY II mit eigenen Investitionen in Experimentierstationen beteiligen.

Industriebezogene Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bilden einen wichtigen Schwerpunkt der Adlershofer Anlage. So wird im Bereich der Mikrosystemtechnik die Röntgentiefenlithographie für die LIGA-Technik eine wesentliche Rolle spielen.

In Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Mikrosystemtechnik (IMT) des Forschungszentrums Karlsruhe, dem Institut für Mikrotechnik Mainz (IMM), dem Institut für Silizium-Technologie Berlin und BESSY wurde schon bei BESSY I ein Mikrostruktur-Labor betrieben, um die





Produktpalette der LIGA-Technik

LIGA-Technologie für industrielle Anwendungen zu nutzen. In diesem Labor sollen die Röntgentiefenlithographie und andere Schritte des LIGA-Prozesses weiterentwickelt und eine industrierelevante Fertigung erprobt werden. Eine Erweiterung dieser Aktivitäten ist vorgesehen.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt bei BESSY II wird das Gebiet der Röntgenmikroskopie sein. Die mehr als zehntausendfach höhere Brillanz und der VUV- bzw. XUV-Wellenlängenbereich der Synchrotronstrahlung von BESSY erlauben die Beobachtung von lebenden Organismen in natürlicher Umgebung mit einer Auflösung von einem hundertstel Mikrometer und weniger. Das erschließt dieser Methode ein breites Anwendungs- und Untersuchungsspektrum auf Gebieten der Biologie und Medizin. Ähnliche Entwicklungen zeichnen sich im Bereich der Bodenkunde und der Kolloidchemie ab.

Artverwandte Techniken werden im Bereich der Spektromikroskopie und Mikro-Spektroskopie eingesetzt. In beiden Fällen besteht das Ziel darin, mit mikroskopischer räumlicher Auflösung Analytik zu betreiben. Neben Anwendungen in der Mikroelektronik bilden Kompositwerkstoffe, dünne Filme und Schichtsysteme einen Schwerpunkt der künftigen Arbeiten.

Vorgesehen ist aber auch, daß BESSY die eigenen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf den Gebieten der Beschleunigerphysik, der experimentellen Nutzung von Synchrotronlicht und der Konstruktion von physikalischen Meß- und Experimentiergeräten mit höchsten technologischen Anforderungen ausweitet. BESSY in Berlin-Adlershof wird Teil einer erneuerten Forschungs- und Technologielandschaft sein. Von hier aus werden vielfältige Impulse für Forschung und Entwicklung ausgehen, zu denen auch die Zusammenarbeit

mit den Technologieunternehmen am Standort beitragen wird. Das Interesse der Forschung an der neuen Lichtquelle BESSY II ist heute schon spürbar und verspricht, Berlin zu einem noch stärkeren Anziehungspunkt als bisher für Forscher aus aller Welt werden zu lassen.



*Mikromotor im Vergleich mit einer Pusteblume
(Quelle: Institut für Mikrotechnik Mainz)*



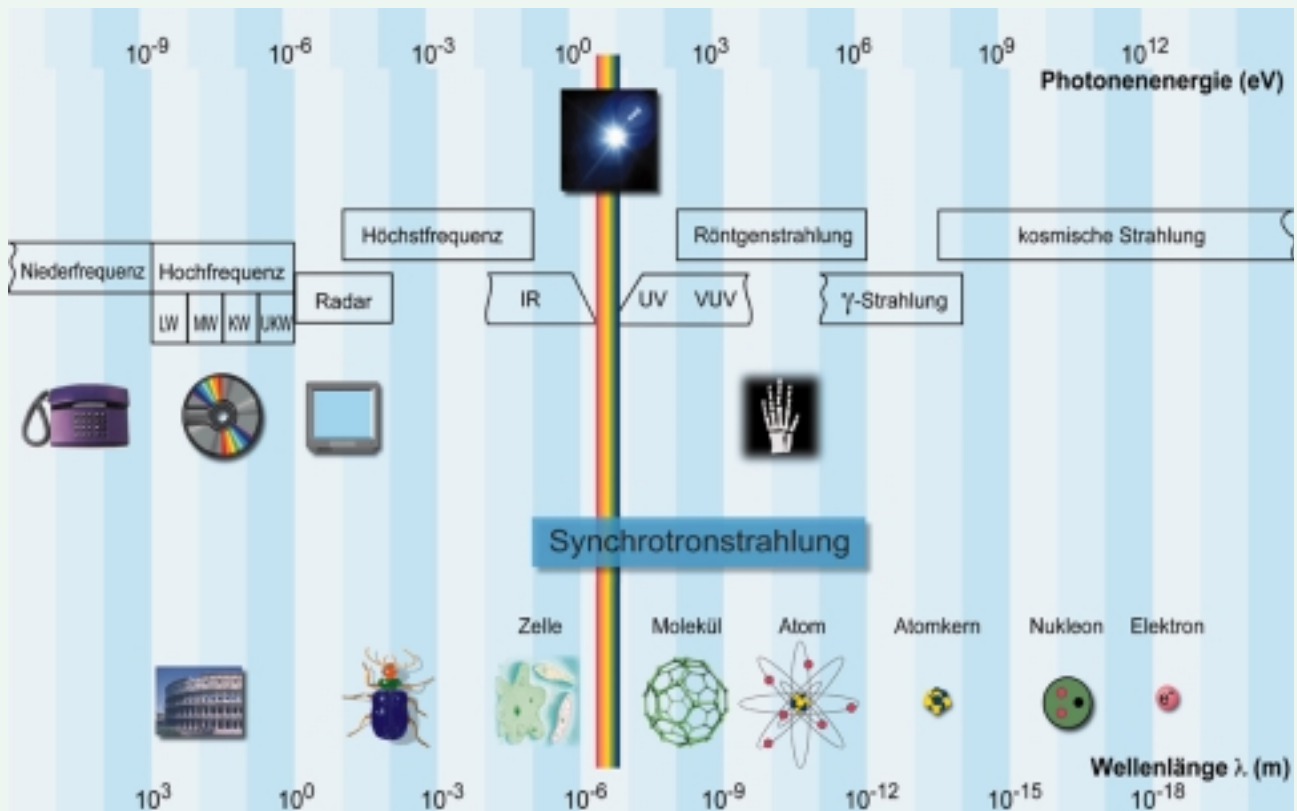


Synchrotronstrahlung

Was ist Synchrotronstrahlung?

Licht in ursprünglicher Bedeutung ist der für unser Auge zugängliche Teil des elektromagnetischen Spektrums. Er ist aber nur ein Bruchteil des Gesamtspektrums. In anderen Bereichen der elektromagnetischen Strahlung werden die Wellen zum Beispiel als Radiowellen, Mikrowellen, ultraviolette Strahlung, Röntgenstrahlung oder kosmische Strahlung bezeichnet. Jede Strahlungsart ist im weitesten Sinne „Licht“.

bewegen, von einem Magneten radial abgelenkt werden. Synchrotronstrahlung wird immer in Vorwärtsrichtung abgegeben, so wie Wassertropfen von einem rotierenden Autoreifen geschleudert werden. Im Labor beobachtet man diese Strahlung in einem schmalen Lichtkegel entlang der Flugrichtung des Elektrons. Je höher die Bewegungsenergie der Teilchen, desto stärker ist das Licht gebündelt und desto energiereicher ist das Licht.



Das elektromagnetische Spektrum

Der Wunsch, auch das „sehen“ zu können, was dem menschlichen Auge von der Natur aus verwehrt ist, entspricht von jeher dem ureigensten Forscherstreben. Der Erfolg einer „sichtbar machenden“ Untersuchung hängt davon ab, wie es gelingt, Strahlung der richtigen Wellenlänge mit hoher Intensität auf die Probe zu fokussieren. Synchrotronstrahlung ermöglicht dieses „Sehen“. Sie ist eine intensive Strahlungsquelle. Synchrotronstrahlung entsteht, wenn leichte, geladene Teilchen wie z.B. Elektronen, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit

Elektronen sind praktisch punktförmige, elektrisch geladene Teilchen. Sie bilden die Hülle der Atome. Die Anordnung der Elektronen in Atomen, Molekülen und Festkörpern bestimmt die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Materie. Diese elektronische Struktur von Materie wird bei BESSY mit Hilfe von „Licht“ untersucht, welches seinerseits mit Hilfe von hochbeschleunigten Elektronen erzeugt wird.



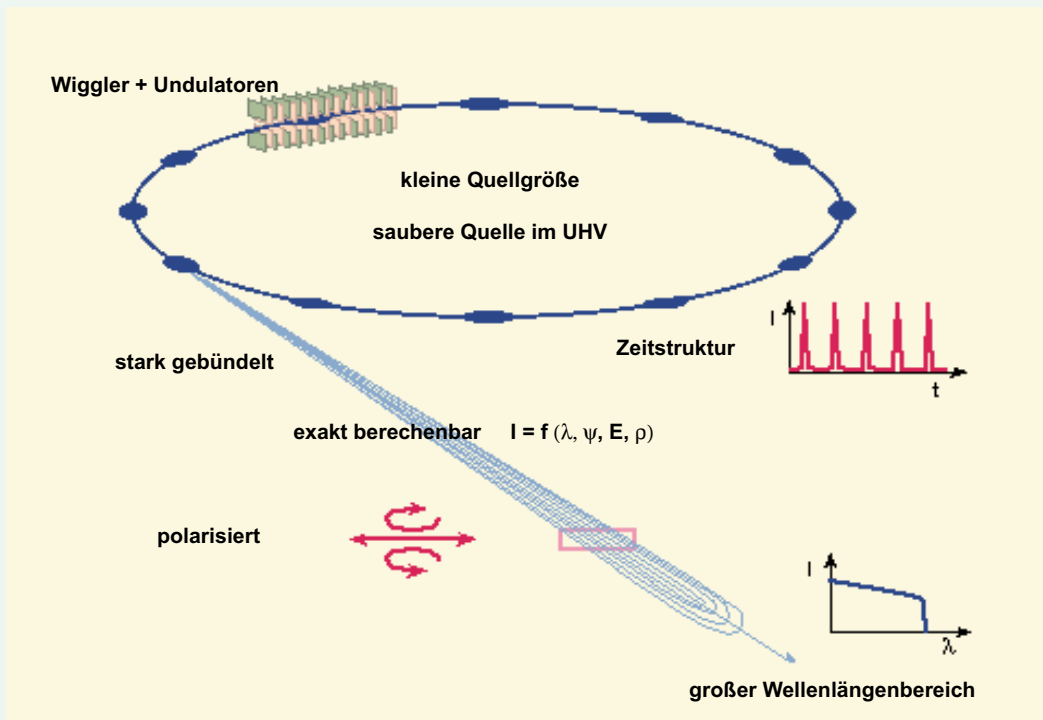
➤ Eigenschaften von Synchrotronstrahlung

Synchrotronstrahlung ist bezüglich vieler Eigenschaften herkömmlichen Strahlungsquellen (z.B. Röntgenröhren) weit überlegen und in dem großen Bereich vom Vakuum-Ultraviolett bis zur harten Röntgenstrahlung des elektromagnetischen Spektrums praktisch ohne Konkurrenz.

Die herausragendste Eigenschaft der Synchrotronstrahlung liegt in ihrer sehr hohen Intensität, die über einen weiten Spektralbereich verfügbar ist. Für eine experimentelle Nutzung ist dies von außerordentlicher Bedeutung. Deshalb ist bei der Planung und dem Bau neuer Strahlungsquellen die Erhöhung der nutzbaren Intensität das alles beherrschende Ziel.

Monochromator ergibt eine kontinuierlich abstimmbare Strahlungsquelle hoher Intensität. Da an einem Speicherring mehrere Monochromatoren aufgebaut sind, können viele Untersuchungen gleichzeitig durchgeführt werden. Bei BESSY I kommen mehr als 30 Experimentierplätze mit entsprechenden Monochromatoren zum Einsatz.

Zu den bemerkenswerten Eigenschaften der Synchrotronstrahlung gehören die starke Bündelung (gleichbedeutend mit einem kleinen Öffnungswinkel) und die Kleinheit des Quellvolumens. Schon bei BESSY I hat der Elektronenstrahl, von dem die Synchrotronstrahlung



Eigenschaften der Synchrotronstrahlung

Die mit hoher Intensität ausgesandte Strahlung zeigt ein Kontinuum, das heißt, sie ist sehr breitbandig, enthält also Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen. Der Experimentator benötigt in der Regel jedoch eine Lichtquelle mit nur einer Wellenlänge, eine monochromatische Strahlung. Dies erreicht man mit Hilfe eines Monochromators, der auf die benötigte Wellenlänge eingestellt wird. Dabei wird die Einstellung nach den Erfordernissen des Experiments variiert. Die Verbindung der breitbandigen Synchrotronstrahlung mit einem

ausgesandte Strahlung, einen Querschnitt, der kleiner ist als der Punkt am Ende dieses Satzes. Eine weitere Verkleinerung des Leuchtflecks wird durch Anwendung von Hohlspiegeln erreicht.

Im Gegensatz zu anderen Lichtquellen sind die Eigenschaften der Synchrotronstrahlung mit hoher Genauigkeit berechenbar. Dies ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Kalibrierung von Detektoren bzw. Strahlungsquellen.



Attraktiv ist auch die Tatsache, daß die Elektronen, die in einem Speicherring umlaufen, Pakete bilden. Bei BESSY haben diese Elektronenpakete die Form und Ausdehnung feiner Nähnadeln, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch das Vakuumrohr „fliegen“. Die Synchrotronstrahlung hat die durch die Elektronenpakete geprägte Zeitstruktur, kurze, intensive Lichtblitze werden erzeugt. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Vorgänge im atomaren Bereich zeitlich zu verfolgen.

Synchrotronstrahlung besitzt einen hohen linearen Polarisationsgrad, das heißt, das Licht hat in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung eine bevorzugte Schwingungsrichtung, die mit der Ringebene zusammenfällt. Dadurch erhält man richtungsabhängige Informationen. Daneben wird zirkular polarisierte

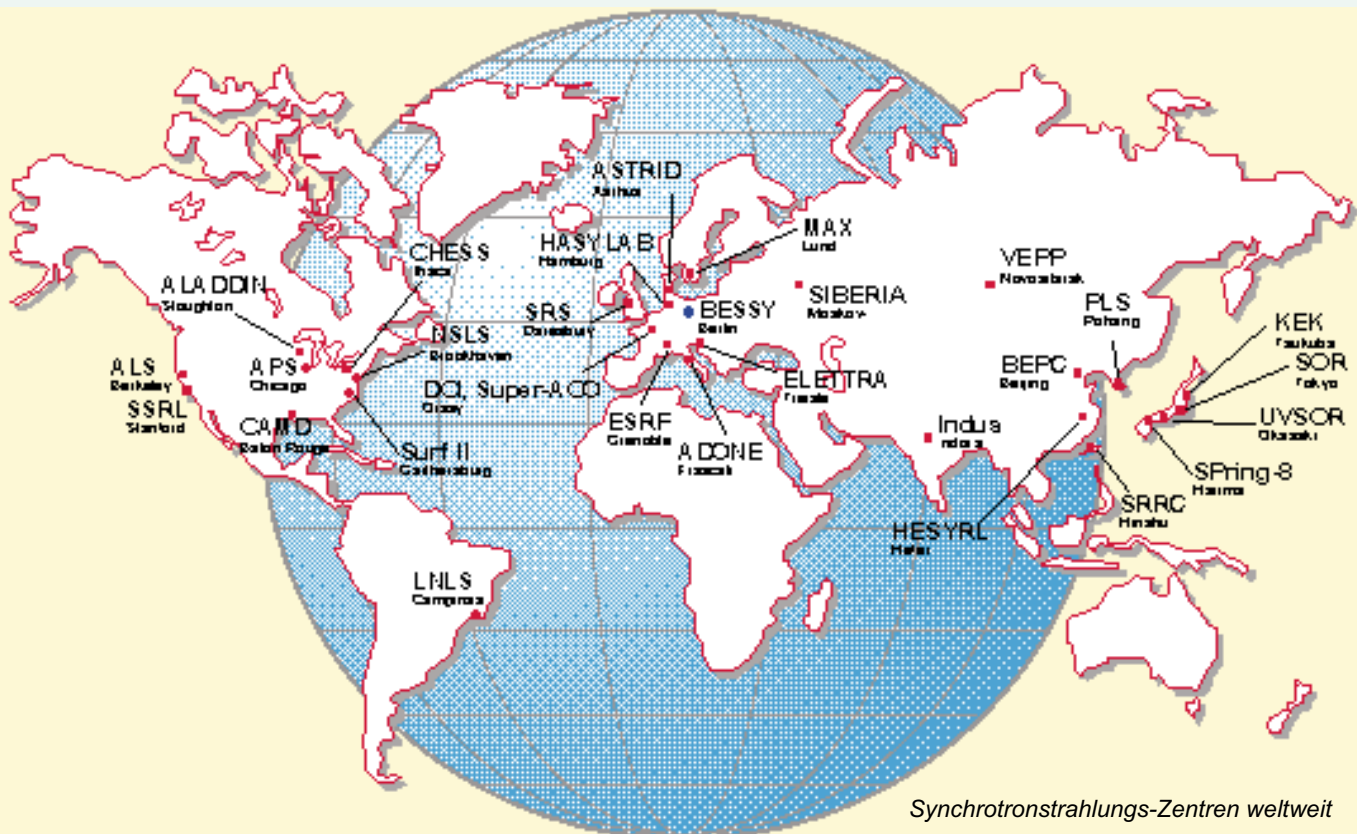
Strahlung erzeugt, die insbesondere für die Forschung an magnetischen Materialien von Bedeutung ist.

Zu den für Experimentatoren wertvollen Eigenschaften gehört zudem, daß die Erzeugung und Führung der Synchrotronstrahlung ausschließlich im Ultrahochvakuum stattfindet. Die Rohre des Speicherrings und der Monochromatoren enthalten 1.000.000.000.000 (das entspricht 1 Million x 1 Million) mal weniger Teilchen als die Luft. Eine Verschmutzung der Probe durch die Strahlungsquelle ist dadurch nahezu ausgeschlossen, eine Eigenschaft, die für die Untersuchung von Oberflächen sehr wichtig ist. Die einzelnen Proben können somit relativ langen Meßzeiten ausgesetzt werden, ohne daß die Gefahr der Fehlinterpretation bedingt durch Fremtteilchen besteht.

Historische Entwicklung

Der Entwicklungsprozeß, der mit der Synchrotronstrahlung verbunden ist, verlief ganz typisch für eine wissenschaftliche Entdeckung, deren Nutzung eng mit dem Stand der Technik verknüpft ist. Im Jahre 1944 von IVANENKO und POMERANSCHUK (Rußland) voraus-

gesagt, wurde drei Jahre später, eher zufällig, die Strahlung in einem Kreisbeschleuniger des Typs Synchrotron beobachtet. Sie galt lange Zeit als lästiges „Abfallprodukt“, denn Synchrotronstrahlung entsteht in den Beschleunigern als magnetische Bremsstrahlung und



Synchrotronstrahlungs-Zentren weltweit



begrenzt, völlig unerwünscht, die erzielbare Endenergie der beschleunigten Teilchen. Erst Jahre später, 1956, setzten TOMBOULIAN und HARTMANN die Synchrotronstrahlen zum ersten Mal gezielt für wissenschaftliche Untersuchungen ein. Sie waren es auch, die erstmals auf die mannigfaltigen Möglichkeiten dieser Strahlung als Werkzeug für den Forscher hinwiesen.

Zu den ersten eigenständigen Forschungseinrichtungen, die in den späten sechziger Jahren mit der gezielten Anwendung der Synchrotronstrahlung begannen, gehörten in Deutschland das spätere Hamburger Labor HASYLAB am Forschungszentrum DESY und in den USA das Labor in Stanford/Kalifornien. Innerhalb weniger Jahre unterstrichen viele hochwertige Forschungsergebnisse die Wichtigkeit der Synchrotronstrahlung. Das führte dazu, daß eigens für Synchrotronstrahlungsexperimente

optimierte Speicherringe, Quellen der 2. Generation genannt, u.a. in Tokio/Japan, Brookhaven/USA, Daresbury/U.K., Lund/Schweden und Berlin-Wilmersdorf errichtet wurden.

Heute, im Jahre 1996, sind Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation weltweit in Betrieb bzw. im Bau, wie European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble/Frankreich, ELETTRA in Triest/Italien, MAX II in Lund/Schweden, ALS in Berkeley/USA, APS in Chicago/USA, SPring-8 in Hamina/Japan und BESSY II.

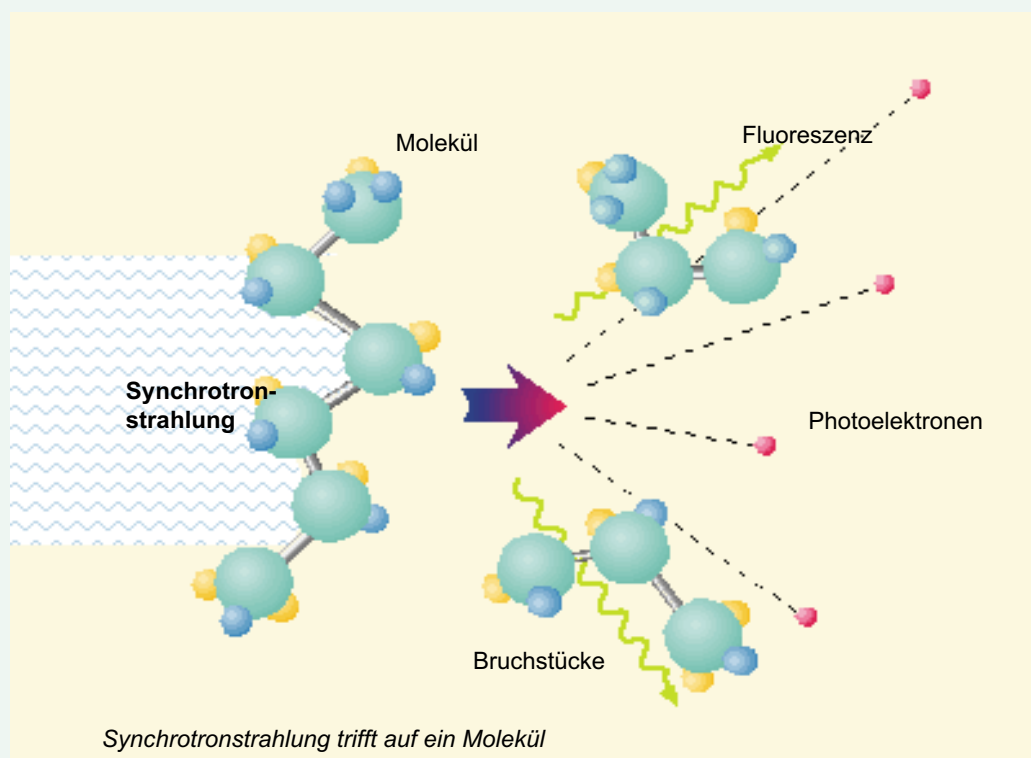
In diesen Strahlungsquellen wird durch Einsatz periodischer Magnetstrukturen, den Wiggler und Undulatoren, eine bedeutende Intensitätserhöhung des abgestrahlten Lichtes erzielt. Daraus resultieren für den Forscher wesentlich verbesserte Untersuchungsbedingungen.

➤ Synchrotronstrahlung als vielseitiges Werkzeug

Die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie erfolgt durch Streuung sowie durch Absorption des Lichtes. Auf dieser Grundlage kann die Struktur und der Aufbau der Atome und Moleküle abgebildet und die Zusammenhänge in ihren Elektronenhüllen untersucht werden. Das Spektrum der Synchrotronstrahlung umfaßt einen großen Wellenlängenbereich, so daß dieses „Licht“ zu unterschiedlichen Strukturuntersuchungen eingesetzt werden kann.

Die harte Röntgenstrahlung mit ihren durchdringenden, hochenergetischen Strahlen besteht aus Lichtteilchen (Photonen) mit Wellenlängen, die den interatomaren Abständen kristalliner Strukturen entsprechen. Dies bewirkt die elastische Streuung (Beugung) der Photonen an den atomaren und molekularen Bausteinen der kristallinen Körper und bildet die Grundlage für den bevorzugten Einsatz der Röntgenbeugung zur Aufklärung geometrischer Strukturen der Materie.

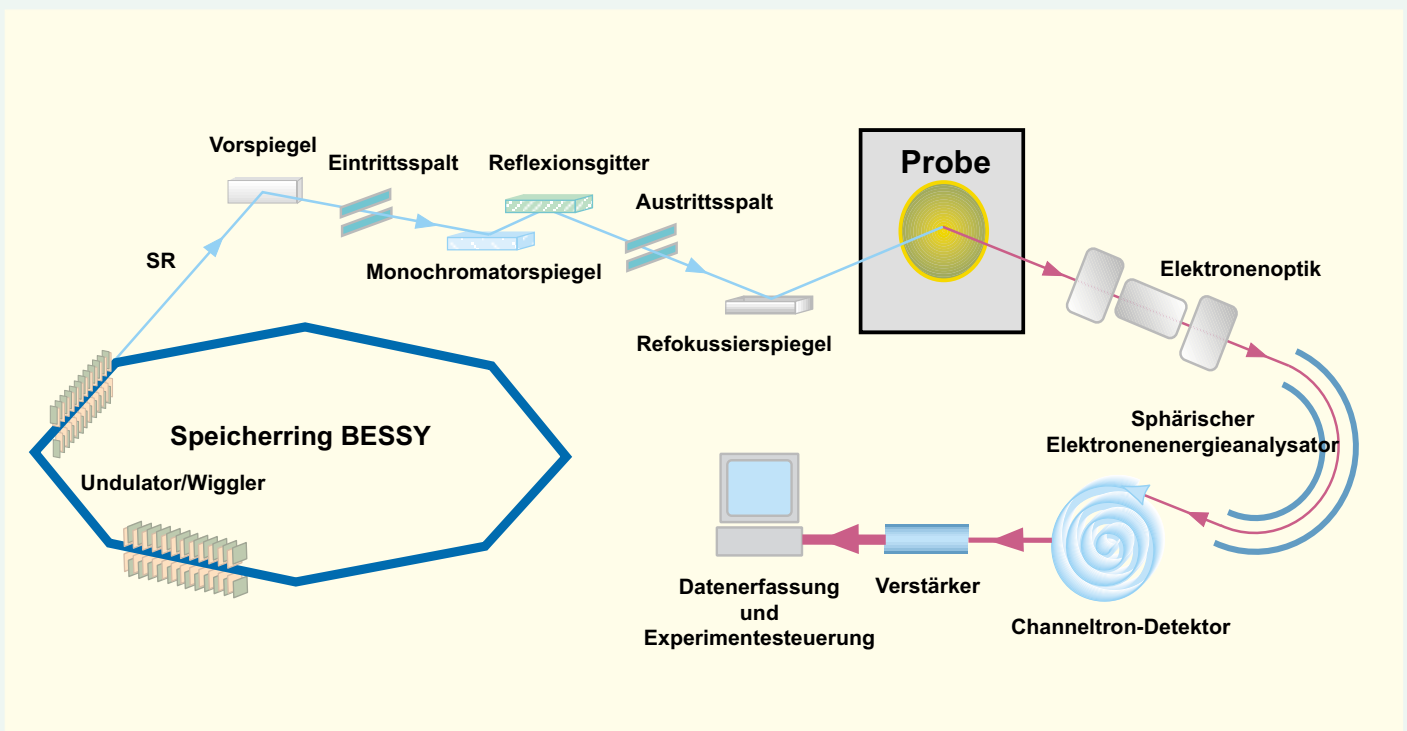
Die Elektronenstruktur der atomaren und molekularen Anordnungen, die in enger Beziehung zu den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Materie steht, wird auf der Basis von Absorption und inelastischen Streuprozessen untersucht. Der zugrundeliegende physikalische Vorgang ist die Photoemission.



Durch Einstrahlung von Licht werden Elektronen aus der Probe herausgelöst, wobei dieser Prozeß auf der gezielten Anpassung der Lichtfrequenz an die Resonanzen des Untersuchungsmaterials beruht. Wegen der großen Materialvielfalt muß allerdings die benötigte Lichtquelle sehr flexibel sein, eine Eigenschaft, die die Synchrotronstrahlung charakterisiert.

nisse haben Eingang in die Halbleiterfertigung oder im Bereich der heterogenen Katalyse in die Chemieproduktion gefunden. Erst jüngst gelang es, die sonst schwierige Verbindung von Polymeren mit Keramiken herzustellen.

Synchrotronstrahlung hat gegenüber konventionellen Quellen wie Röntgenröhren oder Entladungslampen den



Typische Experimentieranordnung bei BESSY

Synchrotronstrahlung wird für die Strukturbestimmung von kristallinen und amorphen Festkörpern, Adsorbaten, Flüssigkeiten sowie Molekülen in der Gasphase verwendet. Es gibt eine Vielzahl von Analysetechniken, die auf dem Prinzip der Photoemission beruhen. Darunter gibt es Methoden mit dem Vorteil, daß in den zu untersuchenden Systemen keine ausgeprägte Fernordnung bestehen muß, das heißt, die Atome müssen nicht über makroskopische Bereiche regelmäßig angeordnet sein.

Erkenntnisse über die Struktur von Materie sind in erster Linie Ergebnisse der Grundlagenforschung. Die Auswirkungen dieser Forschungsergebnisse auf unser tägliches Leben sind häufig schwer zu prognostizieren, dürfen jedoch nicht unterschätzt werden. Viele solcher Ergeb-

nisse haben den Vorteil der hohen Intensität und der guten Fokussierbarkeit. Der Physiker bezeichnet diese Eigenschaften zusammenfassend als Brillanz, die ein quantitatives Maß für die Güte einer Strahlungsquelle darstellt. Die hohe Brillanz der Synchrotronstrahlung kommt allen Untersuchungsmethoden zugute. Sie wird aber vor allem bei Untersuchungen mit hoher räumlicher und/oder spektraler Auflösung benötigt.

Die Einsatzmöglichkeiten von Synchrotronstrahlung sind vielfältig. Insbesondere die Mikrospektroskopie, die hochauflösende Spektroskopie, die Analytik und die Strukturanalyse sind auf die Synchrotronstrahlung als Quelle angewiesen. Weitere Anwendungen ergeben sich in der Mikrotechnologie und der Radiometrie.





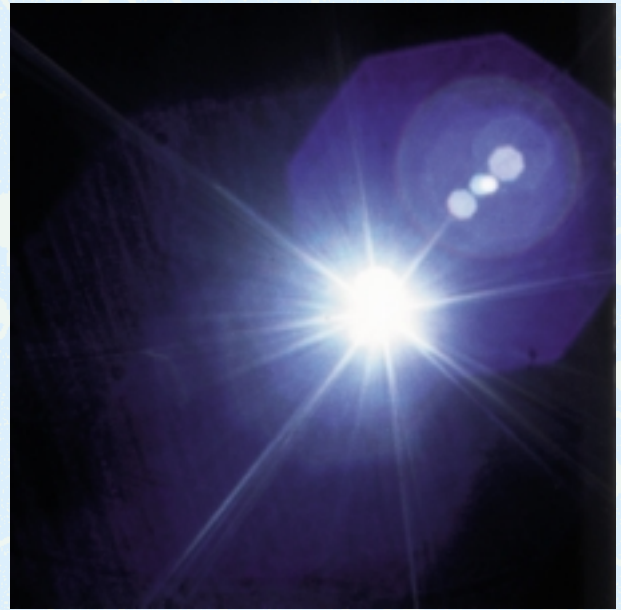
Grundbegriffe

Elektromagnetische Strahlung

Elektromagnetische Strahlung ist durch ihre Frequenz oder gleichwertig durch ihre Wellenlänge sowie durch die Ausbreitungsrichtung und die Polarisation im wesentlichen charakterisiert. Die Wellenlänge ist um so kürzer, je höher die Frequenz ist. Alle elektromagnetischen Strahlen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus, sie unterscheiden sich aber in der Frequenz bzw. der Wellenlänge. Die Variationsbreite ist dabei gigantisch, nämlich von Wellenlängen im Kilometerbereich bis hin zu Dimensionen, die für die Größe von Elementarteilchen wie Protonen und Neutronen typisch sind.

Licht besitzt einen dualen Charakter. Die Ausbreitung von Licht wird mit einem Wellenmodell beschrieben, während der Energieaustausch zwischen einem elektromagnetischen Feld und einer in Materie vorhandenen elektrischen Ladung in Energiepaketen, den sogenannten Quanten oder Photonen, erfolgt. Die Energiemenge, die ein solches „Teilchen“ übertragen kann, ist bei einer kurzwelligen oder hochfrequenten Strahlung größer als bei einer langwelligen Strahlung. Üblicherweise wird diese Energie in Elektronenvolt, eV, gemessen. Liegt der Energiegehalt im Bereich des sichtbaren Lichtes

zwischen ca. 1,6 eV und 3,0 eV, so steigt er bei der Gammastrahlung auf Werte von 100.000.000 eV. Diesen Welle-Teilchen-Dualismus teilt das Licht übrigens mit allen anderen Elementar„teilchen“.



Synchrotronstrahlung ist auch sichtbar

Bindungsenergie und Photoeffekt

Die Atome, Grundbausteine der Materie, bestehen aus positiv geladenen Atomkernen, die von negativ geladenen Elektronen umgeben werden. Dabei ist die Anzahl der Elektronen und deren Umlaufbahnen, den Orbitalen, bei verschiedenen Atomen unterschiedlich. Ein Elektron kann im Atomverband nur eine bestimmte Energie besitzen, so daß die Elektronen auf diskrete Energieniveaus verteilt sind. Diese Verteilung der Elektronen bestimmt die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Stoffes.

Die Energie, die benötigt wird, um das Elektron aus seiner Bahn zu entfernen, wird Bindungsenergie genannt. Die Größenangabe erfolgt in Elektronenvolt, eV. Für jedes Element, jede Verbindung oder Stoffart ist

entsprechend der Anzahl der Elektronen und der Energieniveaus ein spezifisches Spektrum an Bindungsenergien charakteristisch.

Zur Anregung der Elektronen, d.h. zum Verändern der Bindungsenergie bzw. zum Ablösen von Elektronen muß dem Atomverband Energie zugeführt werden. Dies kann auf verschiedene Weise geschehen. Bei BESSY erfolgt die Energiezuführung mit dem Licht der Synchrotronstrahlung, das heißt durch Absorption eines Strahlungsquants.

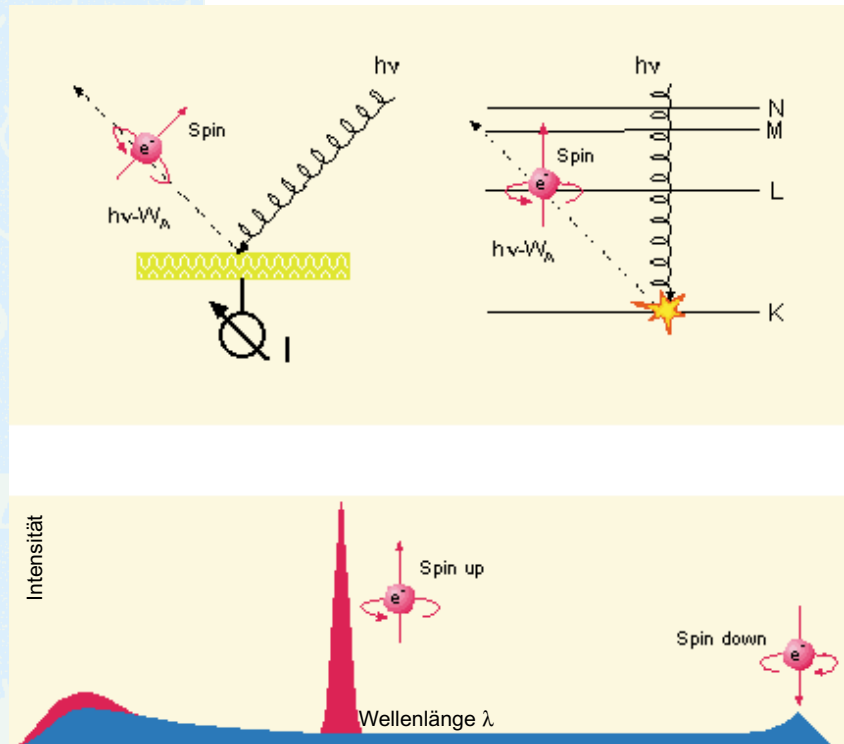
Dabei wird die gesamte Strahlungsenergie eines Photons einem Elektron des bestrahlten Materials übergeben. Die Anzahl der Photonen und damit die Zahl



der herausgelösten Photoelektronen ist zur Lichtintensität proportional. Ist die durch das Photon zugeführte Energie größer als die Bindungsenergie, wird das Elektron aus seinem Verband gelöst und die noch verbleibende Energie wird in Bewegungsenergie umgewandelt. Geschieht dieser Prozeß an Materie, die sich im Vakuum einer Experimentierkammer bei BESSY befindet,

kann das wegfliegende Elektron in entsprechenden Detektoren nachgewiesen werden. Diese von HALLWACHS 1887 entdeckte Eigenschaft von Materie, bei Bestrahlung mit kurzwelligem Licht Elektronen auszusenden, ist unter dem Begriff Photoeffekt bzw. Photoemission bekannt. ALBERT EINSTEIN lieferte 1905 die theoretische Erklärung dafür, die mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde.

Beim Photoeffekt nutzt das Photon seine Energie, um ein Elektron aus der Schale zu lösen. Die überschüssige Energie erhält das Elektron als Bewegungsenergie. Das Atom ist danach in einem ionischen Zustand, in dem es in der Regel nicht lange verbleibt. Die entstandene Lücke auf einer inneren Schale wird durch den Sprung eines Elektrons von der äußeren Schale wieder aufgefüllt. Da Elektronen der kernnäheren Schale stärker gebunden sind als die der kernferneren, wird Energie freigesetzt, die beispielsweise als Röntgenstrahlung (Röntgen-Fluoreszenz) entweder das Material verlassen kann oder ihrerseits das Material weiter ionisiert. Die Energie kann auch zur Aussendung eines Elektrons aus einer äußeren Schale führen, wobei der Überschuß als Bewegungsenergie auftritt (sogenannter Auger-Effekt).



Schematische Darstellung des Photoeffektes unter Verwendung von zirkular polarisiertem Licht $h\nu$ der Synchrotronstrahlung (Spin-Aufteilung in Spin up- und Spin down-drehende Elektronen)

Energieeinheit: eV

Eine Einheit im physikalisch-technischen Sinn dient zur quantitativen Bestimmung (Messung) von Größen gleicher Art. Der Meter für die Länge, die Sekunde für die Zeit, das Volt für die elektrische Spannung, um einige Beispiele zu nennen, vermitteln uns eine bestimmte Vorstellung über die Wesensart eines Geschehens, eines Zustandes oder einer Eigenschaft.

Das Elektronenvolt eV ist eine in der Atomphysik übliche Einheit. Sie ist die Energie, die ein Elektron mit der Elementarladung e beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von 1 Volt aufnimmt. Die Einheit Elektronenvolt, eV, ist von solch einer Kleinheit, daß sie bei

der Beschreibung von Vorgängen des normalen Alltags zu unhandlich großen Zahlen führt. Im mikroskopischen Bereich dagegen spielt diese Energieeinheit eine wichtige Rolle, denn die hier auftretenden Energien sind von dieser Größenordnung. Die Bindungsenergien von Elektronen, die für das Verständnis physikalischer und chemischer Prozesse von großer Bedeutung sind, liegen zwischen 1 eV und 100.000 eV.

In Speicherringen erreichen Teilchen je nach Bauart eine Bewegungsenergie von einigen Tausend eV (keV) bis zu einigen Billionen eV (GeV) und mehr.



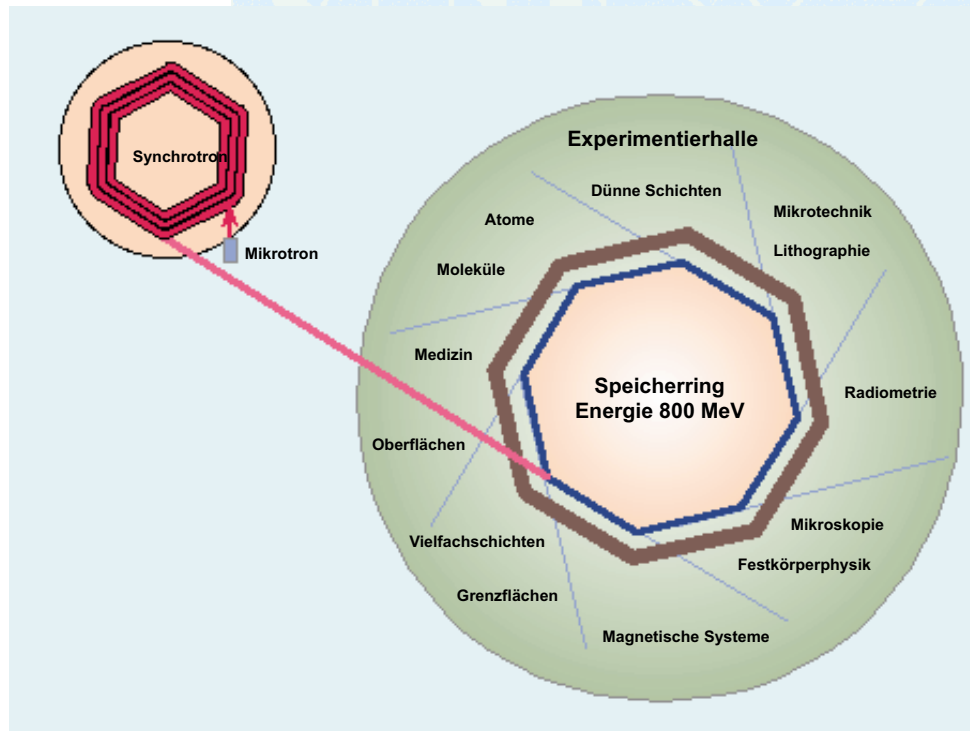
Instrumentarium

Eine Untersuchung mit Synchrotronstrahlung erfordert das Zusammenwirken mehrerer Systeme. Ein Beschleunigersystem beschleunigt Elektronen, die in einem Speicherring für mehrere Stunden umlaufen und dabei die Synchrotronstrahlung abgeben. Die Strahlung wird mit Spiegeln und Monochromatoren aufbereitet. In den Experimentieranordnungen wird die zu untersuchende Probe präpariert und die eigentliche Messung durchgeführt. Die Auswertung der Daten erfordert elektronische Datenverarbeitung.

Beschleuniger und Speicherring

Das Beschleunigersystem bei BESSY I ist typisch für Synchrotronstrahlungsquellen. Die Freisetzung der Elektronen funktioniert ähnlich wie in einer Fernsehöhre. Im Hochvakuum werden von einer Glühkathode Elektronen ausgelöst, die durch eine Anodenspannung von ca. 100.000 Volt beschleunigt werden. Die zweite Beschleunigungsstufe ist ein Mikrotron. Das ist ein Hohlraumresonator, in dem ein starkes elektrisches Hochfrequenzfeld besteht, das 40mal durchlaufen wird. Die Elektronen werden im Magnetfeld des Mikrotrons auf Kreisbahnen mit immer größer werdendem Durchmesser gehalten, bis schließlich eine Energie von 22 Mio eV erreicht ist.

Nun gelangen die Teilchen in das Synchrotron, das als Vakuumkammer eine zu einem Ring von 38,40 m Umfang geschlossene Röhre mit einem Querschnitt von etwa $4 \times 8 \text{ cm}^2$ hat. Die Elektronen werden durch starke Magnete auf einer Bahn innerhalb des Vakuumrohrs gehalten und erneut durch Wechselfelder eines Hohlraumresonators auf die Endenergie von 800 Millionen eV beschleunigt. Damit die Elektronen trotz dieser Energiezunahme auf ihrer Bahn bleiben, wächst das Magnetfeld synchron zur Beschleunigung bzw. Energieaufnahme. Dieser Beschleunigungszyklus wiederholt sich bei BESSY 10mal pro Sekunde, das heißt 10mal pro Sekunde werden etwa 10 Milliarden Elektronen auf die Endenergie beschleunigt. Damit bewegen sich die Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit und werden nunmehr über einen Transferkanal in den Speicherring eingeschossen.



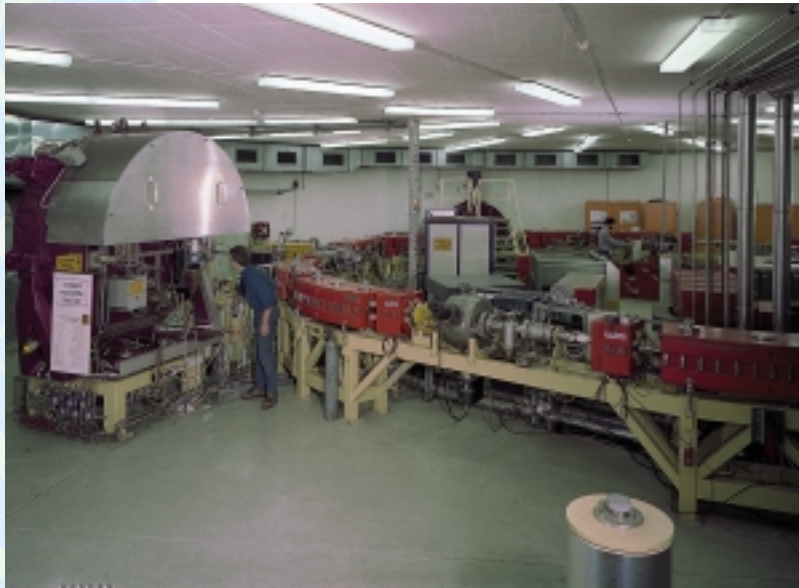
Mikrotron, Synchrotron, Speicherring und Experimentierhalle

Der Speicherring mit einem Umfang von 62,4 m befindet sich bei BESSY I in der Mitte der runden Experimentierhalle und ist von einer Strahlenschutzmauer umgeben. Die Elektronen durchlaufen das ringförmige Vakuumrohr mehrere Stunden lang mit konstanter Geschwindigkeit, etwa 5 Millionen mal in der Sekunde. Dabei wird eine Strecke zurückgelegt, die vergleichsweise der Entfernung der Planeten Erde und Pluto entspricht. Im Speicherring halten starke Magnete die Elektronen auf einer stabilen Umlaufbahn. Die Synchrotronstrahlung selbst entsteht in den durch die Ablenkmagnete bestimmten Kreissegmenten.

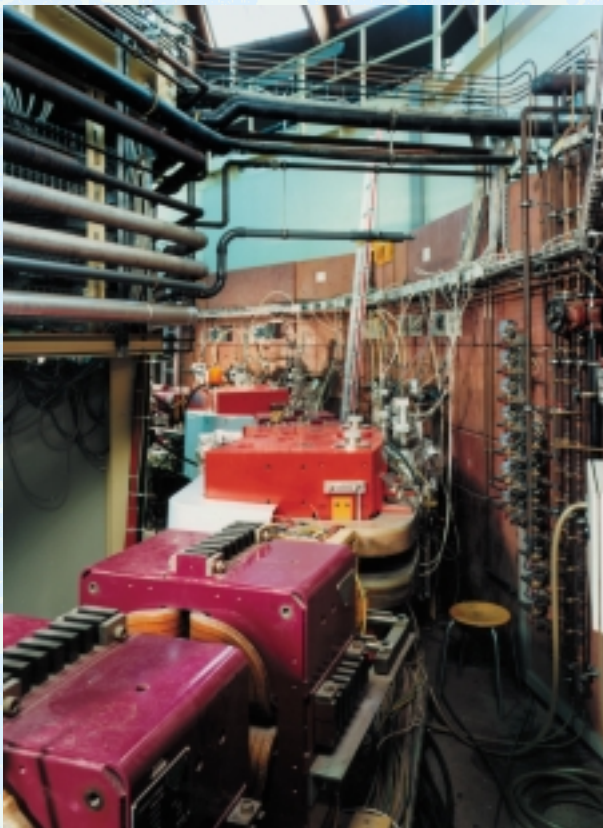


Die Energie, die bei der Abstrahlung von Synchrotronstrahlung dem Teilchenstrahl verlorengeht, wird in einem Hohlraumresonator bei jedem Umlauf ausgeglichen. Die Art der Beschleunigung bewirkt, daß die Elektronen in „Pakete“, sogenannte „bunches“, gruppiert sind. Jedesmal, wenn ein „bunch“ am Strahlrohrauslaß vorbeifliegt, ist ein Lichtblitz zu beobachten. Bei BESSY beträgt die Dauer eines Lichtblitzes etwa 0,2 Nanosekunden, das ist weniger als eine Milliardstel Sekunde!

Die im Speicherring umlaufenden Elektronen stellen einen elektrischen Strom dar. Bei BESSY beträgt die



Mikrotron und Synchrotron



Blick in die Ringschlucht

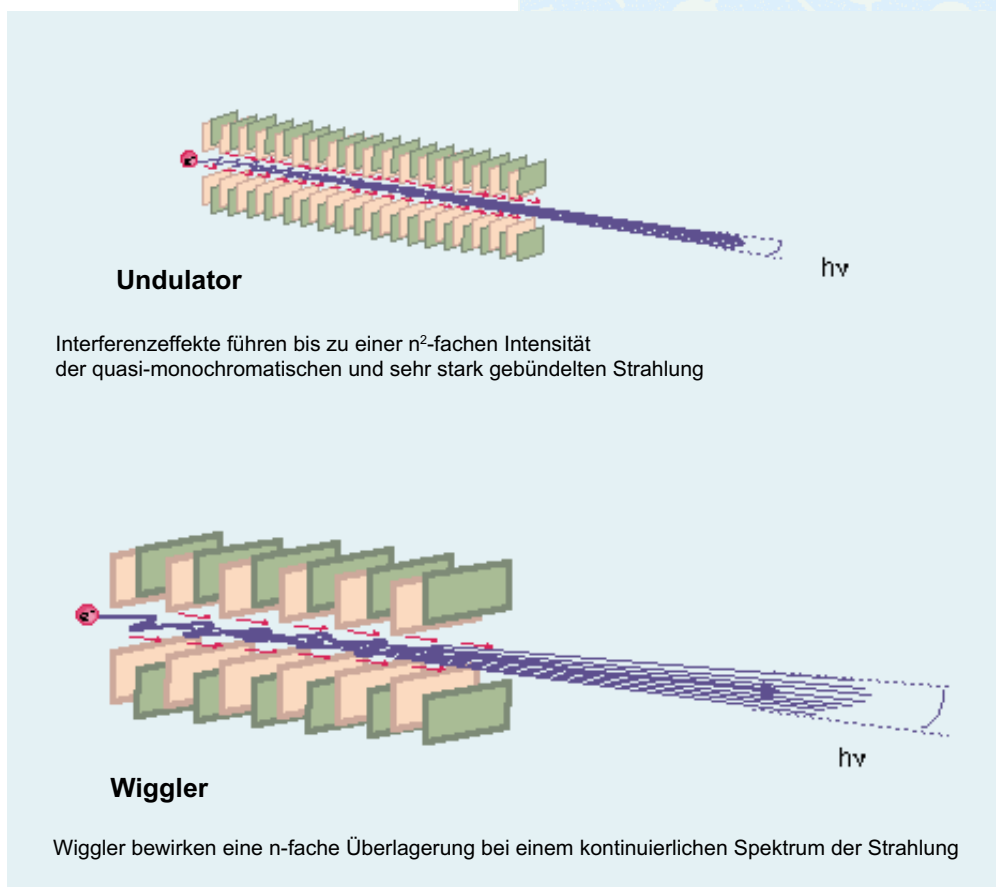
Stromstärke üblicherweise 0,5 Ampere und mehr oder, mit anderen Worten, der BESSY-Speicherring enthält etwa 5×10^{11} Elektronen. Bestimmte Prozesse führen zum Verlust von Elektronen. So kollidieren beispielsweise die Elektronen, obwohl sie in einem Ultrahochvakuum von 10^{-10} hPa umlaufen, mit den wenigen restlichen Gasmolekülen und gehen da-durch verloren. Folglich nimmt der Strom mit der Zeit ab, und der Speicherring muß mit Elektronen vom Synchrotron aufgefüllt werden. Dieser Vorgang dauert wegen des hohen mittleren Stroms des BESSY-Synchrotrons nur wenige Minuten.

Die Synchrotronstrahlung verläßt den Speicherring geradlinig durch Strahlrohre und gelangt über Monochromatoren zu den einzelnen Experimentierstationen. Bei BESSY I gibt es derzeit mehr als 30 solcher Stationen, an denen Forschungsgruppen gleichzeitig und unabhängig voneinander unterschiedliche Untersuchungen ausführen können.

Wiggler und Undulatoren

„Mehr Licht“ wünschen sich alle Nutzer der Synchrotronstrahlung, denn mehr Intensität gestattet dem Experimentator kürzere Meßzeiten, die gleichzeitige Messung mehrerer physikalischer Größen, die Untersuchung kleinster Substanzmengen und eine höhere Auflösung. Mehr Licht ist nicht zuletzt eine qualitative Forderung, denn neben der Intensitätserhöhung ist auch die Strahlfokussierung von wesentlicher Bedeutung.

dieselbe Richtung, wodurch sich die einzelnen abgestrahlten Lichtintensitäten überlagern. Je mehr Bögen die Elektronen durchlaufen, desto größer ist die resultierende Strahlungsintensität. In Undulatoren werden darüber hinaus Interferenzeffekte zu einer weiteren Überhöhung der Intensität ausgenutzt.



Wiggler und Undulatoren

Um „mehr Licht“ zu erzeugen, werden periodische Anordnungen von Permanentmagneten, sogenannte Wiggler und Undulatoren, in gerade Stücke des Speicherringes eingebaut. Sie zwingen dem Elektronenstrahl über eine Länge von mehreren Metern eine schlangenförmige Bahn auf. Jeder Bogen strahlt „nach vorne“ in

Die heutigen modernen Synchrotronstrahlungsquellen, zu denen auch BESSY II gehören wird, sind für die Lichterzeugung in Wiggler und Undulatoren optimiert. Die Funktion des Speicherns von Elektronen und die Funktion der Erzeugung von Licht sind voneinander getrennt und somit ist jede für sich optimierbar.

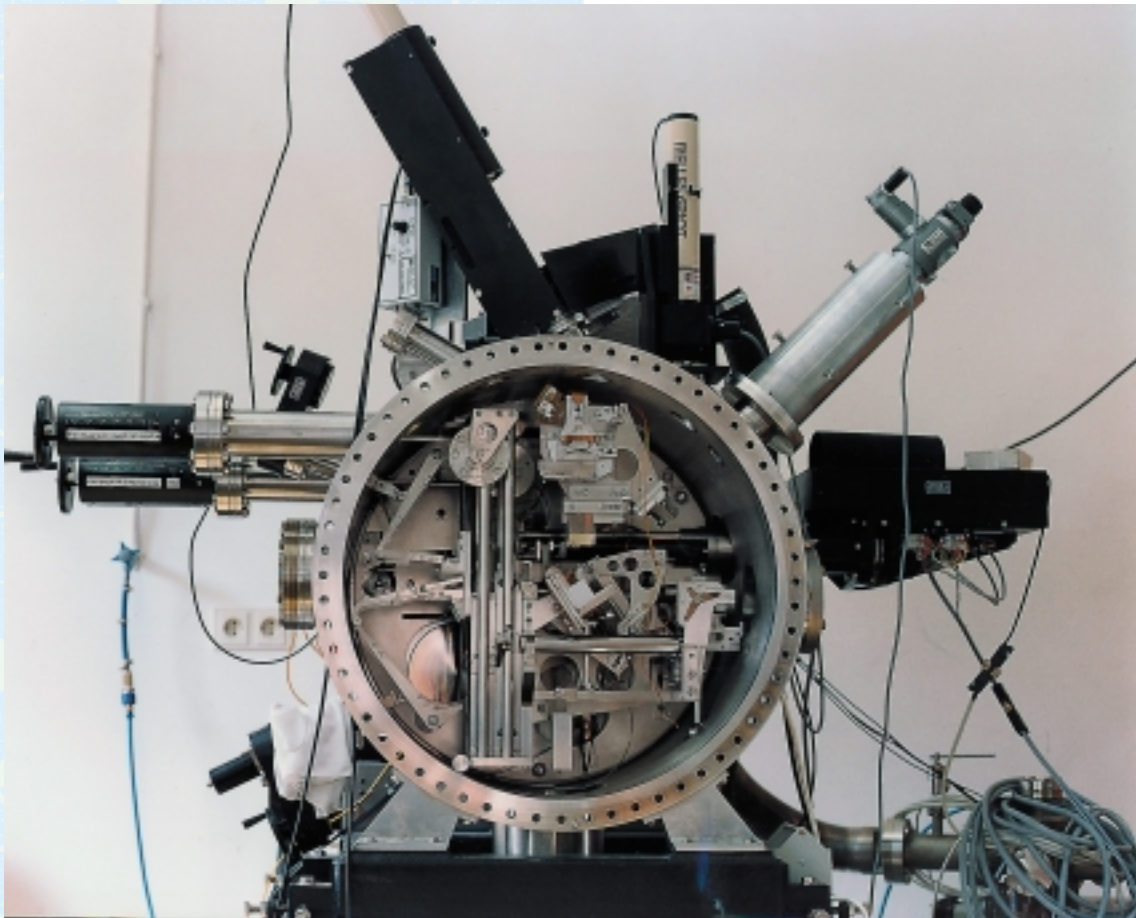


Monochromatoren und Spiegel

Zu jeder experimentellen Anordnung gehört ein Monochromator, der innerhalb eines bestimmten Bereiches die Lage des selektierten Wellenlängenbandes kontrolliert verändern kann. Auf diese Weise erhält man im Zusammenhang mit dem Elektronenspeicherring eine kontinuierlich durchstimmbare, intensive, gepulste, zeitlich stabile Lichtquelle.

gesagt, die gesamte Rasenfläche eines Fußballfeldes muß auf ein zehntel Millimeter genau geschnitten sein.

Die Ausbeute der Monochromatoren zu steigern ist ein immerwährendes Entwicklungsziel. Dazu werden zum Beispiel Spiegelflächen mit unterschiedlichen Metallen wie Gold, Platin, Osmium, Wolfram oder Aluminium



Der BESSY Doppel-Kristall-Monochromator

Bei vielen Anwendungen der Synchrotronstrahlung ist die Fokussierung des Photonenstrahles auf einen kleinen Fleck von wesentlicher Bedeutung. Dafür werden Spiegel mit gekrümmten Oberflächen eingesetzt. Um einen hohen Reflexionsgrad zu erreichen, läßt man die Strahlung häufig unter sehr flachen Winkeln einfallen, „streifender Einfall“ genannt.

Abweichungen von der vorgegebenen Spiegelkrümmung führen zu erheblichen Abbildungsfehlern. Gegenwärtig werden Winkelfehler von kleiner als $1 \mu\text{rad} = 0,21$ Bogensekunden erreicht. Das entspricht etwa eintausend Atomlagen auf 100 mm Spiegelgröße oder anders

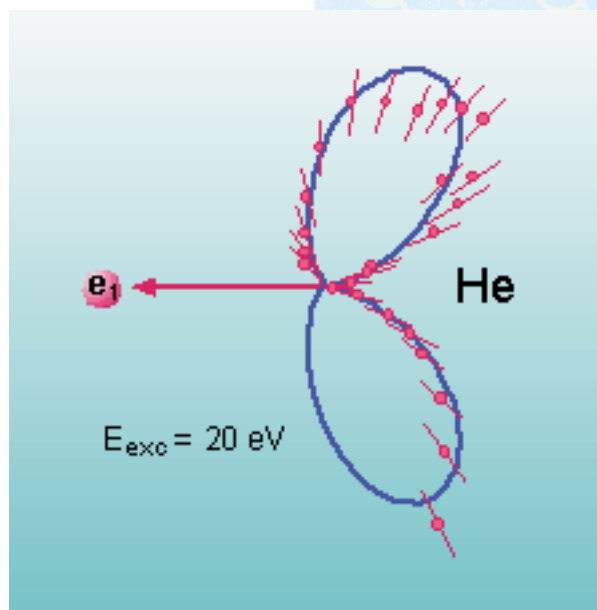
beschichtet. Die Anwendung von Vielschicht-Techniken zur Vergütung der optischen Flächen im VUV - im Sichtbaren von Brillen, Fernrohren und Kameras bekannt - ist eine jüngere, vielversprechende Entwicklung. Ein weiteres Beispiel ist das Verbiegen von Spiegeln im Halter, um sehr große Krümmungsradien und insbesondere das Anpassen der Fokussierung im Betrieb zu erreichen. Diese Technik eignet sich dafür, aufgrund von thermischen Effekten vorübergehend auftretende Verformungen - ein nicht zu unterschätzendes Problem bei Hochleistungs-VUV-Quellen - näherungsweise ausgleichen zu können.

➤ Anwendungsbeispiele

Atomphysik

Das einfachste, mathematisch nicht geschlossen lösbar Vielteilchensystem ist das Dreikörperproblem. In der Atomphysik entspricht dies dem Heliumatom: Zwei negativ geladene Elektronen umgeben den doppelt positiv geladenen Kern.

tronen ist in der Grafik für den Fall dargestellt, daß jedes der beiden Elektronen eine kinetische Energie von 10 eV besitzt. Die Winkelverteilung zeigt Minima bei Polarkwinkeln von 0° (beide Elektronen fliegen in dieselbe Richtung) und 180° (beide Elektronen fliegen in ent-



Der Doppelphotoionisationsquerschnitt in He

Der Photonenstrahl verläuft senkrecht zur Papierebene, die Linearpolarisation ist entlang der Richtung des „ersten“ Elektrons e_1 . Die Winkelverteilung des „zweiten“ Elektrons ist als Polar-Darstellung aufgetragen. Die Punkte mit Fehlerbalken sind die Meßwerte, die durchgezogene Kurve basiert auf theoretischen Berechnungen.

(Quelle: Arbeitsgruppe V. Schmidt, Universität Freiburg)

Ein hinreichend energiereiches Photon ist in der Lage, beide Elektronen gleichzeitig so hoch anzuregen, daß sie den Atomverband verlassen und als freie Elektronen in der Meßkammer nachgewiesen werden können. Bei BESSY wurden von einer Arbeitsgruppe aus Freiburg energie- und winkelabhängige Untersuchungen der Photoelektronen am Helium durchgeführt.

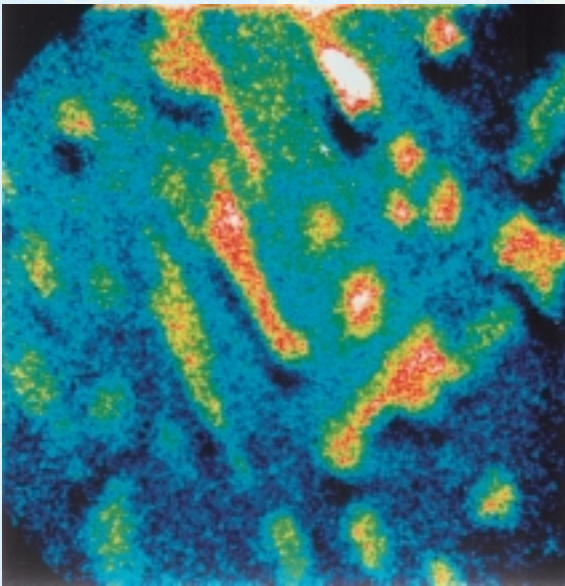
Die gemessene und die theoretisch berechnete Richtungsverteilung der beiden wegfliegenden Photoelek-

gegengesetzter Richtung). Das Minimum bei 180° entsteht aufgrund quantenmechanischer Effekte (Antisymmetrierung der Wellenfunktion), für die es in der klassischen Physik kein Analogon gibt. Das Minimum bei 0° ist auf die Korrelation der Elektronenbewegung infolge der gegenseitigen elektrostatischen Abstoßung zurückzuführen.



Agglomeration von Teilchen

Häufig zeigen Proben spezifische Oberflächenstrukturen mit Ausdehnungen, die kleiner als ein Tausendstel Millimeter sind. So sind beispielsweise Strukturen von Computer-Chips oder die typischen Tröpfchen- bzw. Inselgebilde, die beim Aufdampfen dünnster Schichten entstehen können, von dieser Kleinheit. In diesen und anderen Fällen sind Untersuchungstechniken erforderlich, die neben dem spektroskopischen Trennvermögen über eine hohe räumliche Auflösung verfügen: Spektromikroskopie und Mikro-Spektroskopie. Beide Techniken



*Ag- und Pb-Koabscheidung auf Mo(110).
Die Energie der einfallenden Photonen ist 55 eV, der Abbildungsbereich ist 9 μm groß.*

(Quelle: Arbeitsgruppe E. Bauer, Universität Clausthal-Zellerfeld)

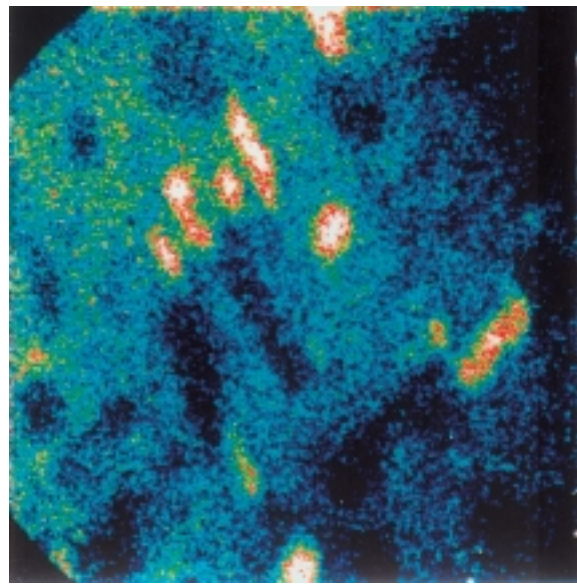
Nachweis der Pb-5d-Photoelektronen

vereinigen die spektroskopische Information mit der mikroskopischen Beobachtung, so daß neben einer chemischen Unterscheidung von Stoffen bzw. Elementen auch deren räumliche Verteilung sichtbar wird. Diese Korrelation ist entscheidend, wenn man detaillierte Aussagen über eine spezifische Elementverteilung wie bei Adsorptions- oder Segregationsprozessen und in Schichtstrukturen erhalten will.

In dem Fall der Mikrospektroskopie wird die Probe mit einem möglichst kleinen Leuchtfleck bestrahlt und die Energieverteilung der herausgelösten Photoelektronen in Abhängigkeit vom Auftreffort des Leuchtflecks untersucht. Bei der Spektromikroskopie ist die Bestrahlung der

Probe „großflächig“ (typische Leuchtfleckgröße: 0,05 mm), und die heraustretenden Photoelektronen werden nicht nur bezüglich der Energie, sondern auch hinsichtlich des Entstehungsortes analysiert.

Diese zweite Variante wird von der TU Clausthal-Zellerfeld bei BESSY entwickelt. Schon jetzt erreicht das Gerät am Undulatorstrahl von BESSY I eine Auflösung von weniger als 0,1 μm . Da das Auflösungsvermögen des Mikroskops wesentlich von dem Photonenfluß an



*Nachweis der Ag-Valenzelektronen mit
einer kinetischen Energie von 5,5 eV*

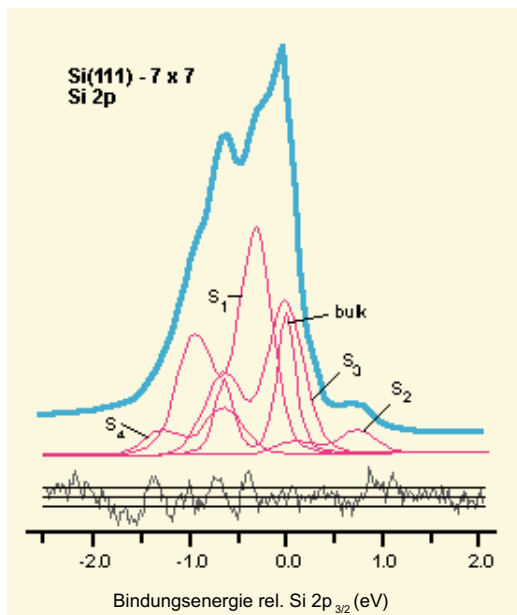
der Probe abhängt, wird bei BESSY II eine räumliche Auflösung vergleichbar zum Röntgenmikroskop bei gleichzeitiger spektroskopischer Analyse erwartet. Möglicherweise sind dann sogar dynamische Experimente durchführbar.

Zur Untersuchung der Vorgänge bei Aufdampfprozessen wurden auf die Oberfläche eines Molybdän-Einkristalls simultan Silber und Blei aufgedampft. Bekanntermaßen tendieren in diesem System Tröpfchen von mikroskopischer Ausdehnung zur Agglomeration, wodurch „Inseln“ entstehen. Durch spektromikroskopische Verfahren können diese Vorgänge sichtbar gemacht werden.



Halbleiter-Oberflächen

Das Äußere, die Oberfläche ist ausschlaggebend für das Erscheinungsbild eines Gegenstandes. Eine genauso wesentliche Rolle spielen Oberflächen und Grenzflächen in der Wissenschaft. Die Oberfläche eines Festkörpers unterscheidet sich physikalisch erheblich vom Inneren. Während die Bindungen eines aus dem Körperinnern beliebig gewählten Bausteins durch Nachbarbindungen völlig abgesättigt sind, bleibt an der Oberfläche ein Teil des Bindungspotentials frei - die periodische Anordnung der Gitterbausteine ist gestört. Daraus resultieren charakteristische energetische Veränderungen in den oberflächennahen Schichten und in der Wechselwirkung

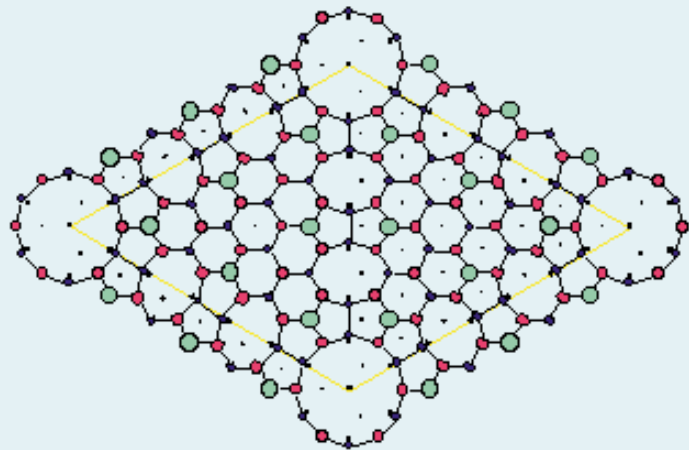


Das Photoemissionsspektrum der Si(111)-Oberfläche zusammen mit einer Linienformanalyse. Jeder Komponente S_1 bis S_4 entspricht eine atomare Umgebung.

(Quelle: Arbeitsgruppe K. Horn, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft)

der Oberflächenbausteine mit der Umgebung. Oberflächeneigenschaften können sich wesentlich von den übrigen Materialeigenschaften unterscheiden. Deshalb und weil viele Vorgänge an der Oberfläche ablaufen, wie zum Beispiel Haftung, Katalyse oder Korrosion, sind Oberflächen Gegenstand wissenschaftlicher Neugier.

Die Erforschung der Oberflächen- bzw. Grenzflächenstruktur von Halbleitern ist u. a. für die Computertechnik und für die Photovoltaik von hoher Bedeutung, da die Grenzflächen die Eigenschaften der elektronischen



An der Si(111)-Oberfläche ändert sich die würfelförmige Atomordnung im Kristallinnern in die hier gezeigte Struktur.

Bauelemente entscheidend bestimmen. Aufgrund der industriellen Anwendung von Silizium-Einkristallen ist die Si(111)-Oberfläche eine gut bekannte Halbleitergrenzfläche. Die Atome im Inneren eines Si-Einkristalls haben eine würfelförmige Anordnung mit einem zusätzlichen Atom in den Würfelflächen. Schneidet man den Kristall entlang einer Ebene, die durch drei Ecken dieses Würfels - entsprechend der (111)-Definition - verläuft, so erhält man die Atompositionen der idealen (111)-Oberfläche. Im Fall des Siliziums ist die tatsächliche Oberfläche jedoch anders (siehe Grafik).

Eine Arbeitsgruppe der Max-Planck-Gesellschaft hat bei BESSY diese Silizium-Oberfläche mit Hilfe der höchstauflösenden Photoelektronen-Spektroskopie untersucht. Diese Methode beruht auf der Photoemission, das heißt auf der Spektroskopie von Elektronen, die bei der Absorption elektromagnetischer Strahlung aus der Probe emittiert werden. Die Durchstimbarkeit der BESSY-Strahlenquelle wurde dabei genutzt, um Informationen über die Struktur der Oberfläche zu erhalten und zu interpretieren. So konnten erstmals Oberflächenzustände nachgewiesen werden, deren Existenz bisher nicht bekannt waren. Es ist zu erwarten, daß dieses Ergebnis für die Entwicklung von Halbleitern auf Si-Basis eine bedeutende Rolle spielen wird.

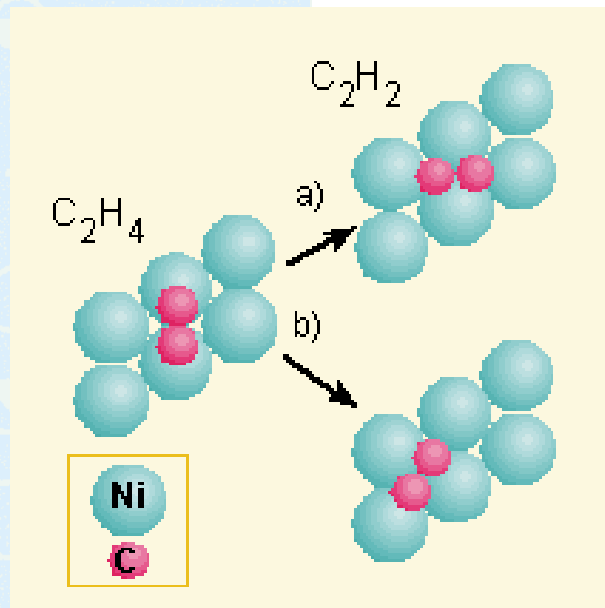
Synchrotronstrahlung als Strahlungsquelle hat die für diese Untersuchungsmethode nötige energetische Variabilität. Die VUV-Strahlungsquelle BESSY verfügt über mehrere Monochromatoren, die in diesem Energiebereich die erforderliche Auflösung erreichen.



Adsorbate

Oberflächen ändern ihre Eigenschaften durch die Anlagerung (Adsorption) von Atomen bzw. Molekülen. Entsprechend können sich die Struktur und damit die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Teilchens verändern, wenn es aus der Gasphase an einer Oberfläche adsorbiert.

gelöste Elektronenwelle kann entweder auf dem direkten Weg oder nach Streuung an einem Nachbaratom zum Detektor gelangen. Diese beiden Teilwellen können sich je nach Weglängenunterschied verstärken oder auslöschen. Somit läßt sich aus einer gemessenen Winkelverteilung von Photoelektronen auf die unmittelbare



Adsorptionsplätze und mögliche Reaktionswege für die Ethylendehydrierung an einer Ni(111)-Oberfläche (ohne H₂-Atome).

(Quelle: Arbeitsgruppe A. Bradshaw, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft)

Im Fall a) wird die C-C-Achse um 90° gedreht.

Im Fall b) beträgt die Rotation 30° und ist mit einer Verschiebung des Moleküls verbunden.

Adsorptionsprozesse spielen im alltäglichen Leben eine wichtige Rolle. erinnert sei nur an das Haften von Klebstoff, die Korrosion von Stahl in feuchter Umgebung, an katalytische Prozesse bei der Autoabgasreinigung oder in den Reaktoren der chemischen Industrie. Der Wissenschaftler untersucht unter kontrollierten Bedingungen die Geometrie und die Bindungsverhältnisse von ausgewählten Atomen bzw. Molekülen auf speziell präparierten Oberflächen.

Mitarbeiter des Fritz-Haber-Institutes der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin und der University of Warwick, U.K., entwickelten bei BESSY eine neue Untersuchungstechnik. Sie beruht darauf, daß die Ausbreitung von (Photo-)Elektronen im Wellenmodell zu beschreiben ist. Die durch ein Photon aus einem Adsorbatatom heraus-

Umgebung des Atoms schließen, von dem die Elektronenwelle durch Absorption eines Photons ausgesandt wurde.

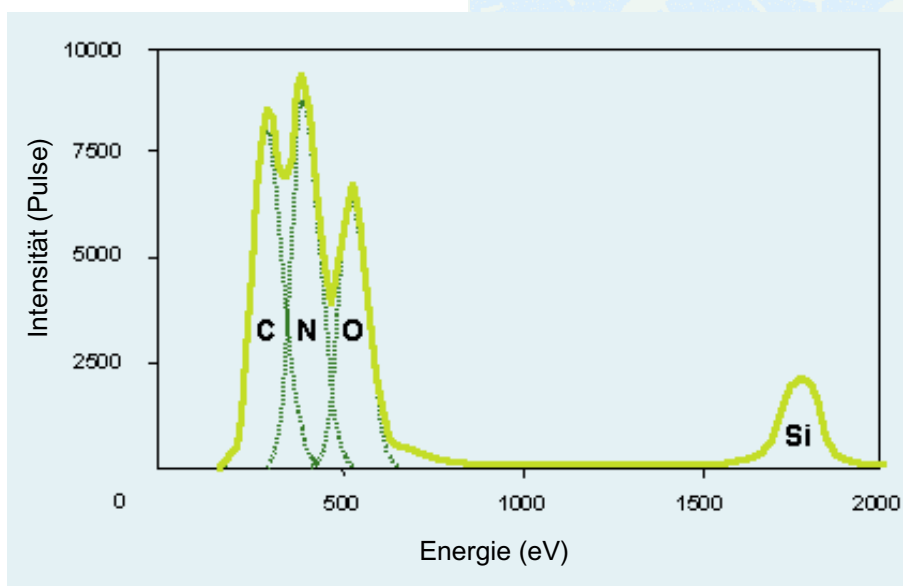
Bei BESSY gelang eine der ersten Anwendungen dieser Methode bei der Untersuchung der Dehydrierung von Ethylen (Ethen, C₂H₄), das auf der Oberfläche eines Nিকেleinkristalls adsorbiert. Bei dieser chemischen Reaktion geht das Ethylen unter der Abgabe von zwei Wasserstoffatomen in Acetylen (Ethin, C₂H₂) über. Molekülgröße und Adsorptionsplatz ändern sich, wobei es zwei mögliche Reaktionsabläufe gibt. Bisher gelang es noch nicht, den Verlauf der chemischen Reaktion zu verfolgen, um zwischen den beiden Möglichkeiten unterscheiden zu können.



Verdeckte Schichten

Beim Photoeffekt werden durch die Einwirkung von kurzwelliger Strahlung auf z.B. eine Festkörperoberfläche oder ein Gasatom Photoelektronen emittiert, in deren Folge elektronische Löcher in kernnahen Elektronenschalen entstehen. Elektronen können von äußeren Atomschalen auf die freien Plätze der kernnahen Bahnen springen. Dabei wird die überschüssige Energie entweder als Bewegungsenergie eines Elektrons oder als Fluoreszenzphoton abgegeben. Diese Energie

beeinflusst. Insbesondere hängt die Informationstiefe davon ab, ob Elektronen oder Photonen nachgewiesen werden. Bei der Fluoreszenzanalyse mit der bei BESSY verfügbaren Photonenenergie erhält man Informationen bis zu einer Probentiefe von 0,2 mm. Schichten, die beispielsweise während der Molekularstrahlepitaxie oder Ionenimplantation von einem Oberflächenfilm verdeckt werden, sind damit spektroskopisch zugänglich. Die Fluoreszenzanalyse mit Synchrotronstrahlung erreicht



Fluoreszenzspektrum einer mit Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) verunreinigten Si_3N_4 -Schicht auf Silizium (Si). Mit Synchrotronstrahlung lassen sich die vier Elemente getrennt nachweisen.

(Quelle: BESSY)

entspricht der Bindungsenergie­differenz zwischen dem Energieniveau des Lochzustandes und dem Niveau, das das auffüllende Elektron verlassen hat. Sie ist für ein spezifisches Atom bzw. einen Atomverband charakteristisch. Der BESSY-Energiebereich erlaubt sowohl die Anregung der K-Schalen leichter Elemente wie Kohlenstoff und Sauerstoff als auch der L- und M-Schalen schwerer Atome wie Eisen oder Barium.

Für die Untersuchung von Festkörpern sind Spektroskopiemethoden um so effektiver, je größer die Tiefe ist, aus der die überschüssige Energie den Festkörper verlassen kann, ohne vorher absorbiert zu werden. Diese sogenannte Informationstiefe wird u.a. von der Energie, dem Abstrahlwinkel und der Probenzusammensetzung

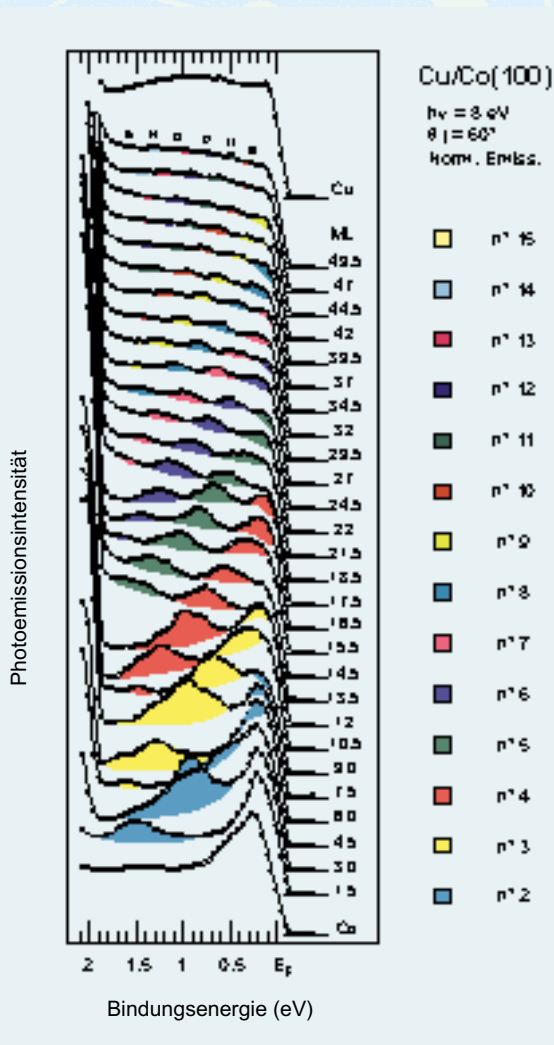
eine Nachweisempfindlichkeit für Fremdatome in einem Festkörper bis in den ppm-Bereich (Konzentrationsverhältnis 1:1.000.000).

Schichten aus verschiedenen Silizium-Stickstoff-Verbindungen werden in der Mikroelektronik eingesetzt. Die bei der Ionenimplantation (N_2 , Ar) von Si_3N_4 -Schichten wirkenden Mechanismen, insbesondere der Einfluß von Implantations- und Temperbedingungen auf die Mikrostruktur der Schichten, sind noch wenig bekannt. Bei BESSY wiesen Fluoreszenz-Nahkantenabsorptionsmessungen am Stickstoff nach, daß infolge von Strahlenschäden beim Ionenbeschuß Zwischengitteratome zurückbleiben, die nicht in das Gitter eingebaut werden.



Magnetische Schichtsysteme

In makroskopischen Proben tritt Magnetismus auf, wenn die mikroskopischen, magnetischen Momente aufgrund einer Wechselwirkung parallel zueinander ausgerichtet sind. Diese für den Magnetismus so entscheidende Wechselwirkung der magnetischen Momente hat auf die Verhältnisse an den Grenzflächen dünner Filme eine besondere Auswirkung. Materialien, die normalerweise nicht magnetisch sind, zeigen Magnetismus, wenn sie als dünner Film auf einem magnetisierten Material aufgebracht sind. In einigen Schichtsystemen wurde ferner eine ungewöhnlich große Änderung des elektrischen Widerstandes infolge von Magnetfeldern beobachtet.



Diese erst 1987 im Forschungszentrum Jülich gemachte Entdeckung führte bereits zu der Entwicklung neuer Leseköpfe für magnetische Datenspeicher durch eine bekannte Elektronikfirma.

Für die Untersuchung der Verhältnisse an Grenzflächen nutzt man einen quantenmechanischen Effekt, der in dünnen metallischen Schichten zu beobachten ist. Dieser Effekt beruht darauf, daß die Wellenfunktion von Elektronen jeweils an der „oberen“ und „unteren“ Oberfläche des Metallfilmes reflektiert wird. Dadurch bilden sich ähnlich wie bei einer Gitarrensaite stehende Wellen aus. Wellenlänge und Energie dieser stehenden Wellen werden u.a. durch die Schichtdicke und das Reflexionsvermögen der Grenzfläche bestimmt. Letzteres wird durch magnetische Effekte beeinflusst. Damit ist der experimentell erforderliche Bezug für eine aussagefähige Methode gegeben.

Um solche stehenden Wellen, auch „quantum well“-Zustände genannt, zu beobachten, untersuchten Mitarbeiter des Instituts für Festkörperforschung des Forschungszentrums Jülich in Zusammenarbeit mit BESSY-Wissenschaftlern mit Hilfe der Photoemission bei BESSY dünne (nichtmagnetische) Cu-Filme auf (magnetischem) Kobalt. In Filmen von wenigen Nanometer Dicke ließen sich „quantum well“-Zustände bis zu einer Schichtdicke von 50 atomaren Monolagen nachweisen. In den Photoemissions-Spektren erkennt man die energetische Lage der Resonanzen als verstärkte Emission von Elektronen unter Lichteinstrahlung. Die Lage der Linien verschiebt sich dabei systematisch in Abhängigkeit von der Schichtdicke.

Photoemissions-Spektren von unterschiedlichen Schichtdicken Cu auf Co(100) bei einer Photonenenergie von 8 eV. Die „quantum well“-Zustände sind durch farbige Bereiche markiert. Die Grundschwingung führt zu einem ungebundenen Zustand und läßt sich in der Photoemission nicht nachweisen.

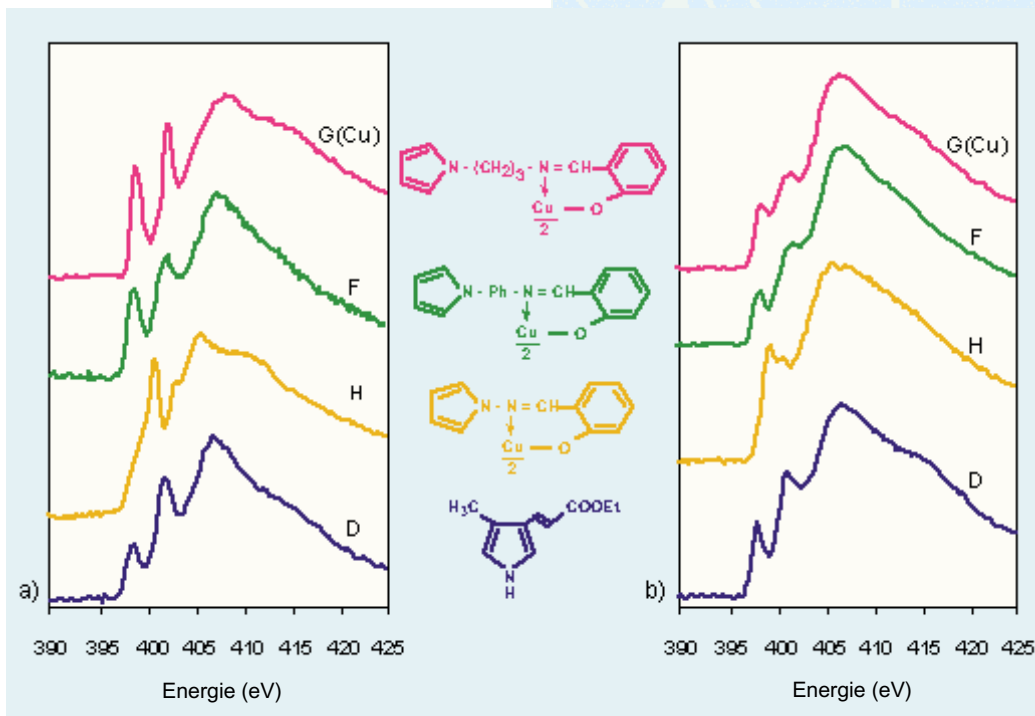
(Quelle: Arbeitsgruppe: W. Eberhardt, Forschungszentrum Jülich)



Polymere

Polymere sind aus unserer alltäglichen Umgebung nicht mehr wegzudenken. In vielen Anwendungen finden wir diese Stoffe mit den Makromolekülen wieder, sei es als Material für Plastikbeutel, für Frischhaltefolie oder für den Sicherheitsgurt des Autos. Der außergewöhnliche Vorteil dieser Verbindungen ist die wertvolle Kombination von hoher Festigkeit und ausgezeichneter Flexibilität aufgrund der faktisch unendlich langen Molekülketten.

die XANES-Technik wird entsprechend der Wahl der Anregungsenergie ein bestimmtes Element in der Probe selektiert. In der spektralen Nähe einer Absorptionskante werden Strukturen beobachtet, die von der Umgebung des untersuchten Atoms abhängen. Das heißt, die XANES-Methode arbeitet wie eine „Sonde“ im Molekül, um in einem bestimmten Bereich die elektronische Struktur zu erfassen. Solche Untersuchungen sind bei BESSY



XANES Spektren an der Stickstoff-K-Kante und Strukturformeln:
a) Monomere
b) Polymere

(Quelle: Arbeitsgruppe R. Szargan, Universität Leipzig)

Die Entdeckung, daß Polymere (ansonsten klassische Isolatoren) in einigen Fällen elektrische Leitfähigkeit zeigen, die durch gezielte Dotierung um viele Größenordnungen erhöht werden kann, hat das Interesse an dieser Stoffklasse noch weiter gesteigert.

Auch für Polymere gilt: Kenntnisse zum Zusammenhang zwischen mikroskopischen Strukturen und makroskopischen Eigenschaften sind Voraussetzung für die Realisierung von effizienten Anwendungen. Da Polymere keine periodischen Strukturen bilden, kann die Röntgenbeugung nicht zur Untersuchung der mikroskopischen Struktur eingesetzt werden. Eine Alternative bildet neben der Photoelektronen-Emissions-Spektroskopie (PES) die XANES-Methode (X-ray absorption near edge structure) - die Nahkantenspektroskopie mittels Röntgenstrahlung. Durch

routinemäßig möglich. Das Angebot von BESSY wird auch von mehreren Arbeitsgruppen regelmäßig genutzt.

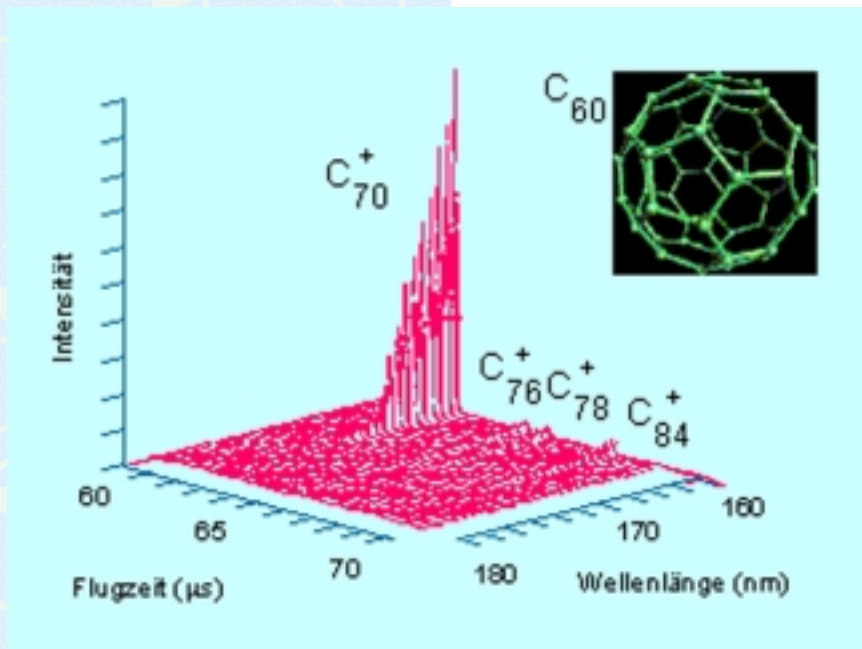
Bei BESSY wurde von Forschern aus Leipzig Polypyrrol mit Hilfe von XANES an der Absorptionskante der Stickstoffatome untersucht. Das bedeutet in diesem Fall, daß gezielt der Bereich der Polymerkette in der Umgebung des Stickstoffatoms analysiert wurde. Die Messungen erfolgten auch an substituierten Pyrrolderivaten, um den Einfluß der Substitution auf die Elektronenzustände und das Ionisationspotential zu untersuchen. Zu beobachten sind Intensitätsänderungen und Verschiebungen von Linien in Abhängigkeit vom Molekül. Die polymerisierten Systeme zeigen aufgrund der Verteilung der Elektronen über einen größeren Teil des Moleküls deutlich geringer ausgeprägte Linien.



Fullerene

Vom Kohlenstoff (C) sind seit langem zwei Formen bekannt, der Diamant und der Graphit. Erst vor einem Jahrzehnt wurde bei der Laserverdampfung von Graphit eine weitere Modifikation entdeckt, die Fullerene (benannt nach Buckminster Fuller). Während Diamant und Graphit ausgedehnte Festkörperstrukturen besitzen, handelt es sich bei Fullerenen im einfachsten Fall um sphärische, fußballförmige Moleküle, im Wissenschaftlerjargon auch Buckyballs genannt.

Aufgrund der Molekülform haben Fullerene einige für Anwendungen interessante Eigenschaften. Kohlenstoffbälle in Röhrenanordnung bilden hochfeste Fasern, während sie sich in Kugelanhäufung als ideales Schmiermittel eignen. Deswegen wird weltweit an der weiteren Erforschung der Fullerene gearbeitet. Eine Forschergruppe der Universität Freiburg nutzt die Synchrotronstrahlung von BESSY, um durch massenspektrometrische Messungen detailliertere



Ionisationsschwellenbereich der Fullerene C_{70} , C_{76} , C_{78} und C_{84}

Mit zunehmender Größe der Kohlenstoffbälle, d. h. mit wachsender Anzahl der gebundenen Kohlenstoffatome im Fullerenverband verschiebt sich der jeweilige Bereich zu niedrigeren Grenzwerten der Ionisationsenergie.

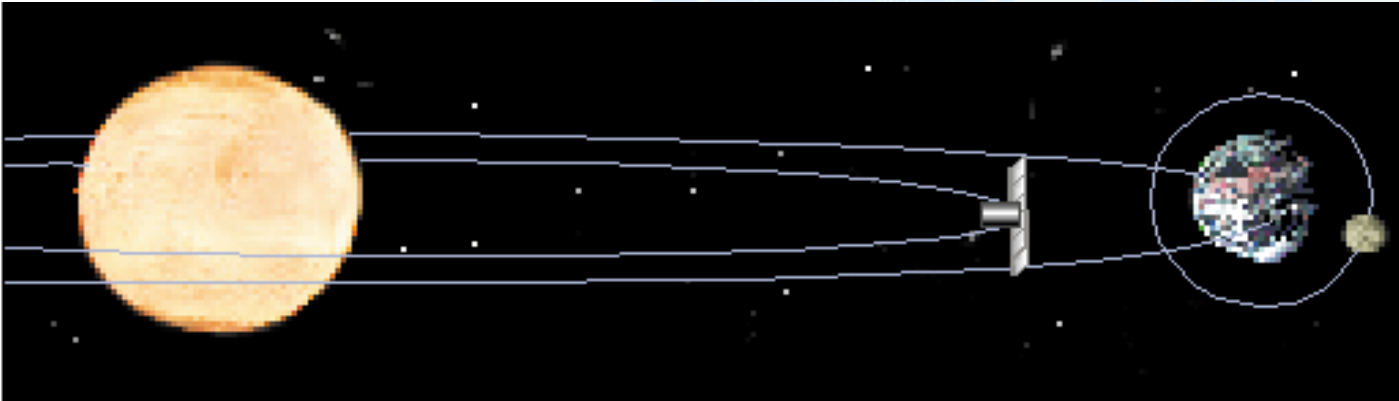
(Quelle: Arbeitsgruppe W. Kamke, Universität Freiburg)

Das kleinste stabile Fulleren ist das Buckminsterfulleren C_{60} . Sechzig Kohlenstoffatome bilden ein geschlossenes Netzwerk von Sechs- und Fünfringen ähnlich wie ein Fußball. Weitere Moleküle mit größerer Atomanzahl wie C_{70} , C_{84} , C_{240} sind bekannt.

Aussagen zur Fullerencharakterisierung zu gewinnen. Anhand von Intensitätsmaxima wurde der Ionisationsgrenzbereich spezifischer Fullerenionen bestimmt.

Instrumentencharakterisierung

BESSY und die Sonnenforschung

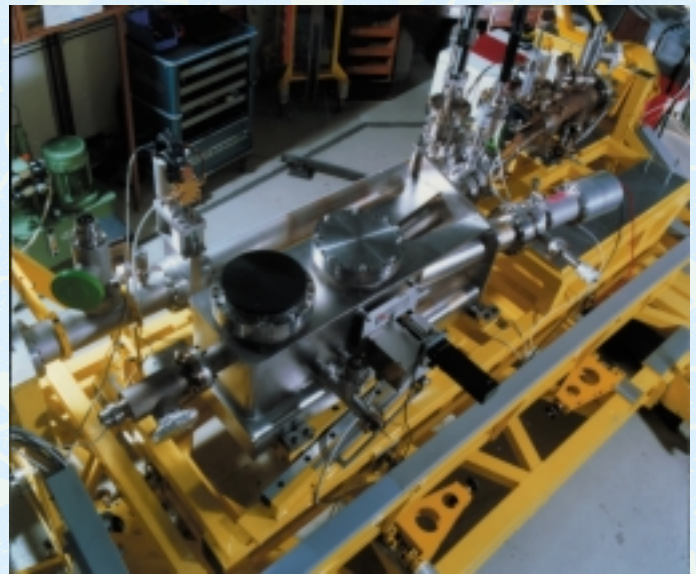


Der Begriff des „Ozonloches“ ist uns aus den Medien allgegenwärtig. Auch aus diesem Grunde ist es wichtig, die globalen Zusammenhänge der Naturprozesse zu kennen. Der Einfluß der VUV- und XUV-Strahlung der Sonne, die in dem oberen Teil der Sonnenatmosphäre entstehen, auf die äußeren Schichten der Erdatmosphäre ist zur Zeit nur unzureichend bekannt, nicht zuletzt, weil genaue Messungen nicht verfügbar sind. Um diese Wissenslücke zu schließen, wurde am 2. Dezember 1995 innerhalb eines Gemeinschaftsprojektes der ESA und NASA die Raumsonde SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) gestartet. Vier verschiedene VUV-Spektrometer werden Aufnahmen von der Sonne mit hoher räumlicher und spektraler Auflösung liefern, unter ihnen SUMER (Solar Ultraviolet Measurement of Emitted Radiation) und CDS (Coronal Diagnostic Spectrometer).

Bei der Kalibrierung von SUMER und CDS hat BESSY eine wichtige Rolle gespielt. Synchrotronstrahlung läßt sich berechnen, da Parameter wie Elektronenstrom und -energie, Magnetfeldstärke und geometrische Größen bekannt sind. Dieser Umstand erlaubt die Kalibrierung von Spektrometern bzw. von Detektoren.

Im PTB-Labor bei BESSY wurden zwei transportfähige Transfer-Quellenstandards für optische Tests und zur radiometrischen Kalibrierung von SUMER und CDS entwickelt. Sie basieren auf Hochstrom-Hohlkathoden-Strahlern. Mit Hilfe dieser Strahler wurde die Kalibrierung der SOHO-Instrumente durch Vergleich mit dem BESSY-Primärnormal mit der geringen Unsicherheit von weniger als 20 % erreicht.

Vergleichsmeßplatz im Radiometrielabor der PTB bei BESSY



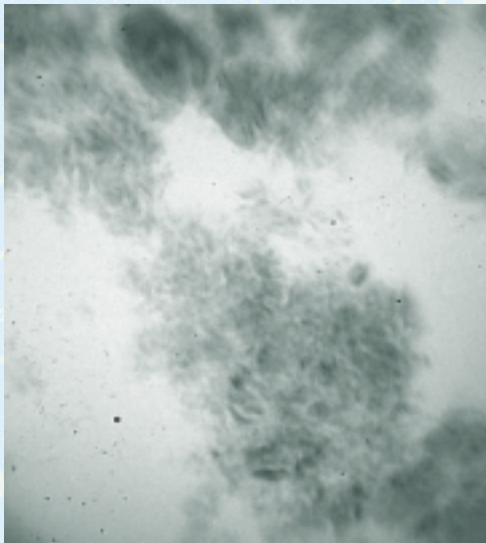
Mit dieser Apparatur wurde der Hochstrom-Hohlkathoden-Strahler, auf dem das Transfernormal für die Kalibrierung der SOHO-Instrumente beruht, mit dem BESSY-Primärnormal verglichen. Die eigentliche Instrumentenkalibrierung erfolgte unter extremen Reinraumbedingungen am Standort von SOHO vor dem Start am 2. Dezember 1995.

(Quelle: Physikalisch -Technische Bundesanstalt)



Röntgenmikroskopie

Auch das beste Mikroskop erreicht höchstens eine laterale Auflösung von der Größe der Wellenlänge des verwendeten Lichtes. Strukturen eines bestrahlten Objektes kann man nur dann erkennen, wenn die Wellenlänge kleiner ist als die Größe dieser Struktur. Will man noch kleinere Strukturen sichtbar machen, so hilft nur eins: Verkleinern der Wellenlänge des verwendeten Lichtes.



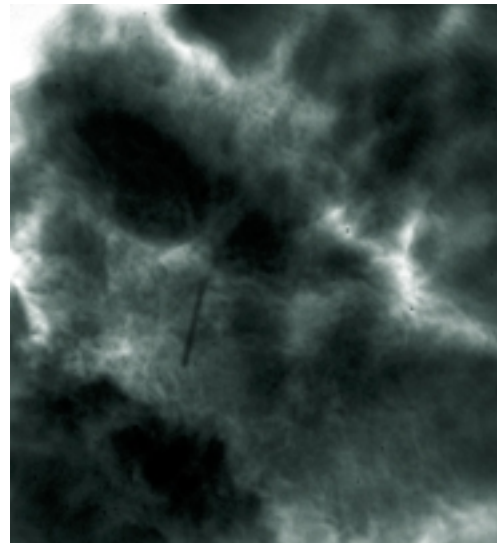
Beeinflussung der von dem Tonmineral Montmorillonit aufgebauten Mikrostruktur durch Wechselwirkung mit einem kationischen Tensid (CTB). Die linke Aufnahme zeigt diese Mikrostruktur vor und die rechte nach der Behandlung mit CTB. Die sichtbare Veränderung hat negative Auswirkungen auf die Qualität des so behandelten Bodens.

(Quelle: Arbeitsgruppe G. Schmahl, Universität Göttingen)

Das von der Forschungseinrichtung Röntgenphysik der Universität Göttingen entwickelte und bei BESSY betriebene Röntgenmikroskop verwendet Synchrotronstrahlung mit einer Wellenlänge von 2,4 nm. Damit erreicht man zwar nicht die Auflösung von Elektronenmikroskopen, aber eine höhere als mit der Lichtmikroskopie. Die in der Anwendung entscheidende Eigenschaft ist die Tatsache, daß die benutzte Röntgenstrahlung Wasser gut durchdringen kann, während andere anorganische und organische Strukturen kontrastreich abgebildet werden. So lassen sich beispielsweise Bodenproben oder sogar ursprünglich lebende Zellen ohne strukturverändernde Präparationen mikroskopisch untersuchen.

Kernstücke des Röntgenmikroskops sind die optischen Elemente, die Zonenplatten, die als Kondensoren und als Mikroskopobjektive eingesetzt werden. Es handelt sich um konzentrische Ringe aus z.B. Germanium oder

Nickel, die von einer dünnen Membran getragen werden. Die Zonenplatten bestehen aus bis zu 40.000 Ringen bei einem Durchmesser von 9 mm. Diese Ringe werden nach außen hin immer dünner. Die Beugung der durchtretenden Strahlung an diesen Ringen führt zu der erstrebten Fokussierung.



Ein interessantes Untersuchungsthema stellt das weite Feld der Kolloide dar. Kolloide sind Partikel, deren Größe im Bereich von Nanometern (gleich ein Millionstel Millimeter) liegt. Sie spielen in der chemischen Industrie, in vielen technischen Anwendungen, aber auch für die chemischen Eigenschaften unseres Erdbodens eine große Rolle. Entsprechend der Größe der Primärpartikel können viele Wechselwirkungsabläufe dieser Kolloide mit der Umgebung, wie Aggregationsprozesse in wäßrigen Lösungen, wegen der zu geringen Auflösung nicht direkt im Lichtmikroskop beobachtet werden.

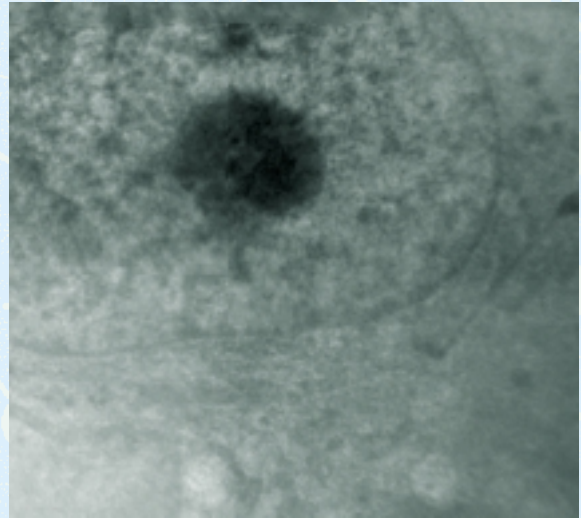
Mit Hilfe des Röntgenmikroskops haben Mitarbeiter der Universität Trier zusammen mit der Göttinger Gruppe bei BESSY das Aggregationsverhalten von kolloidalen Systemen untersucht. Die Tonminerale als kolloidale Bestandteile des Bodens bestimmen wesentlich die Qualität von Böden. Als oberflächenaktive Partikel sind



sie Träger von Nutz- bzw. Schadstoffen. Die von den Tonmineralen aufgebaute Mikrostruktur beeinflusst den Transport dieser Stoffe und die Verfügbarkeit dieser Stoffe für chemische und mikrobiologische Vorgänge. Eine Fragestellung von weitreichender Bedeutung ist die Sanierung kontaminierter Böden. Dies geschieht unter anderem durch die Einwirkung von Tensiden.

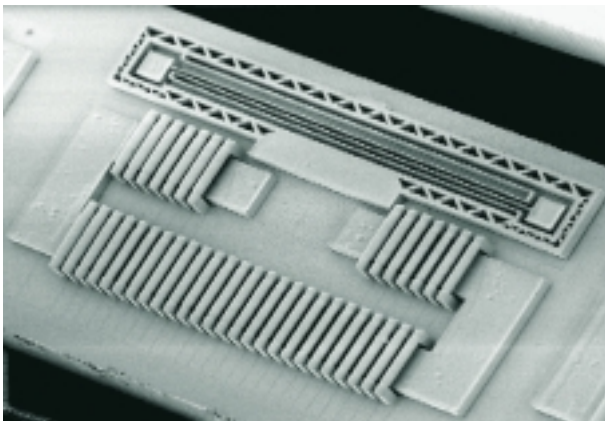
Röntgenmikroskopische Aufnahme einer PtK2-Zelle in Interphase. Das Bild setzt sich aus mehreren Einzelbildern (Belichtungszeit jeweils fünf Sekunden) zusammen. Deutlich sichtbar ist der Kern dieser Zelle mit dem Nukleolus im Innern des Kernes und die Kernhülle. Im Cytoplasma der Zelle erkennt man Mitochondrien, Mikrotubuli und Golgi-Vesikel.

(Quelle: Uni Göttingen in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Krebsforschungszentrum Heidelberg)



Lithographie und Mikrotechnik

Die Leistungsfähigkeit der Mikroelektronik führte zur Entwicklung fingernagelgroßer Computerchips mit Millionen von Transistoren. Von dieser Hochtechnologie

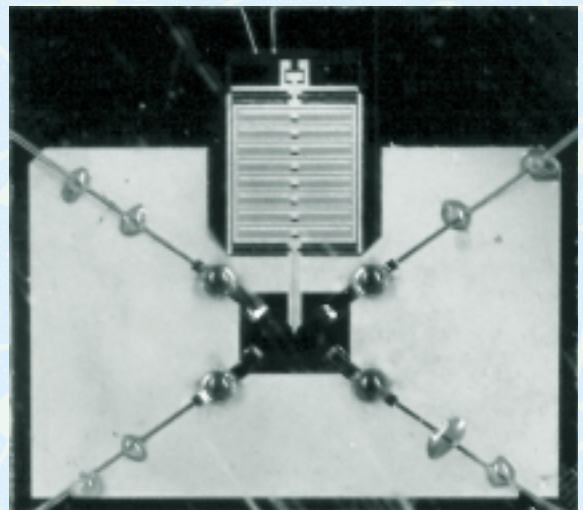


REM-Aufnahme eines elektromagnetischen Mikroaktors bestehend aus Schwinger und Mikrospule mit Stellwegen bis zu 200 µm. Der Kern und der bewegliche Anker sind aus galvanisiertem Permalloy, die Spulendwindungen aus Kupfer gefertigt. Hierbei wurde das LIGA-Verfahren mit Dünnschichttechniken und optischer Lithographie kombiniert. (Quelle: FZK-IMT / Karlsruhe)

Optomechanische Bypass-Schaltung, wie sie als Modul in optischen Kommunikationsnetzwerken Anwendung findet. Es handelt sich um einen elektrostatischen Aktor, dessen Endflächen als Spiegel ausgestaltet sind und in den eine optische Bank integriert wird. Die Spiegel entstanden im LIGA-Verfahren ohne weitere Nachbearbeitung. (Quelle: FZK-IMT / Karlsruhe)

werden weitere Fortschritte in den Miniaturisierungsprozessen erwartet. Mikroelektronische Schaltkreise benötigen kompatible Komponenten wie Sensoren und Aktoren zum Erfassen und zum Beeinflussen der Umgebung. Solche Mikrogeräte sind inzwischen in vielen Bereichen der technischen Anwendung unentbehrlich geworden.

Mit Mikrotechnik bezeichnet man die Verfahren, die die Miniaturisierung von Komponenten erlauben. Als eine der erfolgversprechendsten Herstellungsmethoden gilt die LIGA-Technik, eine Kombination von **L**ithographie, **G**alvanoformung und **A**bformung. Mit dem LIGA-Verfahren können dreidimensionale Strukturkomponenten aus Kunststoff, Metall und Keramik mit Abmessungen im



Sub-Mikrometerbereich hergestellt werden. Gestaltungsvielfalt, hohe Flexibilität, breite Materialpalette sowie hohe Stückzahlen und damit eine preisgünstige Produktion sind neben einer hohen Maß- und Formtreue die wesentlichen Vorteile dieser Methode.

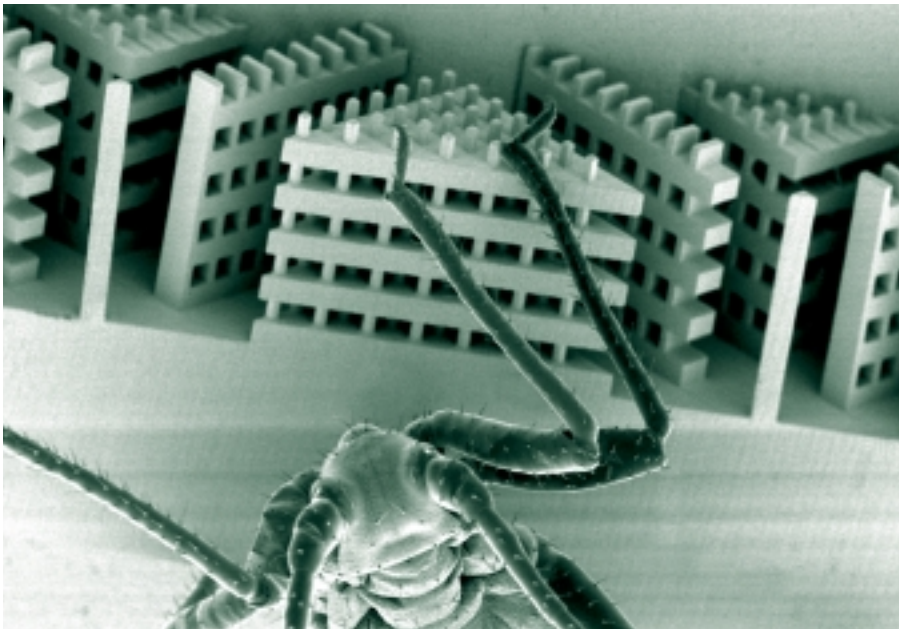
Für den ersten Schritt der LIGA-Technik, die Lithographie (selektives Belichten mit anschließender chemischer Entwicklung), wird Synchrotronstrahlung im Bereich der kurzwelligigen Röntgenstrahlung verwendet, um Strukturen mit Mikrometer-Genauigkeit bei Bauhöhen von bis zu 1 mm zu realisieren.

Bei BESSY wurde die Bedeutung der LIGA-Technik mit Synchrotronstrahlung für die industrielle Anwendung erkannt und in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe und dem Berliner Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie ein Labor für die Röntgentiefenlithografie zur Verfügung gestellt. Um die benötigte härtere Röntgenstrahlung zu erhalten, wurde ein spezieller supraleitender Magnet, ein sogenannter Wellenlängenschieber, entwickelt und installiert. Daran angeschlossen



Elektrischer Mikromotor mit 2 mm Außendurchmesser. Der Motor besteht aus einer Kombination mikrotechnisch hergestellter Teile mit Elementen der Präzisions-Feinwerktechnik.

(Quelle: IMM / Mainz)



Dreidimensionale Mikrostrukturen aus Plexiglas, hergestellt durch gekippte Mehrfachbelichtung; die „vierstöckigen Häuser“ sind 500 µm groß.

(Quelle: IMM / Mainz)

sind drei Strahlrohre, die durch das Forschungszentrum Karlsruhe, das Institut für Mikrotechnik Mainz und anderen genutzt werden.

Arbeitsergebnisse sind u.a. miniaturisierte Antriebe und dreidimensionale, hochkomplexe Strukturen. Insbesondere letzteres eröffnet eine außerordentlich hohe

Formenvielfalt bei ungeändert hoher Präzision, die der LIGA-Technik viele neue fertigungstechnische Möglichkeiten erschließt. Neuartige Anwendungen in der Kommunikationstechnik, insbesondere der Verschaltungsoptiken von Glasfasernetzen, sowie in der chemischen und biologischen Mikroaktortechnik, der Medizintechnik u.a. werden dadurch zugänglich.

Umschlag: BESSY II Schema und Baustelle in Berlin-Adlershof (Januar 1996)

Koabscheidung von Silber und Blei auf einem Molybdän-(110)-Einkristall

