

# Ausblick und Visionen für ANKA

V. Saile, IMT;

D. Einfeld, K. Hesch, R. Rossmanith, R. Steininger, FGS;

H. O. Moser, Singapore Synchrotron Light Source (Singapur)

## Einleitung

Die ANKA-Anlage wird zur Zeit mit acht Strahlrohren in Betrieb genommen. Damit ist das Potenzial der Anlage bei weitem nicht ausgeschöpft. Unter den Vorschlägen für zusätzliche Experimentiereinrichtungen stellen insbesondere neue Konzepte für Insertion Devices eine erhebliche technische Herausforderung dar. Beispiele hierfür sind die Entwicklung eines supraleitenden Mini-undulators für ein Synchrotron-Umweltlabor oder eine Bestrahlungseinrichtung für die direkte Fertigung von Mikrobauteilen.

## Erweiterungspotenzial

Zur Erstausrüstung von ANKA gehören 8 Strahlrohre und Messplätze, die alle mit Strahlung aus den Ablenkmagneten von ANKA versorgt werden. Hinzu kommt ein weiteres Strahlrohr der Max-Planck-Gesellschaft in Stuttgart, das ebenfalls an einen Ablenkmagneten angeschlossen ist. Damit ist die Kapazität der Anlage bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Zukünftige Erweiterungen lassen einen Ausbau auf etwa 20 Strahlrohre zu, wobei diese Obergrenze durch den verfügbaren Platz in der Experimentierhalle bestimmt wird; der Speicherring selbst hat 32 Auslassflansche für den Anschluss von Strahlrohren. Neben Ablenkmagneten als Strahlungsquellen, die ausschließlich in der ersten Phase der Anlage genutzt werden, bietet ANKA aber auch die Möglichkeiten zum Einbau sogenannter „Insertion Devices“ wie Wiggler und Undulatoren. Dazu verfügt ANKA über vier knapp 5 m lange, gerade Driftstrecken und

eine weitere etwa 2 m lange, die zum Einbau der speziellen Magnetanordnungen der Insertion Devices geeignet sind. Solche Insertion Devices sind dadurch gekennzeichnet, dass der Elektronenstrahl am selben transversalen Ort und mit derselben Richtung aus dem Insertion Device herauskommt wie er hineinläuft, so dass es für die Elektronenbahn außerhalb des Insertion Device keine Rolle spielt, ob dieses eingeschaltet ist oder nicht. Mit der Struktur des Magnetfeldes im Insertion Device können die spektralen Eigenschaften der erzeugten Synchrotronstrahlung gezielt eingestellt werden. Die Möglichkeit, in einem Speicherring die Spektralverteilung der Synchrotronstrahlung gezielt den Bedürfnissen des Experimentes anzupassen sowie die Leuchtdichte für bestimmte Wellenlängen um Größenordnungen im Vergleich zu einem Ablenkmagneten zu erhöhen, hat zu einer breiten Anwendung von Insertion Devices innerhalb der letzten Dekade geführt. Die modernsten Speicherringe, Ringe der sogenannten 3. Generation, sind für den Einbau von Insertion Devices konzipiert und optimiert. Ziel dabei ist es, eine möglichst große Zahl von geraden Driftstrecken in den Ring zu integrieren und Emittanz (Dimension  $\times$  Divergenz) des Elektronenstrahls zu minimieren. Man unterscheidet Insertion Devices nach dem Verhältnis  $K$  des maximalen Ablenkwinkels der Elektronenbahn zum Öffnungswinkel der Synchrotronstrahlung des einzelnen Elektrons bei einer charakteristischen Wellenlänge (der sogenannten kritischen Wellenlänge). Dieses Verhältnis ist proportional

zum Produkt aus Periodenlänge in einer periodischen Magnetanordnung und dem Magnetfeld. In praktischen Einheiten ist  $K$  durch

$$K = 0.934 \cdot B(T) \lambda_u(\text{cm})$$

gegeben.

Für  $K \gg 1$  spricht man von einem Wellenlängenschieber, wenn die Elektronenbahn eine einzige Beule mit engem Kurvenradius beschreibt und damit sehr kurzwellige Strahlung emittiert, und von einem Wiggler, wenn die Bahn mehrere, periodische Auslenkungen erfährt. Das Spektrum der dabei erzeugten Strahlung entspricht dem eines Ablenkmagneten mit einer um das  $N$ -fache erhöhten Intensität, wobei  $N$  die Zahl der Auslenkungen in dem Wiggler ist.

Undulatoren werden durch  $K \leq 1$  gekennzeichnet. Sie emittieren nicht mehr ein Kontinuum wie ein Ablenkmagnet sondern im wesentlichen ein Linienspektrum mit einer Grundfrequenz und dominierenden ungeraden Harmonischen. Gerade Harmonische existieren ebenfalls, sind aber deutlich schwächer. Abb. 1 zeigt ein typisches Beispiel eines Undulatorspektrums.

Die Wellenlänge  $\lambda_n$  der Strahlungsmaxima der Grundschwingung und der höheren Harmonischen ist durch die Beziehung

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{2 n \gamma^2} (1 + K^2/2 + (\gamma\vartheta)^2)$$

gegeben. Hier ist  $n$  die Harmonischenzahl,  $\gamma$  das Verhältnis von Gesamtenergie der Elektronen zu Ruheenergie des Elektrons und  $\vartheta$  der Beobachtungswinkel bezogen

auf die Vorwärtsrichtung. Man erkennt, dass man bei einer Reduktion der Elektronenenergie im Speicherring, d.h. von  $\gamma$ , die Periodenlänge verkürzen muss, um dasselbe Spektrum zu produzieren. Der K-Parameter wird dazu benutzt, das vom Undulator produzierte Linienspektrum durchzustimmen. Dies erfolgt bei den meisten Undulatoren, die aus zwei Reihen von Permanentmagneten oberhalb und unterhalb der Bahnebene der Elektronen aufgebaut sind, durch eine mechanische Änderung des Abstandes zwischen den beiden „Magnet-Arrays“ und der damit verbundenen Änderung des Magnetfeldes am Ort der Elektronenbahn.

## Supramini

Das Forschungszentrum Karlsruhe beschäftigt sich seit 1990 mit der Möglichkeit, einen supraleitenden Miniundulator [1] zu entwickeln. Ein Labormuster wurde gebaut und erfolgreich getestet [2]. Die Herstellung eines ersten Prototypen wurde in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner aufgenommen. Die Bedeutung der Supraleitung liegt darin, dass im Gegensatz zu Geräten mit Permanentmagneten auch noch bei sehr kleinen Periodenlängen hohe Magnetfelder erzeugt werden können. Abb. 2 zeigt eine schematische Darstellung des Supramini.

Das weltweit große Interesse an der Supramini-Entwicklung des Forschungszentrums rührt daher, dass mit seiner Hilfe kurzwellige Undulator-Röntgenstrahlung auch an Speicherringen mittlerer Energie erzeugt werden kann.

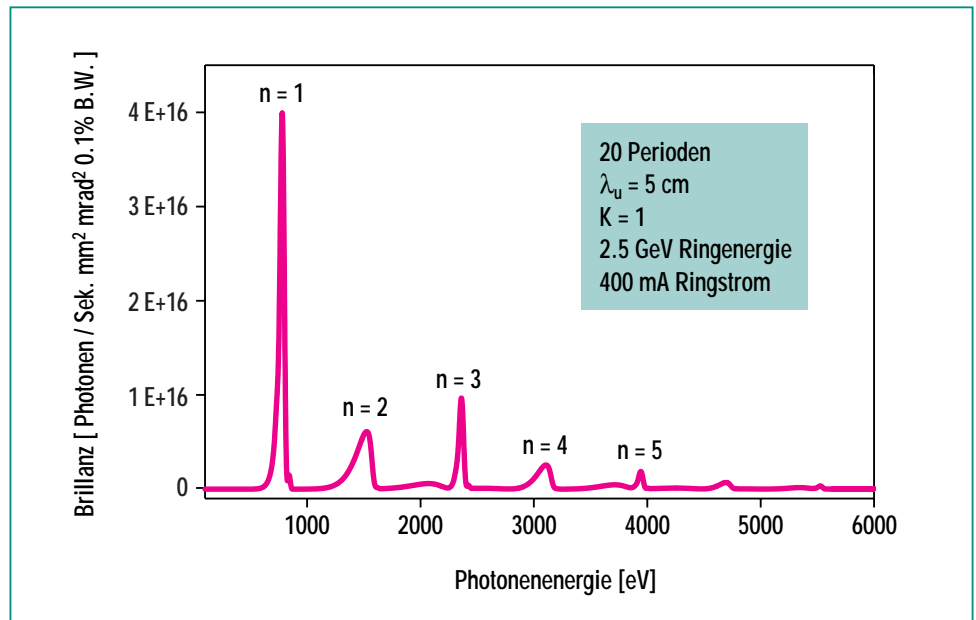


Abb. 1: Typisches Spektrum eines Undulators.

Dadurch kann der Anwendungsbereich solcher Anlagen mit moderaten Investitionskosten erheblich erweitert werden. Supraminis sind also nicht nur für ANKA, sondern für die ganze Klasse von Mittelenergie-Synchrotronstrahlungsquellen von großer Bedeutung. Allerdings sind für einen

Einsatz des supraleitenden Miniundulators in einem Speicherring wie ANKA noch beträchtliche Entwicklungsarbeiten zu leisten. Sind diese erfolgreich, dann wird der Supramini die Möglichkeit bieten, selbst bei niedrigen Elektronenenergien und, damit verbunden, niedrigen Investitions-

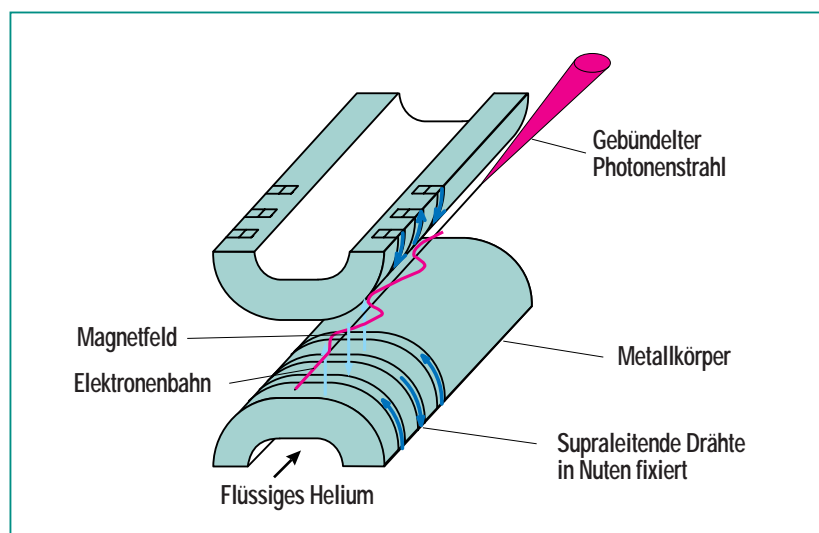


Abb. 2: Schematische Darstellung des supraleitenden Miniundulators.

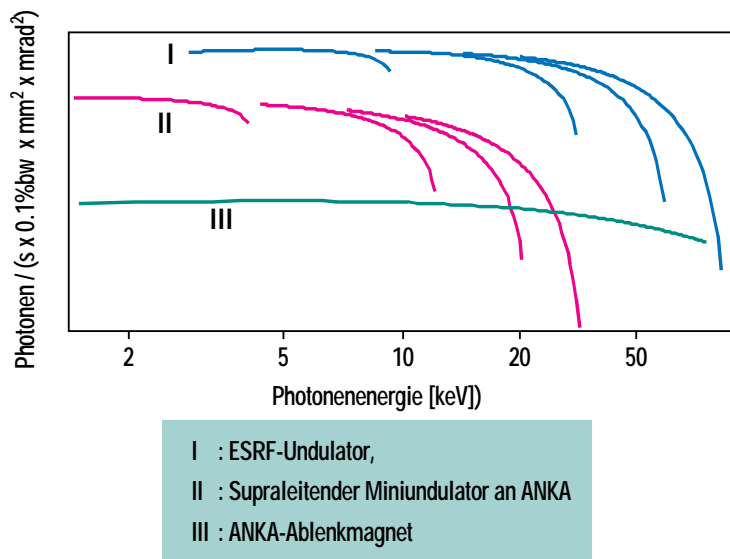


Abb. 3: Brillanz und Durchstimmbereich der Supramini-Strahlung an ANKA im Vergleich zum ANKA-Ablenkmagneten und zu einem typischen Undulator an der ESRF.

und Betriebskosten für die Anlage, hochenergetische Undulatorstrahlung zu erzeugen.

### Synchrotron-Umweltlabor

Ein Supramini von 14 mm Periodenlänge und einer maximalen magnetischen Flussdichte von 1.5 T kann an ANKA (2.5 GeV) Strahlung im Spektralbereich von 1.4 keV bis über 20 keV erzeugen, wenn Strahlung bis zur 7. Harmonischen ausgenutzt wird. Die Brillanz dieser Strahlung liegt um bis zu vier Größenordnungen höher als in den Ablenkmagneten von ANKA und nur noch um zwei Größenordnungen niedriger als heutige typische Undulatorstrahlung an der 6 GeV ESRF-Anlage (Abb. 3). Diese Undulatorstrahlung ist insbesondere auch zur Fokussierung der Strahlung geeignet, mit Querschnitten im  $\mu\text{m}$ -Bereich.

Aufbauend auf eine solche Strahlungsquelle ist das Konzept des Synchrotronumweltlabors an ANKA entstanden, das die Möglichkeit bieten soll, an ein- und demselben Mikroflack auf einer Probe die drei Analytikverfahren Absorptionsspektroskopie, Fluoreszenzanalyse und Diffraktometrie nacheinander einzusetzen. Abb. 4 zeigt ein schematisches Layout dieser Mikrofokus-Kombinationsmesseinrichtung.

Zur Nutzung dieser Messmöglichkeiten, die themenbezogen durch einen Messplatz für die Infrarot-Spektroskopie und -mikroskopie abgerundet werden soll, haben sich zahlreiche Gruppen mit internationaler Beteiligung zu-

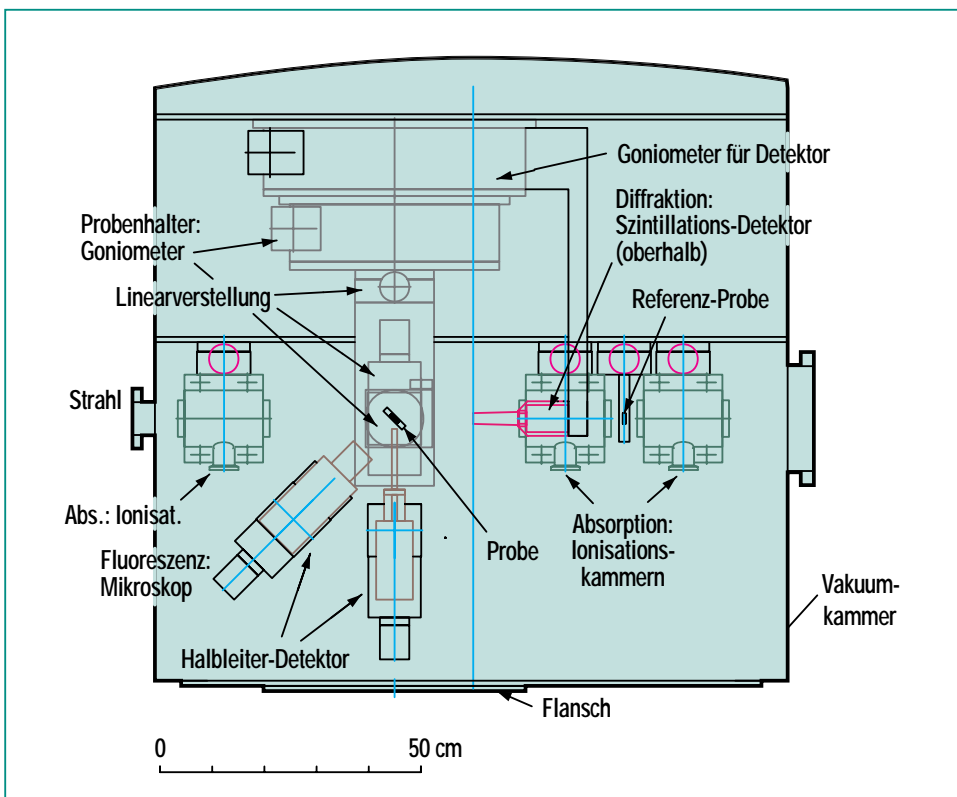


Abb. 4: Schematisches Layout (Draufsicht) der Mikrofokus-Kombinationsmesseinrichtung für das Synchrotron-Umweltlabor.

sammengefunden. Das Spektrum der geplanten Arbeiten, die durch die Analytik des Synchrotron-Umweltlabors ermöglicht bzw. unterstützt werden sollen, reicht von sehr grundsätzlichen Fragestellungen zur Schadstoffbindung und -mobilität in der Umwelt bis hin zur Verifizierung konkreter Sanierungsmaßnahmen. Der Aufbau der entsprechenden Strahlführungs- und Messeinrichtungen ist in Vorbereitung.

### Fertigung von Mikrobauteilen mit Synchrotronstrahlung

Die LIGA-Technik [3] wurde in den 80er und 90er Jahren am Kernforschungszentrum bzw. Forschungszentrum Karlsruhe so weit entwickelt, dass mit dieser Methode heute Produkte hergestellt werden können. Das Verfahren umfasst die Schritte Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung, Galvanik und Abformung. Obwohl schon in den Anfängen der LIGA-Anwendungen klar wurde, dass eine räumliche und zeitliche Trennung der Prozessschritte, die durch die Belichtung der Substrate an weit entfernten Synchrotronstrahlungsquellen erforderlich war, Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit nachhaltig beeinträchtigt, dauerte es noch viele Jahre, bis mit ANKA eine Bestrahlungseinrichtung in unmittelbarer Nähe der Prozesslabors errichtet wurde. Die ersten 3 Strahlrohre der Grundausstattung für LIGA an ANKA dienen der lückenlosen Weiterführung der bisherigen Arbeiten des IMT an BESSY in Ber-

lin und ELSA in Bonn, allerdings unter ungleich besseren Bedingungen. Ein wichtiger Aspekt dabei ist es, Industrieaufträge ohne technische Risiken abzuwickeln. Deshalb sind die LIGA-Strahlrohre nach dem bewährten Vorbild der bisher genutzten Einrichtungen konzipiert.

Mit ANKA werden jedoch auch völlig neue Konzepte und Möglichkeiten denkbar, die realisiert werden sollen, nachdem der Routinebetrieb an ANKA fest etabliert ist. Eine dieser Visionen hat zum Ziel, Mikrobauteile in großer Zahl und kostengünstig direkt mit Synchrotronstrahlung zu fertigen (Direkt-LIGA), d.h. jede Komponente wird einzeln lithographisch hergestellt, ähnlich wie dies in der Fertigung von Halbleiterbausteinen der Fall ist [4]. Bisher wird dies durch die langen Bestrahlungszeiten und den damit verbundenen hohen Kosten verhindert. Deshalb wird die teure Synchrotronstrahlung nur zur Herstellung von metallischen Formeinsätzen eingesetzt, die als Werkzeuge zur Produktion von Bauteilen mit Spritzguss- oder Heißprägeverfahren dienen. Direkt-LIGA bietet entscheidende Vorteile hinsichtlich der Strukturtreue und Qualität der Komponenten, aber insbesondere könnte auch die Zahl der Fertigungsschritte drastisch reduziert werden. Um den Kostennachteil der direkten Bestrahlung zu überwinden, müssen größere Substratflächen in kürzerer Zeit belichtet werden. Dazu können in begrenztem Umfang empfindlichere Resistmaterialien und eine höhere Intensität der Synchrotronstrahlung eingesetzt werden,

aber auch erheblich größere Flächen der mit Resist beschichteten Substrate pro Zeiteinheit belichtet werden. Ideal für Direkt-LIGA wäre ein Insertion Device, das einen mehrere 10 cm breiten Stahl liefert, dessen mittlere Wellenlänge der Resistdicke angepasst ist und der vertikal über mehrere cm zum Überstreichen der Resistfläche ausgelenkt werden kann. Ob eine Magnetanordnung mit diesen Spezifikationen wirklich realisierbar ist und in eine Driftstrecke von ANKA integriert werden kann, ist zur Zeit noch nicht abschließend beantwortet. Die dramatischen Konsequenzen für die Fertigung von LIGA-Produkten kleiner und mittlerer Stückzahl legen es jedoch nahe, solche Konzepte mit Nachdruck zu verfolgen.

### Schlussbemerkung

Der ANKA-Speicherring wird zur Zeit mit acht Strahlrohren in Betrieb genommen und optimiert. Die Kapazität der Anlage ist dabei bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Es existieren neben den beschriebenen bereits eine ganze Reihe von weiteren Vorschlägen von Gruppen innerhalb und außerhalb des Forschungszentrums für Anwendungen, Strahlrohre und Experimentierstationen wie z.B. ein Strahlrohr des IFP für weiche Röntgenstrahlung, an dem die elektronische Struktur von Festkörpern und Oberflächen untersucht werden soll oder ein Strahlrohr unter Leitung des INE zur Charakterisierung von Aktiniden. An guten Projekten mangelt es nicht; die Grenzen für weitere Ausbaupläne von ANKA werden eher durch die

---

---

Verfügbarkeit von finanziellen und personellen Ressourcen definiert. Ab 2001 wird ANKA von dem wirtschaftlichen Geschäftsbetrieb ANKA GmbH übernommen. Für die ANKA GmbH ist ein reibungsloser und kontinuierli-

cher Betrieb der Anlage eine unerlässliche Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg. Dies hat auch zur Folge, dass die Installation zusätzlicher Strahlrohre ausschließlich in lang geplanten Betriebspausen erfolgen kann.

## Literatur

- [1] H.O. Moser, B. Krevet, H. Holzapfel, *Mikroundulator, Deutsches Patent P 41 01 094.9-33, 1* 6. Januar 1991.
- [2] T. Hezel, M. Homscheidt, H.O. Moser, R. Rossmannith, Th. Schneider, H. Backe, S. Dambach, Th. Doerk, F. Hagenbuck, K.-H. Kaiser, W. Lauth, A. Steinhof, Th. Walcher, *Proc. 1999 Particle Accelerator Conference, March 29-April 2, 1999, New York, vol. 1, pp. 165-167, IEEE Catalog Number 99CH36366.*
- [3] E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer, *Microelectronics Engineering (1986), 53-56.*
- [4] V. Saile, *Microsystem Technologies (1998), Potsdam, p. 25-30.*