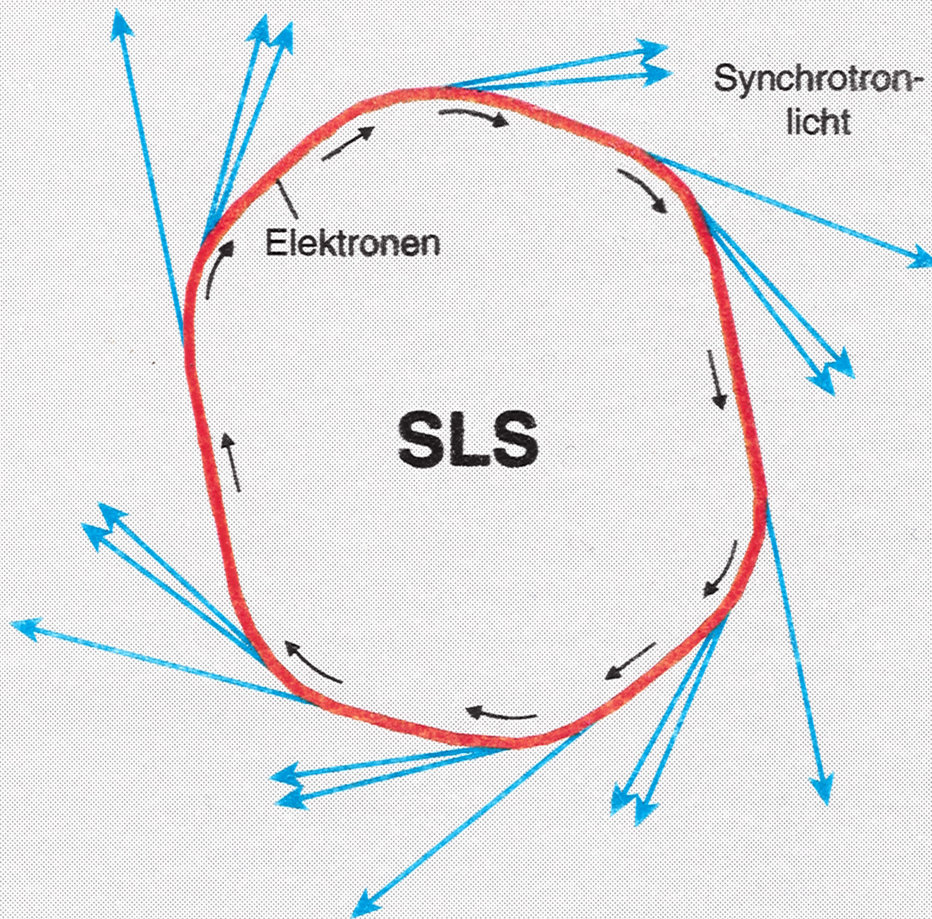




Vorschlag für den Bau einer Synchrotron-Lichtquelle in der Schweiz

Teil I — Übersichtsbericht

7. September 1993
Paul Scherrer Institut
CH - 5232 Villigen PSI
Schweiz

INHALTSVERZEICHNIS

TEIL I — ÜBERSICHTSBERICHT

Kurzfassung	2
1. Einleitung	3
2. Das Konzept	9
3. Das vielfältige Forschungsinstrument	18
4. Die Realisierung	27
5. Die Nutzung	31
6. Schlussbemerkungen	34
7. Autorenliste	35

ANNEX: Scientific and Technological Case A-1

I. The Swiss Environment: a Remarkable Combination of Favorable Elements	A-4
II. The International Environment	A-5
III. Specific Applications	A-7
IV. Concluding Remarks	A-30

TEIL II — SLS-KONZEPT

Conceptual Design of the
Swiss Synchrotron Light Source

KURZFASSUNG

Im vorliegenden Bericht wird vorgeschlagen, am PSI eine Synchrotronlichtquelle zu realisieren. Damit soll ein Schwerpunkt für interdisziplinäre Zusammenarbeit und die Erforschung der kondensierten Materie gebildet werden. Obschon Grundlagenforschung im Vordergrund steht, sind von Anfang an auch Interessen der Industrie absehbar, vor allem für die Strukturbestimmung von biologischen und chemischen Makromolekülen und die Herstellung und Untersuchung von Mikro- und Nanostrukturen.

Die Anlage soll als zentrale, durch das PSI betriebene Einrichtung, den Schweizer Forschenden aus Hochschule und Industrie zur Verfügung stehen, aber auch durch besondere Qualitäten international attraktiv für gute Forschung wirken. Von ihrem Umfang her ist die Anlage jedoch ein nationales Projekt, das im internationalen Netz von Forschungseinrichtungen einbezogen ist. Sie stellt einen wesentlichen Beitrag zur Erhaltung der Attraktivität des Forschungsplatzes Schweiz dar.

Die Quelle besteht aus einem 2.1 GeV Speicherring für Elektronen und einem Injektorkomplex (Linearbeschleuniger plus 2.1 GeV Boostersynchrotron). Die Magnetstruktur ist sehr flexibel ausgelegt mit sehr langen geraden Strecken (2 x 18 m und 4 x 7 m).

Die Quelle ist schwerpunktmässig nicht auf möglichst viele Benützer ausgelegt, sondern auf höchstmögliche Qualität. Sie ist optimiert für Vakuum-Ultraviolett/weiche Röntgenstrahlung aus Undulatoren und verspricht Spitzenleistungen bezüglich Brillanz der erzeugten Strahlung bis in den Kilovoltbereich. Damit ist die SLS komplementär zur Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle in Grenoble (ESRF). Gleichzeitig ist die Anlage jedoch auch eine gute Quelle für harte Röntgenstrahlung, die weltweit nur von wenigen Strahlen übertroffen werden kann.

Das Konzept wurde von international massgebenden Spezialisten als innovativ und machbar beurteilt.

Die Anlage soll – bei einem Baubeginn im Jahr 1996 – bis etwa Ende 1999 realisiert werden.

Das PSI wird bedeutende Mittel innerhalb des Betriebsbudgets als Beitrag an die Realisierung und den Anlagenbetrieb freistellen. Zusätzliche Investitionsmittel im Umfang von 160 MFr. müssten über vier Jahre verteilt zur Verfügung stehen.

Der Vorschlag besteht aus einem Übersichtsbericht (Teil I), in dem auch das Anlagekonzept zusammenfassend dargestellt wird. Letzteres ist in einem separaten Teil II detailliert beschrieben.

1. Einleitung

1.1 Die Erforschung der kondensierten Materie

Eine Analyse des enormen technologischen Fortschritts im 20. Jahrhundert zeigt, dass es kaum technologische Umwälzungen gibt, die sich nicht schlussendlich auf Erkenntnisse der Grundlagenforschung zurückführen lassen. Ohne die Entdeckung der grundlegenden Gesetze, die das Verhalten und den Aufbau der Materie beschreiben, wäre die heutige Hochtechnologie nicht denkbar.

Es stellt sich nun die Frage, welche Art von Forschung und welche Disziplinen für die zukünftige Entwicklung eine besonders wichtige Rolle spielen könnten. Die auf dem Gebiet der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung gerade in den letzten 20 Jahren gemachten Erfahrungen bestätigen, dass sich diese Forschung prinzipiell mit dem Unbekannten oder Unvorhersehbaren beschäftigt und dadurch Unerwartetes produziert. Deshalb ist es nur sehr eingeschränkt möglich, die gestellte Frage zu beantworten.

Es gibt jedoch weltweite Trends: Allgemein akzeptiert sind die Wichtigkeit einer primär erkenntnisorientierten, qualitativ hochstehenden Grundlagenforschung, das nähere Zusammenrücken der verschiedenen Disziplinen sowie eine verstärkte Schwerpunktsetzung auf gesellschaftsrelevanten Gebieten, wo eine Umsetzung in Partnerschaft mit der Industrie möglich scheint. Unbestritten ist die Bedeutung der Offenheit und Zusammenarbeit in einem weltweiten Netz und die Notwendigkeit einer Verbindung der Forschung mit dem Hochschulunterricht.

Ein weiterer Trend ist die verstärkte Suche nach dem Verständnis von Systemen höchster Komplexität. Dabei sind oft sämtliche naturwissenschaftliche Disziplinen und auch die Mathematik gleichzeitig beteiligt. Schliesslich besteht die uns direkt zugängliche Welt vor allem aus hochkomplexer kondensierter Materie oder daraus synthetisierten Systemen, deren Erforschung das Gebiet von einzelnen Atomen und Molekülen, über Cluster und mesoskopische Systeme bis hin zu makroskopischen Festkörpern und Flüssigkeiten überspannt.

Das ungeheuer breite Gebiet der Formen von kondensierter Materie reicht von anorganischen und organischen chemischen Substanzen, wie Isolatoren, Halbleiter, Metalle, Supraleiter und magnetische Materialien bis hin zu "weicher" Materie in Form von Aerosolen, Polymeren sowie biologischer Materie. Diese Forschungsobjekte sind Gegenstand sehr unterschiedlicher, sich häufig aber stark überlappender Arbeitsgebiete, wie zum Beispiel

- Festkörper- und Materialforschung
- Chemie und Polymerforschung
- Grenzflächen, inkl. Oberflächen und dünne Filme

- Atom- und Molekülphysik
- Biowissenschaften und Medizin.

Offensichtlich sind Anwendungsnähe und technologische Relevanz der Forschung in diesen Bereichen besonders gross. Das grundlegende Verständnis der kondensierten Materie in all ihren Formen spielt auch in übergeordneten Forschungsthemen wie zum Beispiel der Energie- oder der Umweltforschung eine wichtige Rolle.

Unser heutiges Wissen über die *Struktur* der Materie (Anordnung der Atome oder magnetischen Momente im Kristall) basiert weitgehend auf sogenannten Streuexperimenten (Diffraktionsmethoden), wobei durch Auswertung der in verschiedenen Richtungen gestreuten Intensitäten Informationen über die räumliche Anordnung und Zusammensetzung im Innern der Probe sowie über die thermische Bewegung der Bausteine gewonnen werden. Als Sonde kann man Teilchenstrahlen (Elektronen, Ionen, Atome, Neutronen) oder elektromagnetische Wellen (Licht - Photonen) verwenden. Die Wellenlänge der Sonde muss dabei den zu untersuchenden Abständen entsprechen oder kleiner sein.

Das angestrebte Verständnis lässt sich nicht allein aus der Kenntnis der Struktur ableiten. Wichtige Eigenschaften der kondensierten Materie werden wesentlich durch das *Energiespektrum* der Elektronen bestimmt. In den entsprechenden Experimenten wird die Verteilung der möglichen Energiezustände gemessen (Spektroskopische Methoden).

Der für die Untersuchung der kondensierten Materie wesentliche Energiebereich (Millielektronvolt bis einige zehn Kiloelektronvolt entsprechend dem Wellenlängenbereich von 0.1 Nanometern bis 100 Mikrometern) wird nun insbesondere durch Neutronen- und elektromagnetische Strahlung geeigneter Wellenlänge abgedeckt.

Zwei äusserst wichtige und auch besonders aufwendige Methoden sind dementsprechend auf zentrale, für viele Benützer betriebene Grossanlagen angewiesen: 1) Reaktoren oder neuerdings auf einem Protonen-Beschleuniger basierende Spallationsquellen (am PSI die SINQ) und 2) Elektronen- oder Positronen-Speicherringe als Quellen für Synchrotronstrahlung (am PSI das im vorliegenden Bericht beschriebene Projekt).

Als Quellen für elektromagnetische Strahlung stehen auch Einrichtungen im Labormassstab zur Verfügung. Ihre Übersichtlichkeit und der einfache Zugang sind offensichtliche Vorteile. Nachteile gegenüber der Synchrotronstrahlung sind bei Lasern die nur bedingte Durchstimmbarkeit und bei der Röntgenröhre die nicht genügende Leuchtdichte.

1.2 Der Zugang zu Grossanlagen

In zunehmendem Masse sind die Forscher in vielen verschiedenen Gebieten auf den Zugang zu Grossanlagen angewiesen. Einerseits muss also der Staat sich an grossen internationalen Projekten beteiligen und für die Nutzung dieser Möglichkeiten auch die Mittel bereitstellen. Andererseits müssen auch auf nationaler Ebene entsprechende Einrichtungen bereitgestellt und in die internationale Zusammenarbeit eingebracht werden, dies natürlich auf Gebieten von besonderer Wichtigkeit, in denen Spitzenleistungen erbracht werden können.

Es gibt nun einen fundamentalen Unterschied zwischen den heutigen Grossanlagen in der Teilchenphysik und denjenigen, die bei der Erforschung der kondensierten Materie eingesetzt werden:

In der Teilchenphysik arbeiten zum Beispiel Forscher aus einer einzigen Disziplin in grossen Kollaborationen (etwa 500 Wissenschaftler) am gleichen Thema, mit dem Ziel, eine wichtige Frage mit einem Zeithorizont von etwa 10 Jahren zu beantworten. Sie sind dabei hundertprozentig auf eine einzige Beschleunigeranlage in der Welt angewiesen, wo ihr Detektor während Jahren im Dauerbetrieb läuft.

Grossanlagen für die Erforschung der kondensierten Materie werden im Gegensatz dazu von kleinen Forschungsgruppen (z. B. 3 Personen) aus verschiedenen Disziplinen immer wieder oder auch sporadisch in kurzen Messperioden benützt.

Ein weiterer Unterschied ergibt sich durch die Verschiedenheit der zu maximierenden Grössen: In der Teilchenphysik strebt man letztlich nach der höchstmöglichen Energie, was in der Praxis den in internationaler Zusammenarbeit maximal bezahlbaren Beschleunigerumfang bedeutet.

Bei Synchrotronlichtquellen hingegen ist zum Beispiel für spektroskopische Untersuchungen die Energie einer chemischen Bindung oder eines Elektrons im Festkörper massgebend. Die erforderliche Energie des Beschleunigers ist vergleichsweise bescheiden. Dementsprechend sind auch die Kosten für die grössten international betriebenen Anlagen viel kleiner als in der Teilchenphysik.

Synchrotronlichtquellen werden nach der Energie der Strahlung grob in zwei Kategorien unterteilt:

- A) Quellen im "Vakuum-Ultraviolett" und "weichen" Röntgenbereich (VUV/XUV, $E \leq 3 \text{ keV}$ und $\lambda \geq 0.4 \text{ nm}$).
- B) Quellen für "harte" Röntgenstrahlung (*hard X-rays*, $E \geq 3 \text{ keV}$ und $\lambda \leq 0.4 \text{ nm}$).

Abhängig von der wissenschaftlichen Fragestellung wird jeweils ein Quellentypus bevorzugt: Eine Strukturbestimmung mit höchster Auflösung verlangt z. B. eine möglichst kurze Wellenlänge, während die

Spektroskopie durch Anregung elektronischer Freiheitsgrade bevorzugt bei grösseren Wellenlängen erfolgt.

Die Benützergemeinschaft verteilt sich zu etwa gleichen Teilen auf beide Quellentypen. Grosse Länder wie die USA und Japan besitzen und realisieren zur Zeit beide Arten von Quellen (z. B. USA: Advanced Light Source in Berkeley und Advanced Photon Source in Argonne).

In den frühen Achtzigerjahren wurde auf europäischer Ebene vereinbart, die – kleineren – Quellen im VUV/XUV-Bereich als nationale Einrichtungen zu betreiben, während für den *hard X-ray* Bereich eine supranationale Quelle zu realisieren sei. Sie steht heute als ESRF in Grenoble am Anfang der ersten Betriebsphase. Die Schweiz hat sich an diesem Projekt beteiligt und auch eine Initiative der interessierten Hochschulen für die Nutzung wurde von den Behörden unterstützt.

1.3 Anforderungen an eine zentrale Anlage für Forschung und Ausbildung in der Schweiz

Eine Besonderheit grosser und komplexer Forschungsanlagen sind die langen Zeiträume, die für die Erarbeitung eines tragfähigen Projektes, die Bewilligung und den Bau nötig sind, sowie die angestrebte Nutzungsdauer. Da sich die betroffenen Gebiete zudem wissenschaftlich weiterentwickeln, muss sichergestellt sein, dass eine Anlage mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in 20 Jahren noch relevante, international kompetitive und für die Ausbildung attraktive Forschung ermöglicht. Daraus ergeben sich folgende Hauptforderungen:

1. Es muss sich um eine **umfassende und zukunftssträchtige Forschungsmethode** handeln.
2. Die **Forschung muss breit abgestützt**, d. h., für mehrere Gebiete wichtig und auch an den meisten Hochschulen vertreten sein.
3. Der **Schwerpunkt der Forschungsthemen muss richtig** liegen in bezug auf den Zeithorizont und die für die Schweiz besonders wichtigen Innovationsbereiche.
4. Ein **langfristiges Interesse wichtiger Industriezweige** sollte direkt (über Forschung und Anwendungen) oder indirekt (über die Ausbildung) vorhanden sein.
5. Die Anlage muss **innovativ** sein, d. h., in relevanten Leistungsdaten über den Stand der Technik hinausführen und neue Experimentiermöglichkeiten erschliessen. Damit soll sichergestellt werden, dass die Anlage bei Inbetriebnahme eine hohe Attraktivität aufweist. Ebenso wichtig ist ein Potential für **Weiterentwicklungen** und Anpassungen.
6. Die Anlage muss sich in den **internationalen Rahmen einordnen**: Obschon als nationale Anlage konzipiert, muss sie einen Beitrag der Schweiz zur internationalen Spitzenforschung leisten, dies natürlich in Abstimmung mit der Rolle, die den supranationalen Zentren zukommt.

7. Die Anlage muss sich in den **nationalen Rahmen einordnen**: Einerseits muss der langfristige Bedarf absehbar sein, andererseits müssen die Mittel für Bau und Betrieb den Möglichkeiten der Schweiz entsprechen.

1.4 Das Paul Scherrer Institut (PSI)

Das PSI ist eine nationale, multidisziplinäre Forschungsanstalt für Natur- und Ingenieurwissenschaften. Seine Forschungstätigkeiten erfolgen in den Bereichen Kern- und Teilchenphysik, Biowissenschaften, Festkörperforschung und Materialwissenschaften, Kernenergietechnik, Nichtnukleare Energietechnik sowie energiebezogene Umweltwissenschaften.

Eine zentrale Aufgabe des PSI besteht darin, für die beiden Hochschulen im ETH-Bereich sowie für die kantonalen Universitäten Forschungseinrichtungen bereitzustellen, diese zu betreiben und die externen Forschungsgruppen auch in wissenschaftlicher Hinsicht zu unterstützen. Eine Benutzerlabor-Funktion übernimmt das PSI zur Zeit vor allem auf den Gebieten Kern- und Teilchenphysik, Neutronenstreuung, Beschleunigermassenspektrometrie, Myonenspektroskopie und in der Halbleiterforschung. Eine umfangreiche Beteiligung schweizerischer und ausländischer Forschungsgruppen ist ausgewiesen.

Um die Funktion des PSI als Benutzerlabor für externe Forschungsgruppen langfristig sicherzustellen, sind Erneuerungen der Anlagen notwendig. Mit der Ende 1995 erwarteten Inbetriebnahme der Spallations-Neutronenquelle wird ein erster Schritt in diese Richtung abgeschlossen sein: Diese Anlage wird den seit 1957 betriebenen Reaktor SAPHIR als zentrale Forschungsanlage für Neutronenstreuung ablösen. Die von den Benützern bearbeiteten Forschungsthemen stammen aus der Biologie, Chemie, Festkörperphysik, Kristallographie und Materialforschung.

Die Schweiz kann sich kein PSI mit Zweit- und Drittklassforschung leisten! Das Institut ist gross und weltweit sichtbar. Die dem Institut zur Verfügung stehenden Mittel erlauben zwar, neben den Betriebsaufwendungen eine kontinuierliche Erneuerung der Forschungsthemen in vielen Gebieten. Sie genügen jedoch nicht, um einen neuen Fokus aufzubauen. Das Institut ist in der Lage und bereit dazu, Mittel umzulagern und sich in neuen, modernen und zukunftsächtigen Forschungsgebieten zu engagieren. Es sucht diese Herausforderung – ist aber auf die Unterstützung von aussen angewiesen.

Aus den dargelegten Gründen ergibt sich, dass das PSI ein natürlicher Standort für eine Synchrotronlichtquelle ist. Hinzu kommt die am Institut vorhandene Expertise für den Bau und den Betrieb von komplexen Beschleunigeranlagen und das Vorhandensein an einem Ort von mehreren komplementären Forschungseinrichtungen für Festkörper-, Material- und Biowissenschaften.

1.5 Der Vorschlag

Der im folgenden beschriebene Vorschlag, am PSI eine Synchrotronlichtquelle zu realisieren, entspricht der Absicht einer Schwerpunktsetzung bei der Erforschung der kondensierten Materie in all ihren Formen und betrifft viele Disziplinen. Das vorgeschlagene Projekt ist umfangmässig klar als nationale Einrichtung einzuordnen, wie sie auch in kleineren Ländern – wie zum Beispiel in Schweden – existiert. Bezüglich der Qualität der Anlage wird erwartet, dass im weltweiten Vergleich Spitzenwerte im VUV/XUV-Bereich erreicht werden. Damit ist die Quelle auch komplementär zur ESRF in Grenoble. Die im Teil 1.3 dieser Einleitung aufgeführten Anforderungen werden vollumfänglich erfüllt.

Für die Realisierung des Projektes wären Zusatzmittel im Umfang von etwa einem Jahres-Betriebsbudget des Instituts erforderlich, welche über vier Jahre verteilt anfallen würden.

Mit dem Bau dieser Anlage wird die Stellung des PSI als erstklassiges Institut auf absehbare Zeit hinaus gesichert.

Umgekehrt werden mit einem vielseitigen und innovativen Forschungsinstrument höchster Qualität neue Möglichkeiten für die Hochschulen und die Industrie geschaffen, die als Anziehungspunkt für die besten ForscherInnen aus vielen Disziplinen wirken würden. Dies wird zu einem wesentlichen Teil durch Umorientierung von personellen und finanziellen Mitteln des PSI erreicht.

2. Das Konzept

Aus bisherigen Diskussionen mit interessierten Benützern ist klar geworden, dass eine zukünftige Synchrotronlichtquelle in der Schweiz nicht auf einen Routinebetrieb für möglichst viele Experimentatoren ausgelegt werden sollte. Vielmehr müssen neuartige Möglichkeiten im VUV/XUV-Bereich im Vergleich zu Quellen der sog. dritten Generation geboten werden, wie sie gegenwärtig oder in naher Zukunft in Betrieb genommen werden (ALS, ELETTRA, BESSY II).

2.1 Wahl der Energie des Speicherringes

Die Benutzergemeinde der Hochschulen und der Industrie in der Schweiz kann vereinfacht in zwei Gruppen unterteilt werden, die aufgrund ihrer Forschungstätigkeit zwei verschiedene Photonenenergiebereiche ausnutzen

- Benützer von Vakuum-Ultraviolett (VUV) und weicher Röntgenstrahlung (XUV) (10 eV - 3 keV)
- Benützer von harter Röntgenstrahlung (3 keV - 50 keV)

Die Wünsche der ersten Gruppe von Benützern werden am besten erfüllt durch Strahlung aus Undulatoren, die in den geraden Strecken eines Speicherringes mit einer Energie um 1.5 - 2 GeV eingebaut sind.

Um harte Röntgenstrahlen mit Undulatoren zu erzeugen, muss die Energie der Elektronen auf 6 GeV oder mehr erhöht werden (was an sehr grossen Anlagen wie ESRF/Grenoble, Advanced Photon Source/Argonne, Spring-8/Jaeri - Riken geschieht). Es ist aber auch möglich, mit einem Elektronenspeicherring tieferer Energie einen hohen Fluss von harter Röntgenstrahlung zu erzeugen. Dazu gibt es drei verschiedene Varianten:

1. Normalleitende Ablenkmagnete in einem Ring mit $E \approx 3.5$ GeV.
2. Supraleitende "wavelength shifters" (3 Dipol-Magnete) in geraden Strecken eines Ringes mit $E \approx 2$ GeV.
3. Supraleitende Ablenkmagnete, die in einen Ring mit $E \approx 2$ GeV integriert werden.

Für die SLS sind die ersten beiden Varianten aus folgenden Gründen weniger attraktiv:

- Die "konventionelle" Lösung mit einem 3.5 GeV Ring ist zugleich die teuerste Version. Zusätzlich benachteiligt sie die Produktion von Photonen tiefer Energie (unter 50 eV) und führt zu schlechteren Strahleigenschaften.
- In der zweiten Variante ist die Anzahl der "wavelength shifters" beschränkt; die zur Verfügung stehenden freien geraden Ringsegmente möchte man vornehmlich für Undulatoren reservieren. Ebenso ergeben sich störende Einflüsse auf die Elektronenstrahl-

qualität (bei tiefster Emittanz), was eine Verschlechterung der Photonenstrahlen aus den Undulatoren mit sich bringt. Zudem ist der Strahldurchmesser beim "wavelength shifter" wesentlich grösser als beim supraleitenden Ablenkmagneten.

Die für die SLS vorgeschlagene Lösung basiert auf der zuletzt erwähnten Variante: Der Einbau von 6 supraleitenden Ablenkmagneten in eine Magnetstruktur, die eine tiefe Emittanz garantiert. Der kleine Durchmesser des Elektronenstrahls in der Mitte dieser Ablenkmagnete führt zu einer hohen Brillanz der harten Röntgenstrahlung.

Als höchste Betriebsgrenze wurde eine Elektronenenergie von 2.1 GeV ausgewählt.

2.2 Besondere Eigenschaften

Bei der Konzeption der Anlage wurde auf folgende Eigenschaften besonderer Wert gelegt, die zu wichtigen Vorteilen im Vergleich zu laufenden oder im Bau befindlichen Synchrotronlichtquellen führen:

- Höchste Brillanz im Vakuum-Ultraviolett (VUV) / weichen Röntgenbereich (XUV)
- Hoher Fluss und sehr gute Strahlqualitäten im harten Röntgenbereich
- Lange gerade Strecken
- Flexibilität
- Entwicklungspotential

Im folgenden werden diese Eigenschaften näher erläutert.

- **Höchste Brillanz** im Bereich Vakuum-Ultraviolett (VUV) und weicher Röntgenstrahlung (XUV). Dieser Parameter drückt am deutlichsten die Qualität einer Synchrotronlichtquelle aus und wird fortwährend bei der Entwicklung neuer Quellen verbessert. Eine hohe Brillanz wird sowohl durch eine Verkleinerung der Elektronenstrahldimensionen (Emittanzverkleinerung) als auch durch die Erhöhung der Anzahl gespeicherter Elektronen (Strahlintensität) erreicht, wobei die erste Möglichkeit bereits durch die Wahl der Magnetstruktur festgelegt wird. Die hohe Brillanz hat einen wesentlichen Einfluss auf die Auslegung der Optik der Strahllinien und der Experimentiereinrichtungen. Ihre Wichtigkeit für die Durchführung ausgewählter Experimente wird im Kapitel 3 und im Annex hervorgehoben.

Die Brillanz und der Photonenfluss aus den Ablenkmagneten und aus typischen Undulatoren in den kurzen geraden Strecken sind in **Bild 1, 2 und 3** angegeben.

- **Hoher Fluss im harten Röntgenbereich** (um 10 keV). Diese Vorgabe wird durch den Einbau von supraleitenden Ablenkmagneten an jenen Stellen des Speicherringes erreicht, an denen die

Elektronenstrahlquerschnitte ausserordentlich klein sind ($\sigma_x = 30 \mu\text{m}$, und $\sigma_y = 60 \mu\text{m}$). Im Vergleich zu Synchrotronlichtquellen mit normal leitenden Magneten (z. B. ESRF / Swiss Norwegian Beam Line) ist die erreichbare Brillanz bis zu einem Faktor 3 höher (siehe **Bild 3**). Eine wichtige Eigenschaft der Strahlung aus den Ablenkmagneten ist der hohe Grad an Linearpolarisation in der Ablenkebene und an Zirkularpolarisation ausserhalb derselben. Es ist ausserdem möglich, an einem supraleitenden Ablenkmagneten mehrere gleichwertige Strahllinien anzukoppeln.

- **Lange gerade Strecken** (bis zu 18 m), um auf neuartige Entwicklungen auf dem Gebiet der "insertion devices" eingehen zu können. Erwähnt seien hier einige Möglichkeiten, die eines vertieften Studiums bedürfen:
 - *Ultralange Undulatoren.* Ein Undulator mit sehr vielen Perioden (z.B. $N \approx 300$) erzeugt Strahlung in einem sehr engen Energieband mit aussergewöhnlicher Brillanz. Bei der SLS könnte man mehr als 10^{20} Photonen/sec/mm² /mrad²/0.1%B im VUV/XUV Bereich mit einer nur vom Undulator gegebenen Bandbreite von $\Delta\lambda / \lambda < 3 \cdot 10^{-3}$ erreichen. (Für eine detaillierte Diskussion siehe Teil II).
 - *Zirkularpolarisation.* Das Interesse der Benützergemeinde für eine zirkularpolarisierte Quelle mit variablem, schnell umschaltbarem Polarisationsgrad wird zunehmend stärker. Ein mögliches Schema besteht in der Anordnung der sogenannten "crossed undulators", d. h. zwei planare, gekreuzte Undulatoren mit einer dispersiven Sektion in der Mitte.
 - *Mehrere Undulatoren in einer geraden Strecke.* Zwei oder drei Undulatoren können in einer Art Schikane installiert werden (gleichzeitige Strahlung für mehrere Experimente). Denkbar ist auch der Einsatz von Undulatoren mit unterschiedlichen Eigenschaften in Serie um den Durchstimmbarkeitsbereich der Strahlung für bestimmte Experimente zu erhöhen.
- **Flexibilität.** Die Anordnung der Magnete wurde mit einem hohen Grad an Flexibilität ausgelegt. Unter anderem ist zu erwähnen:
 - Möglichkeiten für **alternative Betriebsarten** (z.B. lange Lebensdauer des gespeicherten Elektronenstrahls).
 - **Ideale Anpassung** an verschiedene Arten von Undulatoren oder Wiggeln mit einer grossen Anzahl von Quadrupollinsen.
 - **"Top-up" Injektion.** Durch eine kontinuierliche Injektion von Elektronen wird der Strahlstrom konstant gehalten. Dies ist vor allem beim Betrieb mit sehr tiefer Emittanz und damit verbundener kurzer Lebensdauer (z.B. weniger als 2 Stunden) wichtig.
 - **"On-Axis" Injektion.** Bei reduzierter dynamischer Apertur (z.B. beim Betrieb mit "crossed undulators") wird die konventionelle Injektionsmethode durch Akkumulation problematisch. In solchen Fällen können Strahlpakete mit der vollen Ladung von einer Elektronenkanone mit Photokathode produziert und mit

Hilfe eines schnellen Kickers direkt auf die Strahlachse eingeschossen werden.

- Betrieb des Speicherringes mit einer **variablen Anzahl von Elektronenpaketen**. Diese Option, gekoppelt mit einer sehr kurzen Pulsdauer (ca. 10 psec) eines einzelnen Elektronenpaketes, wird für **zeitauflösende Experimente** benutzt.
- **Entwicklungspotential**. Im Hinblick auf Entwicklungen und Erweiterungen der Anlage können folgende Aspekte erwähnt werden:
 - "Free Electron Laser" im Infrarot-Bereich am Injektor
 - "Bypass" für einen FEL bei kurzen Wellenlängen
 - Möglichkeiten zur wesentlichen Verkürzung der Pulsdauer der Elektronenpakete (bis auf einige Picosekunden) mit zusätzlichen Hochfrequenzsystemen.

2.3 Die Anlage

Die im vorhergehenden Abschnitt erwähnten Merkmale werden durch eine neuartige Anordnung magnetischer Elemente mit einer grossen Anzahl von kurzen Ablenkmagneten und von stark fokussierenden Quadrupolen erreicht. Um den Umfang des Speicherringes zu beschränken, wurde die Anzahl der geraden freien Strecken auf 6 festgelegt.

Eine eingehende Beschreibung der Anlage findet sich im Teil II dieses Berichtes. Die wichtigsten Maschinenparameter sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 2.3.1: Maschinenparameter

Umfang	[m]	240	
Gerade Strecken		2 x 18 m, 4 x 7 m	
Gesamtstrom (multibunch)	[mA]	400	
Strom/bunch (few bunches)	[mA]	~10	
Energie	[GeV]	1.5	2.1
Emittanz ϵ_x	[nm rad]	1.6	3.2
Kritische Energie (supral.Dipol) ϵ_c	[keV]	5	14
Energieverlust pro Umlauf	[MeV]	0.12	0.48
Bunch-Länge σ_x	[mm]	3	4.5
σ_t	[ps]	10	15

Erfahrungen aus bestehenden Synchrotronlichtquellen haben gezeigt, dass die Injektion in den Speicherring aus Stabilitätsgründen am vorteilhaftesten bei der Betriebsenergie erfolgt.

Das Injektionsschema der SLS besteht aus zwei Teilen:

- 100 MeV Linearbeschleuniger für Elektronen
- Booster Synchrotron bis zur Betriebsenergie von maximal 2.1 GeV.

Für den Linearbeschleuniger wird eine klassische 3 GHz Hochfrequenzstruktur vorgesehen. Es ist geplant, als Elektronenquelle zwei verschiedene Typen von Hochfrequenzkanonen einzusetzen:

- Thermionische Kathode; besonders geeignet für das Füllen des Speicherrings mit vielen Paketen kleiner Ladung.
- Laser-betriebene Photokathode; erlaubt die Erzeugung von einzelnen Strahlpaketen mit hoher Ladung. Ein grosser Vorteil ist das Fehlen von "Satellitenpaketen".

Für beide Arten von Elektronenkanonen ist eine enge Zusammenarbeit zwischen dem PSI und dem CERN eingeleitet worden.

Diese Entwicklungsarbeiten könnten parallel dazu neue Forschungsmöglichkeiten eröffnen mit einem "Free Electron Laser" im Infrarot-Bereich von 1-20 μm .

Das Booster Synchrotron ist eine eher konventionelle Anlage, die keine spezielle neue Entwicklung voraussetzt. Es wird für die vorgesehene Betriebsenergie von 2.1 GeV ausgelegt, und wird als schlüsselfertige Anlage von spezialisierten Firmen bezogen.

Der Speicherring mit einem Gesamtumfang von 240 m besteht aus 6 Bögen (mit jeweils 60° Strahlablenkung). In jedem dieser Bögen wird ein supraleitender Ablenkmagnet zur Erzeugung der harten Röntgenstrahlung eingefügt, an dem mindestens 2 optische Strahlführungslinien angebracht werden können. Die geraden Strecken sind in 2 Gruppen unterteilt:

- vier mit einer Länge von 7 m
- zwei mit einer Länge von 18 m.

Eine dieser Geraden wird für den Einbau des Injektionssystems beansprucht. Eine weitere Gerade enthält das Hochfrequenzsystem und einen kurzen Undulator/Wiggler.

Die restlichen 4 Geraden sind für den Einbau von Undulatoren oder Wigglern optimiert. Eine detaillierte Auslegung dieser "insertion devices" liegt zur Zeit noch nicht vor. Ihre Eigenschaften hängen sehr stark von den experimentellen Anforderungen ab.

In der folgenden Tabelle sind die Eigenschaften der Synchrotronstrahlung an den jeweiligen Abstrahlorten angegeben, wobei die

Vergrößerung der Quellenparameter durch Diffraktionseffekte berücksichtigt ist (siehe Teil II):

Tabelle 2.3.2: Quellenparameter

	σ_x [μm]	σ_y [μm]	σ_x [μrad]	σ_y [μrad]
Supraleitender Ablenkmagnet	28	55	191	160
Kurze Geraden (7 m)	78	27	46	28

2.4 Gebäude und Infrastruktur

Die gesamte Beschleunigeranlage wird in einer quadratischen Halle mit einer Seitenlänge von 115 m und einer Mittelhöhe von 10.5 m untergebracht. An einer Seite dieser Halle befinden sich ein Laborgebäude, ein technisches Betriebsgebäude mit dem Kontrollraum und ein Speisegebäude. Eine Aussenansicht der Halle ist in **Bild 4**, eine Innenperspektive in **Bild 5** dargestellt.

Sämtliche Beschleunigeranlagen, Speicherring, Booster und Linearbeschleuniger befinden sich in separaten, abgeschirmten Tunnels. Dadurch wird gewährleistet, dass sich Experimentatoren während des Strahlbetriebs permanent in der Halle aufhalten können.

Die hohen Photonenstrahlqualitäten einer modernen Synchrotronlichtquelle erfordern eine sorgfältige Auslegung der Halle. Aufgrund der Empfindlichkeit der magnetischen Struktur des Ringes und der optischen Linien auf Vibrationen und Setzungen müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- gute mechanische Stabilität des Hallenbodens
- Temperaturstabilität im Speicherringtunnel von ca. $\pm 1^\circ\text{C}$
- vibrationsarme Lage. Auslenkungen sollen kleiner als 1 μm in einem Frequenzbereich von 0.3 bis 30 Hz sein.

Der erste Punkt wird durch eine stark armierte Bodenplatte von 40 cm Dicke erfüllt, die von der Dachträgerkonstruktion und den Wänden entkoppelt ist. Ein um den inneren Teil des Ringes verteiltes Netz von Kühlaggregaten sorgt für die notwendige Temperaturstabilisierung des Ringtunnels. Wegen des grossen Hallenvolumens ist dort eine Temperaturstabilisierung in derselben Grössenordnung sehr aufwendig und kostspielig. Der lokalen Stabilisierung der Strahllinien und der Experimentiermessplätze wird eine grosse Bedeutung zugemessen. Eine zentrale Lüftungsanlage, die Frischluft bei einer

konstanten Temperatur in Bodennähe in die Halle einfließen lässt und die warme Luft bei den Kuppeln absaugt, ist vorgesehen. Dadurch wird eine mittlere Temperatur von 25°C mit langsamen täglichen Schwankungen erreicht.

2.5 Budget

2.5.1 Investitionskosten

Die Kostenabschätzung der in diesem Bericht vorgeschlagenen Synchrotronlichtquelle bezieht sich auf eine Anlage mit folgenden Eigenschaften:

- Linearbeschleuniger für Elektronen, 100 MeV; die Elektronenquelle und die erste Beschleunigerstrecke werden aus der Testanlage übernommen, die am PSI in Zusammenarbeit mit CERN zur Zeit aufgebaut wird.
- Booster-Ring, 0.1-2.1 GeV, 106.2 m Umfang.
- Speicherring, 2.1 GeV, 240 m Umfang
 - "Hexagon Lattice": bestehend aus 6 achromatischen Bögen, mit jeweils 6 normalleitenden und 1 supraleitenden Ablenkmagneten.
 - Gerade Strecken: 2 à 18 m , 4 à 7 m.
- Einbau von 3 "insertion devices" (Phase I).
- Strahlrohr-Infrastruktur, optische Komponenten, Experimentiereinrichtungen und Detektoren für 5 Strahllinien, 3 davon aus Undulatoren und 2 aus den supraleitenden Ablenkmagneten (Phase I). Diese Grundausstattung wird zu einem späteren Zeitpunkt und unter Mitarbeit der Benützer erweitert.

Die Kostenabschätzung stützt sich auf detaillierte Angaben aus dem BESSY II-Proposal und dem ESRF Foundation Phase Report. Eine entsprechende Skalierung aufgrund der Grösse der Anlagen wurde vorgenommen.

Zur Realisierung des Projektes sind 2 ha Land notwendig, das an das jetzige Westareal angrenzt. Der Kostenaufwand zum Erwerb ist im Budget nicht berücksichtigt.

Die Investitionskosten wurden, wie man aus der Tabelle entnehmen kann, in 3 Gruppen unterteilt:

- Über eine beim Parlament vorzulegende "Botschaft" werden 160 MSFr. für die Beschleunigeranlage, die Gebäude und die Infrastruktur beantragt.
- Das PSI stellt 23 MSFr. zur Realisierung der Strahllinien (Phase I) zur Verfügung. Dazu kommt u.U. ein Beitrag zum Aufbau von "proprietary beam lines" aus der Industrie.

Tabelle 2.5.1: Investitionskosten der SLS

	"Botschaft" MSFr.	PSI MSFr.	Nationalfonds MSFr.	Total MSFr.
1. Beschleunigeranlage	77.0	23.0	5.0	
2. Experimentiereinrichtungen				
3. Gebäudeinfrastruktur	73.0			
4. Externe Arbeitskräfte	10.0			
SLS-Gesamtkosten	160.0	23.0	5.0	188.0

- Es wird erwartet, dass benützerspezifische Experimentiereinrichtungen und Detektoren über den Nationalfonds finanziert werden. Der Kostenaufwand von ca. 5 MSFr. wird auf die Dauer der Konstruktionsphase (ca. 4 Jahre) verteilt anfallen.

Eine detaillierte Auflistung der Investitionskosten befindet sich im Teil II dieses Berichtes.

2.5.2 Betriebskosten

Um eine grobe Idee der Betriebskosten der SLS zu gewinnen, seien hier die wichtigsten Aspekte aufgelistet:

- Stromkosten
- Allgemeiner Unterhalt
- Entwicklung

Tabelle 2.5.2: Betriebskosten der SLS

	MSFr. /Jahr
1. Stromkosten	3.0
2. Unterhalt	3.0
Beschleuniger	1.5
Experimente	1.0
Infrastruktur	0.5
3. Entwicklung	5.0
Beschleuniger	2.0
Experimente	3.0
4. Personalaufwand	12.0
Total	23.0

Verschiedene Posten, wie allgemeine Dienste, Laborbenutzung, Bibliothek, Reisen, Transportdienst, allgemeine Sicherheit, zentrales Computernetzwerk usw. werden als Teil der Institutskosten angenommen und sind hier entsprechend nicht berücksichtigt.

Die Betriebskosten werden aus den laufenden Institutsmitteln abgedeckt.

Die erforderlichen personellen Mittel sollen durch eine entsprechende Verlagerung innerhalb des PSI bereitgestellt werden.

2.6 Personalaufwand

- **Konstruktionsphase:**

Gestützt auf die Erfahrung beim Bau ähnlicher Projekte (ALS in Berkeley, BESSY in Berlin) wird ein Arbeitsaufwand von 500 Personenjahren für den Bau der Anlage abgeschätzt. Voraussetzung dazu ist die Vergabe für die Herstellung des grössten Teils der Beschleunigeranlage an die Industrie.

- **Betriebsphase:**

Der Personalaufwand für den Betrieb der SLS beläuft sich auf:

- Beschleunigeranlage 50 Personen
- Experimentiereinrichtungen 35 Personen
- Technische Infrastruktur 30 Personen

Diese Angaben setzen voraus, dass die Benützergemeinde eine grosse Unterstützung und einen kontinuierlichen Ausbau und eine Entwicklung neuer Strahllinien durch das Institut erwartet.

Weiterhin ist der Betrieb der Anlage auf die wissenschaftliche Unterstützung der vorhandenen PSI-Forschungsbereiche und auf eine substantielle Unterstützung durch den Technisch-Wissenschaftlichen Bereich angewiesen.

3. Das vielfältige Forschungsinstrument

3.1 Allgemeine Betrachtungen

Die *elektromagnetische Strahlung* (deren bekannteste Formen sind sichtbares Licht, Radiowellen und Laserlicht), spielt in der Grundlagen- und angewandten Forschung in so unterschiedlichen naturwissenschaftlichen Gebieten wie Physik, Chemie, Biologie, Medizin eine aussergewöhnliche Rolle. Sie ist eine der wichtigsten Sonden zur Untersuchung der elektronischen Struktur der Materie, des Ablaufs vieler chemischer Prozesse sowie zur Klärung des Aufbaus sowohl von Festkörpern als auch von biologischen Substanzen. Ihre Verwendung sowohl in der Diagnose (z. B. Röntgenaufnahmen) als auch für therapeutische Zwecke ist in der Medizin unerlässlich. Ihre industriellen Nutzungsmöglichkeiten reichen von photoneninduzierten chemischen Produktionstechniken bis zu lithographischen Herstellungsverfahren.

Die *Synchrotronstrahlung* (abgekürzt *SR* von Synchrotron Radiation) im speziellen hat sich seit ihrer erstmaligen Beobachtung zu einem Forschungsmittel entwickelt, dessen Spektralbereich sich vom Infraroten (*IR*) über das sichtbare Licht und das Vakuum-Ultraviolett (*VUV*) bis zum harten Röntgenbereich erstreckt. Aufgrund folgender Eigenschaften ist sie sogar zu einer einzigartigen Quelle elektromagnetischer Strahlung entwickelt worden:

- hohe Intensität und sehr hohe Leuchtdichte
- kontinuierliches Spektrum vom Infrarot- bis in den harten Röntgenbereich
- starke natürliche Bündelung der Strahlung von 0.1 mrad bis 1 mrad
- lineare Polarisation in der Ebene des Beschleunigers
- zirkulare Polarisation oberhalb und unterhalb dieser Ebene
- gepulste Strahlung mit Pulsdauern bis zu einigen Picosekunden
- genaue Berechenbarkeit
- saubere Ultrahochvakuum-Quelle

Ihre Nutzung hat in den letzten Dekaden weltweit sehr stark zugenommen, was sich in der Anzahl der vorhandenen und geplanten Quellen zeigt. Es ist zu erwarten, dass dieser Trend in absehbarer Zukunft anhalten wird, zudem der Schwierigkeitsgrad und die Komplexität der in Angriff genommenen Experimente weiter zunehmen wird. Damit verbunden ist eine intensivere Nutzung der Experimentierplätze, nicht nur durch eine wachsende Anzahl von Experimentiergruppen, sondern auch durch die verlängerte Dauer der Experimentiertätigkeit einzelner Gruppen.

Die *SR* bietet eine sehr grosse Anzahl von Experimentiertechniken an, die – wie in **Bild 6** und **Bild 7** ersichtlich – für sehr unterschied-

liche Forschungsdisziplinen und zunehmend für industrielle Anwendungen zur Verfügung stehen. Sie ist also ein vielfältiges Forschungsinstrument, das sich in eine breite Palette komplementärer Methoden (z. B. NMR, Neutronenstreuung, Müonspinresonanz, Positronenspektroskopie u.a.) einfügt.

In den folgenden Abschnitten werden zusammenfassend die wissenschaftlichen Forschungsmöglichkeiten sowie die industriellen Anwendungen an der vorgeschlagenen SLS erläutert. Für einen vertieften Einblick sei hier auf den Annex verwiesen.

3.2 Wissenschaftliche Fragestellungen

Festkörper- und Materialforschung

Ein Schwerpunkt bei der Anwendung von *SR* – sogar die treibende Kraft für den Bau und die Weiterentwicklung von solchen Anlagen – ist die Untersuchung von photoinduzierten Prozessen in der kondensierten Materie. Die angewandten Experimentiermethoden überspannen einen sehr breiten Energiebereich vom Infrarot bis hin zu den Röntgenstrahlen. Spektroskopische Methoden, die auf Photoabsorption, Reflexion, photoneninduzierte Desorption sowie auf die photoneninduzierte Emission von Elektronen beruhen und dadurch die Bestimmung der Energiezustände der Elektronen ermöglichen, sind zunehmend eine Voraussetzung für die Untersuchung der Eigenschaften von neuen Materialien und für das Verständnis grundlegender physikalischer Phänomene.

Die erhöhte Brillanz der Undulatoren bei der *SLS* wird nicht nur Messungen an extrem komplexen oder verdünnten Systemen erlauben, sondern durch eine Verbesserung der Energieauflösung zu neuen Experimentiermöglichkeiten führen. Die Untersuchung von magnetischen Materialien stellte in den letzten Jahren aus zweierlei Gründen eine grosse Herausforderung dar. Zum einen wird das physikalische Phänomen des Ferromagnetismus in wichtigen Werkstoffen noch nicht richtig verstanden. Zum anderen ist die Industrie ständig an der Entwicklung neuartiger magnetischer Materialien interessiert.

Eine der wichtigsten in diesem Zusammenhang angewandten Methoden ist die spin-polarisierte Photoemission, bei der gleichzeitig Spinrichtung, und die kinetische Energie des Elektrons nachgewiesen werden. Da die Erfassung der Spinrichtung aufgrund eines sehr kleinen Wirkungsquerschnittes im Nachweisprozess einen sehr hohen Photonenfluss erfordert, sind solche Experimente auf eine hochintensive Quelle angewiesen. Dieselben Argumente gelten auch für andere hochentwickelte Methoden, wie z. B. die winkelaufgelöste Photoemissionsspektroskopie. Durch die Wahl der Anzahl der gespeicherten Elektronenpakete und deren zeitliche Anordnung, kann die Aussagekraft solcher Experimente verbessert werden. In bestimmten Fällen wird die Durchführung speziell heikler Experimente erst ermöglicht.

Durch die rasche Entwicklung und Verbesserung von Molekülstrahlquellen lassen sich heute gewisse Cluster – die in der Natur nicht oder nur ausnahmsweise vorkommen – von verschiedener Art und Grösse herstellen. Sie können aus wenigen Atomen bis zur Ansammlung von tausend und mehr bestehen. Auch bei verschiedener elementarer Zusammensetzung sind die im Vordergrund stehenden Fragen ähnlicher Natur: elektronische Struktur, Zusammenhänge zwischen Grösse und Form der Cluster und deren dynamisches Verhalten. Untersuchungen in der letzten Zeit haben gezeigt, dass Cluster von kleiner Grösse Eigenschaften besitzen, die man weder an einzelnen Atomen noch in Festkörpern beobachtet hat. Aufgrund des Grössenverhältnisses zwischen Oberfläche und Volumen spielen diese Objekte eine wesentliche Rolle bei katalytischen Vorgängen. Zu den schon vorhandenen Methoden können neue zum Einsatz kommen, wie Koinzidenzexperimente, bei denen gleichzeitig die Elektronenemission und die Laufzeit der entstehenden Ionen gemessen werden und damit das Photoelektronenspektrum einer bestimmten Clustergrösse ermittelt wird. Die spektroskopischen Untersuchungen von Clustern werden immer mehr an Bedeutung gewinnen, vor allem auf dem Gebiet der extrem kleinen Dimensionen (Clustergrössen $< 0.1 \mu\text{m}$), da die Luftverschmutzung in den Industrienationen zunehmend durch solche mit üblichen Methoden nicht nachweisbaren Partikel bestimmt wird.

Die Untersuchungen von Oberflächen und Grenzflächen stellen seit langem eine der wichtigsten Anwendungen von Synchrotronstrahlung dar. Es werden unter anderem eine Vielfalt von praktischen Problemen behandelt, wie zum Beispiel die Korrosion, die Passivierung oder die Katalyse. Experimentiermethoden, die auf *SR* beruhen, spielen bei der Bestimmung der elektronischen Eigenschaften von Oberflächen und Grenzflächen in Metallen und Halbleitern eine grosse Rolle. Die elektronische Struktur von Grenzflächen in Halbleitern bestimmt weitgehend das Verhalten und die Leistungsfähigkeit von mikroelektronischen Bauteilen. In diesem Zusammenhang sei der mehrjährige ständige Fortschritt bei dem Verständnis der Eigenschaften von Schottky-Barrieren (zwischen einem Metall und einem Halbleiter) und von Energiebanddiskontinuitäten bei der Heterostruktur zweier Halbleiter erwähnt. Die Photoemission mit *SR* hat zu dieser Entwicklung einen wesentlichen Beitrag geleistet.

Im Laufe dieser Untersuchungen wurde eine neue – sehr interessante – Technologie eingeführt: das sogenannte *band gap engineering*. Sie besteht in der gezielten Herstellung von Halbleiter-Grenzflächen mit bestimmten Eigenschaften (z. B. Energiebarrieren oder Energiebanddiskontinuitäten) durch kontrolliertes Doping in mikroskopischen Dimensionen. Besonders wichtig ist diese Entwicklung für neue Schwerpunktprogramme wie die Nanotechnologie und die Optoelektronik, bei denen Halbleiter-Grenzflächen eine zentrale Rolle spielen. Wie schon erwähnt, ist der Photonenenergiebereich, der mit *SR* abgedeckt wird, besonders geeignet für dieses Forschungsgebiet. Die hohe Qualität der SLS wird es ermöglichen, die genannten Techniken gezielter und effektiver anzuwenden und neue – wie die Spektrosmikroskopie – einzuführen.

Die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung durch K. A. Müller und J. G. Bednorz in der Schweiz hat zu Arbeiten auf dem Gebiet der Supraleitung angeregt und zu einem zentralen, ausserordentlich belebten Forschungszweig geführt. Die Untersuchungen der supraleitenden Energielücken mit Hilfe der Photoemission – die sogenannte *gap spectroscopy* – sind ein wichtiger Beitrag zum Verständnis dieser Eigenschaft bestimmter Festkörper. Die dabei erzielten Resultate sind beeindruckend: Erstmals ist es auch gelungen, mit der Technik der Photoemission das Auftreten der Energielücke im elektronischen Anregungsspektrum eines Supraleiters nachzuweisen. Zudem konnten gewisse theoretische Voraussagen zur elektronischen Bandstruktur verifiziert werden. Dazu waren sowohl die Energie- als auch die Winkelauflösung der photoemittierten Elektronen von grosser Wichtigkeit.

Eine vielversprechende Technik zur Untersuchung von technologisch relevanten Fragestellungen in der Oberflächenchemie oder bezüglich Strahlungsschäden an Materialien, ist die photoneninduzierte Desorptionsspektroskopie. Dabei werden mit Hilfe von *SR* Atome oder Moleküle, die an der Oberfläche anhaften, angeregt und freigesetzt. Die Untersuchung der Eigenschaften der freigesetzten Teilchen lassen Rückschlüsse auf die Oberflächeneigenschaften zu. Die Desorptionsspektroskopie bietet die Möglichkeit an, dynamische Prozesseigenschaften der Desorption zu untersuchen. Einer der grossen Nachteile dieser Methode liegt in der extrem kleinen Nachweiswahrscheinlichkeit. Experimente werden dadurch sehr schwierig und zeitintensiv. Eine zusätzliche Schwierigkeit kommt hinzu, wenn man sich auf den Nachweis der neutralen Teilchen aus dem Desorptionsmechanismus konzentriert. Aus diesem Grund hat sich die grösste Anzahl der Experimente bislang auf den Nachweis der Ionen beschränkt. Die Ergebnisse deuten aber darauf hin, dass durch das Studium der Ionen nur ein Bruchteil des Desorptionsprozesses erfasst wird. Mechanismen, die zur Freisetzung neutraler Teilchen führen, sind um zwei bis drei Grössenordnungen wahrscheinlicher, als diejenigen, die zur Ionenfreisetzung führen. Der überwiegende Anteil der bis heute durchgeführten Experimente hat also nur "die Spitze des Eisberges" beleuchtet.

Der hohe Fluss aus den *insertion devices* und den Ablenkmagneten der SLS wird zu einem grossen Teil die kleine Nachweiseffizienz aufheben und dazu beitragen, dass die Desorptionsspektroskopie eine grössere Rolle in Europa einnimmt, ähnlich der jetzigen Entwicklung in den USA.

Komplementär zur Neutronenstreuung ist die Röntgendiffraktion eine der wichtigsten Methoden zur Strukturbestimmung von Festkörpern. Die Durchstimmbarekeit und die natürliche sehr starke Bündelung ermöglichen eine intensive Nutzung der *SR* für die ab initio-Bestimmung von Kristallstrukturen und für die Untersuchung von Phasenumwandlungen in Abhängigkeit der Temperatur (z. B. in keramischen Materialien) oder unter extrem hohen Drücken.

Die in situ-Verwendung von Röntgendiffraktion, Weitwinkel- und Kleinwinkelröntgenstreuung erlauben schon die Untersuchung von Phasenübergängen bei der Polymerschmelzung, wobei man auf Zeitskalen im 100 Millisekunden-Bereich empfindlich ist. Die Erhöhung des Photonenflusses wird neue Forschungsmöglichkeiten in der Charakterisierung von Polymeren und vor allem detaillierte Studien der Auswirkungen eines Herstellungsverfahrens auf die Eigenschaften erlauben.

Chemie

Spektroskopische Methoden mit *SR* wurden zum Verständnis physikalischer und chemischer Prozesse in den letzten Jahren vermehrt eingesetzt. Die untersuchten Phänomene reichen von bimolekularen Reaktionen zwischen Ionen und kleinen Molekülen bis hin zu komplexen Vorgängen wie die Photolyse organischer Moleküle oder Ablaufschritte bei der Katalyse oder Photosynthese. Gemeinsames Ziel der Experimente ist die Untersuchung der molekularen Energiezustände, die selektiv durch *SR* angeregt werden, der Sequenz der ablaufenden Schritte, der Zwischenzustände sowie die Bestimmung der Reaktionswege, deren Wahrscheinlichkeit und Zeitskalen.

In dem an den Undulatoren der *SLS* zur Verfügung stehenden Photonenergiebereich von einigen eV bis einigen keV spielen sich elementare Anregungs- sowie dynamische Zerfallsprozesse ab. Es ergibt sich für die Synchrotronstrahlung ein breites interdisziplinäres Arbeitsgebiet mit vielen Anwendungen. Hier eine unvollständige Liste:

- Die Rolle freier Radikale oder von Zwischenzuständen ist in verschiedenen Gebieten der Chemie von fundamentaler Bedeutung, z. B. atmosphärische, Plasma- oder Verbrennungschemie. Diese Untersuchungen haben einen weitreichenden Einfluss bei der Suche nach verbesserten, "sauberen" chemischen Prozessen, die zu umweltverträglichen Techniken führen. Dazu sind eine Reihe von *SR*-Methoden, wie hochauflösende Photoelektronenspektroskopie, induzierte Fluoreszenz und Multiphoton-Ionisation gebräuchlich.
- Untersuchungen zur Dynamik chemischer Prozesse. Die Zeitskalen von Energietransferprozessen und chemischen Reaktionen erstrecken sich bis in den Picosekundenbereich und kürzer, wobei die Zwischen- und Endzustände oft eine Lebensdauer im Millisekundenbereich aufweisen. Durch die Kombination von extrem kurzen Laserpulsen (im Subpicosekundenbereich) mit der kurzen Pulsdauer der *SR* aus Wiggler oder Undulatoren (10-30 psec) wird die Verwendung von sogenannten "Pump-Probe"-Techniken möglich, die ein weites Experimentierfeld zur Dynamik angeregter Zustände eröffnen.
- Die Strukturbestimmung (sowohl statisch als auch dynamisch) von anorganischen und organischen Makromolekülen oder Polymeren mit Hilfe des Zirkulardichroismus und des magnetischen Zirkular-

dichroismus, wird in grossem Masse von der hohen Brillanz und dem Fluss aus speziellen *insertion devices* Vorteile ziehen. Vor allem die Durchstimmbarkeit und der variable Polarisationsgrad der Strahlung werden zu einer Ausweitung der Anwendung dieser Experimentiermethoden führen.

- Untersuchung der Wechselwirkung zwischen der Oberfläche und Adsorbaten durch Röntgen-Diffraktion an der Oberfläche. Damit lässt sich nicht nur die Lage der absorbierten Moleküle in Bezug auf die Oberfläche bestimmen, sondern es sind auch dynamische Prozesse bei der molekularen Dissoziation zugänglich, die zu einem besseren Verständnis der Katalyse führen können. Komplementär zu dieser Methode wird *EXAFS* angewandt, die interatomare Bindungslängen und Orientierung von Molekülen bestimmt, die an Oberflächen anhaften. Die Entwicklung zu zeitaufgelösten Methoden erlaubt das Studium von Reaktionsmechanismen.

Biologie und Biotechnologie

Die *Strukturbestimmung* von Makromolekülen, Proteinen und komplexeren Substanzen, wie Viren, ist von grundlegender Bedeutung für das Verständnis des Aufbaus von biologischen Systemen und deren Wechselwirkung untereinander. Beispiele sind die Wirkung von Enzymen, die Untersuchung der körpereigenen Abwehrmechanismen oder der molekularen Prozesse bei der Einnahme bestimmter Drogen.

Die Röntgen-Diffraktion, die meist benutzte Technik zur Strukturbestimmung biologischer Substanzen in kristalliner Form, ist von mehreren Faktoren abhängig: Kristallisationsprozesse der Proben, Bestimmung der Streuphase, Interpretation der gemessenen Elektronendichteverteilungen und die Umsetzung in Strukturmodelle mit Hilfe von Computercodes. Wesentliche Vorteile der *SR* bei der Anwendung dieser Methode sind:

- Möglichkeit der Benutzung von sehr kleinen Kristallen ($\approx 50 \mu\text{m}$)
- Aufnahme von hochpräzisen Datenserien, die zu verbesserten Elektronendichteverteilungen führen und damit exaktere Strukturbestimmungen zulassen
- zeitaufgelöste Experimente
- verbesserte Winkelauflösung aufgrund der hohen natürlichen Bündelung der *SR*.

Bei der Untersuchung der Nahordnung von Metalloproteinen und Peptiden gehören Methoden wie *EXAFS* (Extended X-Ray Absorption Fine Structure) oder *XANES* (X-Ray Absorption Near Edge Structure) zu den gebräuchlichsten Techniken. Dank des wesentlichen Intensitätszuwachses der *SR* eröffnen sich neue Möglichkeiten wie die Untersuchung von Prozessen bei der Photolyse oder von an Membranen haftenden Proteinen in verdünnten Lösungen. Die Ent-

wicklung von neuartigen *insertion devices*, die zirkularpolarisiertes Licht mit einem variablen Polarisationsgrad abstrahlen können, ermöglicht die Anwendung neuer spektroskopischer Methoden wie des Zirkulardichroismus. Die einmalige Kombination von höchster Brillanz, Polarisation und inhärenter Zeitauflösung der SR (≈ 30 ps) kann dazu benutzt werden, subtile zeitliche Änderungen der Struktur eines Moleküls während einer Reaktion (*Proteinfaltung*) zu beobachten. Solche zeitaufgelöste Untersuchungen sind von besonderem Interesse sowohl für die pharmazeutische Industrie als auch für jene die auf dem biotechnologischen Sektor tätig sind.

Eine wesentliche Begrenzung bei der Anwendung der konventionellen lichtoptischen Mikroskopie im Bereich der Biologie liegt in der Auflösung, deren Grenze bei Strukturen um ca. $0.2\ \mu\text{m}$ liegt. Zwar bietet die Elektronenmikroskopie eine wesentlich höhere Auflösung (Höchstauflösung um $1.5\ \text{\AA}$), die aber in einem wohlpräparierten trockenen (und daher veränderten) Zustand der Probe unter Vakuum erreicht wird.

Für die Untersuchung von biologischen Strukturen im wässrigen Zustand könnte sich die *abbildende Röntgenmikroskopie* besonders eignen. Entwicklungen in bestehenden Labors haben Auflösungen bis zu $50\ \text{nm}$ erreicht. Dabei wird Strahlung mit einer Photonenenergie zwischen $290\ \text{eV}$ und $530\ \text{eV}$ verwendet (das sogenannte *Wasserfenster*). Wenn es darauf ankommt, am Objekt eine möglichst geringe Strahlendosis zu deponieren – was insbesondere für biologische Objekte zutrifft – ist der Einsatz des *Röntgenrastermikroskops* von Vorteil. Dabei wird die Strahlung mit Hilfe von Zonenplatten fokussiert und das Objekt rasterförmig durch den Fokus bewegt. Die deponierte Dosis ist in diesem Fall um eine Grössenordnung geringer als bei der abbildenden Methode.

Die Brillanz der SR-Quellen ist für die Leistungsfähigkeit der *Röntgenmikroskopie* die entscheidende Grösse. Mit den an den Undulatoren der SLS zu erwartenden Brillanzwerten könnte man bis zur theoretisch möglichen Grenzauflösung herankommen und die Belichtungszeit so verkürzen, dass bei hoher Auflösung die durch die Bewegungen hervorgerufene Unschärfe vermieden werden könnte.

Die Untersuchung der Eigenschaften von Strukturen mit Hilfe der photoneninduzierten Emission von Elektronen wird in den Biowissenschaften im Gegensatz zur Chemie oder Festkörperphysik nur in einem sehr beschränkten Umfang betrieben. Der Grund ist darin zu suchen, dass Informationen, die über einen grossen lateralen Bereich gemittelt werden, in biologischen Systemen von sehr begrenzter Aussagekraft sind. Das Zusammenfügen von spektroskopischen Methoden mit der sehr guten lateralen Auflösung aus SR-Quellen haben aber zu einer neuen Forschungstechnik geführt: die ***Spektromikroskopie***. Damit kann man Mikrographien eines spezifischen Elements innerhalb eines biologischen Systems (z. B. in neuronalen Netzwerken) aufnehmen. Die zur Zeit erreichte laterale Auflösung im Submikron-Bereich ist angepasst, um Untersuchungen an

Systemen von zellularen Grösse durchzuführen, typischerweise 5-20 μm für Neuronen, bis hin zu Bruchteilen von Mikrometern für Organellen.

Mikro- und Nanotechnologie

Wie in den bisherigen Abschnitten dargestellt wurde, eignet sich *SR* in hervorragender Weise zur Strukturaufklärung kleinster Objekte. Dies gilt selbstverständlich auch in der Mikrotechnik und der sich gerade erst entwickelnden Nanotechnologie. In diesen beiden Disziplinen kommt aber ein entscheidender weiterer, bisher kaum behandelter Aspekt der *SR* zum tragen: Die Anwendung für präparative Zwecke. Analog wie Röntgenstrahlung in der Medizin sowohl diagnostisch wie auch therapeutisch angewandt wird, ist Lithographie mit *SR* in der Mikro- und Nanotechnik eines der bevorzugten Herstellungsverfahren.

Die Attraktivität der *SR* als "Werkzeug" für die Herstellung kleinster Strukturen liegt im Umstand begründet, dass konventionelle formgebende Verfahren (z.B. "spanabhebend") im Bereich Mikro- und Nanometer nicht anwendbar sind und deshalb alternative Prozesse eingesetzt werden müssen. Heute bedient man sich dafür in erster Linie der Lithographie, dem Standardherstellungsverfahren z.B. auch für die Mikrochips. Die durch Belichtung eines photoempfindlichen Lackes auf einer Oberfläche definierten Strukturen werden durch Ätzen in diese übertragen. Die *SR* eignet sich in ganz besonderer Weise für derartige Lithographieverfahren, da sie kurze Wellenlängen, hohe Intensität und geringe Divergenz aufweist. Die im folgenden kurz skizzierten Anwendungen der *SR* für die Mikro- und Nanotechnik sind im Teil "Scientific and Technological Case" ausführlicher behandelt.

In der *Mikrotechnik*, einem schnell wachsenden Gebiet mit Anwendungen z.B. in der Sensorik, Optik oder Medizinaltechnik, werden heute Bauteile mit Grössen von einigen μm bis zu einigen -zig μm mit dem LIGA-Verfahren (Lithographie und galvanische Abformung) hergestellt. Dabei werden vergleichsweise dicke Polymerschichten durch Schattenwurfmasken mit *SR* belichtet. Im Entwickler lösen sich die belichteten Teile heraus und die so entstandenen Hohlräume werden durch galvanische Verfahren wieder aufgefüllt. Man erhält dadurch das gewünschte Bauteil, wie etwa ein Zahnrad oder eine Düse, aus Metall. Damit dies mit genügender Präzision ausgeführt werden kann, muss die Belichtung der Polymerschicht mit intensiver (Belichtungszeiten), kurzweiliger (Auflösungsvermögen) und parallel (aspect ratio der Strukturen) elektromagnetischer Strahlung durchgeführt werden. Daraus folgt, dass mit LIGA eines der geeignetsten und heute gängigsten Verfahren zur Herstellung mikrotechnischer Bauteile an die Verfügbarkeit von *SR* gebunden ist. Die Mikrotechnik hat ein hohes Anwendungspotential insbesondere für die Schweizer Industrie, ergibt sie sich doch als logische Weiterentwicklung der bestehenden Feinmechanik-Tradition. Nicht zuletzt deshalb ist

Mikrotechnik an der EPFL und der Universität Neuchâtel zum Schwerpunktsthema erklärt worden. Das Vorhandensein von *SR* in der Schweiz wird neue Impulse in der Forschung geben und Synergien entwickeln.

Noch weiter von der Anwendung entfernt, aber als langfristige Entwicklung dafür um so wichtiger, ist die *Nanotechnologie*. Dieses neue, hochaktuelle Forschungsgebiet wurde im Grunde durch die Erfindung des Raster-Tunnelmikroskops durch H. Rohrer und G. Binnig in der Schweiz angestossen. Heute sind weltweit Forschergruppen im Entstehen oder bereits an der Arbeit, um die Möglichkeiten der neuen Analyse- bzw. Präparationsmethoden im Nanometerbereich auszuschöpfen. Geht es bei der Nanowissenschaft z.B. um die grundsätzliche Klärung von Ober- und Grenzflächenvorgängen im atomaren Bereich mittels Rastersonden-Verfahren, befasst sich die Nanotechnik mit den für allfällige Anwendungen relevanten Prozessen. Hier wird Röntgenlithographie mit *SR* als eines der aussichtsreichsten Verfahren zur Erzeugung von Nanostrukturen angesehen. Die Gründe dafür sind etwa die gleichen wie beim LIGA Verfahren, nur dass noch zusätzlich zu berücksichtigen ist, dass die Strukturen wesentlich kleiner ($<10\text{nm}$) sein können, wodurch die Forderung nach der Kurzwelligkeit der Strahlung zusätzliches Gewicht erhält. Lithographieverfahren in der Nanotechnik werden in Zukunft eine herausragende Rolle spielen.

Die noch junge Nanotechnologie ist ein ausgeprägt multidisziplinäres Forschungsthema mit langfristig hohem Potential für technische Anwendungen in Gebieten wie z.B. Informationstechnologie, Werkstoffe, Sensorik, Bio-/Medizintechnik usw. Der Phantasie betr. die Anwendungen nanotechnischer Resultate sind kaum Grenzen gesetzt: Die Vervielfachung der Informationsdichte in Speichermedien, weitgehend abfallproduktfreie Synthese komplexer Verbindungen oder gezielte, schonende Eingriffe in der Neurochirurgie. Wesentlich werden dabei aber immer Komponenten sein, die auf irgendeine Art und Weise im Nanometer-Bereich gezielt und definiert geformt bzw. strukturiert sind. Hierfür wird *SR* eine prominente Rolle spielen.

4. Die Realisierung der SLS

Die hier vorgeschlagene Synchrotronlichtquelle setzt im internationalen Vergleich neue Massstäbe und geht deutlich über das bereits Vorhandene hinaus. Es stellt sich nun die Frage nach der Machbarkeit: Kann das PSI mit den zusätzlich verlangten Investitionsmitteln innerhalb des vorgesehenen Zeitplanes eine Anlage bauen, die die erwarteten Leistungen erbringt ?

4.1 Technische Machbarkeit

Beschleunigeranlage

Mit den langen geraden Strecken, dem Einbau von supraleitenden Ablenkmagneten und der hohen Strahlqualität (höher als alle anderen Anlagen, die im Betrieb, Bau oder in Planung sind), soll die SLS die Grenzen der Kohärenz und der Brillanz über das heute Verfügbare hinauschieben.

Wichtige Teile der Auslegung und Berechnung der Beschleuniger wurden von international massgebenden Experten beurteilt und zum Teil nachgerechnet. Dabei wurden die Erwartungen in bezug auf die Qualität der Anlage bestätigt. Eine Besonderheit der SLS wird die bei gewissen Betriebszuständen kurze Lebensdauer des gespeicherten Strahls sein. Das Konzept beinhaltet eine kontinuierliche Nachfüllung des Speicherringes, um in diesem Fall keine Nachteile in Kauf nehmen zu müssen. Bei den extremen Anforderungen an die Stabilität des Strahls ist dieses Injektionssystem sicher nicht einfach zu realisieren, wird jedoch als machbar beurteilt. Eine weitere Herausforderung ist auch die Entwicklung der Rückkopplungssysteme, die die Elektronenpakete longitudinal und transversal stabilisieren sollen. Ohne sie würde zum Beispiel die Verschiebung der magnetischen Linsen im Mittel um 0.4 Mikrometer eine spürbare Beeinflussung des Strahls ergeben!

Eine weitere kritische Komponente ist die Elektronenquelle, die eine möglichst hohe elektrische Ladung in einem sehr kurzen Zeitintervall und mit genügender Strahlqualität liefern soll. Das PSI hat in einem gemeinsamen Projekt mit dem CERN, das – allerdings für eine andere Anwendung – parallele Interessen hat, die Entwicklung dieses Teils der SLS an die Hand genommen. Attraktiv daran ist die Möglichkeit, in diesen Vorexperimenten die Grundlagen für einen "Free Electron Laser" höchster Leistung im Infrarotbereich zu erarbeiten.

Strahllinien und Quellen

In diesem Bereich wurde noch am wenigsten getan: Einerseits, weil es weniger um Fragen der Machbarkeit geht, andererseits, weil gerade hier die zukünftigen Benutzer der Anlage einbezogen werden müssen. Es zeichnet sich ab, dass sie sich gruppieren werden, um einige neuartige ambitionierte Konzepte vorzuschlagen. Das PSI erwirbt sich durch die Beteiligung an der Swiss Norwegian Beamline an der

ESRF bereits das nötige Know-how auf der Stufe Technik. Es scheint, dass die extrem hohen Leistungsdichten der Synchrotronstrahlung zusammen mit den Präzisionsanforderungen ein lösbares Problem darstellen. Dies vor allem als Folge der Anstrengungen in anderen Zentren, die die Weiterentwicklung der in Frage kommenden Komponenten enorm gefördert haben.

Die supraleitenden Magnete – ursprünglich auch als ein kritisches Element angesehen – konnten inzwischen drastisch vereinfacht werden und auch bei den Undulatoren werden im allgemeinen keine besonderen Schwierigkeiten erwartet. Neuartige Systeme, wie zum Beispiel gekreuzte Undulatoren zur Erzeugung von zirkulärpolarisiertem Licht, müssten in Zusammenarbeit mit anderen Zentren entwickelt werden.

Zuverlässigkeit der Gesamtanlage

Die Betriebssicherheit der 6 supraleitenden Magnete muss zu einem hohen Grad gewährleistet sein, weil bei ihrem Ausfall die gesamte Anlage stillstehen würde. Auch die für die Injektion benötigten schnellen "Kickermagnete" könnten auf der Seite der Elektronik eigentliche Lebensdauerprobleme zeigen. Beides kann jedoch durch entsprechende Auslegung unter Kontrolle gebracht werden.

Ausfälle in der Elektrizitätsversorgung sind heute weltweit in zunehmendem Masse ein Problem geworden. Das PSI ist allerdings durch seinen Standort in unmittelbarer Nähe der Kernkraftwerke Beznau besonders begünstigt. Unangenehm werden hier nur Unterbrüche infolge von Gewittern.

Zusammenfassend wird heute das Projekt als innovativ und ambitiös, jedoch als machbar beurteilt. Nicht einfach wird sicher die Handhabung aller Fragen der Stabilität sein. Ihre Beherrschung ist notwendig, um die besonders hohe Qualität der Maschine ausnützen zu können.

4.2 Budget

Die Budgetierung der SLS ist relativ präzise. Dies ist bei Synchrotronlichtquellen möglich, da Vergleichsmöglichkeiten existieren und keine schwierigen Sicherheitsfragen auftreten.

Wie schon erwähnt, bleibt im Moment der Bereich Klima - Lüftung noch unklar. Die für die Strahllinien eingesetzten Mittel entsprechen einer Erstausrüstung. Während die Maschine – einmal gebaut und in Betrieb – für Umbauten nur wenig zur Verfügung steht, erwarten wir auf der Seite der Strahllinien auch nach der Inbetriebnahme einen kontinuierlichen Aus- und Umbau, der weitgehend vom PSI mit Betriebsmitteln getragen wird. Dieses Vorgehen wird bei allen Benützeranlagen des PSI seit jeher angewandt. Eigene ForscherInnen

erarbeiten vor allem in Zusammenarbeit mit jenen der Hochschulen entsprechende Konzepte und setzen sie um.

Zusammenfassend kann bestätigt werden, dass mit den beantragten Mitteln die SLS gebaut und instrumentiert werden kann. Das PSI wird die entsprechenden Mittel zeitgerecht freistellen. Wir gehen davon aus, dass die aufgrund von einzelnen Gesuchen beim Nationalfonds beantragten Kredite für die Experimentierkammern bewilligt werden.

4.3 Zeitplan

Will die Schweiz mit diesem Projekt einen neuen Schwerpunkt setzen, so muss es zügig abgewickelt werden. Die Vorbereitungsarbeiten sind auf die Vergabe der Lieferverträge möglichst früh im Jahre 1996 auszurichten. Die Projektgruppe SLS des PSI muss und kann dementsprechend ausgebaut werden. Für gewisse Spezialgebiete soll auf Know-how und Messeinrichtungen in anderen Zentren zurückgegriffen werden. Zum Beispiel für Undulatoren oder Kickermagnete (Speisungen und Vakuumkammern) wären Konstruktionen und Messeinrichtungen in Trieste und an der ESRF verfügbar.

Die Vorentwicklung von Prototypen wird mehr Ausnahme als Regel sein. Der Stand der Technik erlaubt heute meist die Beschaffung aufgrund von Berechnungen und der Ueberprüfung einer Nullserie.

Der Zeitplan wird im wesentlichen durch den Bauteil bestimmt. Es ist deshalb von allergrösster Wichtigkeit, die entsprechenden Projektierungs- und Vorbereitungsarbeiten zeitgerecht einleiten zu können – also vor 1996.

Für die Konzeption und die technische Realisierung der Strahllinien würde das PSI erfahrene Spezialisten anheuern. Sie könnten vorerst sogar an einem anderen Standort – zum Beispiel in Lausanne – mit den interessierten Hochschulgruppen diesen Teil der Anlage entwickeln. Zeitplanmässig ist diese Arbeit noch nicht projektbestimmend und auch noch weniger kritisch. Es ist jedoch wichtig, den hochqualifizierten, aber oft nicht besonders grossen Gruppen, die personellen Mittel zur Verfügung zu stellen, damit sie ihren Willen zur Mitarbeit auch in die Tat umsetzen können.

4.4 Integration der SLS ins PSI

Damit ist zweierlei gemeint: Erstens die Bereitstellung der personellen und finanziellen Mittel durch entsprechende Umschichtung der Forschung und zweitens der Aufbau der PSI-eigenen Forschung an der SLS.

Die in **Bild 8** gezeigte graphische Darstellung gibt die Entwicklung der den Forschungsschwerpunkten zugewiesenen Personenjahre zwi-

schen 1980 und 2000 wieder. Dabei ist das Personal der Forschungsanlagen mit dem Anteil des Infrastrukturpersonals entsprechend ihrer dazumaligen Benützung den Forschungsschwerpunkten zugeteilt.

Die Beschleunigeranlage war früher grösstenteils für die Teilchenphysik eingesetzt. Der Forschungsreaktor SAPHIR wurde grossteils für Kernenergieforschung verwendet. Heute wird die Beschleunigeranlage schon mehrheitlich für Festkörperforschung und Materialwissenschaften sowie für Biowissenschaften eingesetzt und weiterentwickelt. Der SAPHIR wird heute grossteils für Neutronenstreu-Experimente verwendet.

Entsprechend haben sich die Forschungsschwerpunkte anteilmässig verändert. Das PSI hat in den letzten 5 Jahren einen deutlichen Wandel vollzogen.

Mit der sich im Bau befindenden Spallations-Neutronenquelle (SINQ) und bei Realisierung des vorgeschlagenen Projekts Synchrotronlichtquelle (SLS) entwickelt sich das PSI organisch weiter zu einem international bedeutenden Forschungszentrum in den Gebieten Festkörperphysik, Materialwissenschaften, Chemie, Biologie und Medizin. Daneben nimmt es auch weiterhin eine bedeutende Stellung auf dem Gebiete der Kern- und Teilchenphysik sowie der Energieforschung ein, wobei letztere von den erwähnten Forschungsgeräten zunehmend profitieren wird.

Was die Forschung mit Synchrotronstrahlung betrifft, entwickeln sich heute im PSI schon Ansätze auf vielen Gebieten: Von der Mikrostrukturierung über die Untersuchung von Neuronen in bezug auf ihren Eisengehalt, bis zur Katalyse- und Verbrennungsforschung, um nur einige ausgewählte Gebiete zu nennen, hat sich bereits aktives Interesse manifestiert.

4.5 Projektabwicklung

Es handelt sich bei der SLS für das PSI um ein Projekt, bei dem auf sehr viel Erfahrung im Hause zurückgegriffen werden kann. Allerdings ist es möglich, die Industrie wesentlich mehr als sonst einzusetzen. Es gibt weltweit einige Firmen, die Teilsysteme – zum Beispiel den recht konventionellen Booster-Beschleuniger – herstellen können. Diese Firmen sind bei genauem Hinsehen gar nicht so spezialisiert. Vielmehr handelt es sich um einen kleinen Kern von Leuten, die sich die entsprechende Expertise einkaufen müssen. Es muss geprüft werden, ob sich nicht auch in der Schweiz Konsortien bilden lassen, die dasselbe tun und sich substantielle Teile des Beschleunigers (allerdings zu Weltmarktpreisen) als Auftrag sichern.

5. Die Nutzung

5.1 Die Nutzungsdauer

Wie in der Einleitung unter Punkt 1.3 erwähnt, sind grosse und komplexe Forschungseinrichtungen zwar mit bedeutenden Investitionen verbunden, werden jedoch üblicherweise während Jahrzehnten genutzt. Dabei werden die Grundgeräte ständig weiterentwickelt und oft auch völlig unerwarteten Anwendungen zugeführt. Gute Beispiele dafür sind am PSI der SAPHIR-Reaktor (Nutzungsdauer etwa 40 Jahre, d. h. bis 1997), der Tandem-Van-de-Graaff-Beschleuniger (voraussichtliche Betriebsdauer etwa 30 Jahre) und die vor 20 Jahren gebaute 600 MeV-Beschleunigeranlage, die in Zukunft als Teil der Spallations-Neutronenquelle SINQ auch noch die Aufgaben des Reaktors übernehmen wird.

Erstaunlicherweise findet man für solche Geräte immer wieder Nischen für Spitzenforschung und Anwendungen. Die vorgeschlagene SLS verspricht, schon von der Vielseitigkeit der Methoden und Forschungsgebiete her und dem damit gegebenen ungewöhnlich grossen Marktpotential, eine lange Lebensdauer.

Es ist natürlich nicht möglich, über solche Zeiträume betreffend der Rolle der Synchrotronstrahlung in den einzelnen Gebieten zuverlässige Voraussagen zu machen: Einerseits werden neue Methoden wie das STM (Scanning Tunneling Microscope) und seine Weiterentwicklungen, oder zum Beispiel auch die fortgeschrittene NMR-Spektroskopie, gewisse Fragen besser beantworten können; andererseits werden sicher noch andere Quellen für elektromagnetische Strahlung zum Einsatz kommen, die gewisse Aufgaben übernehmen können. Man kann jedoch davon ausgehen, dass die Synchrotronstrahlung auch in Zukunft breite Anwendung finden wird – sicher ergänzt durch anderes, aber selber auch in der Bedeutung durch neu entwickelte Methoden gesteigert.

5.2 Die allgemeine Entwicklung des Bedarfs

Die Anwendung von Synchrotronstrahlung ist voraussichtlich noch für einige Zeit ein Wachstumsgebiet. Obschon neue Anlagen gebaut werden, wird eher weniger zur Verfügung stehen: An älteren Anlagen war es möglich, bei jedem der vielen Ablenkmagnete die erzeugte Strahlung mit Strahllinien zu nutzen. Die modernen Anlagen sind auf eine relativ kleine Zahl von Strahllinien höchster Qualität ausgelegt. Bei der ESRF zum Beispiel stehen maximal 16 Plätze für Undulatoren zur Verfügung. Es ist zu erwarten, dass zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der SLS etwa die Hälfte davon im Betrieb sein werden – dies für eine Nutzergemeinde aus ganz Europa. Dazu kommt die zu erwartende Ausserbetriebsetzung einiger Anlagen der ältesten Generation.

Die zunehmende Komplexität der Experimente, gekoppelt mit der Notwendigkeit, einen viel intensiveren Zugang zu Strahllinien zu haben, wird den Bedarf erhöhen. Dasselbe gilt für Experimente, die

vom Anlagebetrieb her andere ausschliessen. Bei zeitaufgelösten Messungen zum Beispiel werden vielleicht nur wenige Elektronenpakete gespeichert, was für alle anderen Benutzer erschwerte Bedingungen schafft – oder ein "Wavelength Shifter" könnte die Qualität des Strahls so stark herabsetzen, dass andere Experimente benachteiligt werden.

Einem wachsenden Bedarf steht also voraussichtlich ein international wesentlich erschwerter Zugang zu den leistungsfähigen Anlagen gegenüber. Die SLS soll den Schweizer Forschenden aus den Hochschulen und der Industrie als Werkzeug höchster Qualität so zur Verfügung stehen, wie es in Zukunft eben nötig sein wird: Als ein Instrument, das auch längerdauernde, spezialisierte Experimente und nicht zuletzt auch Ausbildung ermöglicht.

5.3 Das europäische Umfeld

Die ESRF wird insbesondere den Bedarf der an einer VUV/XUV-Quelle interessierten Benutzer qualitativ und quantitativ nicht abdecken können. Für diesen Spektralbereich ausgelegt, werden in Trieste (ELETTRA) und in Berlin (BESSY II) moderne Quellen gebaut, die für den Einsatz von Wiggeln und Undulatoren optimiert sind und hohe Brillanz aufweisen.

Es bestehen weiterhin in Frankreich und England Pläne für den Bau neuer Anlagen, die aber eher auf lange Lebensdauer des Elektronenstrahls und auf eine grosse Anzahl von "insertion devices" und nicht auf hohe Brillanz ausgelegt sind. Sie sollen dazu dienen, die Wünsche der heute in jenen Ländern vorhandenen Benutzergemeinde zu erfüllen. Eine Zusammenfassung der laufenden, der sich im Bau befindenden und der geplanten Quellen ist in der Tabelle 5.3.1 angegeben.

Eine 1989 durchgeführte EG-Studie mit dem Ziel, Status und Perspektiven der Anwendung von Synchrotronstrahlung im VUV/XUV-Gebiet zu analysieren, bestätigt den Erfolg der in den frühen Achtzigerjahren beschlossenen Politik des Baus nationaler Anlagen und empfiehlt deren Fortsetzung. Festgestellt wird dabei auch, dass sich in Ländern ohne eigene Anlagen (etwa die Hälfte der EG-Partner) pro Kopf der Bevölkerung zehnmal weniger Forscher der Methode bedienen.

5.4 Die Nutzung durch Schweizer Forschende

Wie bereits erwähnt, kann man nicht einfach vom heutigen Bedarf ausgehen. Es muss eine Langzeit-Perspektive entwickelt werden, die berücksichtigt, dass die an solchen Anlagen durchgeführte Forschung bis zu einem gewissen Grad angebotsorientiert ist. Der Bau der SLS wird eine Verstärkung gewisser Gebiete bewirken, einen interdisziplinären Schwerpunkt bilden und nicht zuletzt die Ausbildung vor allem auf Hochschulstufe und Industrie beeinflussen.

Eine Abschätzung der Grösse der möglichen Benutzergemeinde, die für eine Auslastung der Anlage vertretbar ist, liegt bei etwa 200-400

Tabelle 5.3.1: Synchrotron Lichtquellen in Europa

LAND	ANLAGE	ELEKTRONENENERGIE (Gev)	
Dänemark	ISA, Aarhus	0.6	in Betrieb
Deutschland	BESSY I, Berlin	0.8	in Betrieb
	BESSY II, Berlin	1.7	im Bau
	BONN II, Bonn	2.3	in Betrieb
	DELTA, Dortmund	1.5	im Bau
	ELSA, Bonn	3.5	in Betrieb
	HASYLAB (DORIS III), Hamburg	3.7	in Betrieb
Frankreich	DCI, Orsay	1.85	in Betrieb
	SUPERACO, Orsay	0.8	in Betrieb
	SOLEIL, ?	2.1	Vorschlag
	ESRF, Grenoble	6.0	in Betrieb
Grossbritannien	SRS, Daresbury	2.0	in Betrieb
	SINBAD, Daresbury	0.7	Vorschlag
	DIAMOND, Daresbury	3.0	Vorschlag
Holland	EUTERPE, Eindhoven	0.4	in Betrieb
	FELIX, Nieuwegein	0.05	in Betrieb
Italien	ELETTRA, Trieste	2.0	im Bau
Russland	SIBERIA I, Moskau	0.45	in Betrieb
	SIBERIA II, Moskau	2.5	in Betrieb
	VEPP-2M, Novosibirsk	0.7	in Betrieb
	VEPP-3, Novosibirsk	2.2	in Betrieb
	VEPP-4, Novosibirsk	7.0	in Betrieb
Schweden	MAX I, Lund	0.58	in Betrieb
	MAX II, Lund	1.5	im Bau
Spanien	SLC, Barcelona	2.5	Vorschlag

Forschenden pro Jahr. Die obere Grenze ist durch die verfügbare Strahlzeit gegeben, wenn man berücksichtigt, dass anspruchsvollere Experimente durchgeführt werden.

Umgekehrt kann man aus der Grösse der Schweiz, der wahrscheinlichen Entwicklung der Forschung in Hochschulen, Industrie und am PSI selber, ähnliche Zahlen herleiten. Von Vorteil ist dabei natürlich, dass bereits heute eine bedeutende international aktive Anzahl von Gruppen existiert, die als "Kondensationskern" wirken können.

Der Vergleich mit Ländern ähnlicher Grösse und technologischer Entwicklung – zum Beispiel Kanada oder Schweden – bestätigt diese Abschätzungen.

6. Schlussbemerkungen

- Der vorliegende Bericht entspricht dem heutigen Stand der Arbeiten, d. h. einige Aspekte sind noch nicht mit der notwendigen Tiefe bearbeitet. Es sind dies bei der Beschleunigeranlage das Kontrollsystem und die sehr anspruchsvollen Mess- und Rückkopplungssysteme für den gespeicherten Strahl. Beim Gebäude ist es das Gebiet Klima / Lüftung, wo zwar ein interessantes Konzept erarbeitet wurde, die Kosten jedoch zu hoch sind. Andere Konzepte für die Wärmeabfuhr und reduzierte Anforderungen scheinen hier möglich. Keiner der offenen Punkte stellt jedoch die Machbarkeit in Frage.

Zu entwickeln ist allgemein noch das Gebiet der optischen Strahllinien. Dies ist aber natürlich, da ja die zukünftigen Benützerkreise der SLS die Möglichkeit haben müssen, diesen Teil der Anlage an ihre speziellen Anforderungen anzupassen.

- In wichtigen Forschungsgebieten – und vor allem wenn es darum geht, immer wieder benötigte "Werkzeuge" zur Verfügung zu stellen – muss der Beteiligung der Schweiz an den supranationalen Anlagen (ESRF) ein nationaler Effort entsprechen (SLS). Das PSI hat diesbezüglich Erfahrung: Es betreibt erfolgreich einen Reaktor für Neutronenstreuung (und bald an seiner Stelle die SINQ) parallel zur Schweizer Beteiligung am europäischen Höchstflussreaktor (ILL).
- Es ist zu erwarten, dass mit dem Bau und der Weiterentwicklung der SLS-Anlage sowie der SLS-Forschungseinrichtungen bedeutende "spin-offs" in mehreren Gebieten entstehen werden. Es entspricht der bisherigen und auch zukünftigen Institutspolitik des PSI, diese Möglichkeiten konsequent auszunutzen.

7. Autorenliste

Paul Scherrer Institut

R. Abela, S. Adam, R. Andres, A. Anghel, J. Gobrecht,
G. Heidenreich, W. Hirt, M. Jermann, W. Joho, K. Knop,
P. Marchand, C. Marinucci, Ch. Markovits, Ch. Perret, L. Rivkin,
U. Schryber, P. Seiler, A. Streun

EPF Lausanne

G. Margaritondo

Université de Neuchâtel

Y. Baer

ETH Zürich

G. Kosterz, H. R. Ott, R. Prins, T. Richmond, B. Rossi, B. Schön-
feld

Universität Zürich

B. Larsson

EAWAG

A. J. B. Zehnder

IBM

B. Reihl

SLS-Projektleitung

W.Hirt	PSI
R. Abela	PSI
W. Joho	PSI
L. Rivkin	PSI
G. Margaritondo	EPFL

Verdankungen

An dieser Stelle möchten wir uns für die Unterstützung und Beratung bei der Ausarbeitung des SLS Konzepts und der Vorbereitung dieses Berichtes bei einigen Personen und Institutionen bedanken. Die folgende Liste ist bei weitem nicht vollständig.

A. Baldereschi (EPFL), K. Kern (EPFL), W. Kündig (Univ. Zürich), K. A. Müller (IBM), P. Pattison (Univ. Lausanne), D. Pescia (ETHZ), M. Peter (Univ. Genève), M. Quack (ETHZ), H. Rohrer (IBM), L. Schlapbach (Univ. Fribourg), W. D. Schneider (Univ. Lausanne), H. C. Siegmann (ETHZ), C. von Planta (Hoffmann-LaRoche), H. P. Weber (Univ. Lausanne) und K. Yvon (Univ. Genève) haben in vielen stimulierenden Diskussionen dazu beigetragen, die wissenschaftlichen Ziele des SLS Projekts zu formulieren.

Bei der Auslegung des SLS Konzepts konnten wir auf wesentliche Anregungen folgender Industriefirmen zählen: Ciba-Geigy (Basel), Hoffmann-LaRoche (Basel), Sandoz (Basel), SMH (Biel).

Die Mitglieder des "SLS Machine Advisory Committee", A. Hofmann (Vorsitz, CERN), G. Mülhaupt (ESRF), A. Wrulich (ELETTRA) haben das Maschinenkonzept kritisch unter die Lupe genommen und sehr wertvolle Vorschläge beigesteuert. Ihr Kommentar zum Konzept des SLS Speicherrings ist im Anhang zu Teil II zu finden.

Bei der Ausarbeitung des SLS Maschinenkonzepts konnten wir von zahlreichen Kontakten mit Experten auf dem Gebiet der Synchrotron-Lichtquellen profitieren:

J. Bengtsson (LBL), S. Chattopadhyay (LBL), R. Coisson (Parma), M. Cornacchia (SSRL), M. Eriksson (Lund), A. Jackson (LBL), K. Kim (LBL), R. Keller (LBL), N. Mezentsev (Novosibirsk), S. Milton (APS, vormals PSI), H. Padmore (Daresbury), C. Pellegrini (UCLA), V. Suller (Daresbury), G. van Dorssen (Daresbury), G. Vignola (Frascati), P. Vobly (Novosibirsk), H. Wiedemann (Stanford), H. Winick (SSRL) and K. Wille (Dortmund).

Die Experimentierhalle wurde vom Architektur- und Ingenieurbureau Schindler-Schindler zusammen mit K. Daniels und seinem Team (Institut für Haustechnik ETHZ) ausgelegt. Die Eignung des vorgesehenen Geländes als Standort der SLS wurde von H. J. Lang (Institut für Geotechnik ETHZ) und D. Mayer-Rosa (Institut für Geophysik ETHZ) untersucht.

Beim Besuch ihrer Synchrotron-Lichtquellen haben wir von der Gastfreundschaft und der Unterstützung folgender Institute profitiert: ALS (Berkeley), APS (Argonne), BESSY (Berlin), ELETTRA (Trieste), ESRF (Grenoble), ETL (Tsukuba), HASYLAB (Hamburg), INS (Tokyo), LURE (Orsay), NSLS (Brookhaven), Photon Factory (Tsukuba), SOITEC (Tsukuba), SPring-8 (Riken), SSRL (Stanford).

Schliesslich möchten wir uns speziell bei L. Adrion, C. Bachmann, U. Karcher und M. Salzmann für ihre grosse Mithilfe bei der Gestaltung dieses Berichts bedanken.

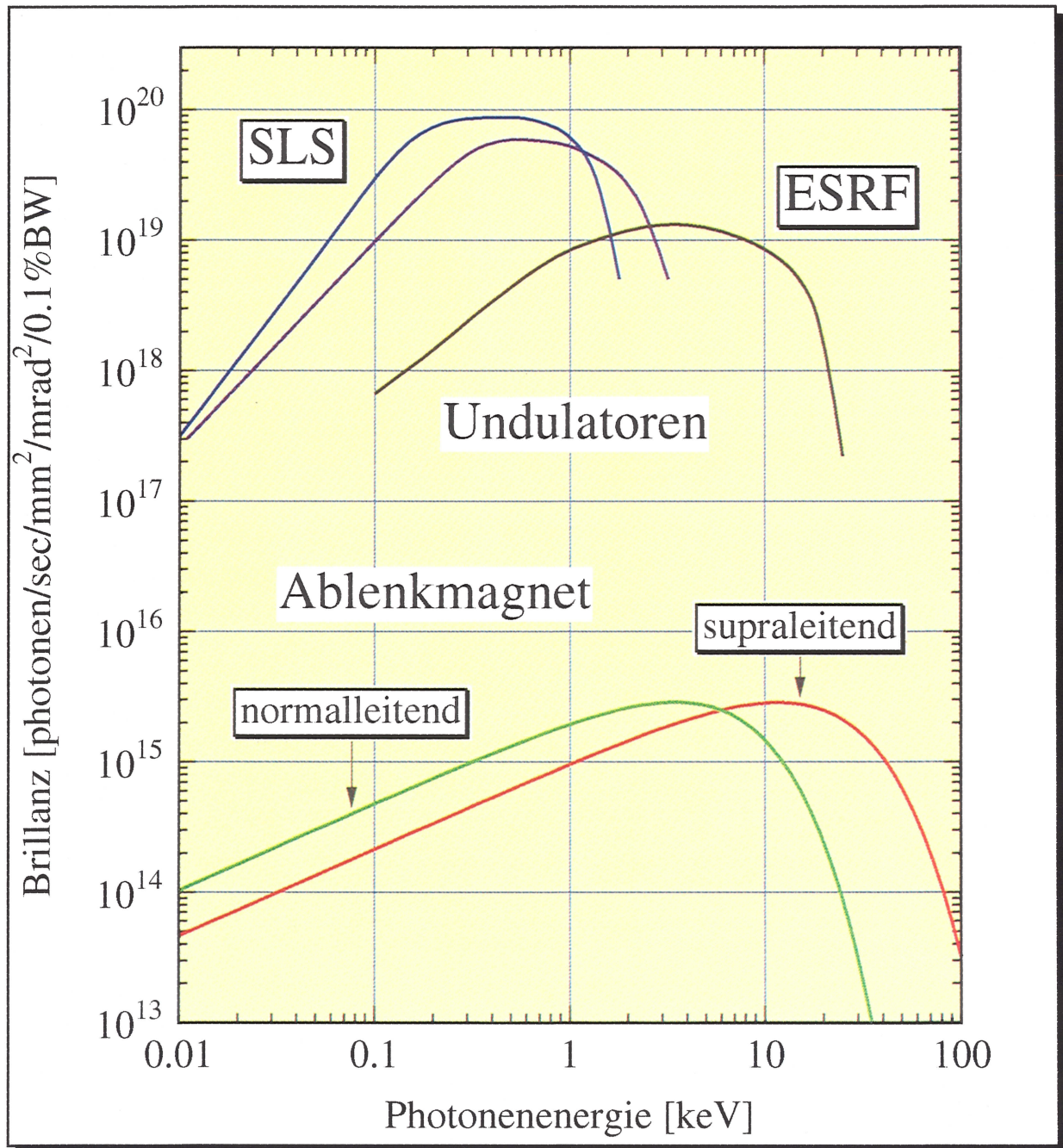


Bild 1: Brillanzkurven der Synchrotronstrahlung aus den Ablenkmagneten bei 2.1 GeV und aus typischen Undulatoren bei 1.5 bzw. 2.1 GeV (gemittelte Enveloppen über mehrere Ordnungen und verschiedene Undulatoren bei 400 mA, im Vergleich zu Undulatoren bei der ESRF bei 200 mA).

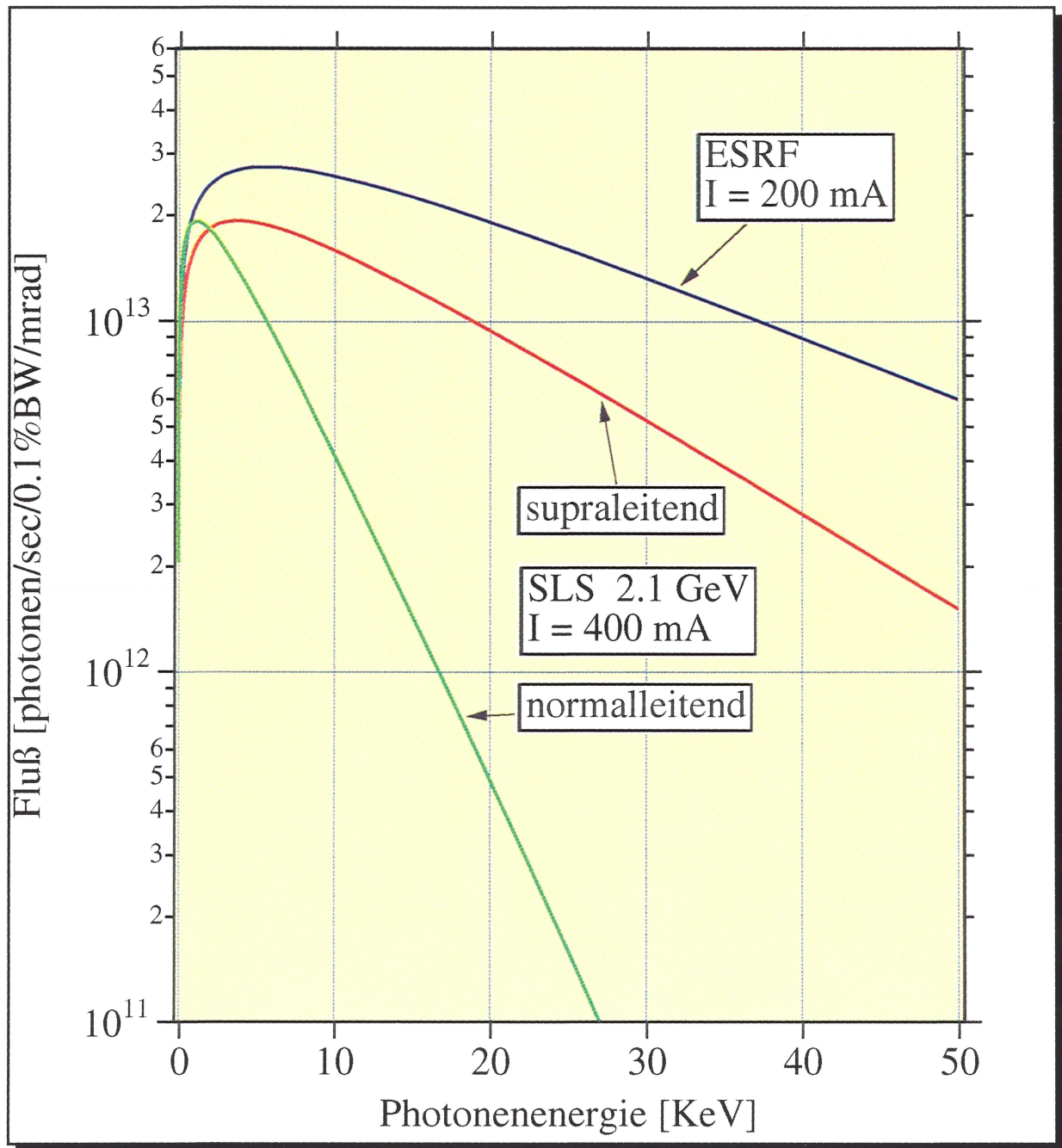


Bild 2: Flusskurven aus den Ablenkmagneten bei 2.1 GeV.

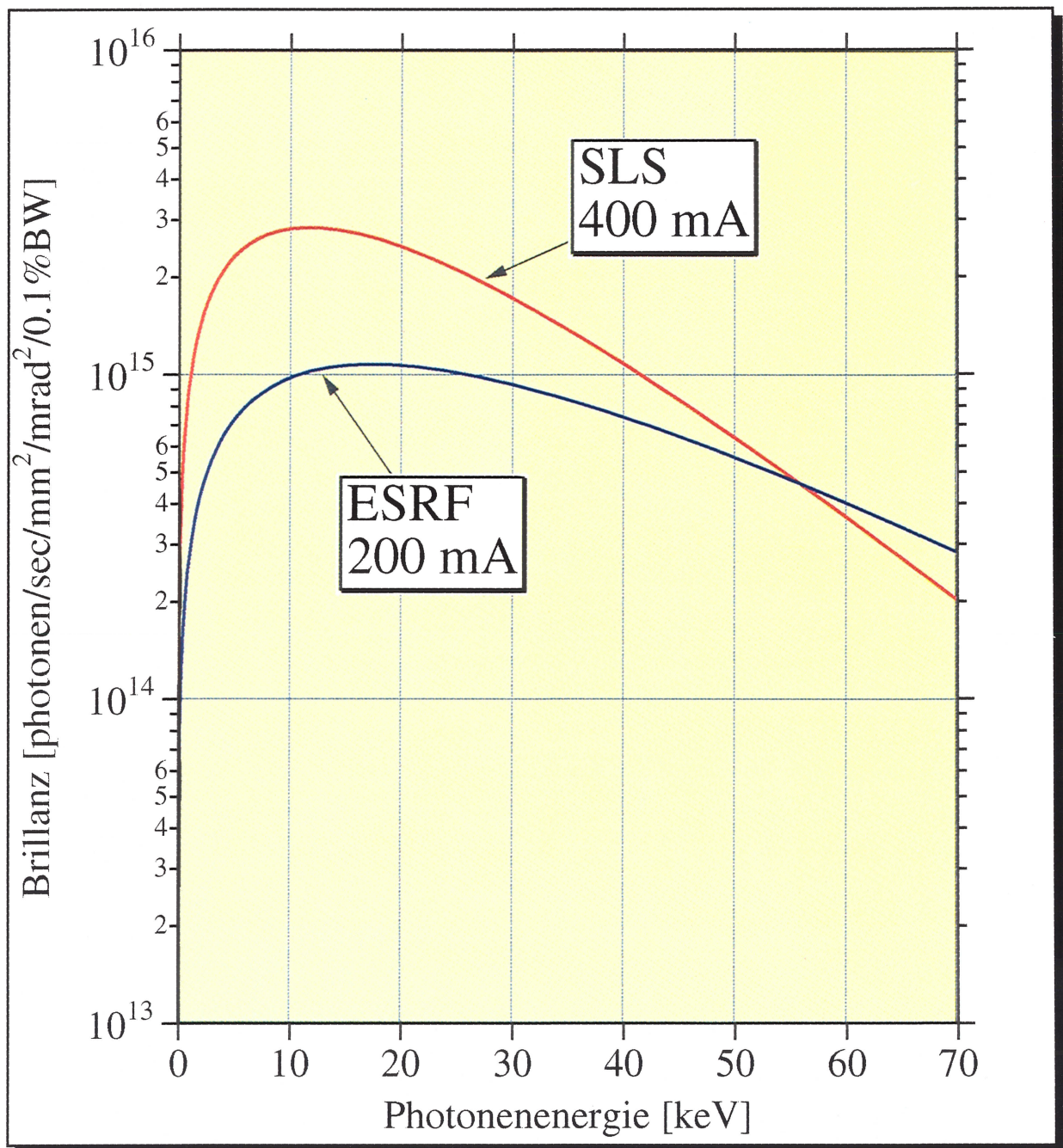


Bild 3: Vergleich der Brillanz aus dem supraleitenden Ablenkmagneten der SLS mit einem normalleitenden Ablenkmagneten der ESRF.

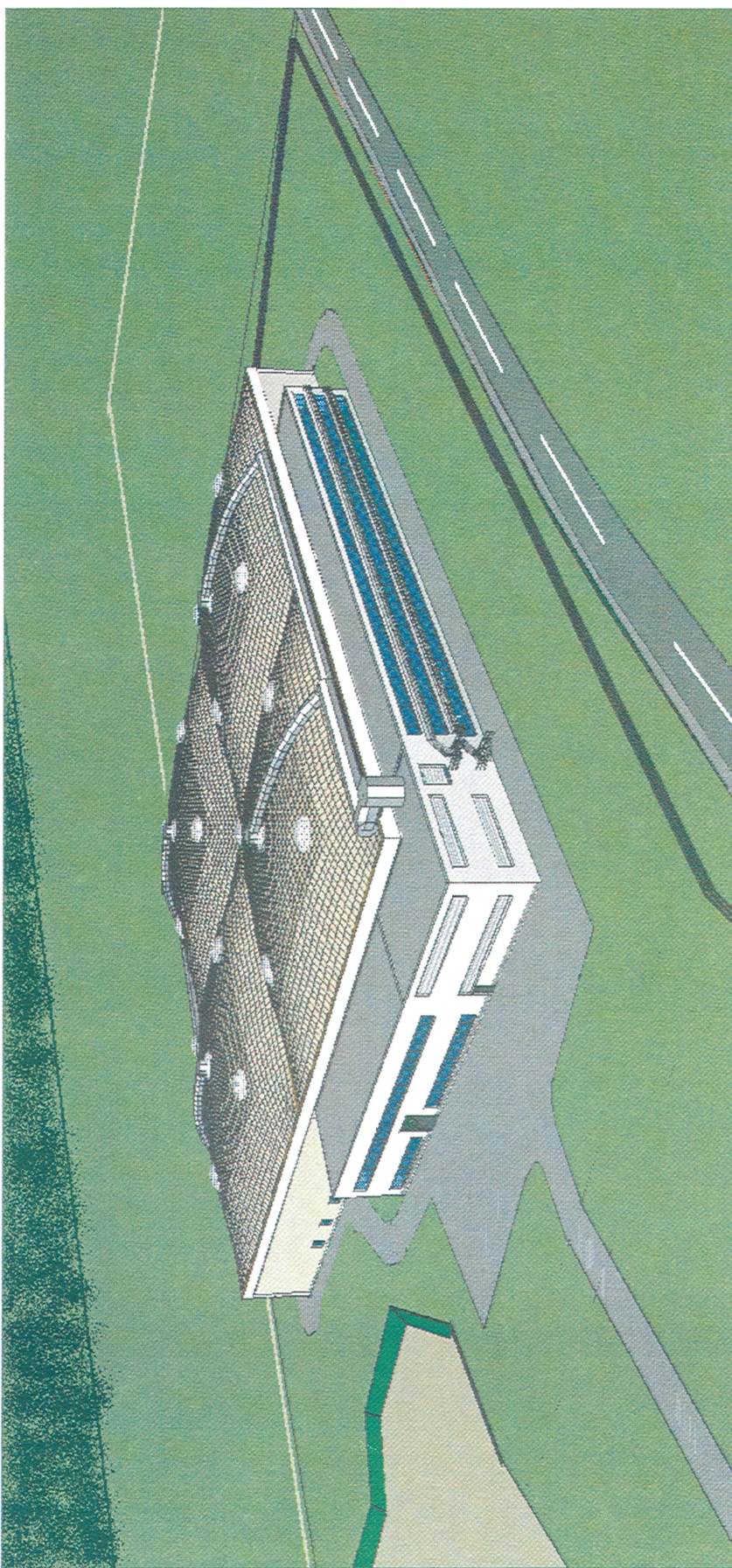


Bild 4: Aussenansicht der Experimentierhalle mit Labor-, Speise- und Laborgebäude (Blick aus Nordwesten).

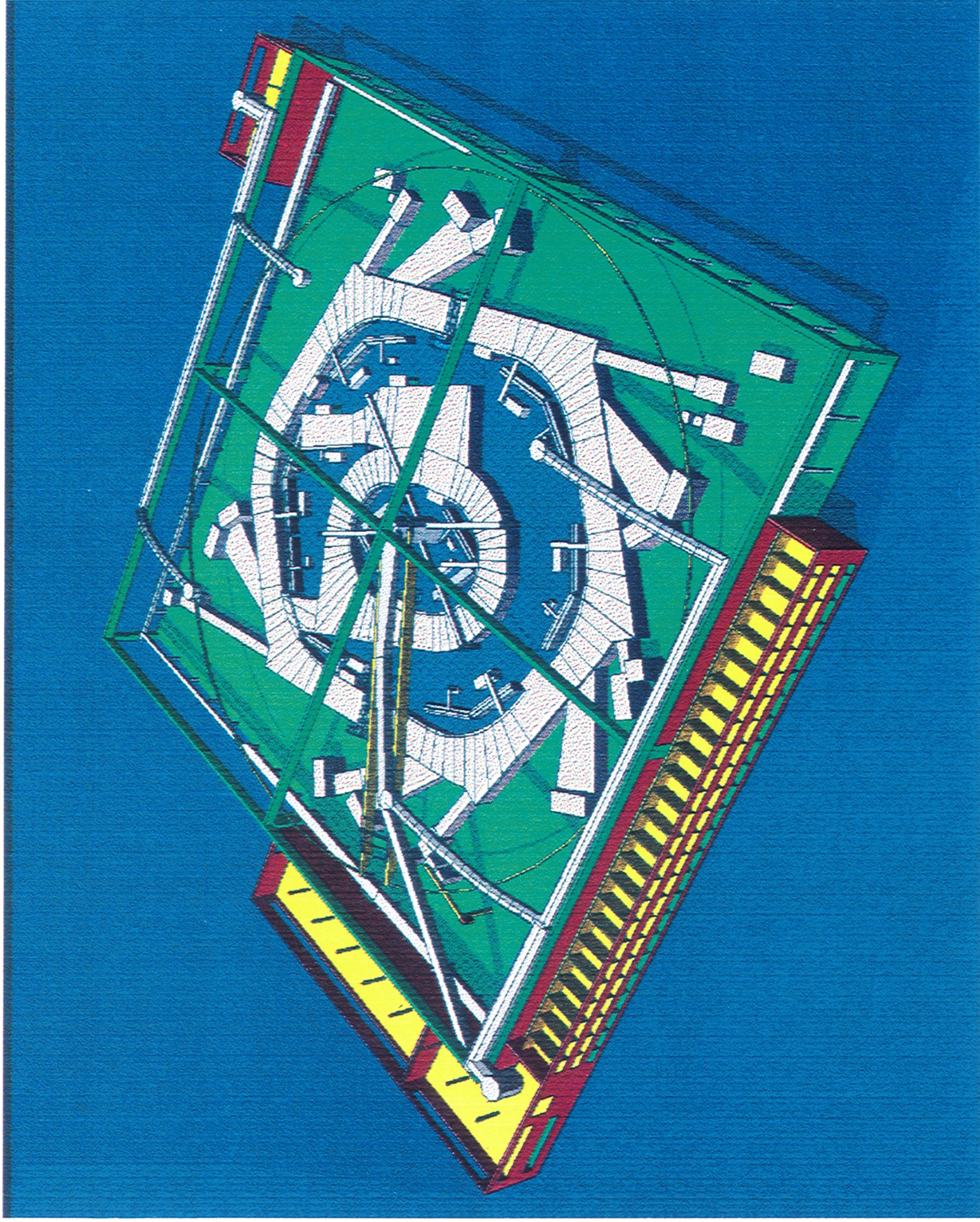


Bild 5: Innenperspektive der Experimentierhalle.

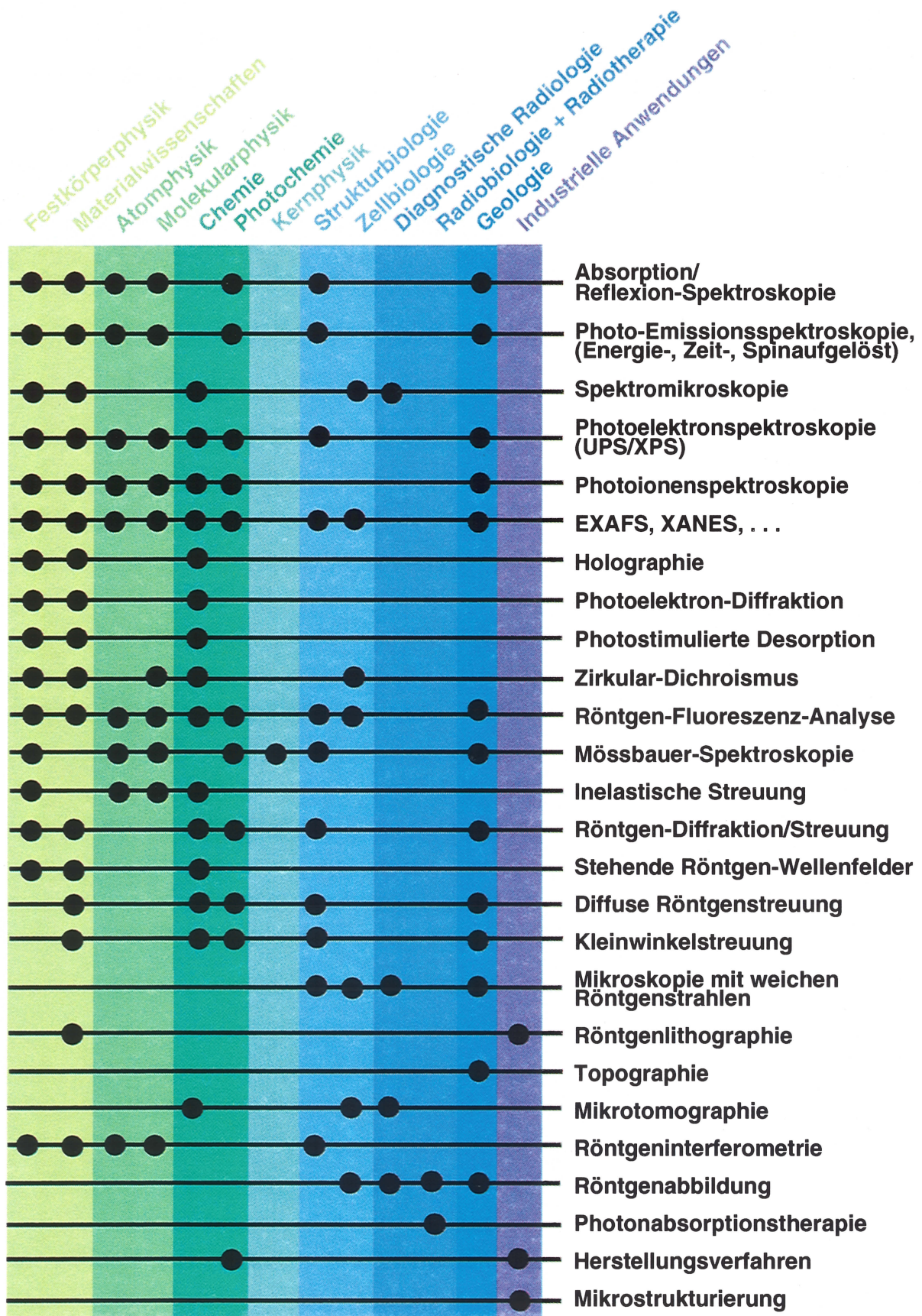


Bild 6: Einsatzgebiete und Techniken der Synchrotronstrahlung

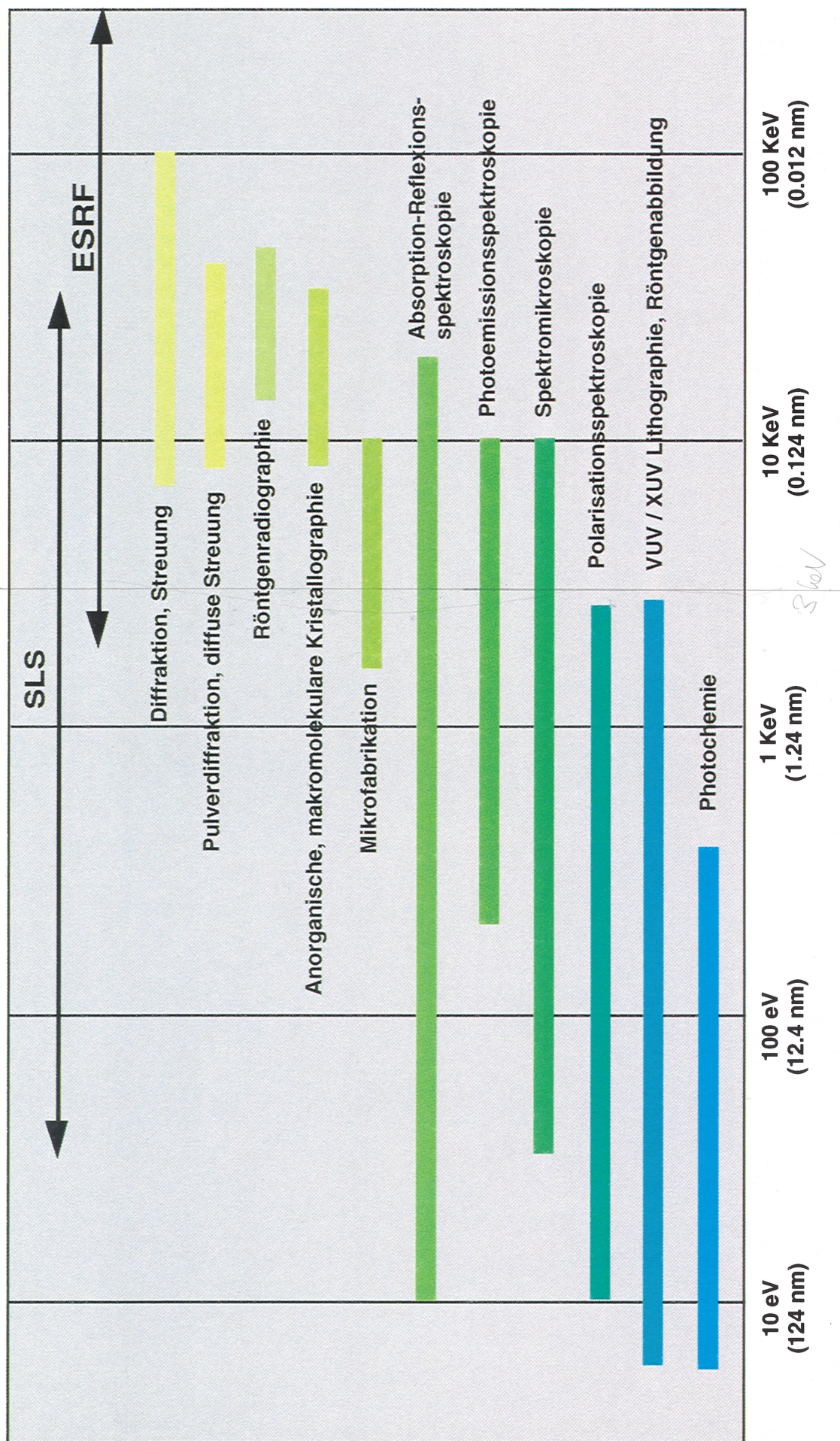


Bild 7: Experimentiertechniken und zugehörige Energiebereiche

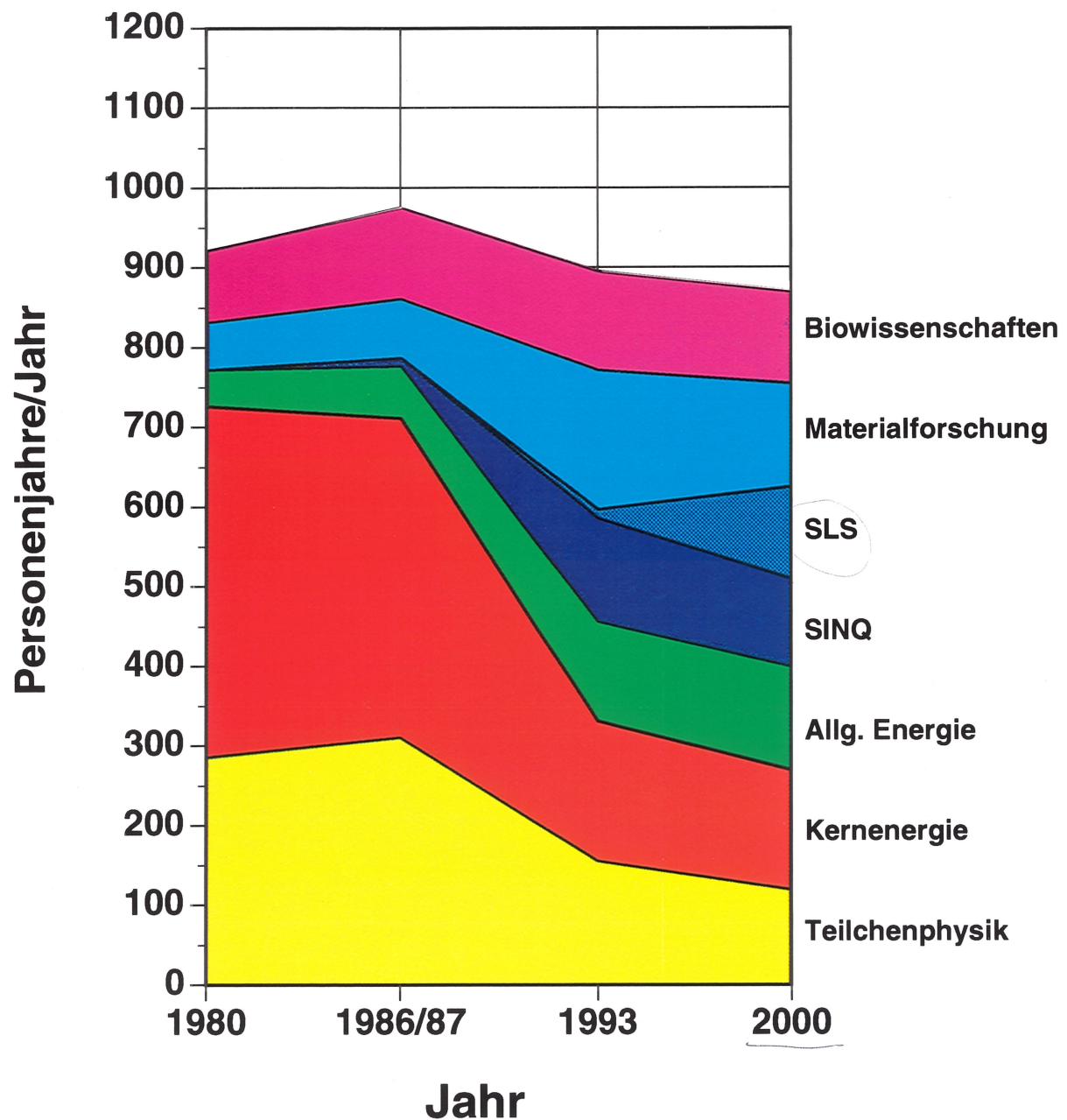


Bild 8: Entwicklung der den Forschungsschwerpunkten zugewiesenen Personenjahre zwischen 1980 und 2000 (ohne Drittmittel). Dabei ist das Personal der Forschungsanlagen (z.B. Beschleunigeranlage und Forschungsreaktor) mit dem Anteil des Infrastrukturpersonals entsprechend ihrer dannzumaligen Benützung den Forschungsschwerpunkten zugeteilt.

**SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL CASE:**

**Many Applications in
Many Different Domains**

CONTENT

I. The Swiss Environment: a Remarkable Combination of Favorable Elements	A-4
II. The International Environment	A-5
III. Specific Applications	A-7
III.1 Synchrotron Light in Physics and Chemistry	A-7
III.2 Synchrotron Light in Biomedical Research	A-13
III.3 Synchrotron Light in Micro- and Nanotechnology	A-19
III.4 Synchrotron Light in Environmental Research	A-29
IV. Concluding Remarks	A-30

The factors that make so strong the scientific and technological case for the SLS are:

- The basic reasons that make synchrotron light an essential tool for today's science and technology, and
- The unique combination of positive elements that create unusually favorable conditions for the SLS here in Switzerland.

Synchrotron light is so important because it concerns the one problem that unifies most of the domains of science and technology: what do a biologist, a pharmacologist, an ecologist, a physicist, a medical researcher, a chemist, or a material scientist have in common? The answer is that they are all interested in phenomena that are related to *chemical bonds and electronic structure*. Microscopic physiology, the structure of proteins, the formation of polluting clusters, the transport and optical properties of semiconductors, the carcinogenic effects of radiation, the mechanisms of catalysis, the properties of artificial nanostructures: this may appear as a very heterogeneous list, but all of its components are basically related to the properties of chemical bonds and electronic structure.

The study of such properties constitutes indeed much of today's science and technology. Synchrotron light is an essential tool in this endeavor, again for very basic reasons.

The many techniques that study chemical bonds properties and electronic structure are all based on the interaction between an elementary "probe" and the system under investigation. Since the very birth of scientific and technological research, the electromagnetic radiation has been the most important of such probes. Electromagnetic radiation is the essential tool for crystallography, spectroscopy, microscopy, processing and fabrication techniques that constitute a large fraction of the modern science and technology.

In most cases, to study chemical bonds the electromagnetic radiation must satisfy at least one of two basic requirements. Its wavelength must be comparable in magnitude with the length of chemical bonds, or its photon energy should not differ much from the energy of the electrons in the atoms that form the bonds.

Before the advent of synchrotron light, such requirements were difficult to meet, because good sources of electromagnetic radiation with the required wavelength and photon energy did not exist. Synchrotrons are by far the brightest, most intense, and most flexible sources in this spectral domain.

A synchrotron source like the SLS is not a one-application facility. It provides photons, simultaneously, for many different users and many different types of applications.

Each application exploits one of the basic interactions between electromagnetic radiation and molecules, solids or biological systems. For example, the radiation can be diffracted. This phenomenon is used in crystallography to identify the atomic structures created by the formation of chemical bonds. Or it can be reflected or absorbed, perhaps stimulating the emission of photoelectrons or other particles: each of these phenomena is exploited in a variety of spectroscopies and/or microscopy techniques. Finally it may break chemical bonds, producing radiation damage in biological systems or photostimulated chemical processes.

The diversity, interdisciplinarity and extent of the uses of synchrotron light are illustrated by **Figure 1**. This table indicates the impact that SLS, the brightest and most advanced synchrotron source of soft-x-rays, will have on Swiss and European science and technology: not on one branch, but on many if not most of their domains.

I. The Swiss Environment: a Remarkable Combination of Favorable Elements

Switzerland, among all countries, offers a rather unique combination of essential factors, that create an unusually good environment for developing the most advanced synchrotron radiation source project of the next decade:

- Switzerland possesses the technical know-how required to develop such a facility; in particular, the advanced know-how that is necessary to increase the brightness and open the way to many novel applications.
- Scientists in Switzerland are already among the world leaders in several domains of synchrotron research, including those that require high brightness such as ultrahigh-resolution photoemission, spin polarization and circular polarization techniques, spectro-microscopy and cluster spectroscopy.
- The Swiss industry has a tradition of excellence in areas such as precision mechanics and pharmaceutical innovation, that will take full advantage of the advanced performance of the SLS.
- Switzerland is a world leader in understanding and controlling air pollution. Synchrotron light is becoming an essential tool for the study of small post-combustion particles and reactive clusters; the SLS is likely to become a key element in keeping Switzerland at the forefront in the fight against pollution.
- Switzerland is already engaged in a variety of advanced synchrotron programs at foreign facilities, supporting these programs with considerable investments. Normalized to its population, the existing activities already make Switzerland one of the European centers in

this domain. The SLS will not be built in a scientific or industrial desert, but on the solid foundation of many years of practical experience.

- Last but not least, there will be a unique combination of large scale user facilities at PSI for complementary investigations.

These elements create an unique situation for optimizing the future Swiss investments in this domain, moving beyond the synchrotron light science of this decade, and building in Switzerland a scientific and technological program of absolute excellence, that will play a significant role internationally.

II. The International Environment

Although planned as a national facility, the SLS is embedded in the international network of synchrotron light facilities. Whereas the most advanced source of hard x-rays in Europe – the ESRF in Grenoble – was realised as an international project, the sources in the spectral range of vacuum ultraviolet and soft x-rays are normally operated on a national level.

The scientific case for the SLS is based on a strategy that is dictated by the factors discussed above, and by the international status and evolution of synchrotron light activities.

This evolution has been based, over 25 years, on three generations of sources; the first consisted of reconverted sources originally constructed for high-energy physics research. The second generation – that includes facilities like Bessy I in Berlin, Aladdin at Wisconsin and the NSLS in Brookhaven – are dedicated sources specifically designed for synchrotron light research.

The performance of these sources is still quite limited as far as their brightness is concerned. Brightness is a crucial characteristic for scientific and technological applications, that combines the emitted photon flux with the source's area and with its angular collimation. In the third generation, the brightness levels are being improved by the use of low-emittance accelerators and special insertion devices. Two synchrotron sources of the third generation operating in the same general spectral range as the SLS, are in the commissioning phase: ELETTRA at Trieste and ALS at Berkeley.

Compared to second-generation sources, these facilities increase the brightness by at least three orders of magnitude. This means being able to dramatically improve at least one important aspect of each application. Consider, for example, spectroscopy applications such as photoemission or photostimulated desorption; with the present sources, one can push almost to the limit the energy and angular resolution, and reach modest levels of lateral and time resolution.

With ELETTRA and ALS, it will be possible to reach the natural limits in each of these performance aspects, *but not simultaneously*. For example, it will be possible to push the lateral resolution to the natural (diffraction) limits, with reasonable energy resolution, but not to have at the same time good lateral, energy, angular and space resolution. Thus, even ELETTRA and ALS will not fully exploit the potential capabilities of synchrotron-light spectroscopies.

The SLS will go beyond these limits by further increasing the brightness level, and therefore inaugurating the fourth generation. With its brightness level, simultaneous optimization of several performance aspects will be possible. The advanced status of Swiss research in the corresponding areas will make it possible to translate this opportunity into fundamental scientific achievements and technological progress.

II.1 The General Philosophy of the Scientific and Technological Case

The Swiss and international status of synchrotron activities dictate three specific criteria to optimize the SLS project and its scientific and technological case:

1. The source parameters must be pushed to the limit, in particular as far as brightness is concerned: SLS will not be a “generic” national source, but a most advanced tool that is not available elsewhere.
2. The use of the source must privilege the areas of present Swiss excellence in science and technology.
3. The SLS must provide support for future industrial needs. Its characteristics and mode of operation must therefore also be optimized for applications of interest to the Swiss industry.

As far as this third point is concerned, two practical examples can immediately be offered:

First, the magnet system (lattice) and the energy of the source is planned to make it very competitive for uses such as macromolecular crystallography, microfabrication and micromechanics, all areas of very high interest for the Swiss industry. Other industrial areas that will profit from the expected performance of the SLS are photochemistry, surface science and catalysis, corrosion prevention, microelectronics, x-ray microscopy, combustion and microparticle research.

Second, the SLS operation mode will be extremely user friendly, with particular emphasis on the specific needs of industry. The key elements will be reliability and confidentiality.

III. Specific Applications

A series of examples of the many applications of the SLS will now be discussed. It should be emphasized that their list, although impressive, covers only a fraction of the facility's potential applications. It should, nevertheless, give an idea of their advanced and interdisciplinary character.

III.1 Synchrotron Light in Physics and Chemistry

III.1.1 Microscopy, Spectromicroscopy and Electron Holography

At present, synchrotron light in the spectral domain of the SLS is primarily used for different kinds of spectroscopies: photoemission, optical absorption, reflection, stimulated desorption, photoluminescence, etc. Synchrotron light has greatly enhanced the capabilities of these spectroscopies – but we are still far from completely exploiting them, and the main limitation is the brightness of the photon source.

Synchrotron-light spectroscopies are usually implemented without lateral resolution. This is a severe limitation, since it makes them blind to crucially important material properties on the nanoscopic or mesoscopic scale. The third-generation sources will make it possible to achieve good lateral resolution, but without full optimization of all other desirable performances. With the SLS, this optimization will become possible.

Photoemission spectroscopy is a good example of this revolution. More than one century after Hertz's discovery of the photoelectric effect, we are still far from reaching the limits of its potential capabilities. The ultimate photoemission experiments would be able to control/tune with high accuracy and measure with very high resolution all of the relevant parameters: photon energy and polarization, electron energy and momentum, also spin polarization and achieve the natural limits of time resolution and lateral resolution determined by diffraction (better than 100 Å). At present, instead, we can optimize at most a couple of parameters; as to lateral resolution, we are typically blind to properties on a scale smaller than 0.1 mm with this technique.

The first undulator sources of synchrotron light, e.g., the Stanford-Berkeley-Wisconsin undulator on Aladdin, have allowed lateral resolutions of the order of 0.1 micron; this combination of spectroscopy and lateral resolution is known as *spectromicroscopy*. The resolution achieved in these advanced tests is certainly a big improvement, but still far from the diffraction limits. ELETTRA and the ALS will reach the diffraction limits in spectromicroscopy, but without being able to optimize energy and angular resolution, spin detectability, etc. The results will nevertheless produce very important progress, notably in materials science.

Such progress is due, in particular, to the *chemical* sensitivity of the new

microscopy and spectromicroscopy techniques. **Figure 2** shows an example: the reconstructed three-dimensional micrographs lines of gold on a substrate. These images are *not* created by the geometrical characteristics of the system: they reflect instead the contrast between its different chemical components. The new synchrotron-light microscopies and spectromicroscopies are excellent tools for advanced chemical analysis on surfaces on a microscopic scale.

With the SLS, the ultimate limits of the different types of spectromicroscopies become much closer. For example, the combination of high lateral, space and angular resolution will produce information on the chemical status of the elements and on fine details of the band structure on a microscopic scale. And also information beyond band structure of high-temperature superconductors and low-dimensionality systems. The spin information will make it possible to clarify the very nature of phenomena like ferromagnetism, again on a microscopic scale.

Lateral resolution with optimized performances makes it possible to use synchrotron spectroscopies in non-traditional domains, such as the life sciences, where the need for microscopy is dictated, for example, by the size of cell elements. **Figure 3** emphasizes that ordinary photoemission spectroscopy is blind to the microscopic structure of a neuron cell system, whereas synchrotron photoemission spectromicroscopy can explore its properties. This approach is already being used, for example, to identify the spatial distribution of elements such as aluminum (see **Figure 4**), that many authors suspect to play a role in the Alzheimer and other diseases of crucial importance in today's society.

The general use of synchrotron light in biomedical research will be discussed in detail later. We note that it is essential for an important aspect of x-ray microscopy in the life sciences: the study of “wet” specimens. This requires working in the spectral domain of minimum absorption by the water – the so-called “water window” illustrated by **Figure 5**. No other source matches the advanced characteristics of synchrotrons in this spectral range.

It should be noted that scientists in Swiss institutions are already at the forefront of the evolution from conventional to advanced spectroscopy and to spectromicroscopy. They hold the world records for lateral, energy and angular resolution, which put them in the forefront, for example, of the research on the electronic structure of superconductors (see **Figure 6**). They have a tradition of world leadership in spin-polarized experiments, and have already participated in one of the two experimental programs on photoemission spectromicroscopy of biological systems. The SLS is precisely what is needed to keep Swiss science at the forefront of these fundamentally important research areas.

Also related to lateral resolution is the emerging domain of synchrotron-light and electron holography, whose progress has been quite relevant in recent years as far as image reconstruction is concerned. Atomic

resolution or better has been claimed in selected cases. Once again, however, the performance is limited by the signal level: the time per hologram is still too long. The signal level produced by the SLS will make it possible to improve the performance and at the same time decrease the data-taking time. This is a crucial point, for example, in holographic techniques based on electron diffraction, since spurious features are filtered out by a parallel analysis of many holograms.

III.1.2 Time Resolved Spectroscopy

Again in the general field of synchrotron-light spectroscopy, there is at present another severe limitation: the experiments must be performed in a time-averaged mode due to limited signal level. This is unfortunate, since one misses important material science processes, that occur on a time scale ranging from minutes to the reciprocal frequency of lattice vibrations. At present, synchrotron-light spectroscopy is blind to all but the slowest time evolution processes.

In principle, the natural limits in time resolution are determined by the particle detection technique, and they could be easily pushed to the nanosecond range or better. In practice, the real limit is given by the signal level, and therefore the brightness of the photon source.

As a consequence, time-resolved experiments have been extremely scarce in synchrotron-light spectroscopy. This is a field in which every increase in the signal level can be directly translated into an improvement of the time resolution. With the existing sources, the possibilities are very limited. With the third-generation sources that will be commissioned in the near future, time resolution can be achieved by limiting other performances such as energy, angular or lateral resolution.

With the SLS, such limits will partly be overcome. As an example, if a photoemission experiment is performed in a mode similar to those currently used (medium energy resolution, no lateral resolution etc.), one could take spectra in microseconds. In practical experiments, it will be necessary to find a compromise between time resolution and other performances — but with much more flexibility with the SLS than with any other synchrotron source.

III.1.3 Multiparticle Experiments

This is yet another branch of synchrotron-light spectroscopy that is underdeveloped in spite of its strong potential for applications. It is based on the fact that many spectroscopies exploit phenomena with correlated emission of several particles. As cases at point, consider the Knotek-Feibelman desorption mechanism with ejection of Auger electrons, photoelectron-photoion coincidence experiments and photo-fragmentation experiments.

The advantages offered by the SLS in this case are more subtle than in the previously discussed experiments, but quite important. The most

relevant is the flexible use of the source's time structure for time-of-flight analysis. In many cases, this will mean using the source in the single-bunch mode, and with ultrashort pulses: two requirements that usually conflict with the needs of other users. In the case of the SLS, the necessary flexibility for this as well as for other special modes of using the source should exist.

III.1.4 Special Polarizing Devices; Spin Polarization Experiments

Spin polarization experiments are a traditional area of excellence of Swiss research. In the case of synchrotron light, experiments of this kind could greatly profit from two factors. First, the increase in brightness that augments the signal level, a crucial advantage because of the low efficiency of the detection techniques. Second, the use of circularly polarized synchrotron light, another feature where SLS is expected to lead to major advances.

Circular polarization is naturally present in the out-of-plane emission of bending magnets, but with somewhat limited brightness. Special kinds of undulators or wiggler-undulators have been proposed as circularly polarized sources, e.g., elliptical or cross-field devices. However, the effects of such devices on a low-emittance storage ring of medium electron energy are still unclear; as a consequence, the programs in this area are very conservative even for the third-generation sources under construction.

One foresees, therefore, that the development of this area - as well as that of other techniques that depend on circular polarization, e.g., chiral spectroscopy of molecules - will be severely retarded or even impeded. The SLS will play a crucial role in making this development finally possible. There is such a strong interest and such an outstanding tradition in Switzerland for this kind of research, that it is fully justified to operate special high field insertion devices for a substantial portion of the total time.

III.1.5 Diffuse Scattering

Diffuse scattering of x-rays or neutrons from alloy single crystals reveals details of the microstructure, i.e. the occupation of lattice sites by a given atomic species and the local displacements from the ideal positions of the average lattice. In most cases where measurements of sufficient accuracy have been performed, alloys (and non stoichiometric compounds) show a tendency towards either local (short-range) or long-range order, or phase separation. The transformation is not always complete. Diffuse scattering is very sensitive to these effects, and can be used to study equilibrium properties as well as kinetic processes in non-equilibrium situations. The extraction of the relevant parameters requires extensive measurements of low scattering intensities between Bragg peaks within a given volume of reciprocal space. These (displacement and short-range order) parameters are of interest for the

basic understanding of alloys, phase diagrams and transformation kinetics, and for the interpretation and controlled modification of alloy properties, e.g. mechanical strength, transport and magnetic properties. For example, short-range order parameters can be used to calculate pair interaction potentials which subsequently serve to calculate phase diagrams. Information on clustering and lattice distortion is important for current attempts to better control such properties as high-temperature mechanical strength, magnetic hysteresis, and flux-pinning in type-II superconductors. Kinetic studies of systems starting from non-equilibrium situations are sensitive tests of currently evolving kinetic theories based on continuum models, statistical mechanics, and computer simulation.

Appropriate scattering instruments employing synchrotron radiation are advantageous for several reasons. The gain in intensity alone allows to study new systems with lower scattering contrast between their constituents while better resolution is obtained because of the inherent collimation of the incident beam. Kinetic experiments will be possible over a larger time-temperature range. If only one incident wavelength is available – as with laboratory x-ray sources – partial correlation functions can be obtained only for binary systems. Synchrotron radiation can be tuned to wavelengths in the vicinity of absorption edges, and the anomalous scattering contributions of individual components within the sample can then be evaluated separately.

The high brilliance and the tunability of energy for x-rays from a storage ring is particularly useful if one wants to know more about atomic displacements, as usually their scattering contribution is very small. It is hoped that a breakthrough in this field may be obtained by employing the recently introduced three-lambda method, where one enhances/suppresses certain scattering contributions by the choice of the x-ray wavelength/energy, and where inelastically scattered x-rays are separated experimentally (and not, as in the past, approximately subtracted based on calculations).

From experience with local and remote but more powerful facilities for neutron scattering, it may be anticipated that convenient access to a local storage ring will have a fruitful impact on research using x-ray scattering in general and help to select and better prepare those experiments that require the special features of a larger facility like the European Synchrotron Radiation Facility.

III.1.6 Cluster Spectroscopy

The Swiss research in this area is among the best in the world, notably at the ETHZ and at the EPFL. The worldwide impact of cluster spectroscopy is increasingly important on fundamental condensed-matter research – but also on applied industrial studies and on ecological problems related to atmospheric pollution. Yet, at present cluster spectroscopy is mostly confined to supported clusters, and therefore it is severely limited.

The beneficial impact of the unprecedented brightness of the SLS on cluster spectroscopy is evident and very important. The problems in working with unsupported clusters primarily arise from the signal level, and will be alleviated or removed by the increase in brightness.

The cluster spectroscopy applications of the SLS will be particularly important in the domain of ultrasmall clusters – believed to be extremely important but undetected in urban atmospheric pollution. These studies will be based, for example, on photoionisation experiments accompanied by simultaneous time-of-flight analysis to measure masses. Once again, multiparticle-coincidence techniques will play an important role.

At present, no approved research programs in these areas exist at the third-generation facilities, primarily because, even with the increase in brightness produced by these sources, the signal problems are still considerable. The SLS may become a world leader in this kind of research.

In particular, the study of post-combustion particles could play an important role in the optimization of the corresponding industrial processes (e.g., energy conversion in power plants), and at the same time in the control of pollution. The SLS will in fact keep Switzerland at the forefront in the research on air pollution.

III.1.7 Photochemistry

This is a largely unexplored area of potential industrial interest. Although a bit more speculative than the other components of the scientific case, its possible role may be extremely important and should be carefully considered.

In essence, very little is known on the chemical stimulation effects of extremely concentrated ultraviolet and x-ray beams. The little that is known is very encouraging from the point of view of industrial applications. For example, it has been found that synchrotron light stimulates the "cold" passivation of semiconductors by nitridization; very interesting results have been obtained with photon-stimulated metallization processes starting from metallo-organic overlayers. Several programs are planned in this area for ELETTRA and the ALS, with a potential for explosive growth of the entire field of x-ray photochemistry.

The photochemical use of the SLS is likely to transform it into a crucial resource for the Swiss industry, under either one of two possible scenarios. First, one of maximum expansion, in which the discoveries produced by sources like ELETTRA and the ALS are rapidly transferred to industry: this would create, for the Swiss chemical industry, an immediate need for a high brightness source suitable for x-ray photochemical applications. But even under a scenario of slower expansion, there is likely to be an urgent need for the Swiss industry to have access to an advanced photon source like the SLS for R&D photochemical applications.

III.2 Synchrotron Light in Biomedical Research

Various types of radiation in the form of photons in the infrared, visible, ultraviolet and x-ray parts of the electromagnetic radiation spectrum are classical tools in the macro- and microscopic study of biological structure and function by *radiography*, by *absorption*, *emission or fluorescence spectroscopy*, or by *diffraction techniques*. Such methods are used with a high degree of sophistication, with or without contrast-enhancing and staining procedures. Observations are made *in vivo* as well as *in vitro*, and biological structures can conveniently be studied at the *organ*, *cell*, *organelle* and *biomolecular levels*. With modern computer technology, the collected data can be rapidly stored and treated, allowing reconstructions that often permit functional interpretations as well.

Not surprisingly, therefore, the introduction of synchrotron radiation has attracted profound interest in the life sciences: beam lines tailored to the various needs of biochemistry, cell biology or biomedical radiology already offer excellent conditions at several synchrotron light sources. The "first generation" experiments were explorative and conducted with the aim of understanding the potential capabilities of the new radiation tools. The "second generation" experimental (and also preclinical) studies are now being performed with established technology in biomedical beam-lines, using white or monochromatic beams in the spectral range from infrared to hard x-rays.

In *molecular and cellular biology* applications range from the atomic mapping of biomolecules (for the study of problems such as enzymic reactions, molecular recognition and drug targeting) to reconstruction of supramolecular aggregates (like HIV and influenza viruses) and to direct observations of assembling and disassembling of cell organelles, fibre systems or membranes in living cells. A safe forecast would be that the advanced new synchrotron light sources, in combination with ever-more efficient computer technology, will represent an indispensable resource in the biomolecular and pharmacological research of the next decade. The type of studies just referred to will be of general and decisive importance in biochemistry, molecular and cellular biology, toxicology and pharmacology *etc.*, where improved understanding of mechanisms of molecular transformation, recognition and transport is a fundamental prerequisite for knowledge based on "first principles".

There is also a considerable need for observations of structures and phenomena in fixed or living cells as they occur *in situ*, in embryos, or healthy or malignant tissues. This field of study is here referred to as *cellular biology*. High-resolution 3-D analysis of cellular structure and function, including topographic chemical mapping and analysis of fluorescent markers, will be a very important field of application in the decades to come.

A similar situation prevails in the fields of *diagnostic radiology*, *radiobiology* and *radiotherapy*, where several promising, possibly large-

scale clinical applications have been conceived: digital subtraction coronary angiography, precision CT-tomography for tumour diagnosis or treatment planning, and high-precision radiosurgery/radio-therapy. The various technologies seem very promising and highly relevant from the point of view of large scale human health care (the vascular and malignant diseases considered are the main killers in our society). Evaluation in terms of cost/benefit cannot yet be made, however. In a few years time the various new technologies will have been further improved and tested, and it is likely that SLS will have its most important role, in a clinical context, as a scientific and technical partner to facilitate the transfer of tested and approved technology into the hospital environment.

In summary, traditional photon sources, including lasers and powerful x-ray devices, represent an indispensable set of tools in biological research. There are several limitations inherent in the current technology, however, especially in experiments that require high spatial or temporal resolution or increase of contrast through stains or other agents that cause disturbances or artifacts in the object under study. In such cases, synchrotron light offers new and unique measuring conditions, thanks to its unmatched flux, brilliance and tunability in the far UV and x-ray range. Very important, more often than not, is also the unlimited possibilities for rapid pulsing (even in the nanosecond range) and intensity modulation.

In the following six subsections, the most important fields of investigation are referred to, with special emphasis on the research potential that would be available to life scientists advanced sources, as the proposed SLS.

III.2.1 Diffraction Methods

Many powerful methods exist to analyse the nature, and the linear sequence, of the building blocks of biological macromolecules (amino acid sequence of proteins). Predicting the precise spatial arrangement, however, still defies the most modern modelling efforts. Three dimensional structures still have to be determined experimentally. For smaller molecules (up to 20 kD) alternative methods exist (*e.g.* nuclear magnetic resonance); for larger structures only x-ray diffraction techniques can be used.

The diffraction methods used for biological materials are based on the elastic scattering of photons with electrons in the sample. Due to the high brilliance and tunability of synchrotron light, diffraction spectra of unmatched quality can be recorded in experiments of short duration. The main advantage, however, is that only extremely small crystals are needed. Two major difficulties will therefore be less restrictive: (i) only small amounts of biological materials are available for analysis in most cases; (ii) large single crystals of biological materials are notoriously hard to grow, occasionally even necessitating zero-gravity conditions. The very small crystals required for x-ray diffraction studies (typically of

the order of 50 - 500 μm , in special cases in the submicrometer range) can be grown in most cases.

Solving the structure of a crystal requires information on both the amplitude and the phase of the diffracted wave. If only the intensities of diffracted waves are measured, the phase information is not directly recovered. One way to circumvent this problem is to obtain the diffraction pattern of the investigated crystal and compare it with that of an isomorphically derived crystal. In practice this means growing a second crystal from a chemically modified protein containing – preferably – an additional heavy element. This protein modification must not, however, alter the crystal structure, lest it invalidates the determination of the phase. Again the possibility to use small crystals in synchrotron light-crystallography facilitates the preparation of suitable isomorphous crystals.

An alternative method for the determination of phase is the use of multiple wavelength dispersive methods. This technique, based on the availability of a white x-ray spectrum, is particularly suited for synchrotron light.

Structural density fluctuations in non-crystalline samples can be analysed by using modifications of the traditional x-ray scattering techniques. Small angle scattering for instance may give information about long range structural parameters in biopolymers (e.g. collagen).

In summary, protein crystallography will be a main application of synchrotron light for both fundamental and applied biological research. Based on structural data of *enzymes, receptors, antibodies etc.*, computer aided molecular design (CAMD) may be used to greatly reduce the experimental efforts needed for the development of new molecules in medicine, pharmacy and biotechnology. On the other hand, CAMD optimized macromolecules will have to be synthesized and their structure be confirmed by crystallographic studies. Therefore, synchrotron light and CAMD are two complementary and indispensable tools of modern macromolecular design. The SLS, as a very advanced light source, will be capable of addressing different areas of protein crystallography with high efficiency. From the superconducting bends, high photon fluxes and brilliance at the necessary energies will yield a resolution of $\geq 0.5 \text{ \AA}$. Direct and continuous access to radiation of this quality will contribute to rapid progress in fundamental structural biochemistry, and will be indispensable for the rational design of industrial products in pharmacology and biotechnology.

III.2.2 Inelastic Scattering

In these techniques, energy is transferred from the photons to the sample. Information can be gathered from the absorption process itself (e.g. radiography, dichromography) or from the subsequent events (e.g. x-ray fluorescence, photoelectrons). For biological research, these methods have the great advantage that native – even live – specimens

can be investigated, if necessary under ambient conditions. No staining is required as the x-rays interact directly with electrons of selected atoms in the sample.

The absorption coefficient for x-rays drops with the third power of the energy of the incident photons. However, when the photon energy reaches the binding energy of the innermost electrons, characteristic for each atomic species, the absorption coefficient increases rapidly, then falls. For biological research, this "K-edge" is particularly interesting. By taking a picture on both sides of the K-edge and digitally subtracting them (dichromography), the spatial distribution of a single species of atoms can be recorded.

Upon closer examination the K-edge turns out to contain some fine structure. Analysis of this structure (Extended X-ray Absorption Fine Structure, EXAFS) yields information on the spatial electron distribution near the investigated atom, resulting in a description of its relation to neighbouring atoms. Many modifications of this basic technique exist.

The absorption of a photon results in the ejection of a photoelectron. This leaves a vacancy in the electron shells of an atom. The filling of this vacancy results in secondary photons (x-ray fluorescence) or secondary electrons (Auger and Coster-Kronig electrons). These secondary radiations carry information on their former electronic environment, such as the binding energy of chemical bonds, *etc.* Again the chemical environment of a selected atomic species can be studied without major processing of the sample. Using electron optics, the spatial distribution of photoelectrons or secondary electrons may be identified, opening up the possibility of chemically selective microscopy. In biological samples, the spatial distribution of trace elements (*e.g.* enzyme cofactors, pollutants *etc.*) may be identified without staining processes.

Non-destructive multi-element analysis is possible by using x-ray fluorescence. Because of the greater penetration power of the x-rays, information on a thicker surface layer can be gained. Due to the limited possibilities of x-ray optics, spatial resolution is best achieved in a scanning mode (see the subsection on "Focussed X-ray Beams"). Tunability and high flux are prerequisites for this type of studies. Synchrotron light matches these requirements very precisely.

III.2.3 Time Resolved Structural Studies

Synchrotron light is, by virtue of its origin, a pulsed light source. Coupled with the high brilliance, flux and high repetition rate, experiments are possible with hitherto unmatched temporal resolution. Stopped-flow and stroboscopic investigations will yield new insights in macroscopic (*e.g.* muscle contraction) and molecular processes (*e.g.* enzyme reaction mechanisms).

A potentially very attractive new method may be the use of time-resolved protein crystallography. As mentioned above, only very small

crystals are needed when using synchrotron light. In these microscopic samples, diffusion of small molecules into the crystal, always consisting of 30 - 80% of solvent, is very fast and may, therefore, not be the time-limiting step in, for instance, an enzymatic reaction. The study of intermediate reaction products by "flash" Laue-crystallography may be possible.

SLS, by virtue of high flux and brilliance, and its versatility in its mode of operation, would provide good conditions for these experiments. Nevertheless, the best conditions for these measurements exist at the undulator lines at the ESRF.

III.2.4 Focussed X-ray Beams

The high brilliance of synchrotron light opens the possibility of focussing (not collimating) x-ray beams. With current techniques a spot size of about 50 nm is possible. The lateral resolution with focussed x-ray beams, therefore, exceeds that of light microscopy by a factor of > 5 . Many of the techniques described above can be applied in a scanning mode, adding spatial resolution to chemico-physical results. By applying x-ray fluorescence or x-ray secondary electron analysis in a scanning mode, multielemental analysis is possible at subcellular level. The localization, without prior staining procedures, of natural, pharmaceutical or toxic substances is possible. Thus, uptake, transport or storage of many elements can be studied at a resolution expected to exceed that of light microscopy without prior staining procedures.

III.2.5 Diagnostic Radiology

Until recently, clinical research with synchrotron light has been synonymous with the effort to introduce intravenous injection of iodine-containing contrast agents and digital subtraction techniques ("above and below the K-edge of iodine") for coronary angiography. Such a method would have distinct advantages for general screening purposes and for cardiological research because of the reduced risk for the patient, as compared with current routines that require injection of the contrast agent directly into the coronary arteries. A necessary prerequisite, however, is the intense monochromatic x-ray beams available at some synchrotron light-facilities, such as the proposed SLS.

The use of a suitable contrast agent and imaging with tuned x-ray beams can also give high contrast images of the vasculature in the brain or in tumours for screening or mapping purposes. Such techniques will probably become important in the context of advanced treatment planning, for surgery and for stereotactic radiotherapy or radiosurgery (*vide infra*). They will permit unsurpassed resolution (better than 0.5 mm) and mapping of low-Z and intermediary-Z elements, as indicated by the results of preliminary experiments at the Brookhaven light source.

III.2.6 Radiobiology and Radiotherapy

Synchrotron light in the form of intense, monochromatic, tuneable and collimated beams is also useful for interventional purposes, in radiosurgery or radiotherapy, and in so-called photon activation therapy (PAT). The latter is based on selective K-edge excitation, whereby the produced Auger or Coster-Kronig electrons should preferably affect only the selected target cell population. The great clinical potentialities of such techniques have stimulated the development of iodine containing, DNA-affinitive drugs useful for the selective increase of radiosensitivity in the case of monochromatic x-rays. In the present phase of research interest is focussed on principles for the selective targeting of iodinated DNA-seeking drugs to tumour cells and pathological endothelium. At the same time, methods are being developed for precise irradiation of target structures in the brain: (i) small "position-malign" tumours and vascular malformations, (ii) larger malignant tumours, such as meningiomas or neuroblastomas, and (iii) targets for functional radiosurgery in brain disorders such as epilepsy, Parkinson's disease or intractable pain.

The strategies are based on the idea that synchrotron light could be used both for the mapping of the target area and for the final intervention. Imaging, by dual or multiple energy CT, would be used for the mapping of the target, and for treatment planning. Then, while the patient remains in position, the "operation" will be performed at high dose-rate. The positioning accuracy would be better than 1 mm and the size and shape of the radiolesions could be easily adjusted to fit any anatomical conditions.

For functional radiosurgery and other indications for small target eradication, stereotactic cross-firing with mm-sized beams would be the method of choice. For larger targets, especially malignant tumours in children, a new concept under study at Brookhaven seems promising. The idea is to use an array of thin beams that allows uniform irradiation of the target volume but leaves a pattern of intact unirradiated cell populations in the intervening tissues. Theory and explorative experiments show that it would be possible, in this way, to prevent untoward tissue damage, even in young developing brains. This is due to the fact that the radiosensitive, critical cell populations – endothelial cells and oligodendroglia – could recover, thanks to the spared, unirradiated cells in intervening tissues.

III.2.7 Concluding remarks on Biomedical Research with Synchrotron Light

The implementation at the SLS of the techniques described above and the corresponding suitable beam-lines for work with XUV and up to ca. 50 keV x-rays, would serve a wide sector of basic biomedical and clinical sciences. In a few years, several of the methods mentioned will be ripe for utilization in a "work-horse" manner. Other techniques – especially those applicable to cell biology and clinical radiology – are still in their infancy, but show a great potential for the decades to come. In biological

and medical research – especially in experiments with living materials, and when patients or specimens from patients are involved – the existence of a national synchrotron light facility would offer obvious advantages. The potential users are many, but few of them could take the responsibility for a dedicated beam-line or instrumental set-up. Such initiatives must be supported by a wider community of users. The ideal situation with well-coordinated, short-term and long-term plans, would allow many users to use first-class experimental facilities for experiments and clinical applications that do not fit into the planning of research at international synchrotron light-facilities.

III.3 Synchrotron Light in Micro- and Nanotechnology

Microtechnology is a discipline currently being introduced in a number of industries. Still a lot of R&D work remains to be done. It is particularly suited for Swiss industry, for this reason the topic has been declared as priority research area at the EPFL and also at the University of Neuchâtel. Nanotechnology on the other hand is a very new field with rather longterm perspectives. Many scientists believe that nanotechnology will have a tremendous impact on industry and society in the next century. In both, micro- and nanotechnology, lithography using synchrotron light is one of the key technologies for the realization of small structures. Therefore, the following two sections will concentrate on the synchrotron light-lithography aspects.

III.3.1 Three-Dimensional Microfabrication with the SLS

The impact of product-miniaturisation on many industries has been dramatically demonstrated over the past 50 year by semiconductor microelectronics. The number of functions per unit chip area has been doubled every 2 to 3 years over this time period. A similar development is currently under way concerning other areas than electronics, such as mechanics, fluidics, optics, etc. It is the goal of Micro Systems Technology (MST) to build small systems with functions similar to larger conventional ones by combining electrical, mechanical, optical and other elements. As in microelectronics, the success of such an approach depends on the ability of producing such micro systems in large quantities and at reasonably low costs.

Synchrotron light offers one effective way to achieve this goal. In particular, a technique called LIGA (abbreviation for the German words "Lithographie", "Galvanoformung and Abformung"), has been developed which uses synchrotron light to define very deep (up to 100-

200 μm) structures with high resolution (below 1 μm) in the lateral dimensions using special deep-etch lithography and photoresist. Mass production is achieved by subsequent electroforming and moulding processes. Originally developed by Prof. Ehrfeld at the Karlsruhe Nuclear Research Centre, the LIGA technique has very quickly gained international recognition for its potential impact on MST and is currently heavily supported by several national programs in the USA, Japan and Europe. Moreover since a few years an industrial company (MicroParts, Dortmund and Karlsruhe) exploits the LIGA process commercially.

Basic principles of using synchrotron light for three-dimensional (3D) microfabrication

The fabrication of microstructures, which are truly 3D using traditional methods like mechanical machining is limited to minimal feature sizes of a fraction of a millimetre. The classical mechanical watch industry has pioneered this field. For smaller structures new methods for fabrication have to be found.

One well established method, limited to a certain class of three-dimensional (3D) structures, is based on preferential etching in silicon. On a crystallographically oriented single crystal silicon wafer a two dimensional etch mask is defined by ordinary quasi-two-dimensional (2D) optical lithography. Then a special liquid chemical etch is used to remove the material below the opening of the etch mask. Since the etch rate in single crystal silicon depends heavily on the crystallographic direction, very deep holes and grooves without affecting the lateral environment may be produced this way. The anisotropy of the etch process dictates the final shape of the 3D-structure. Only a limited range of such structures as they may be defined by the crystallographic planes can be accessed by this method.

An alternative method with much more flexibility is offered by synchrotron light which may be used to define 3D-structures in polymer materials. Afterwards, the original master is replicated by electroforming and moulding techniques. The whole process is known as LIGA. The major steps involved in this process are shown in **Figure 7** and are outlined below.

Synchrotron light is used to expose thick layers of photoresist in a shadow casting mode. The short wavelength minimises diffraction effects. To produce a 3D structure of depth and width d and features size f with a 1% accuracy, a maximal wavelength λ

$$\lambda = d^2/100f$$

may be used to minimise diffraction effects. According to this simple estimate, for a typical micro structure with $d=100\ \mu\text{m}$ and $f=1\ \mu\text{m}$ a wavelength of 0.1nm (corresponding to a photon energy of 12.4 keV) would be required.

Other considerations, like the generation of photoelectrons in the photoresist at shorter wavelengths and availability of suitable mask materials with a high absorption constant move the optimum wavelength for the exposure in the range of 0.2 to 0.3nm (4 to 6keV). This range is well covered by the proposed synchrotron light-source SLS.

The exposed photoresist is developed whereby the exposed material is dissolved and the desired 3D structure appears. Special polymer materials developers are required which guarantee geometrical stability during and after development. Good results have been obtained with a crossed linked type of poly(methylmethacrylate) PMMA and a 2-(2-butoxy-ethoxy)ethanol based developer. Advanced resist-developers are currently under development by the chemical industry. A typical exposure required is in the order a few kJ/cm².

In the next step, metal is deposited from an electrolyte and a metallic structure is built up which is an exact and hard replica of the original structure in the resist material. This replica then serves as the mould of the subsequent micromolding process.

The micromolding process can be carried out in various ways. If large quantities of replicas are required, it is advisable to use the mould as a master to produce further templates which then serve to fabricate the production moulds by electroforming. Depending on the application, the electroformed mould may be the final product. Generally, however, the production moulds will then be used in an injection moulding machine to generate large quantities of the original structure defined in the photoresist in a suitable resin. This whole fabrication scheme obviously allows for many variations.

The basic LIGA process yields structures with vertical walls. This limitation can be overcome by various technical means. For instance, during the exposure process the direction of the incident beam may be continuously tilted resulting in conical structures. Another way to realise lateral variation is available during electroforming. After filling the holes and groves of the original plastic template the electroforming process may be continued resulting in an overgrowth structure which is truly 3D. Yet another approach, probably the most universal one, is offered by subdividing a particular given 3D structure in layers which may be approximated by purely conical structures, producing these sublayers separately and assembling the whole structure at the end. This last approach resembles the production of multilayer circuit boards.

Applications of 3D microstructures produced by LIGA

The LIGA process offers a basic tool for the fabrication of mechanical, electromechanical and optical devices in the micrometer range. As this technique is further developed, the range of materials which can be used for the final product seems unlimited, covering all major classes such as plastics, metals and ceramics. This development is still at its beginning, but world-wide efforts will guarantee its progress. For the

Swiss micro tool and machine industry, LIGA could offer new challenges and opportunities.

Below, an incomplete list of application examples is given. It only represents a glance of the possibilities which may be available in the future.

Sensors

The development of sensors is naturally oriented towards smaller dimensions, since this represents the path toward integration with miniaturised electrical components for signal processing and/or the construction of arrays of sensors with multiple functions. Typical examples are pressure and vibration sensors for mechanical measurements, or magnetic sensors based on LIGA produced micro-coil structures for inductive field measurement. Other examples cover fluid devices, electrochemical analysis, aerosol measurement, radiation measurement etc.

Electrical and optical micro connector

Packaging of microelectronics and micro optical components represents a major technological problem at the interface to the macroscopic world, as the dimensions of these devices have shrunk over the past decades. For instance, when connecting an optical fibre to a optoelectronic device, such as a laser or an integrated circuit, mounting tolerances in the sub micron range are typically required. The LIGA technique offers a multitude of novel structures to solve these mounting problems cost effectively.

For microelectronics circuits multi-pin plugs have been demonstrated with integrated guide pins to facilitate the coarse alignment. A centre-to-centre spacing for the individual pins of less than 80 μm , which is more than an order of magnitude smaller than the conventional pins, is possible (**Figure 8**).

Micro mechanical components

Micro mechanical gearwheels, slide bearings, spring couplings, electromechanical switches etc. belong to the visually most impressive structures which so far have been demonstrated by LIGA (**Figure 9**). In contrast to similar devices produced by the anisotropic etch technique in silicon, the LIGA produced micro-mechanical components offer working lifetimes which are of practical value. Micromotors have been built and kept running for several days.

Since friction and wear are a central problem in moving micro mechanical components, whenever possible alternative schemes based on elastic deformation only are preferred. This can be applied particularly to actuators and micro positioning systems, such as they are for instance required in scanning tunneling microscopy.

Fluid technology

Good examples for this class of applications are nozzle arrays for ink jet systems, spinneret plates for synthetic fibre production, novel columns for chromatography, or more complex systems, such as micro pumps and micro cooling systems based on the Joule-Thomson effect. The wide range of materials available for such devices when using the LIGA technique represents a particular advantage in these applications.

Micro optical components

Micro optics, especially diffractive optics usually may be satisfied by quasi 2D surface relief structures. Techniques to produce them by hot embossing or casting have been developed in the past. However, as such elements like Fresnel phase plates and holographic optical elements need to be mounted to form larger systems, there is a demand to combine them with other functional elements. LIGA offers not only to provide these elements which are truly 3D, but also exhibits sufficient surface quality for optical applications, requiring roughness values which easily must be below 10 nm.

Concluding Remarks on LIGA-related Techniques

Deep-etch x-ray lithography using the SLS in combination with electroforming and moulding processes, known as the LIGA process, represents a very promising tool for the fabrication of a large variety of microstructure components and new products. The increasing trend toward miniaturisation will certainly continue and effect many industries besides the microelectronics industry. LIGA offers one answer to this challenge, offering a cost-effective process for true 3D micro structuring.

In addition to this industrial and commercial aspects of LIGA, the availability of 3D micro structuring will also stimulate applications for pure scientific use. This may particularly be the case for Nanoscience. Manipulation of small objects at the atomic scale may require intermediate structures at the micrometer and sub-micrometer range as an interface to the real world.

Finally, 3D micro structuring using synchrotron light is still at its beginning. It is expected that problems which represent high scientific-technical challenges must be solved. This is a good ground for applied research in a field which is of high socioeconomic value.

III.3.2 Quasi 2D Microlithography

Digital integrated circuits are the key components for data processing systems and consequently the cornerstone for the forthcoming information age. Since „information“ as such is something immaterial, there is no direct coupling between the amount of information processed or

stored and the quantity of material involved in this process. The market demands systems with as little hardware involved as possible (e.g. notebook PCs) having highest processing speed. Both aspects have driven microelectronic technology towards smaller and smaller dimensions over the last 40 years with the limits by far not reached yet. The density of storage cells in dynamic memory chips for example is doubling every 1.5 years. One of the key processes for continuing this trend is the improvement of lithography, i.e. transferring the CAD-generated layout-patterns into the surface material of the chip. Although the individual structures on the chips surface are of course three-dimensional, their height is very small compared to the chip area. Therefore this lithography generally is referred to as "quasi 2D". This chapter will review the lithography methods, their limitations and their future potential with particular emphasis on synchrotron light-x-ray lithography.

Although microelectronics is not the only application for submicron lithography, it is clearly the technology driver in this field because of its gigantic market volume. Additional "niche" applications include microoptics, certain sensors or special biomedical components. On the other hand, nanotechnology, now starting to be worked on in many places worldwide and also at PSI, could open completely new application areas for submicron-lithography.

State of the art optical lithography

In the past and today optical lithography using visible or near UV light is by far the dominating technology. For details on optical lithography the reader is referred to the vast amount of literature on semiconductor processing. Today, projection alignment using wafer steppers is the most common lithography method. Light usually from a mercury lamp is collimated, sent through a mask ("reticle", normally a chromium pattern on a quartz plate) and the image of the mask is projected on the chip surface, exposing the photoresist.

Until ~1990 the limitations concerning feature size in IC manufacturing were yield issues, e.g. process latitude and defect control – not optics. This, however, is rapidly changing with shrinking dimensions. The theoretical resolution w (i.e. the size of the smallest printable object) of projection lithography is given by

$$w = 0.5 \lambda / NA$$

with λ being the wavelength used and NA the numerical aperture of the projecting lens system. Commonly 365 nm light ("i-line") or in the near future 248 nm ("deep UV") is applied. Since modern steppers achieve a NA of about 0.5, the resolution limit is in the order of the given wavelength. Contrast is limited by diffraction phenomena and thus weak when operating at maximum resolution. Therefore, in practical applications the design rules (width of smallest features) are kept a factor of two above the resolution limit. This restricts UV lithography to structures $>0.5 \mu\text{m}$.

Masks for the submicron range, consisting of chromium layers on polished quartz plates, are generally written by electron beam lithography (see below) with a resolution $< 0.1 \mu\text{m}$. Resists mostly used in optical and UV lithography are positively working novolak based polymers. The diffraction caused limitation of $\sim 0.5 \mu\text{m}$ can in principle be pushed towards smaller dimensions by the introduction of so called "phase shift masks" (PSM). Explained in a simplified way, their principle bases on the introduction of additional openings in the chromium layer near the edges of the Cr structures and the addition of an optical $\lambda/2$ layer over these openings. Light passing through these extra openings is phase shifted and cancels out the unwanted diffraction maxima in the shadow-areas on the chip. This leads to a higher contrast in the resist, allowing smaller structures to be exposed. PSM technology is currently introduced in some large scale IC fabs and it is estimated that most of the future 64 MbDRAM production will use PSMs. Though not proven in production yet, UV-PSM lithography could give acceptable yield at design rules around $0.4 \mu\text{m}$.

It is generally assumed that today's concepts for chip design and device structures can be linearly extrapolated down to $0.1 \mu\text{m}$ feature size. Below this, physical limitations and quantum effects demand new approaches for design concepts and device structures.

In the following sections the possibilities for lithography $< 0.5 \mu\text{m}$, the practical limitation of optical lithography, will be discussed. The example will be usually microelectronics, but the arguments are of general nature and apply to the other application areas of quasi 2D lithography as well.

Lithography for $< 0.5 \mu\text{m}$ structures

Basically two possibilities exist for exposing structures $< 0.5 \mu\text{m}$ in photoresist:

- electron (ion) beam lithography
- x-ray lithography

Exotic techniques like mechanically scratching with an AFM or optical near field methods (SNOM) for nanostructuring have an uncertain potential and are not reviewed here.

Electron beam lithography

Electron beam lithography is state of the art for large scale IC mask making. Exposure is achieved by scanning the resist layer with a focussed electron beam in an electron-microscope-like setup. Its inherent disadvantage is its limited speed because of the sequential scanning of the layer to be exposed. For this reason, e-beam lithography is seldomly used for direct writing on the chip although this process offers perfect precision and flexibility since no masks are necessary. The beam can be focussed down to $< 10 \text{ nm}$ and the system accuracy is limited by the reproducibility of the electromagnetic deflection of the

beam in the usual case that several lithographic layers form the device. 50 nm are achieved in commercial state of the art systems. Apart from speed, other problems of e-beam lithography are backscattered electrons leading to resist exposure in dark areas and proximity effects when the beam hits the surface at an angle due to its deflection. Writing speed has been improved by "beam shaping" i.e. forming the cross section of the e-beam by diaphragms into basic elements of the structure, but for mass production of chips it is still considered uneconomical by most manufacturers. On the other hand, e-beam lithography is a perfect tool and thus widely used for prototyping, multiproject wafers etc. and of course in research. Efforts are going on to further increase the throughput of e-beam machines. One interesting idea is to assemble an array of miniaturized e-beam columns in parallel, thus writing all chips on the wafer at the same time.

X-ray lithography

The only alternative today for high throughput lithography in the ~100 nm range is x-ray lithography. Apart from the higher resolution because of the much shorter wavelength used, there are a number of considerable additional advantages:

For x-rays the refractive index is close to unity for essentially all materials involved. Consequently, standing waves and scattering at surfaces with topography pose no problem in x-ray lithography. Also the resist thickness and exposure control are uncritical. This offers a much wider process latitude and consequently higher yield. Furthermore, x-ray lithography is much less sensitive to dust particles on the mask or on the wafer since most dust particles are essentially transparent to the x-rays. Charged particles, a problem in e-beam lithography, are uncritical as well.

General limitations of x-ray lithography are emission of photo- and Auger electrons from the surfaces hit by the x-rays and, of course diffraction. Photoelectrons created are exposing the resist in unwanted areas, leading to limitations in resolution. Electron emission can be minimized by selecting the proper wavelength (i.e. 0.8 - 1.3 nm) leading to a resolution limit <30 nm. Diffraction causes no major problem as long as the gap between mask and substrate is kept small (i.e. a few microns). If for some reason, e.g. high surface topography, the gap has to be kept large, diffraction indeed is the limiting factor for resolution in x-ray lithography.

X-ray masks

As x-rays are hardly reflected at normal incidence, contrast on the surface to be exposed is created by absorption resp. transmission in the mask. This causes the problem of a temperature rise in the mask leading to a change in dimensions by thermal expansion. Special means of cooling e.g. by helium gas have to be provided. Stresses in the different layers building the mask originating from preparation also can lead to warping or other deformations. This requires great care in mask

making. Today, x-ray masks usually consist of a 1 - 3 μm membrane of CVD deposited Si, Si_3N_4 or SiC with the absorbing structures being 0.2 - 0.6 μm Au or W. This results in a 10 dB attenuation in the "shadow" areas. The metal is structured by e-beam lithography and anisotropical plasma etching. Since x-ray masks are expensive (~15k\$/level), it is usually attempted to repair them with focussed ion beam technology (FIB) if defects occur i.e. metal spots in the transparent region or holes in the metal film.

Generally it can be stated that manufacturing of proper, distortion free x-ray masks and the ability to align them reproducibly against the substrate still pose the most challenging problems in x-ray lithography.

Resists

Normal UV novolak resists have poor x-ray sensitivity. In the past therefore poly-methyl-methacrylate (PMMA) has frequently been used. Recently also chemically amplified novolak based resists became commercially available where the product can be chosen for either high sensitivity or high resolution.

X-ray sources

A number of ways exist for supplying the desired x-rays:

- the classical x-ray tube
- laser plasma sources
- electron storage rings

Although the x-ray tube was used to demonstrate x-ray lithography first, it is not of practical use for any production since its intensity is far too low – even with the strongest, water cooled rotating anodes. Most of the energy of the impinging electrons is converted into heat and only a small fraction into x-rays.

Laser plasma sources origin from laser fusion research. A small metal sample (200 μm dia.) is excited by powerful lasers leading to x-ray emission. The intensity is lower (5-20 times compared to a synchrotron source) and the beam is divergent since coming from a point source. For exposure the beam has to be collimated by a multilayer paraboloid or other means of x-ray optics. This demands a tight control of mask-wafer distance for acceptable overlay accuracy. On the other hand, this technology requires much less capital investment and clean-room floor space and is thus more compatible with today's UV stepper technology – compared to synchrotron light x-rays rather an evolution than the revolution in microelectronic processing. Laser plasma x-ray sources are commercially available today as lithography tools.

Synchrotron x-ray lithography

From a purely technical viewpoint synchrotrons provide the ideal source for x-ray lithography. The intensity of x-rays from a synchrotron storage

ring is about an order of magnitude higher than from laser plasma sources. Exposure times are correspondingly shorter, yielding a higher throughput. This is still multiplied by the fact that many beam lines can be attached to one storage ring. X-rays from a storage ring show a low divergence, resulting in large, distortion-free exposure fields and low proximity effects. This relaxes the requirement on the tolerances for the mask-substrate gap, making the exposure of large areas (chips) easier. Collimation of the x-rays may be done in the beam line using multilayer mirrors at low angles of incidence. Also the synchrotron sources easily allow the selection of the wavelength, so λ can be optimized for the best tradeoff of resist sensitivity vs. mask absorption/transmission. In the literature wavelengths between 0.8 and 1.6 nm are recommended for lithography.

X-ray steppers at storage rings work in a similar way like for UV-lithography with the main differences being higher precision and the mask/wafer being in vertical position since the x-rays come in horizontally. Special care has to be taken to avoid distortion induced by gravity due to the vertical position. State of the art x-ray steppers achieve tolerances for aligning (overlay accuracy) of 70 nm (3σ).

For submicron lithography in the semiconductor industry, dedicated "small" storage rings have been developed with superconducting magnets. At least ten such systems are in operation in Japan, two are installed at IBM (US).

A recent development is soft x-ray projection lithography (SXRPL), where a projection system is used similarly to a conventional wafer stepper. The main advantage obviously is that the features on the mask can be reduced e.g. 5-times by projection on the wafer surface, thus achieving either a simpler mask making or smaller geometries on the substrates. x-ray optics is achieved by spherical or parabolic mirror elements consisting of multilayer systems. These mirrors limit the usable wavelength to above 13 nm because of their reflection properties. A number of advantages of the direct lithography such as depth of focus have to be sacrificed, however.

Synchrotron light-lithography for PSI-Nanotechnology

Concerning future research at PSI a high synergy between the plans for nanotechnology research and the possible availability of synchrotron light x-ray lithography is given. The project „Nanostructured interfaces“ doubtlessly would profit from nearby synchrotron light-XRL. Presently, a focussed ion beam system is installed at PSI, which would allow simple and flexible generation of x-ray masks with simple test patterns. Moreover, ideas exist for developing improved x-ray mirrors based on nanostructured thin-film multilayer systems. If successful, these innovative elements for x-ray optics might allow building a x-ray microscope which would be an extremely valuable tool for analysis on the nanometer scale.

Summary

In summary, it has been shown that optical lithography has its practical limit around 0.5 μm . To go beyond, x-ray and e-beam lithography are available with the latter having low speed as one of the main disadvantages. We conclude that lithography with x-rays from an electron storage ring is the most suitable method for resolution in the sub-0.5 μm range. Limitation of structural size currently is determined by the ability to make and position an adequate mask. Further improvements may be expected here in conjunction with new projection methods.

III.4 Synchrotron Light in Environmental Research

For the understanding and the control of environmental processes, knowledge of structures and mechanisms on a molecular and atomic level is indispensable. Research in chemistry, material sciences, biology, etc. is most often carried out in homogenic systems. The environment of natural processes is distinguished by heterogeneity, that extends to the atomic scale. For research at that scale the SLS can fill an important gap.

It becomes increasingly evident that a considerable number of environmental processes take place at surfaces and interfaces, i. e. at or between solid/liquid, solid/gas, or gas/liquid. The SLS can provide better insight into adsorption/desorption and surface catalysed reactions. To understand the reaction kinetics, it is not only important to know if molecules are adsorbed but also in what spatial configuration with respect to the solid or liquid matrix and the reaction partners. The high time resolution can be used for the study of reaction mechanisms. Knowledge on the mechanisms of polymer adsorption are of interest not only to environmental scientists but also to material and medical scientists.

Many remedial processes are based on microbial activities. In recent years a number of new key reactions have been discovered. They are mostly catalyzed by metallo-enzymes not yet known so far. The possibility to analyze the reaction mechanisms and their transition states by synchrotron light is intriguing. The elucidation of metallo-enzyme structures with little and small protein crystals will certainly boost research in biocatalysis. Promising advances failed in the past because those metallo-enzymes could not be obtained as large crystals.

Most light induced reactions in the environment, in particular in the atmosphere, proceed via radicals, either in the gas and water phase or at surfaces and interfaces. Better insight into these reactions will help to develop chemicals with less or no negative impact into atmospheric processes and to reduce the antropogenic contribution to global change.

Radical reactions are also the key in production of drinking water and thus to human health.

As discussed in the subsection III, 1.6, the worldwide impact of cluster spectroscopy is increasingly important on ecological problems related to atmospheric pollution. In particular, the study of post-combustion particles could play an important role in the optimization of the corresponding industrial processes.

IV. Concluding Remarks

The scientific and technological case for the SLS demonstrates that the Swiss environment is ideal to translate the basic reasons that make synchrotron light so important into a program of world-level excellence. The key characteristics of the program are its broad scope and interdisciplinarity.

But the SLS is not only a facility for science: it is a guarantee that key elements of the Swiss industry will not find themselves at a disadvantage with respect to the foreign competition. They will be able, if necessary, to fully exploit the new technologies with a facility in the national territory, which will give them an advantage with respect to their competitors, guaranteeing unusual conditions of reliability and confidentiality.

There exists indeed the potential for an explosive growth of the industrial fabrication and analytical applications of synchrotron light.

Applications of Synchrotron Radiation and Associated Techniques

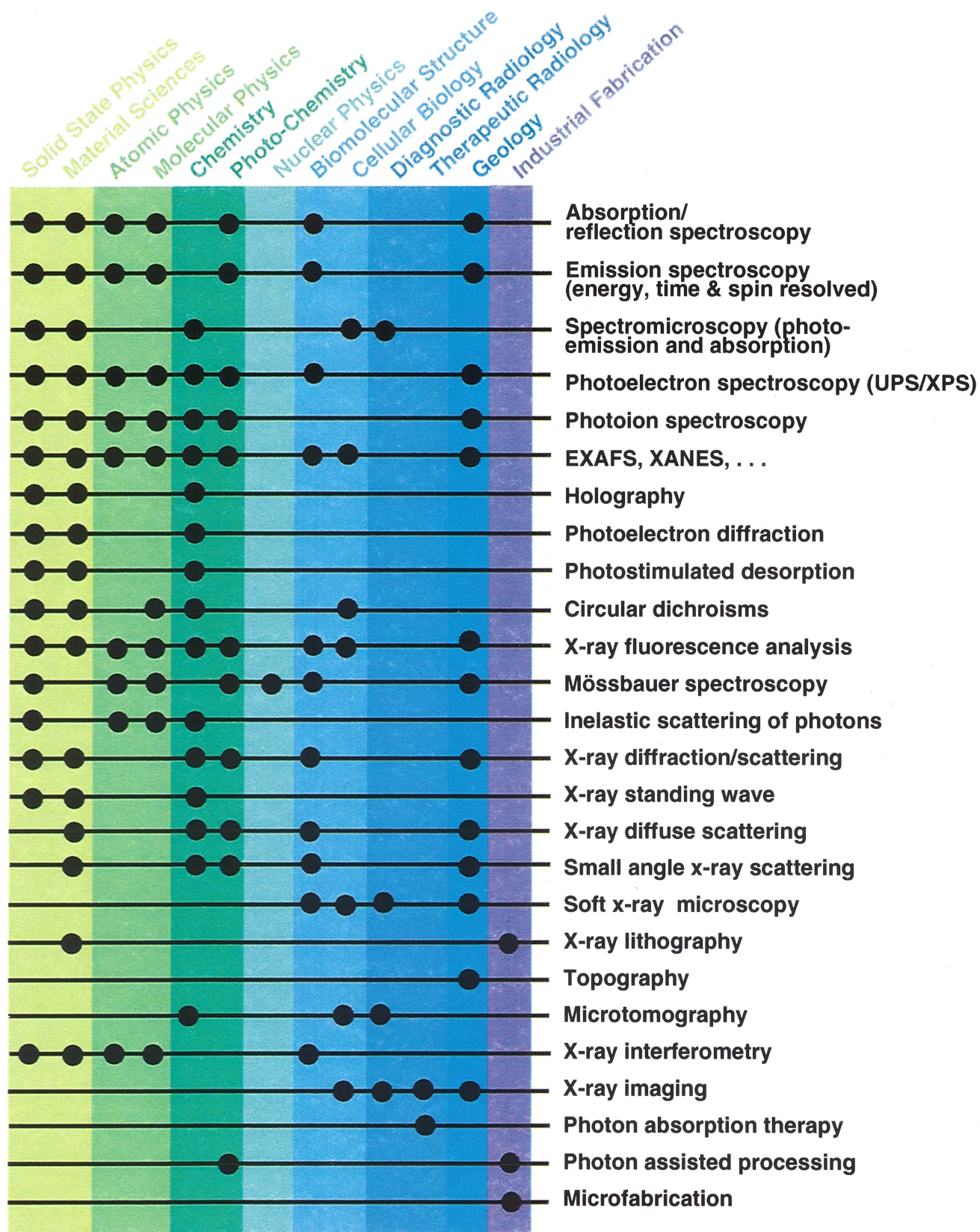


Figure 1

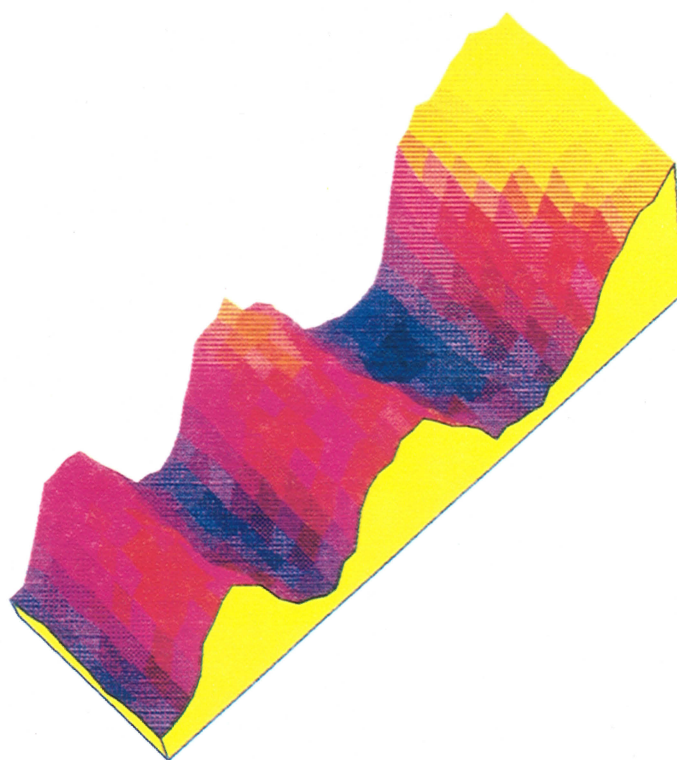
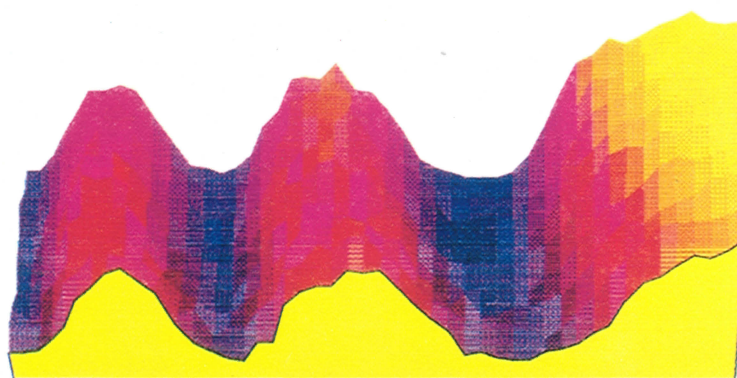
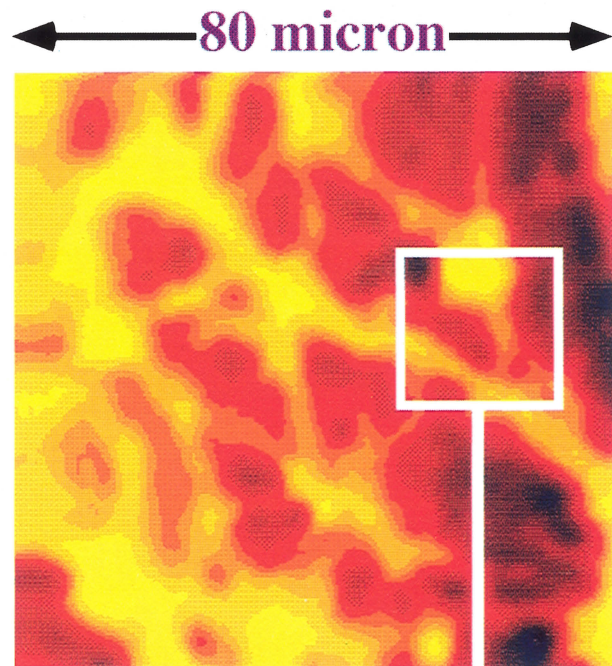
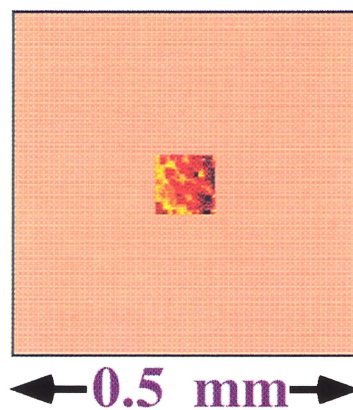


Figure 2: The new x-ray microscopies with synchrotron light: the 3-dimensional "geometry" really reflects the contrast between different chemical components (photoelectron micrographs of gold structures on a substrate).

**SYNCHROTRON-
RADIATION
PHOTOELECTRON
MICROSCOPY
IMAGE OF A
NEURON
NETWORK:**



**SEEN WITH THE
SPACE
RESOLUTION
OF ORDINARY
SPECTROSCOPY:**



**CURRENT SPACE
RESOLUTION OF
SYNCHROTRON-
RADIATION
PHOTOEMISSION
SPECTRO-
MICROSCOPY
(0.1 MICRON)**

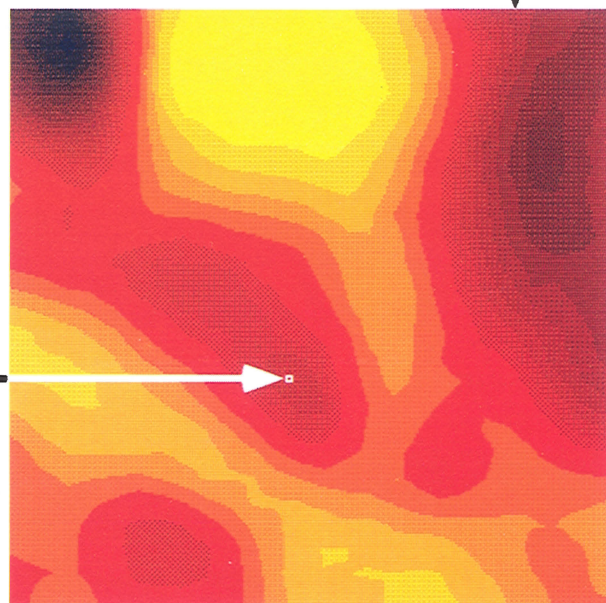


Figure 3

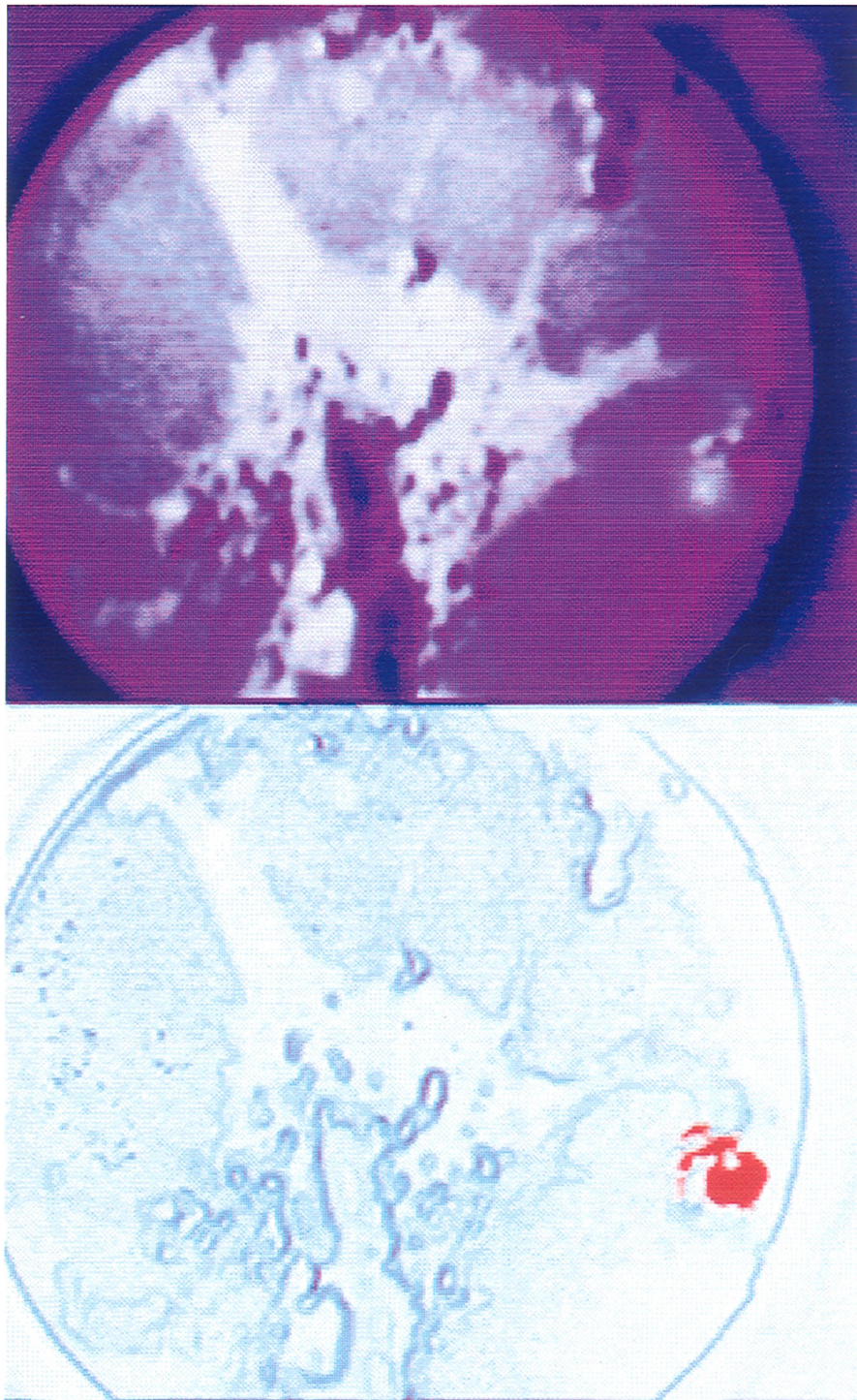


Figure 4: Distribution of aluminium (red) in a neuron network, revealed by photoemission spectromicroscopy with synchrotron light.

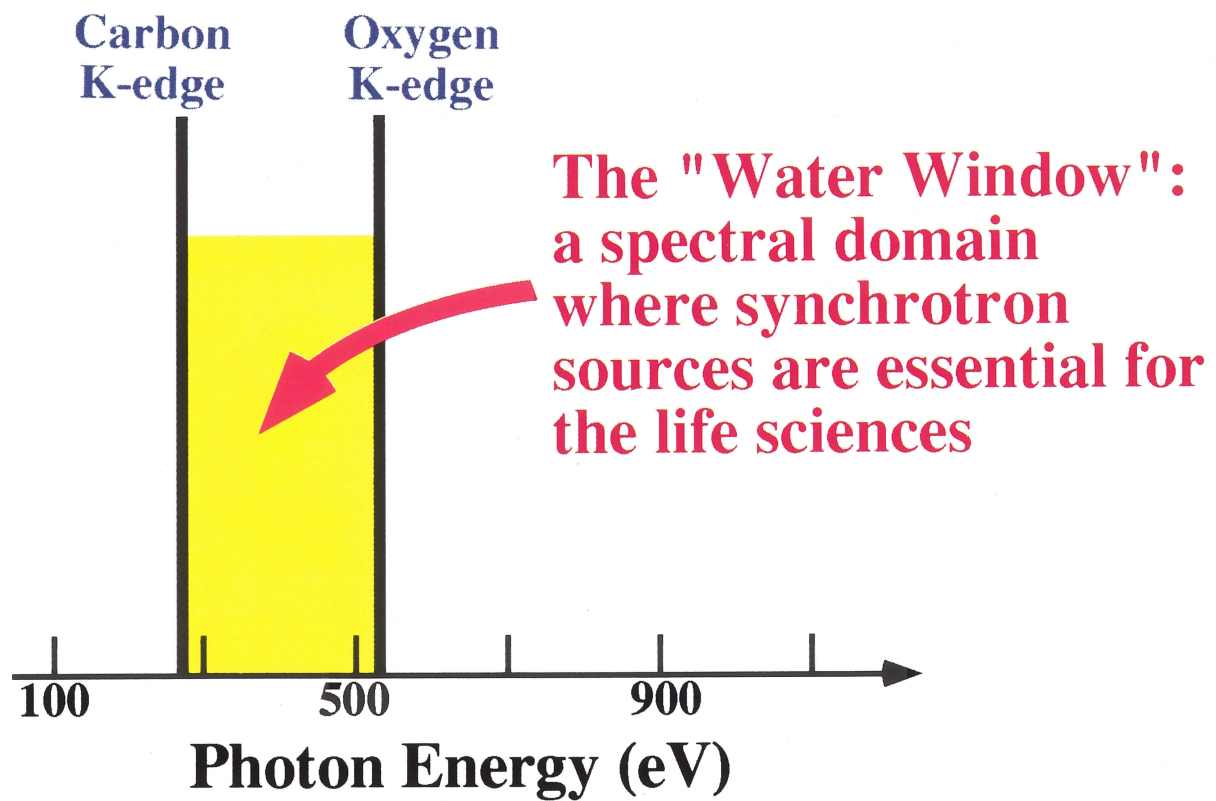
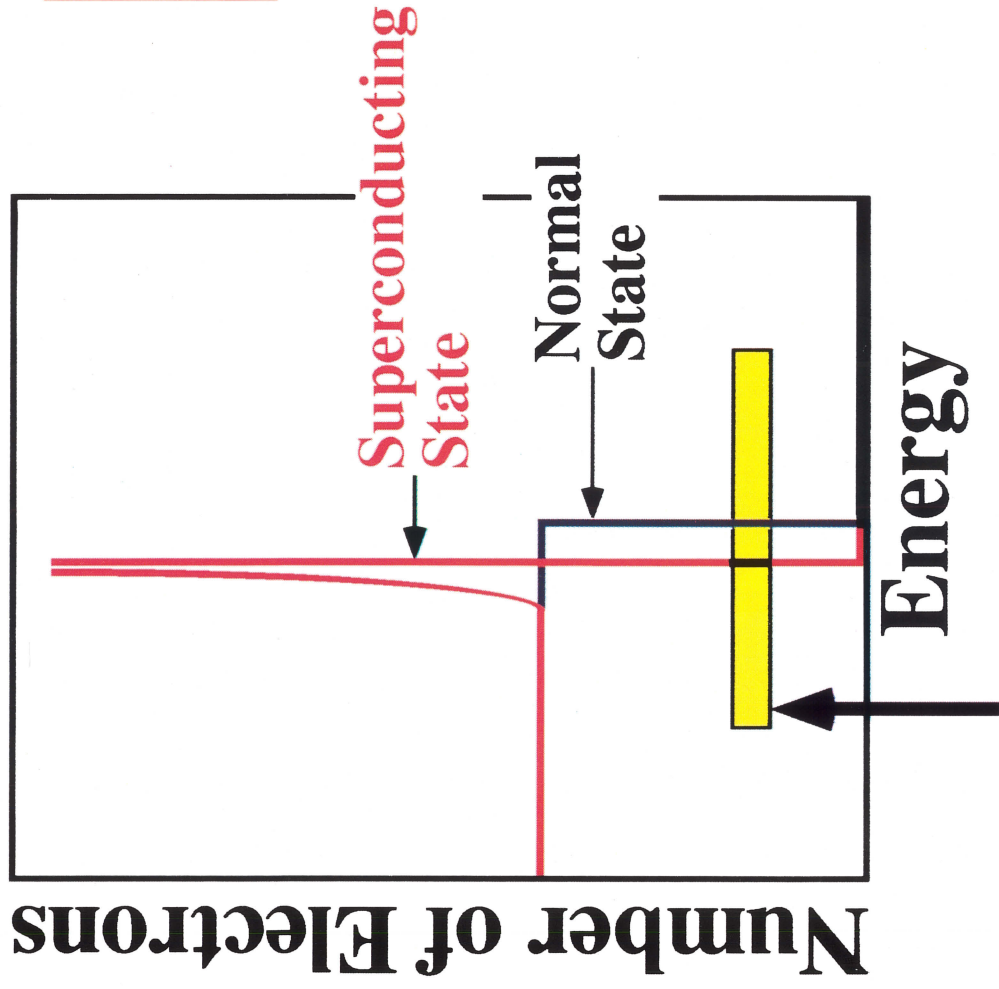


Figure 5



The insufficient energy resolution makes it impossible to observe the phenomenon

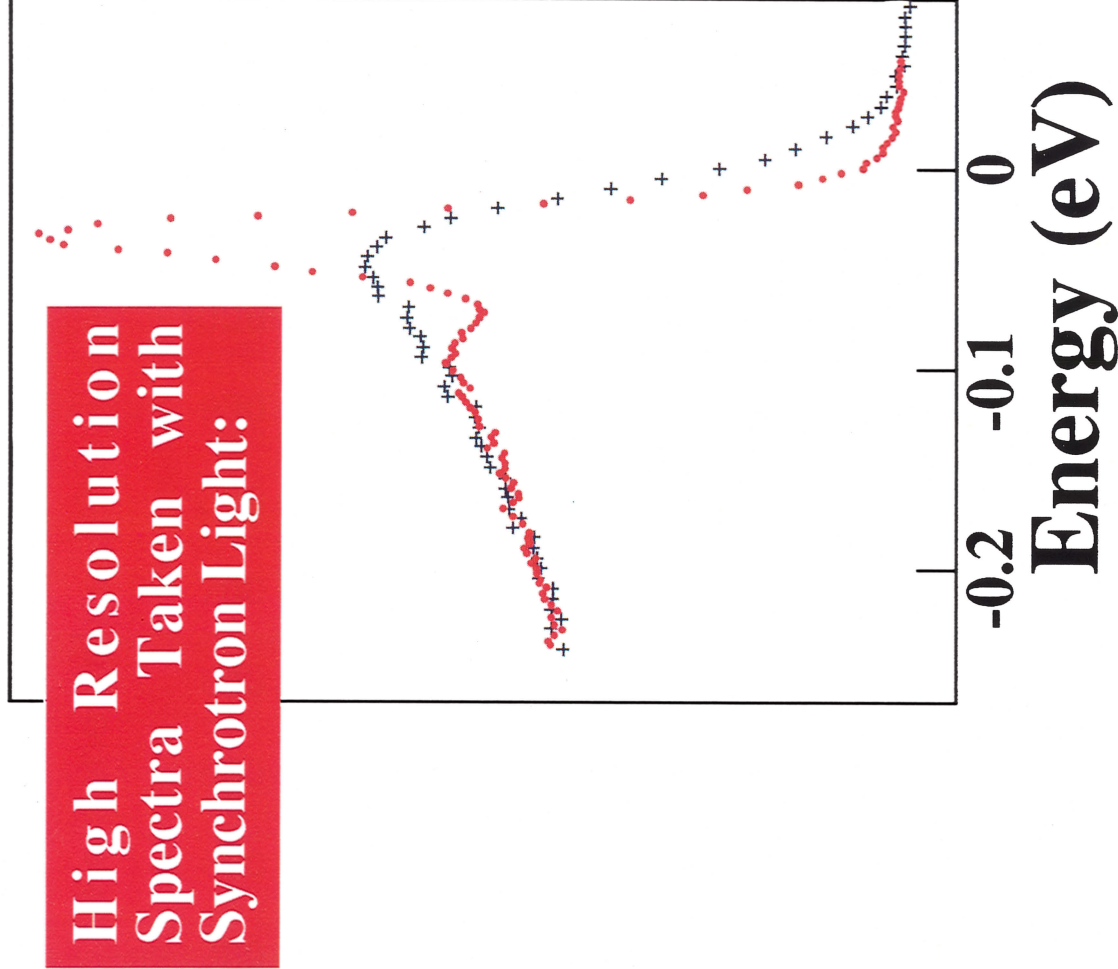
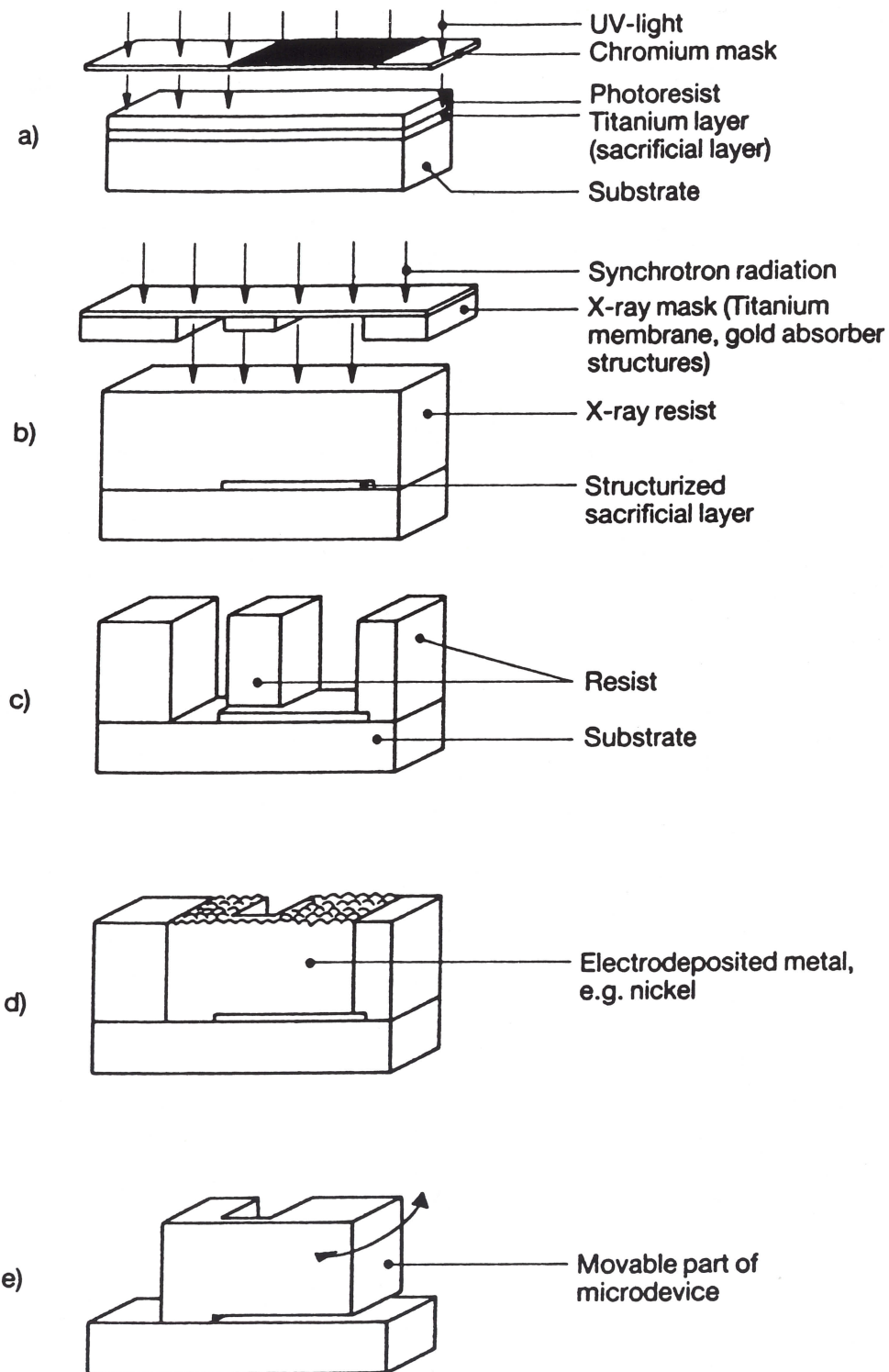


Figure 6: Photoemission studies of High Temperature Superconductors.



Principal steps of the fabrication of movable microdevices

Figure 7: Special LIGA process which allows to produce micro structures with movable parts. A so-called sacrificial layer (Opferschicht) is required to fabricate parts which are not bound to the base plate. (Source: Microparts)

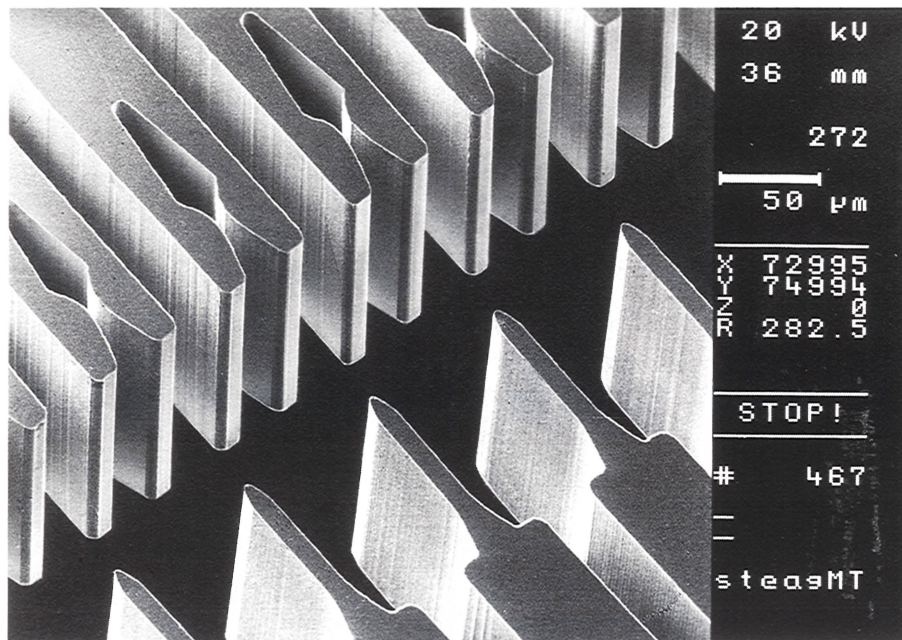


Figure 8: Miniaturised multi-plug fabricated by electroforming from nickel. (Source: Microparts)

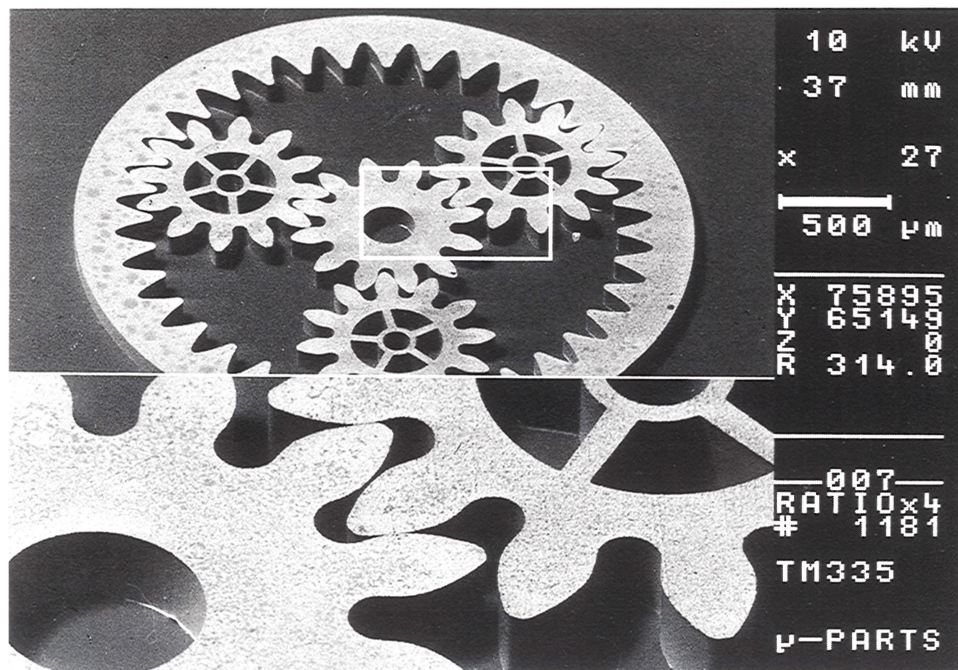


Figure 9: Metallic gear wheels fabricated by the LIGA process.
(Source: Microparts)