

Das harmonische doppelseitige Mikrotron – Die neue, vierte Beschleunigerstufe des Mainzer Mikrotrons

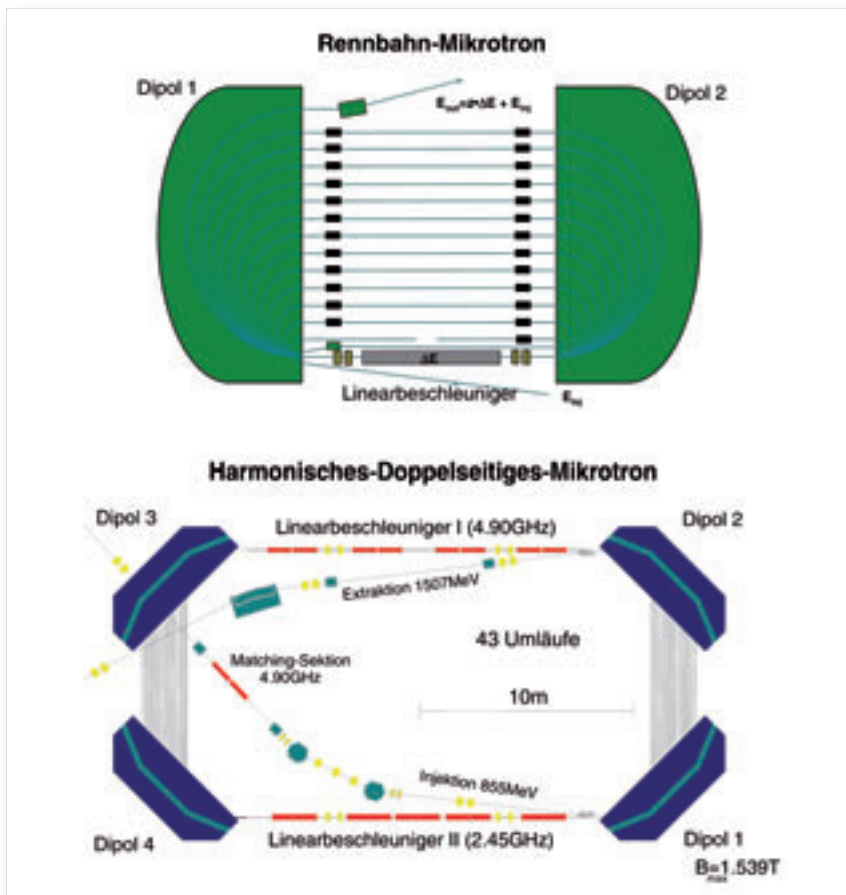
Von Andreas Jankowiak

Ein Juwel in der Forschungslandschaft: Der Mainzer Elektronenbeschleuniger zieht Wissenschaftler aus der ganzen Welt an.

In sechsjähriger Bauzeit hat der Mainzer Elektronenbeschleuniger, das „Mainzer Mikrotron“ (MAMI), für rund 12,5 Millionen Euro eine neue, vierte Stufe erhalten: ein harmonisches doppelseitiges Mikrotron (HDSM). Am 19. Dezember 2006 konnte die neue Anlage erstmals in Betrieb gesetzt werden, die Energie des Teilchenstrahls wird damit von bisher 855 auf 1.508 Megaelektronenvolt (MeV) nahezu verdoppelt. Nach nur zwei Wochen Testbetrieb konnte Anfang 2007 bereits mit dem normalen Experimentierbetrieb rund um die Uhr begonnen werden. Dieser schnelle Erfolg bei der Inbetriebnahme der vierten Stufe war nur möglich, weil das Institut für Kernphysik über mehr als 40 Jahre Erfahrung in der Entwicklung und im Betrieb von Elektronenbeschleunigeranlagen verfügt. Die neue Konstruktion ist so angelegt, dass die bisher außerordentlich hochwertige Strahlqualität erhalten bleibt. Damit können die Kernphysiker, die für ihre Forschungen aus aller Welt ans Mainzer Mikrotron kommen, künftig noch tiefer ins Innere der Materie blicken. So können mit der vierten Beschleunigerstufe, MAMI C genannt, weitere Teilchen erzeugt und erforscht werden.

Bereits Mitte der 60er-Jahre haben die Kernphysiker in Mainz einen gepulsten Linearbeschleuniger für 350 MeV Maximalenergie in Betrieb genommen. Da zu dieser Zeit weltweit mehrere ähnliche Anlagen entstanden, konnte der Beschleuniger damals von einem Generalauftragnehmer quasi „schlüsselfertig“ gekauft werden. Schnell war jedoch klar, dass man den wachsenden Anforderungen der Experimentatoren an die Strahlqualität (Energieschärfe, maximaler Strahlstrom, zeitliche und räumliche Stabilität des Strahls) nur gerecht werden kann, wenn man über entsprechendes eigenes Know-how verfügt. So wurde unter der Leitung von Helmut Herminghaus eine Beschleunigerphysik-Abteilung gegründet. In den 70er-Jahren zeigte sich, dass ein weiterer Erkenntnisgewinn in der Kernphysik nur über sogenannte Koinzidenzexperimente zu erreichen ist. D.h. es müssen zwei oder mehr Reaktionsprodukte, die beim Zusammenprall eines Elektrons mit einem Nukleon entstehen, gleichzeitig nachgewiesen werden. Mit dem vorhandenen Linearbeschleuniger, der nur ganz kurze Elektronenpulse aussendet, war dies nicht möglich. Daher musste ein neues Konzept gefunden werden, um einen kontinuierlichen Elektronenstrom bei gleichzeitig hoher Energie zu erzeugen. Dabei gilt: je kleiner die Teilchen, desto größer die notwendige Energie. Bei einem Nukleon mit einer Größe von ca. 10^{-15} Meter sind daher Elektronenenergien von vielen Hundert Megaelektronenvolt nötig. Die Beschleunigung der Teilchen, die am Ende der Beschleunigungsstrecke auf ein Zielobjekt geschossen werden, findet in elektromagnetischen Wechselfeldern statt. Dazu werden die Elektronen zum richtigen Zeitpunkt in einen geeignet geformten Wellenleiter eingespeist, wo sie zu Paketen gebündelt auf den Wellenbergen einer geführten elektromagnetischen Welle reiten. Die Elektronen bewegen sich mit dieser Welle mit, erfahren dabei ständig ein positives elektrisches Feld und nehmen kontinuierlich über die Länge der Beschleunigerstruktur Energie auf. Eine solche Strecke ist in der „alten“ Anlage MAMI B ca. 2 Meter lang, wird bei einer Frequenz von 2,45 Gigahertz (GHz) – der klassischen Mikrowellenfrequenz – betrieben und mit einer Mikrowellenleistung von 25 Kilowatt gespeist. Damit kann einer kontinuierlichen Kette von Elektronenpaketen, die im Abstand der Wellenlänge der Mikrowelle fliegen – das sind in unserem Fall 12,2 Zentimeter –, eine Energie von ca. 1,9 MeV zugeführt werden.

Abb. 1: Schematische Darstellung eines Rennbahn-Mikrotrons (oben) sowie des harmonischen doppelseitigen Mikrotrons



Um höhere Energien zu erzielen, könnte man mit vielen dieser Sektionen einen langen Linearbeschleuniger bauen. Für eine Energie von 855 MeV wären dazu auf einer Länge von etwa einem Kilometer 450 Sektionen und eine Mikrowellenleistung von mehr als 11 Megawatt notwendig – eine sehr unökonomische und auch unelegante Lösung. Es wurde daher ein anderer Weg beschritten: Vor und hinter einem kurzen Linearbeschleuniger (Linac) werden zwei 180°-Umlenkmagnete aufgestellt (siehe Abb. 1). In den Magnetfeldern dieser Dipolmagnete werden die Elektronen auf Kreisbahnen gezwungen, deren Radius mit der Energie schrittweise zunimmt. Werden das Magnetfeld und der Energiegewinn so eingestellt, dass sich von Umlauf zu Umlauf die Bahnlänge gerade um eine Wellenlänge erhöht, dann können die Elektronen in mehreren Umläufen den gleichen Linac durchlaufen und dabei ein Mehrfaches an Energie gewinnen – bei fünf Umläufen zum Beispiel das Fünffache an Energie. Ein solcher Beschleuniger nennt sich, wegen der charakteristischen Form der Elektronenbahnen, Rennbahn-Mikrotron (RTM). 1979 wurde ein erstes, noch recht kompaktes RTM mit zwei 1,3 Tonnen schweren Dipolen und einer Grundfläche von rund 10 Quadratmetern in Betrieb gesetzt. Das Rennbahn-Mikrotron beschleunigte in 18 Umläufen auf 15 MeV Elektronenenergie. Es zeigte sich, dass aufgrund der exzellenten Strahlqualität und Betriebsstabilität einer solchen Anlage das richtige Konzept verfolgt wurde. In den nächsten 10 Jahren wurden mit Mitteln der Hochschulbauförderung und mit personeller Unterstützung durch einen Sonderforschungsbereich zwei weitere Rennbahn-Mikrotrone hinzugefügt. 1990 konnte mit MAMI B das letzte und größte dieser RTM in Betrieb gesetzt werden. In zwei je 450 Tonnen schweren Dipolen mit einem Magnetfeld von 1,28 Tesla – ein Magnetfeld 25.000 Mal stärker als das der Erde – werden die Elektronen in 90 Umläufen von 180 MeV auf bis zu 883 MeV beschleunigt. Bei einem maxi-

malen Strahlstrom von 100 Mikroampere bedeutet dies eine Strahlleistung von 88.000 Watt in einem Strahl, dessen Durchmesser wenige zehntel Millimeter beträgt. Dieser Strahl wird in Vakuumröhren durch ein verzweigtes System von Strahlführungen, bestehend aus Dipolmagneten zur Ablenkung und Quadrupolmagneten zur Fokussierung, zu den vier Experimentierplätzen geführt (siehe Abb. 2).

Seit 1990 wird der Mainzer Beschleuniger ca. 6.500 Stunden im Jahr für Experimente genutzt. In dieser Zeit – die Betriebsleitung war Anfang der 90er-Jahre an Karl-Heinz Kaiser übergegangen – wurde kontinuierlich an der Verbesserung der Strahleigenschaften gearbeitet. Aufgrund der hervorragenden Strahlqualität, so kann z.B. die Energie des Elektronenstrahls auf 0,001 Promille stabilisiert werden, und der hohen Verfügbarkeit hat sich MAMI als führende Anlage in diesem Energiebereich etabliert und wird im Rahmen der vier großen Experiment-Kollaborationen des Instituts von Wissenschaftlern aus aller Welt genutzt.

1999 wurde der neue SFB 443 „Vielkörperstruktur stark wechselwirkender Systeme“ gegründet, für dessen Forschungsprogramm die Erhöhung der MAMI-Energie auf ca. 1.500 MeV notwendig wurde. Wesentliche Rahmenbedingungen für dieses Vorhaben waren, dass aufgrund der hohen Investitionskosten keine neuen Gebäude für den Beschleuniger gebaut werden, die Strahlqualität und

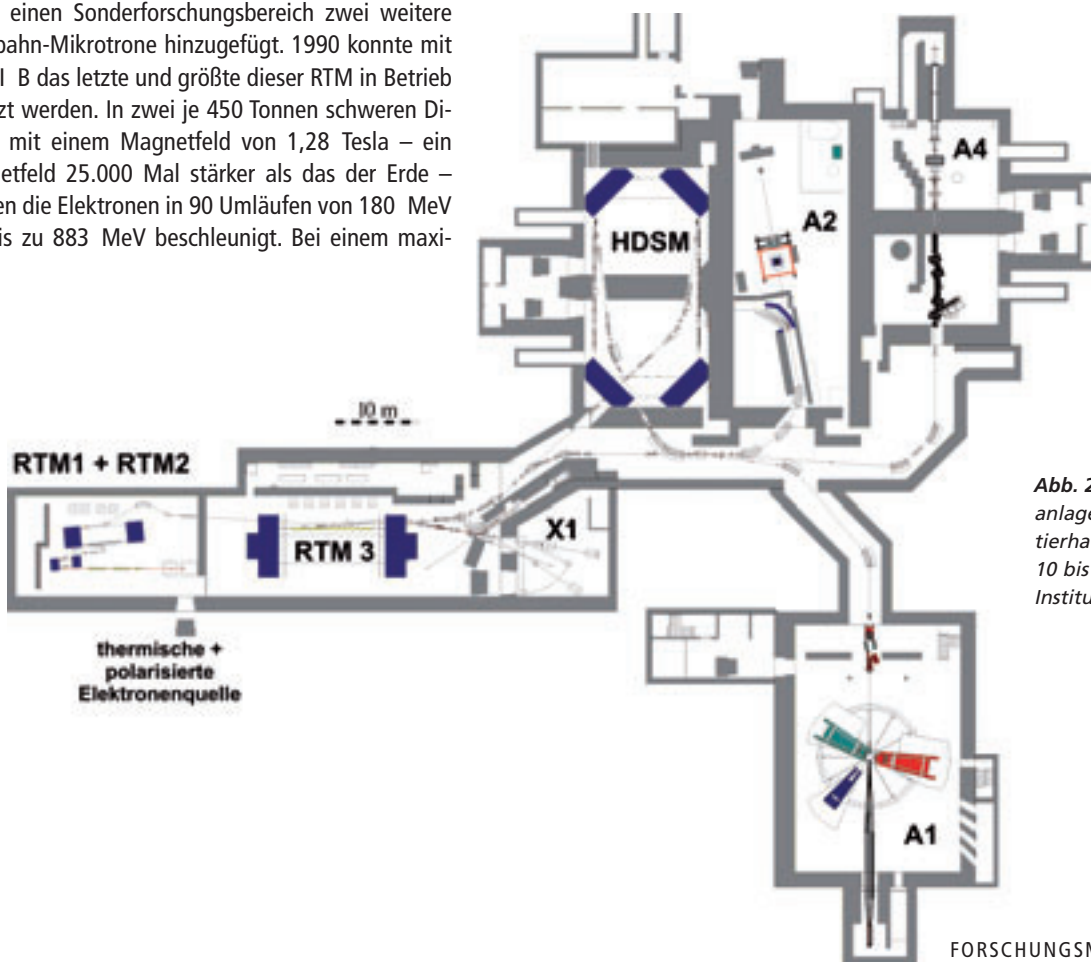


Abb. 2: Grundriss der Beschleunigeranlage MAMI sowie der Experimentierhallen. Alle Hallen liegen in ca. 10 bis 15 Meter Tiefe unter dem Institutsgelände.

die Verfügbarkeit der Beschleunigeranlagen erhalten bleiben und der Betrieb der bestehenden Anlage während der Bau- und Inbetriebnahmephase möglichst wenig beeinträchtigt wird. Vorstudien hatten gezeigt, dass man diese Ziele am effizientesten erreicht, wenn man die im Institut vorhandene Expertise für Entwicklung und Bau von hochpräzisen Elektromagneten und normalleitenden Linearbeschleunigersektionen nutzt.

Als vierte Stufe kam ein weiteres Rennbahn-Mikrotron nicht in Frage: Bei festem Magnetfeld skaliert das Gewicht eines solchen 180°-Dipols mit der dritten Potenz der zu erreichenden maximalen Energie. Eine Erhöhung von 855 MeV auf 1.500 MeV hätte Dipole eines Gewichts von mehr als 2.000 Tonnen erfordert. Die Lösung wurde unter Verwendung eines Konzeptes gefunden, das Karl-Heinz Kaiser bereits in den 70er-Jahren skizziert hatte, das damals aber als zu ambitioniert – man verfügte noch nicht über die notwendigen Simulationsprogramme zur Untersuchung der Magnetfelder und der Strahldynamik – in der Schublade bleiben musste: das doppelseitige Mikrotron (DSM). Jeder der 180°-Ablenkdiplane wird dabei durch je zwei 90°-Dipole ersetzt. Da nun nur noch ein kleineres Kreissegment durch die Magnete abgedeckt werden muss, kann ein Großteil des Magnetgewichts gespart werden. Für das 1.500-MeV-DSM benötigt man vier Ablenkdiplane zu je 250 Tonnen. Diese definieren zwei gemeinsame Strahlachsen, auf denen zwei Linearbeschleuniger installiert werden können (siehe Abb. 1). In 43 Umläufen durch diese Anlage wird der Elektronenstrahl von 855 MeV auf 1.500 MeV beschleunigt (siehe Abb. 3). Im Detail gibt es im Wesentlichen zwei Besonderheiten zu beachten:

1. Auch im DSM muss die Bahnlänge von Umlauf zu Umlauf um ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge anwachsen. Wegen der zwei Linacs

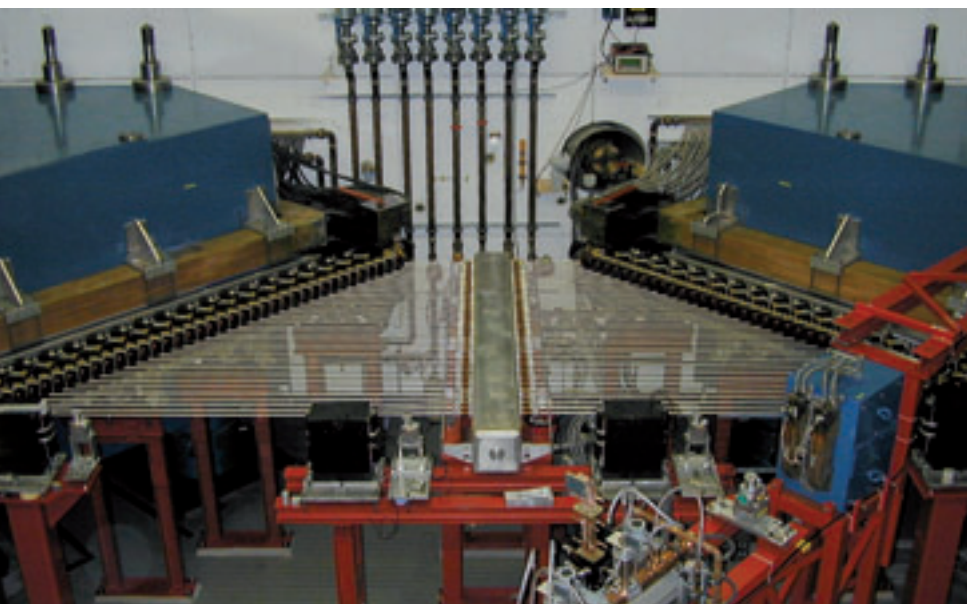
beträgt die minimal mögliche Bahnverlängerung jedoch zwei ganze Wellenlängen. Berechnet man den dazu notwendigen Energiegewinn pro Umlauf, erhält man einen Wert von ca. 40 MeV. Da mit nicht gepulsten, normalleitenden Linacstrukturen nur ca. 1 MeV pro Meter realisierbar ist, hätte jeder Linac mindestens 20 Meter lang sein müssen. Dazu reichte jedoch der verfügbare Platz nicht aus. Da der notwendige Energiegewinn aber proportional zur Wellenlänge des Hochfrequenzsystems ist, konnte das Problem gelöst werden, indem mit der doppelten MAMI-Frequenz von 4,90 GHz (halbe Wellenlänge) gearbeitet wurde. Als Konsequenz musste im Institut ein weltweit bisher nie realisiertes Hochleistungs-Hochfrequenzsystem mit entsprechenden Linearbeschleunigerstrukturen für 4,90 GHz entwickelt werden.

2. Der Ein- und Austritt des Elektronenstrahls unter 45° in die Ablenkdiplane führt im Randfeld des Magneten, in dem die Feldlinien nach außen gekrümmt sind, zu einer vertikalen Defokussierung des Elektronenstrahls, das heißt er wird aufgeweitet. Dieser Effekt kann durch im Magneten entgegengesetzt gekrümmte Feldlinien kompensiert werden. Zu erreichen ist dies durch ein Gradientenfeld, bei dem innerhalb der Dipole das Magnetfeld senkrecht zur Polschuhkante abnimmt. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wurde dieser Gradient so angepasst, dass für alle Energien eine Parallel-zu-parallel-Abbildung erreicht wird und die Magnete somit wie eine feldfreie Driftstrecke wirken.

Der 2. Punkt führt allerdings zu einer weiteren Komplikation: Da nun das Feld in der Tiefe des Magneten abnimmt, benötigen die Elektronenpakete mit wachsender Energie einen stetig kleiner werdenden Energiegewinn von Umlauf zu Umlauf, um die konstante Bahnlängenänderung von zwei Wellenlängen zu erreichen. Da jedoch der Beschleunigungsprozess in einem solchen Rezipulator selbststabilisierend ist, passen sich die Elektronen von Umlauf zu Umlauf zeitlich so auf der Hochfrequenzwelle an, dass sich der notwendige Energiegewinn automatisch einstellt. Computersimulationen zeigten dann, dass der Beschleunigungsvorgang stabiler stattfindet und die Parameter des Elektronenstrahls, insbesondere dessen Energieschärfe, verbessert werden können, wenn einer der Linearbeschleuniger wieder mit 2,45 GHz betrieben wird. Diese Erkenntnis führte zur Realisierung der vierten Stufe als harmonisches doppelseitiges Mikrotron (HDSM).

Im Jahr 2000 konnte mit der Beschaffung der Komponenten für das HDSM begonnen werden. Wie bereits bei der Realisierung von MAMI B wurden alle wesentlichen Komponenten im Institut für Kernphysik entwickelt und dann von der Industrie in enger Zusammenarbeit mit dem Institut hergestellt. Teilweise, wie z.B. bei den 4,90-GHz-Sektionen, wur-

Abb. 3: Dargestellt sind die 43 Rückführungsbahnen zwischen zwei der großen 90°-Ablenkdiplane des HDSM. Der 855-MeV-Strahl läuft durch die vorderste Bahn. Mit dem Energiegewinn jedes Umlaufs tritt er dann in die nächste weiter außen liegende Bahn ein, bis er 1.508 MeV erreicht hat und zu den Experimentierplätzen geführt werden kann.



den zuerst voll funktionsfähige Prototypen im Institut gebaut und erprobt, bevor die Serienfertigung begann. Nur so konnte für die Firmen das Risiko bei der Herstellung dieser Sonderanfertigungen beschränkt und die Herstellung bezahlbar gemacht werden. Die vier großen, 250 Tonnen schweren 90°-Magnete wurden bei SFAR Steel in Frankreich hergestellt und dann Ende 2002 geliefert und installiert. Hierbei ist eine Präzision von weniger als einem zehntel Millimeter in der Justage notwendig. Das Magnetfeld jedes Magneten wurde individuell vermessen. Es wurden flächige Korrekturspulen, zwei für jeden Magneten, entworfen und gebaut, die es erlauben, die Magnetfelder mit einer relativen Genauigkeit in Bezug auf den idealen Feldgradienten von 0,1 Promille zu korrigieren. Dieser Prozess, einschließlich des finalen Einbaus der Korrekturspulen und der großen Vakuummagneten, konnte im März 2006 abgeschlossen werden. In anderen Bereichen gab es unerwartet Verzögerungen: So benötigte der Hersteller der 4,90-GHz-Hochleistungs-Mikrowellenverstärker (sogenannte Klystrone) 10 Prototypen und mehr als 20 Monate, bevor das erste Gerät ausgeliefert werden konnte, das vor Ort schon längst dringend für weitere Tests von Prototyp-Komponenten benötigt worden wäre. Letztlich wurde die Anlage mit nur etwa einem Jahr Verzögerung Mitte Dezember 2006 fertiggestellt. Innerhalb von einem Tag Strahlbetrieb konnte der 855-MeV-Elektronenstrahl durch die 43 Umläufe gefädelt und auf 1.508 MeV beschleunigt werden. Dies im wortwörtlichen Sinn, da mit Hilfe kleiner Korrekturmagnete auf jeder Rückführungsbahn der Strahl Umlauf für Umlauf durch die Mitte der Linearbeschleuniger gelenkt wird. Dabei steht dem Strahl in den 43 Umläufen mit einer Wegstrecke von insgesamt 2.900 Meter nur ein Vakuumrohr mit ca. 12 Millimeter Durchmesser zur Verfügung. Wenn alles richtig eingestellt ist, geht von einer Million gestarteten Elektronen nur eines auf dem Weg durch den Beschleuniger verloren. Ende Februar 2007 konnte bereits die erste Experimentierstrahlzeit über 10 Tage, 24 Stunden am Tag, bei 1.508 MeV durchgeführt werden. Die Ergebnisse wurden bereits zur Veröffentlichung eingereicht. Mit MAMI C steht nun den Kernphysikern eine weltweit einmalige Beschleunigeranlage mit einer Energie von 1.508 MeV für die Grundlagenforschung zur Verfügung. Den Lehrbüchern der Beschleunigerphysik kann damit ein neuer Beschleunigertyp, das harmonische doppelseitige Mikrotron, hinzugefügt werden.

Zu den bisherigen Höhepunkten der Forschung an MAMI gehören u.a. Präzisionsmessungen zur Struktur der Nukleonen und leichten Atomkerne, neue Aussagen über die Ladungsverteilung im Neutron, Messungen des Strangeness-Anteils im Proton sowie die Polarisierbarkeit des aus einem Quark und einem Antiquark aufgebauten Pions. Mit MAMI C können künftig weitere Teilchen erforscht werden, vor allem die schweren Mesonen und

Hyperonen, die ein „strange quark“ enthalten. Davon erwarten Wissenschaftler neue Erkenntnisse über die Struktur der Kernbausteine und der darin wirkenden fundamentalen starken Kräfte.

■ Summary

On 19th December 2006 the worldwide first Harmonic Double Sided Microtron (HDSM) came into operation. As the new fourth stage of MAMI (Mainzer Mikrotron), it accelerates a continuous beam of electrons from 855 MeV to 1508 MeV. After only two weeks of commissioning from end of February on it serves for routine "24 h a day" nuclear physics data taking runs. Here a brief history of the accelerator development at the Institut für Kernphysik is given and the working principle of the HDSM is described.



Dr. Andreas Jankowiak

Andreas Jankowiak, geboren 1967, studierte Physik an der Universität Dortmund und fertigte seine Diplomarbeit sowie die Doktorarbeit im Jahr 2000 am dortigen Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, dem heutigen Zentrum für Synchrotronstrahlung, an. In dieser Zeit wirkte er bei Bau- und Inbetriebnahme des Elektronenspeicherrings DELTA als Verantwortlicher für die Strahl diagnose- und Hochfrequenzsysteme mit. 2000 wechselte er in die Beschleunigergruppe des Instituts für Kernphysik der Universität Mainz. Seit 2005 ist er Projektleiter „Bau und Inbetriebnahme von MAMI C“ des SFB 443 und Leiter der für Betrieb und Weiterentwicklung der Beschleunigeranlagen verantwortlichen Arbeitsgruppe.

■ Kontakt

Dr. Andreas Jankowiak
 Institut für Kernphysik
 Johannes Gutenberg-Universität Mainz
 Johann-Joachim-Becher-Weg 45
 55128 Mainz
 Tel. +49 (0) 6131 39-26004
 Fax +49 (0) 6131 39-22964
 E-Mail : janko@kph.uni-mainz.de
<http://www.kph.uni-mainz.de/>