

Entwicklung von Insertion Devices

S. Casalbuoni, M. Hagelstein, B. Kostka, R. Rossmann, ISS; M. Kläser, Th. Schneider, ITP;
A. Bernhard, D. Wollmann, Laboratorium für Applikationen der Synchrotronstrahlung, Universität Karlsruhe;
M. Weißer, E. Steffens, Physik Institut, Universität Erlangen-Nürnberg;
T. Baumbach, ISS und Laboratorium für Applikationen der Synchrotronstrahlung, Universität Karlsruhe

Um ANKA mit größeren und teureren Speicherringen konkurrenzfähiger zu machen wurde erstmals ein neuartiges supraleitendes Undulatorsystem entwickelt und Anfang 2005 erfolgreich mit Strahl getestet. Die Entwicklung des supraleitenden Undulators erstreckte sich über mehrere Jahre und wurde anfangs gemeinsam mit dem Institut für Technische Physik (ITP) im Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt. Der jetzt in ANKA eingebaute Undulator wurde gemeinsam mit der Industrie (ACCEL Instr. GmbH) für den Betrieb in einem Speicherring weiterentwickelt.

Röntgenstrahlung aus Ablenkmagneten und Insertion Devices

Die meisten Beamlines bei ANKA nutzen die Röntgenstrahlung aus, die in den Ablenkmagneten erzeugt wird. Abb. 1 zeigt die prinzipielle geometrische Anordnung. Das Röntgenlicht wird in einem ganz engen Kegel mit dem Öffnungswinkel $2/\gamma$ abgestrahlt (γ ist das Verhältnis der Elektronenenergie zur Ruheenergie (511 keV)). Da die Elektronen-Energie bei

ANKA 2,5 GeV ist, ist der Öffnungswinkel ungefähr 0,4 mrad, also sehr klein. Dieser Kegel überstreicht wie ein Leuchtturmfeuer die fest installierte Probe.

Für viele Experimente ist die Zahl der Photonen, die aus einem Ablenkmagneten auf die Probe fallen, nicht ausreichend. Daher wurden so genannte Insertion Devices (Wiggler und Undulatoren) erfunden. Sie heißen deshalb Insertion Devices, weil sie zwischen zwei Ablenkmagneten installiert werden (inserted) und keine Nettoablenkung des Strahls hervorrufen. Die Wirkungsweise der Insertion Devices ist schematisch in Abb. 2 dargestellt.

Der Strahl wird durch die abwechselnden Magnetfelder über die Probe hin- und hergewedelt und beleuchtet somit für längere Zeit die Probe.

Die Parameter, die einen Undulator beschreiben, sind direkt aus Abb. 2 ersichtlich: die Periodenlänge und Spalthöhe (Abstand zwischen den beiden Undulatorhälften).

Der maximale Ablenkwinkel, den ein Elektron in einem Insertion Device erfährt, teilt die Insertion De-

vices in zwei Kategorien. Ist der Ablenkwinkel größer als der halbe Öffnungswinkel $1/\gamma$ des Abstrahlungskegels, spricht man von einem Wiggler, ist er gleich oder kleiner, von einem Undulator [1].

Diese Unterteilung hat eine fundamentale physikalische Bedeutung. Betrachtet man ein einzelnes Elektron, so überlagern sich in einem Undulator alle abgestrahlten Photonen. Sie können also interferieren. In dem Abstrahlungskegel sind alle Wellenlängen vertreten. Man würde also erwarten, dass sich einige Frequenzen durch Interferenz auslöschen und andere verstärken. Abb. 3 zeigt das gerechnete Spektrum eines solchen Undulators. Betrachtet man nur die Strahlung entlang der Undulatorachse, wird fast die gesamte Strahlung bis auf eine Linie (die Fundamentallinie) und deren ungeradzahlige Vielfache durch Interferenz ausgelöscht.

Der klassische Undulator aus Permanentmagneten

Der in Abb. 2 dargestellte Undulator ist wie fast alle bisher existierenden Undulatoren aus Permanentmagneten aufgebaut. Um die

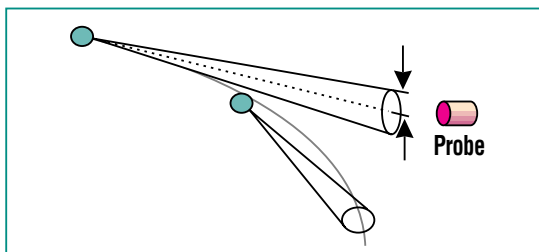


Abb. 1: Relativistische Elektronen in einem Ablenkmagneten senden in Vorwärtsrichtung einen eng begrenzten Kegel von Synchrotronstrahlung aus. Dieser Kegel überstreicht für einen kurzen Augenblick die Probe.

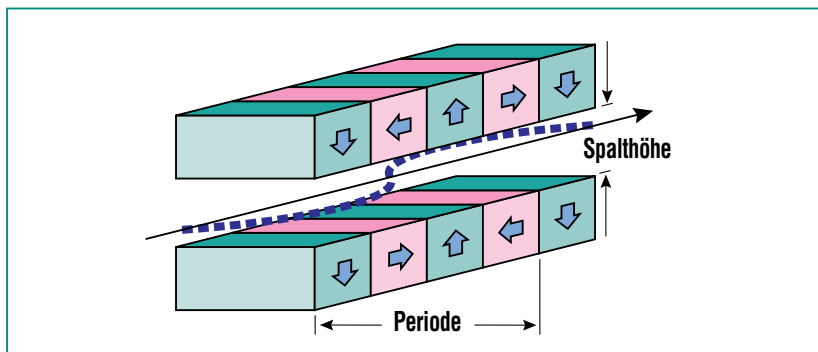


Abb. 2: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Insertion Devices. Der Strahl wird durch abwechselnde Felder auf eine sinusförmige Bahn gezwungen.

Position der Linien zu verändern, muss daher der Abstand der Undulatorhälften mechanisch verändert werden. Das ist eine mechanisch nicht ganz einfache Aufgabe, da die Permanentmagnete sich gegenseitig anziehen und damit auf das Gerät starke magnetische Kräfte wirken, die durch eine komplexe mechanische Struktur aufgefangen werden müssen.

Die maximale magnetische Feldstärke wird von den Materialeigenschaften der Permanentmagnete bestimmt. Deshalb wurde bei ANKA darüber nachgedacht, neuartige Undulatoren zu entwickeln, die den fundamentalen Nachteil, die mechanische Feldverstellung, nicht mehr haben und außerdem ein höheres Magnetfeld besitzen.

Entwicklung von supraleitenden Undulatoren bei ANKA

Es wurde daher vorgeschlagen, die Permanentmagnete durch su-

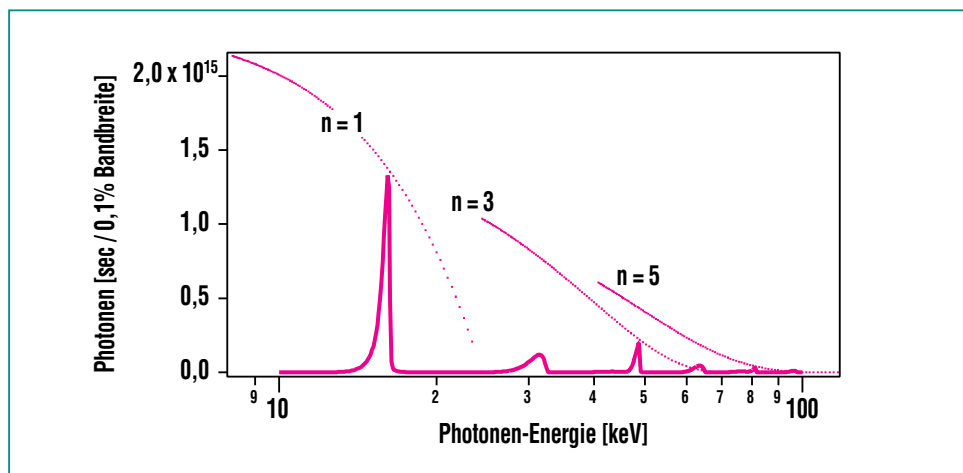


Abb. 3: Beispiel für ein Spektrum, das in einem Undulator erzeugt wird. Durch Interferenz der Strahlung entlang der Elektronenbahn werden im Wesentlichen nur Photonen einer Energie sowie deren ungeradzahlige Vielfache erzeugt. Die Position der Linie wird durch die Änderung der Magnetfeldstärke verschoben (entlang der gestrichelten Linie). Beim Verschieben ändert sich nicht nur die Energie sondern auch die Intensität.

praleitende Wicklungen zu ersetzen. Der Aufbau ist in Abb. 4 schematisch dargestellt. Die supraleitenden Drähte werden von hohen Strömen mit abwechselnder Stromrichtung durchflossen. Die hohen Ströme erzeugen ein starkes Magnetfeld, das nun auf den

Strahl wirkt. Die Stromrichtung ist durch die Pfeilrichtung beschrieben [2].

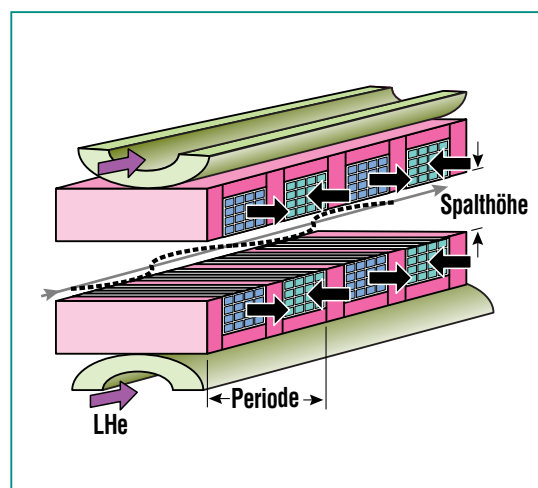


Abb. 5: In den Speicherring ANKA eingebauter supraleitender Undulator. Die Gesamtlänge in Strahlrichtung ist etwa 2,3 m. Der Undulator kann mit einer festen Spalthöhe von 8, 12 und 16 mm betrieben werden. Bei der Injektion wird die Spalthöhe automatisch auf 20 mm geöffnet. Die Periodenlänge ist 14 mm. Insgesamt besteht der Undulator aus 100 Perioden.

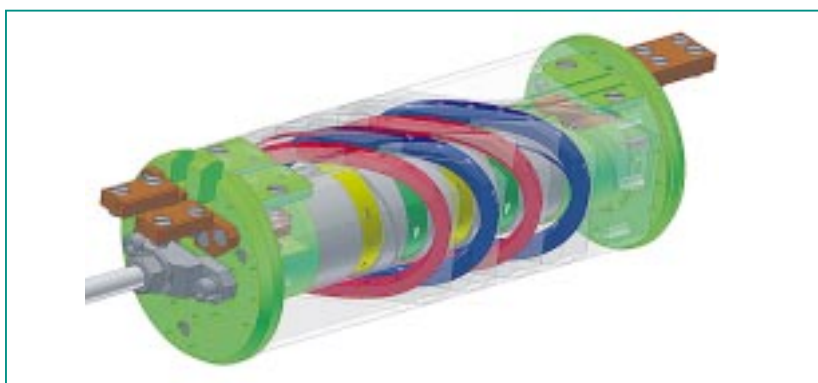


Abb. 4: Prinzip des von ANKA entwickelten supraleitenden Undulators. Die Permanentmagnete wurden durch supraleitende Drähte ersetzt, die von hohen Strömen (bis zu 1000 A pro Draht) mit abwechselnder Stromrichtung durchflossen werden. Der zwischen den Spulen befindliche Eisenkern dient zur Bündelung der Feldlinien. Der ganze Undulator wird entweder mit flüssigem Helium oder Kaltköpfen (sogenannten Cryocoolern) gekühlt.

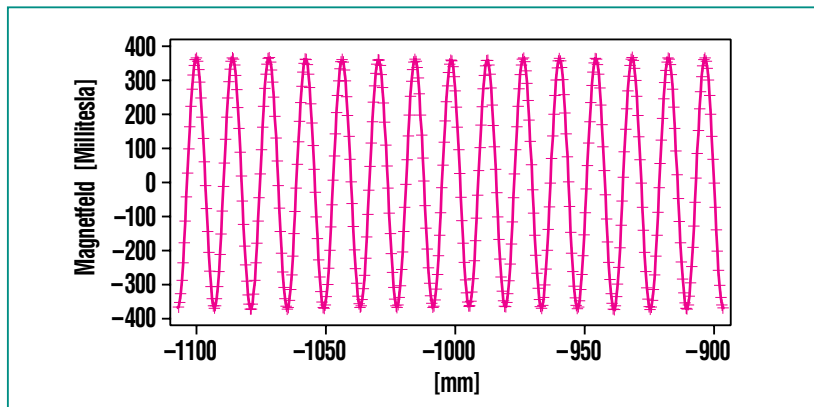


Abb. 6: Beispiel einer Feldmessung. Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus der Mitte des Undulators (mehrere Perioden von 100). Die Spalthöhe ist 8 mm, die Stromdichte 500 A/mm². Die Punkte markieren die mit einer Hall-Sonde gemessenen Punkte. Die Periodenlänge ist 14 mm.

Um eine hohe Feldstärke zu erzielen, müssen die supraleitenden Drähte dicht am Strahl angeordnet sein: die Kühlung muss indirekt erfolgen. Bei dem ersten vom Forschungszentrum Karlsruhe gebauten Modell (getestet am Mainzer Microtron MAMI [3]) erfolgte die Kühlung durch flüssiges Helium, bei dem zweiten in ANKA installierten und von der Firma ACCEL Instr. GmbH gebauten Gerät erfolgt die Kühlung durch Kontakt mit sogenannten Kaltköpfen oder Cryocoolern.

Das in ANKA eingebaute Gerät ist in Abb. 5 dargestellt [4].

Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt aus dem gemessenen Feld des Undulators.

Die weltweit ersten Strahltests mit supraleitenden Undulatoren bei ANKA

Ziel der Versuche mit Strahl war es, herauszufinden, wie sich der Undulator in einem Speicherring ver-

hält. Das größte Problem dabei liegt in der Tatsache, dass der Strahl und die 4 Grad kalte Oberfläche nur wenige Millimeter voneinander entfernt sind. Der Strahl kann diese Oberfläche auf vielfache Weise erwärmen:

a.) Synchrotronlicht, das von einem vor dem Undulator liegenden Ablenkmagneten er-

zeugt wird, fällt auf die 4 Grad Kelvin kalte Oberfläche und wird dort zumindest teilweise absorbiert und erwärmt sie. Um das zu verhindern, wurde ein ausgeklügeltes Kollimatorsystem vor dem Undulator installiert, das verhindert, dass Strahlung von außen auf die kalten Oberflächen gelangt.

b.) Synchrotronlicht, das im Undulator selbst erzeugt wird, kann die Oberfläche erwärmen.

c.) Der durch den Undulator fliegende Elektronenstrahl erzeugt im Undulator Spiegelströme, die den Undulator erwärmen.

d.) Es ist bekannt, dass der Strahl durch Synchrotronlicht außerhalb des Undulators die Vakuumkammer um einige Grad erwärmt. Durch Wärmetransport dringt die Wärme in den Undulator.

Die Berechnung dieser Effekte ist schwierig, da nahe dem absoluten Nullpunkt die physikalischen Ei-

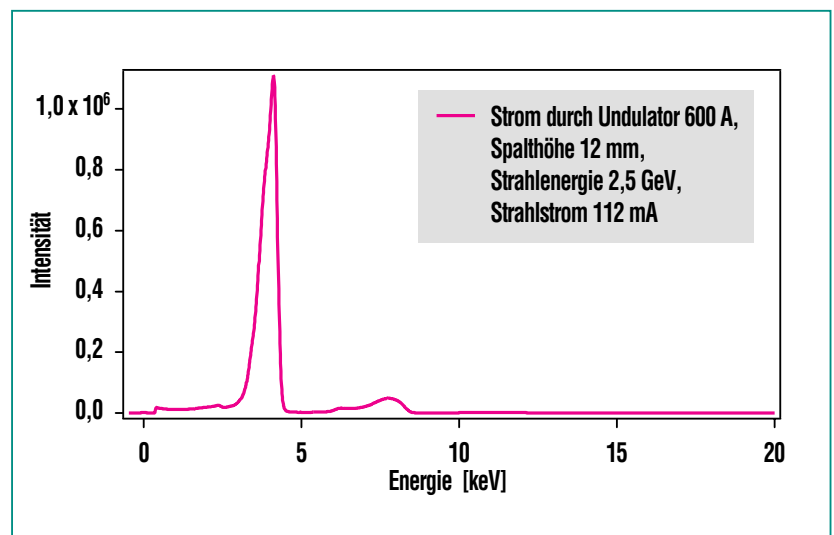


Abb. 7: Erstes mit dem supraleitenden Undulator bei ANKA aufgenommenes Spektrum (Periodenlänge 14 mm, Strahlenergie 2,5 GeV).

igenschaften der Materie wie der Wärmetransport anders ablaufen als bei Raumtemperatur. So ist zum Beispiel der Effekt der Hochfrequenz-Spiegelströme bei niedrigen Temperaturen kaum untersucht, sodass das Design eines solchen Gerätes mit Risiken verbunden ist.

Die Messungen an ANKA zeigten jedoch, dass die oben beschriebenen Effekte richtig abgeschätzt wurden und dass ein solches System tatsächlich funktioniert. Abb. 7 zeigt ein erstes gemessenes Spektrum und man kann erkennen, dass es mit den theoretischen Vorhersagen, wie sie in Abb. 3 gezeigt wurden, recht gut übereinstimmt.

Zukünftige Entwicklungen bei ANKA

Nach den ersten erfolgreichen Funktionstests dieses Geräts wird

darin gedacht, mehrere supraleitende Undulatoren in ANKA einzusetzen. Mit diesen neuen Undulatoren soll ein weiterer Bereich von Anwendungen abgedeckt werden. Dabei will man die Tatsache ausnutzen, dass die Eigenschaften der emittierten Strahlung bei supraleitenden Undulatoren elektrisch verstellt werden können. Das Konzept zielt darauf ab, den Polarisationsvektor des Lichtes elektrisch zu verändern: je nach Einstellung kann man durch elektrisches Umschalten zum Beispiel links- oder rechtshändig zirkular polarisiertes Licht erzeugen oder aber die Periodenlänge des Undulators in Stufen verändern.

Abb. 8 zeigt eine von mehreren möglichen Bauformen, wie man die Polarisationsrichtung elektrisch verstellen kann. Im Prinzip handelt es sich um zwei unabhängige Undulatoren, die ineinander geschachtelt sind. Der eine ist rela-

tiv zu dem anderen geneigt. Die geneigte Wicklung erzeugt sowohl ein horizontales wie auch ein vertikales Feld, die andere Wicklung aber nur ein vertikales Feld. Durch Veränderung der Stärke der Ströme kann man die Polarisationsrichtung des Lichtes einstellen [5].

Die Herstellung von helischen Wicklungen erfordert neue Fertigungsmethoden. Um diese auszuprobieren und zu optimieren, wurde am Institut für technische Physik des Forschungszentrums Karlsruhe ein erster kurzer Prototyp entwickelt und getestet (Abb. 9).

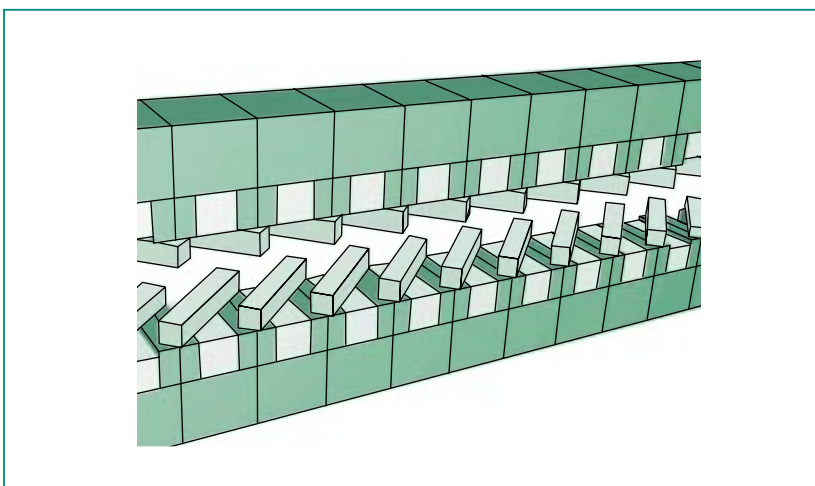


Abb. 8: Schematische Darstellung des geplanten supraleitenden Undulators für ANKA, bei dem man nicht nur die Wellenlänge sondern auch die Polarisationsrichtung des Lichtes einstellen kann. Der Undulator besteht aus zwei Teilundulatoren, wobei einer sowohl horizontale als auch vertikale Magnetfelder erzeugt, der zweite nur vertikale. Durch Wahl der Feldstärken wird die für das Experiment gewünschte Polarisationsrichtung eingestellt.

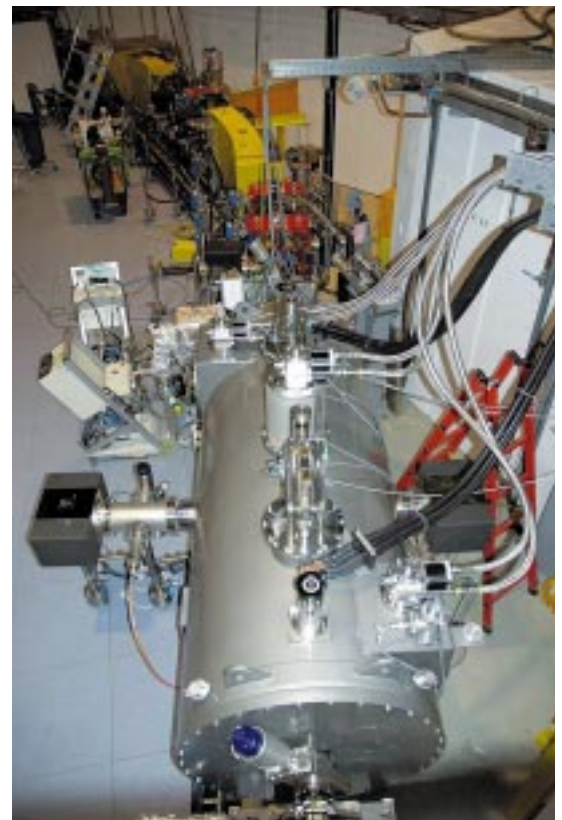


Abb. 9: Erster in einem Heliumbad getesteter Undulator Testaufbau (gezeigt ist eine Hälfte des Undulators), der zu einem helischen Undulator mit variabler Polarisationsrichtung weiterentwickelt und in ANKA eingebaut werden soll.

In ANKA soll später ein weiterer supraleitender Undulator eingebaut werden, bei dem die Periodenlänge in Stufen elektrisch verändert werden kann. Das hat den Vorteil, dass man die abgestrahlte Photonenenergie über einen weiten Bereich variieren kann.

Zusammenfassend kann gesagt werden: im Forschungszentrum Karlsruhe wurde der erste supraleitende Undulator mit kurzer Periode entwickelt und erfolgreich getestet.

Zukünftige Entwicklungen weltweit

Dies ist jedoch aller Voraussicht nach nur der erste Schritt einer weitergehenden internationalen Entwicklung [6]. Experten vom Berkeley National Lab haben bereits darauf hingewiesen, dass für den Bau von supraleitenden Undulatoren andere supraleitende Materialien besser geeignet sind als die hier verwendeten NbTi-Drähte. Es wurde vorgeschlagen, Nb₃Sn-Supraleiter zu verwenden und ein erster Prototyp wurde in Berkeley gebaut und (ohne Strahl) getestet.

Dieses Konzept wird derzeit auch beim amerikanischen Hochfeldlabor in Tallahassee weiter verfeinert. Sowohl das Brookhaven National Lab und Argonne National Lab begannen ebenfalls Entwicklungen auf diesem Gebiet. Die European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble baut gemeinsam mit der Industrie im Rahmen eines EU-Programms einen supraleitenden Undulator. Es wird interessant sein, zu beobachten, wie sich die Idee des supraleitenden Undulators in den nächsten Jahren weltweit weiterentwickeln wird.

Literatur

- [1] H. Onuki, P. Elleaume (editors), *Undulators, Wigglers and their Application*, Taylor and Francis 2003
- [2] H.O. Moser, R. Rossmanith, *Nucl. Instr. Meth, A*, 490(403)2002
- [3] T. Hezel et al., *Proc. PAC 1999, New York 2002*, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p99/PAPERS/TUAR5.PDF>
- [4] A. Geisler et al., *Proc. PAC 2002, Paris* <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e02/PAPERS/TUPLE040.pdf> PAC 2002
- [5] A. Bernhard et al., *IEEE Trans. On Applied Superconductivity*, Vol.15, No. 2 (2005), p. 1228
- [6] *siehe Proc. WUS 2005, DESY June 2005* <http://www.desy.de/wus2005/>