

Forschung mit Synchrotronstrahlung

T. Baumbach, ISS

Einführung

ANKA ist das Akronym für Angströmquelle Karlsruhe, die Synchrotronanlage der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. Das Forschungszentrum betreibt mit ANKA eine der drei nationalen Großforschungsanlagen Deutschlands zur Erzeugung und Nutzung von Synchrotronstrahlung (Abb. 1).

ANKA wurde im Jahre 2002 vom damals neu gegründeten Institut für Synchrotronstrahlung in Betrieb genommen. Im darauf folgenden Jahr 2003 wurde ANKA für den allgemeinen Nutzerbetrieb geöffnet und wird seitdem von Wissenschaftlern und Ingenieuren des Forschungszentrums und von Gruppen externer Einrichtungen, Universitäten, wissenschaftlichen Instituten und Industrieunternehmen für ihre Forschung genutzt.

Die Nutzergruppen bewerben sich um Zugang an die ANKA-Strahlrohre im gegenseitigen Wettbewerb, wobei die Messzeit über ein internationales Vorschlags- und Auswahlverfahren nach Kriterien der wissenschaftlichen Exzellenz und der technologischen Relevanz der Anträge und der bisher an der Anlage erzielten Ergebnisse vergeben werden. Dabei sind für die angewandte und Industrieforschung kurzfristige und flexible Zugangsmöglichkeiten geschaffen worden. Die kommerzielle Nutzung der Anlagen für industrielle Dienstleistungen wird durch die ANKA GmbH und ab 2006 durch den ANKA – Commercial Operation Service koordiniert.

Mit den Experimentiereinrichtungen seiner derzeit zwölf Strahlrohre haben die Forschungszen-

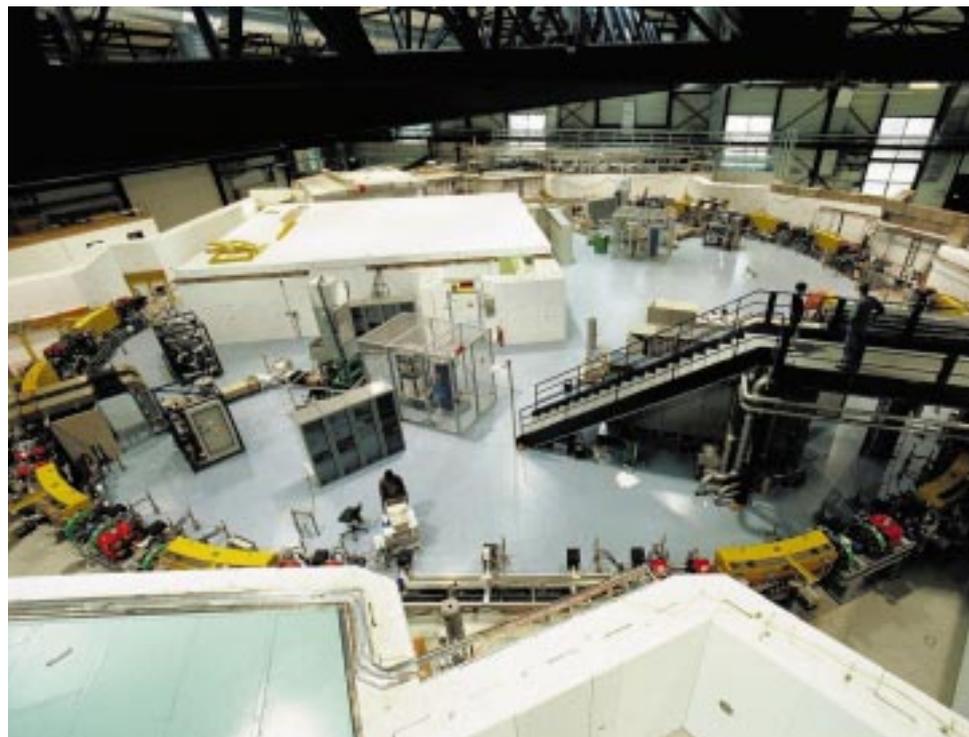


Abb. 1: Ansicht der ANKA-Halle mit dem 2,5-GeV-Synchrotronspeicherring.

trum Karlsruhe GmbH und seine Kooperationspartner ein vielfältiges Angebot für die Analytik, Materialdiagnostik und Mikrofertigung mit Synchrotronstrahlung aufgebaut: Analytik von der Infrarotspektroskopie bis zur Röntgenfluoreszenzanalyse, zerstörungsfreie Materialcharakterisierung von der IR-Ellipsometrie bis zur Röntgen-Computertomographie, Mikrofertigung unter Anwendung der LIGA-Prozesstechnik, basierend auf ANKAs Röntgentiefenlithographie.

ANKA soll in den kommenden Jahren mit der Mission eines nationalen und Europäischen Nutzerbetriebs für Synchrotronforschung voll ausgebildet und entwickelt werden, wobei ANKA seine Kompetenzen der Analytik, Materialdiagnostik, Mikrofertigung und Geräteentwicklung auf die Wis-

senschaftsfelder Synchrotron-technik, Nano- und Mikrotechnologie, Festkörper- und Materialforschung, Aktiniden- und Umweltforschung fokussiert.

Diese Mission wird einerseits umgesetzt durch den instrumentellen Ausbau der Synchrotronanlage, seiner Beschleuniger und Strahlrohre, sowie der allgemeinen Infrastruktur für den Nutzerbetrieb, inklusive der Ausstattung mit Nutzerhaus und Nutzerarbeitsplätzen. Andererseits wird von den an ANKA kooperierenden Instituten komplementäre Messtechnik und Technologie in sinnvoller Ergänzung der Synchrotron-technik integriert und so das instrumentelle und methodische Leistungsangebot des Nutzerbetriebes der ANKA auf Kernbereiche der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH erweitert.



Abb. 2: ANKA fokussiert und koordiniert ihre Forschung thematisch in fünf ANKA-Laboratorien.

In den ANKA-Laboratorien (siehe Abb. 2)

- ANKA-Labor für Mikro-Fertigung und -Charakterisierung
- ANKA-Labor für Nano-Fertigung und -Charakterisierung
- ANKA-Labor für Festkörperforschung
- ANKA-Labor für Aktinidenforschung und Umweltstudien
- ANKA-Labor für Entwicklung von Synchrotrontechnologie

verknüpft ANKA sein Portfolio der Synchrotrontechniken mit Technologien der Probenherstellung, Präparation und Prozessierung sowie mit komplementären Charakterisierungsmöglichkeiten der Institute der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, gestärkt durch weitere Kooperationen u.a. mit Universitäten der Umgebung (Abb. 3).

Damit etabliert sich ANKA gezielt in Schwerpunktprogrammen des Forschungszentrums Karlsruhe innerhalb der programmorientierten Forschung der Helmholtz-Gemeinschaft.

Ein früheres Heft der Nachrichten des Forschungszentrums Karlsruhe berichtete bereits über die Funktionsweise, die instrumentelle Ausstattung und das avisierte Methodenspektrum an ANKA [1], weshalb wir das vorliegende Heft hierzu auf eine kurze Einführung beschränken wollen. Diese Ausgabe illustriert vielmehr Beispiele relevanter Aufgabenstellungen und repräsentativer Anwendungen und Ergebnisse, welche auf den wissenschaftlichen Gebieten der ANKA-Laboratorien von den Instituten des Forschungszentrums und kooperierenden Forscher-

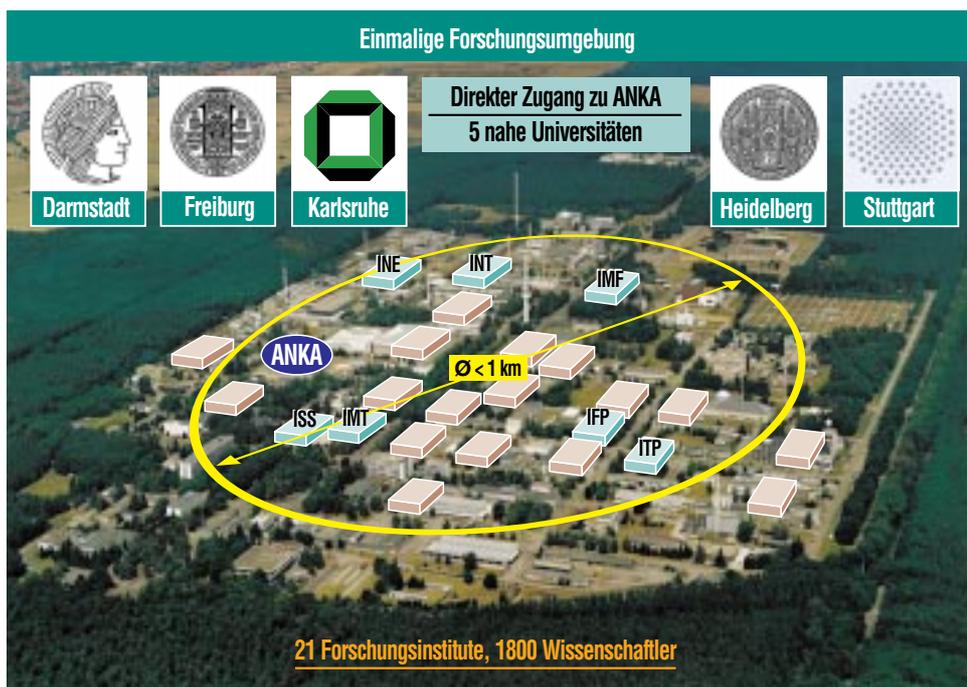


Abb. 3: ANKA ist eingebettet in eine einzigartige Forschungsumgebung an der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH und in der Region. Farblich hervorgehoben sind direkt an ANKA kooperierende Institute (grün) und ANKA nutzende Institute (braun) des Forschungszentrums, darüber hinaus wichtige kooperierenden Universitäten der Region.

gruppen an ANKA bearbeitet bzw. erzielt wurden. Die verschiedenen Themen wurden entsprechend gruppiert.

Das Angebot an ANKA ist schwerpunktmäßig ausgerichtet, ihre Nutzungsmöglichkeiten sind jedoch weit vielfältiger, wie die drei letzten Beiträge der Ausgabe belegen mögen.

Synchrotronstrahlung

Im Jahre 1887 gelang es Heinrich Hertz in Karlsruhe, mit dem nach ihm benannten Hertzschen Dipol die Existenz elektromagnetischer Wellen und damit damals die Richtigkeit der Maxwellschen Theorie der Elektrodynamik nachzuweisen. Die elektromagnetischen Wellen entstanden in Folge der Beschleunigung von elektrischen Ladungen.

Synchrotronstrahlung wurde 1947 zum ersten Mal bei General Electric beobachtet. Sie entsteht, wenn geladene Teilchen relativistischer Geschwindigkeit beschleunigt werden, indem sie von ihrer geradlinigen Bewegung abgelenkt werden. Diese Art der Beschleunigung über eine Richtungsänderung bei gleich bleibendem Geschwindigkeitsbetrag geschieht z.B. in Synchrotron-speicherringen, einer Art Karussell für geladene Teilchen extrem hoher Energie und Geschwindigkeit.

ANKA betreibt einen solchen Speicherring für Elektronen mit einer Energie von 2,5 GeV. Die Elektronen werden von einer Elektronenkanone emittiert und in einer Beschleunigungsstrecke eines Rennbahn-Mikrotrons auf 53 MeV, im nachgelagerten Booster-Synchro-

tron auf 500 MeV und im Speicherring schließlich auf 2,5 GeV beschleunigt (siehe Abb. 4). Bei dieser Energie werden die quasi mit Lichtgeschwindigkeit dahinjagenden Elektronen mit einer mittleren Lebensdauer von ca. 15 Stunden im Hochvakuum von 10^{-9} mbar auf seiner Umlaufbahn gehalten.

Die Elektronen emittieren die Synchrotronstrahlung auf ihrem Weg durch sogenannte Ablenk Magneten. Dort werden sie auf ihrer horizontalen Bahn durch das vertikale magnetische Feld des Ablenk Magneten von einer ansonsten geradlinigen Bahn abgelenkt und auf die Kreisbahn des Speicherringes gezwungen. Ein Elektronenpaket im Ablenk Magneten stellt sozusagen eine ultraschnell bewegte, hoch brillante Lichtquelle dar. Aus Sicht des im Laborsystem ruhenden Experimentators führt die Bewegung der Quelle zum relativistischen Dopplereffekt, d.h. zu einer Frequenzverschiebung und in letzter Konsequenz zur Emission eines Wellenlängenspektrums vom fernen infraroten bis in den harten Röntgenstrahlungsbereich hinein. Und zwar in Vorwärtsrichtung der Bewegung der Elektronen, also tangential zu seiner Umlaufbahn, und in einem sehr kleinen Raumwinkel gebündelt. Der Speicherring der ANKA hat eine Elektronenoptik-Anordnung eines so genannten achtfachen Achromat mit insgesamt 16 paarweise angeordneten Ablenk Magneten (Double Bend Achromat). Die Ablenk Magnete sind abwechselnd mit einem oder zwei Strahlports ausgestattet, aus denen die Strahlrohre mit Synchrotronstrahlung versorgt werden können.

Besonders „hochwertige“ Synchrotronstrahlung hoher Leuchtdichte wird in so genannten Wigglern und Undulatoren produziert. Das sind eine Art Achterbahnen, in denen die Elektronen in alternierenden Magnetfeldern auf eine wellenförmigen Bahn beschleunigt werden. Die auf diesem Schlingerkurs in einem Undulator von einem Elektron an benachbarten Wellenberge emittierte Strahlung interferiert miteinander, was in seinem Ergebnis im ruhenden Bezugssystem des Beobachters zur Erzeugung quasimonochromatischer Strahlung extrem hoher spektraler Leuchtdichte führt.

ANKAs Strahllinien

Die Synchrotronstrahlung gelangt in Strahlrohren zu den Experimentierstationen der Nutzer. Die Experimentierstationen befinden sich in komfortablen Strahlenschutzhütten. Im allgemeinen wird der weiße Synchrotronstrahl zuerst in einer Optikhütte mit Blendensystemen, Filter, Spiegel, Gitter-, Multischicht- oder Kristallmonochromatoren, Röntgenlinsen etc. in gewünschter Weise konditioniert, so hinsichtlich seiner Photonenenergie, seiner Winkelverteilung und Ausdehnung, seiner Fokussierung oder seiner Kohärenzeigenschaften.

Das eigentliche Experiment findet in der Experimentierhütte statt, wo die Proben in den erforderlichen Freiheitsgraden gedreht oder positioniert und in der jeweils erforderlichen Probenumgebung, z.B. unter Vakuum, Temperatur, mechanischer, magnetischer, elektrischer Last oder konkreter chemischer Umgebung untersucht wer-

dulator“ weitere dreidimensional abbildende Methoden wie Mikrotomographie, Synchrotron-Laminographie, Phasenkontrastmethoden und Beugungsmikroskopie (Full-Field Micro-Diffraction Imaging) vorgesehen.

Röntgenlithographie

Das ANKA-Lab für Mikrofertigung und -charakterisierung betreibt eine in Europa einmalige Anlage, drei Strahlrohre der Röntgentiefenlithographie integriert in eine geschlossene LIGA-Prozesskette innerhalb des Qualitätsmanagementsystems ISO 9001/2000.

LIGA steht für Lithographie, Galvanik und Abformung. Der Prozess war von Wissenschaftlern des Forschungszentrums erfunden worden [2] und seine effektive Einführung und Umsetzung eine Motivation für den Bau der Synchrotronanlage ANKA.

Die Mikrofertigung am Forschungszentrum ist spezialisiert auf Nicht-Silizium-Materialien – Keramik, Metalle und Polymere. Mit dem LIGA-Verfahren hergestellte Komponenten und Systeme finden Anwendung in der Mikrooptik und Nanophotonik, Mikro- und Nanofluidik und in neuartigen Hochfrequenzkomponenten für die drahtlose Informationsübertragung. Eine herausragende Anwendung für die Synchrotrongeinschaft selbst sind die Produktentwicklungen röntgenoptischer Linsensysteme, welche eine sehr effiziente Mikrofokussierung von Röntgenstrahlung erlauben und u.a. für röntgenmikroskopische Abbildungsverfahren wie die Mikrofluoreszenzanalyse am Synchrotron und im Labor Anwendung findet.

Entwicklung von Synchrotrontechnologie an ANKA

An ANKA werden Undulatoren auf Basis von innovativen Konzepten des Einsatzes von Supraleitertechnologie des Instituts für Technische Physik entwickelt [3-5]

Mit dieser Technologie können alternierende Magnetfelder kurzer Periode weniger Millimeter und hoher Feldstärke bis zu 1,4 Tesla mit Hilfe von supraleitenden Wicklungen mit Stromstärken von ca. 1000 Ampere realisiert werden. ANKA ist auf diesem Gebiet in strategischer Kooperation mit dem Unternehmen ACCEL Instruments GmbH derzeit weltweit Technologieführer und testet erfolgreich den ersten supraleitenden Undulator in einem SynchrotronSpeicherring (Abb. 5).

Der Einsatz supraleitender Undulatoren der an ANKA entwickelten Technologie in Speicherringen mittlerer Energiebereiche zwischen ca. 2 bis 3 GeV erlaubt auch an solchen kosteneffizienten Synchrotronanlagen, wie sie derzeit weltweit überwiegend gebaut werden, die Emission von hochbrillanter Undulatorstrahlung mit Photonenenergien im für die Materialforschung wesentlichen harten Röntgenbereich. Dieser Bereich war bisher nur Undulatoren an im Vergleich kostenintensiven Hochenergiemaschinen von größer 6 GeV vorbehalten, wie man sie an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble oder PETRA am DESY in Hamburg findet.

Neben der Undulatortechnologie entwickelt ANKA erfolgreich das

Konzept der Produktion von Infrarotstrahlung an der Kante des Magnetfeldes beim Eintritt der Elektronenpakete in den Ablenk magneten. Solche Kantenstrahlung zeigt im Bereich der Infrarotstrahlung einige Vorteile gegenüber konventioneller, im Ablenkmagnet entstehender Synchrotronstrahlung, insbesondere eine willkommene Bündelung. Über eine zusätzliche Reduzierung der Ausdehnung der Elektronenpakete im Speicherring (low alpha mode) und damit der Pulslängen der gepulsten Strahlung auf ca. 1 Pikosekunde kann kohärente Kantenstrahlung produziert werden, mit einem Intensitätsgewinn um mehr als fünf Größenordnungen im fernen IR zwischen 65 cm^{-1} und 1 cm^{-1} , einem Wellenlängenbereich, der auch als THz-Fenster bekannt ist [6]. Mit der Entwicklung innovativer Messtechnik wie der Ellipsometrie und der Nahfeldmikroskopie

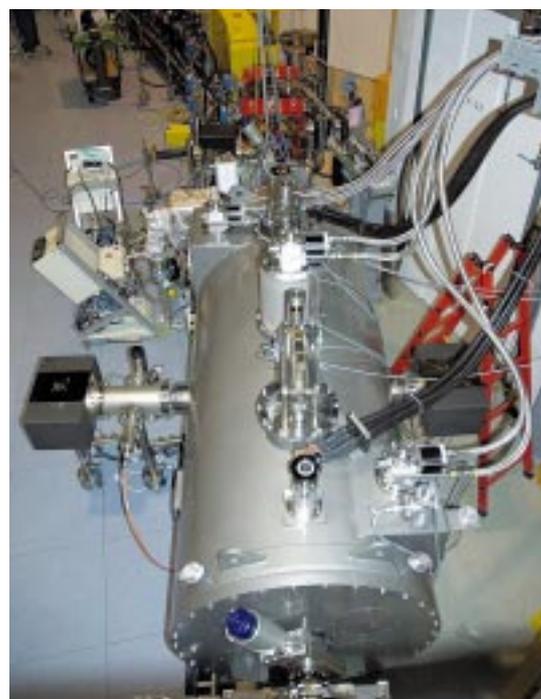


Abb. 5: Supraleitender Undulator an ANKA.

an den Infrarot-Strahllinien in Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung Stuttgart begibt sich ANKA auf den Weg zu einem der weltweit führenden Zentren für Synchrotron-Infrarotmesstechnik.

Ausblick

Mittelfristig wird sich ANKA im Nutzerbetrieb auf den Wissenschaftsfeldern der fünf ANKA-Labors etablieren.

Ein Schwerpunkt der weiteren instrumentellen Entwicklungen an den Strahlrohren der Analytik und Materialforschung wird die Integration von Herstellungsverfahren und Prozessierungstechnologien sein, mit dem Ziel von In-situ-Untersuchungen zur Evolution von Struktur und Dynamik der Proben in Wechselwirkung mit technologischen Prozessen der Synthese, des Wachstums, der Selbststrukturierung, der mechanischen Zuverlässigkeit und der thermischen Stabilität z.B. von Mikrosystemen und Nanomaterialien unter Last oder von Beschichtungen und Katalysatoren in unterschiedlicher chemischer Umgebung sein (Abb. 6).

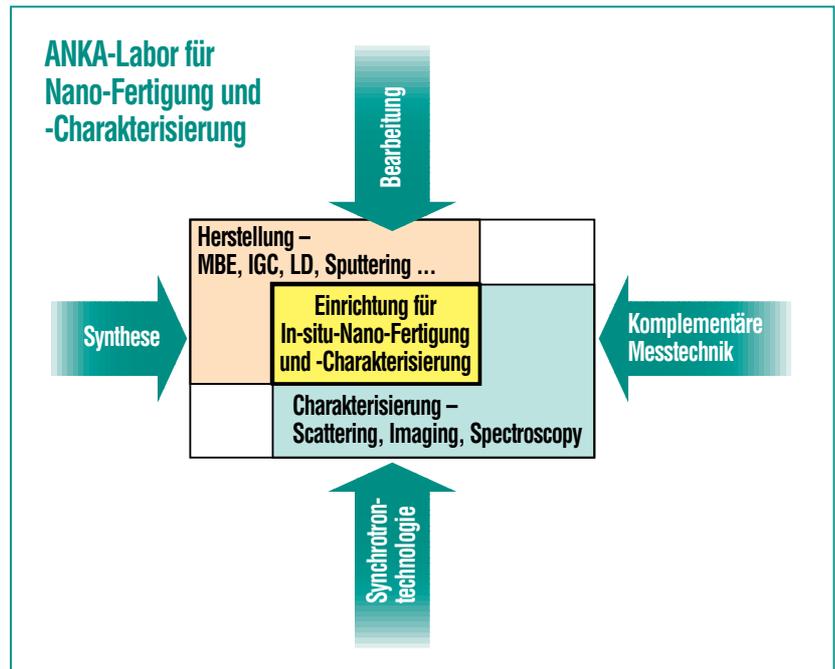


Abb. 6: Schematische Darstellung der Ausrichtung des ANKA-Labors für Nano-Fertigung und -Charakterisierung auf die Integration komplementärer Technologien an ANKA.

Für die langfristige Strategie erarbeitet ANKA ein Konzept der Anlage als Testbett für innovative Synchrotrontechnologien wie der supraleitenden Undulatortechnologie für Freie Elektronenlaser und der Erweiterung der ANKA um KARL – dem Testbett eines Karlsruher Energy Recovering Linacs.

Im Juni 2005 wurde ANKA von einer internationalen Gutachterkommission der öffentlichen Forschung und der Industrie umfassend und erfolgreich evaluiert: die Synchrotronanlage, die Qualität ihres Nutzerbetriebes, die wissenschaftlichen Ergebnisse, die zukünftigen Vorhaben, die Strategie und die gesetzten Ziele.

Literatur

- [1] Forschungszentrum Karlsruhe Nachrichten 32, 4/2000
- [2] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagemann, A. Maner, D. Münchmeyer, *Microelectronic Engineering* (1986), 53-56
- [3] H. O. Moser, B. Krevet, H. Holzapfel, *German Patent DE 4101094*, Research Center Karlsruhe
- [4] R. Rossmannith, U. Schindler, *German Patent No. 103 58 225*
- [5] B. Kostka, R. Rossmannith, M. Hagelstein, T. Baumbach, A. Bernhard, M. Weißer, E. Steffens, „Generation of X-ray radiation in a storage ring by a superconductive cold-bore in-vacuum undulator“ *Physical Review Letters*, 2005, in print
- [6] A.-S. Müller, I. Birkel, B. Gasharova, E. Huttel, R. Kubat, Y.-L. Mathis, D.A. Moss, W. Mexner, R. Rossmannith, M. Wuensch, P. Wesolowski, F. Perez, M. Pont, C.J. Hirschmugl, „Far infrared coherent synchrotron edge radiation at ANKA“, *Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, 2005*