

Der Injektor der Speicherringanlage ANKA

D. Einfeld, M. Pont, FGS

Einleitung

Im Speicherring von ANKA soll zur Erzeugung der gewünschten Synchrotronstrahlung ein 400-mA-Elektronenstrahl bei einer Energie von 2.5 GeV gespeichert werden und seine Lebensdauer sollte mehrere Stunden betragen [1]. Diese Parameter werden in mehreren Stufen erreicht. Die vor dem eigentlichen Speicherring liegenden Stufen werden zusammenfassend als „Injektor“ bezeichnet. Der Injektor liefert Elektronenpulse von 500 MeV und 4 bis 8 mA an den Speicherring, in

dem dann eine Stromakkumulation und die Beschleunigung auf die genannte Endenergie von 2.5 GeV erfolgt [2]. Der Injektor selbst besteht wiederum aus zwei Stufen, dem Vorbeschleuniger, mit dem 53 MeV erreicht werden, und einem sogenannten Booster-Synchrotron. Zwischen den einzelnen Beschleunigungsstufen wird der Elektronenstrahl über Transferwegen geführt, auf denen die Strahlparameter geeignet an die nächste Stufe angepasst werden. Abb. 1 zeigt ein schematischer Aufbau des Injektors.

Im folgenden sollen die Komponenten des Injektors näher beschrieben werden.

Der Vorbeschleuniger des Injektors

Die Elektronenkanone und das Mikrotron bilden als eine Einheit den sogenannten Vorbeschleuniger des Injektors. Die Elektronenkanone erzeugt durch Aufheizen der Kathode den Elektronenstrahl mit einer Impulsdauer von 5 μ s. Die Elektronenkanone ist auf-

gebaut aus einer sphärischen „Pierce Gun“ mit einer BaO-Kathode. In der Elektronenkanone werden die Elektronen auf 70 keV beschleunigt. Von der Elektronenkanone gelangt der Strahl über den ersten Transferweg in das Mikrotron. Der Transferweg beinhaltet im wesentlichen einen fokussierenden Quadrupol und mehrere Solenoidspulen zum Fokussieren des Strahles.

Ein Mikrotron [3] (siehe Abb. 2) besteht im allgemeinen aus einem Hochfrequenz – Resonator zur Beschleunigung und einem Magneten zur Ablenkung des Strahles. Der Elektronenstrahl wird durch den Magnet so abgelenkt, dass er mehrmals durch die Beschleunigungsstruktur (Resonator) durchläuft.

Besitzt der Magnet eine homogene magnetische Flussdichte, so durchläuft der Elektronenstrahl eine Kreisbahn mit dem Radius:

$$\rho \text{ [m]} = \frac{3.3356 E \text{ [GeV]}}{B \text{ [T]}}$$

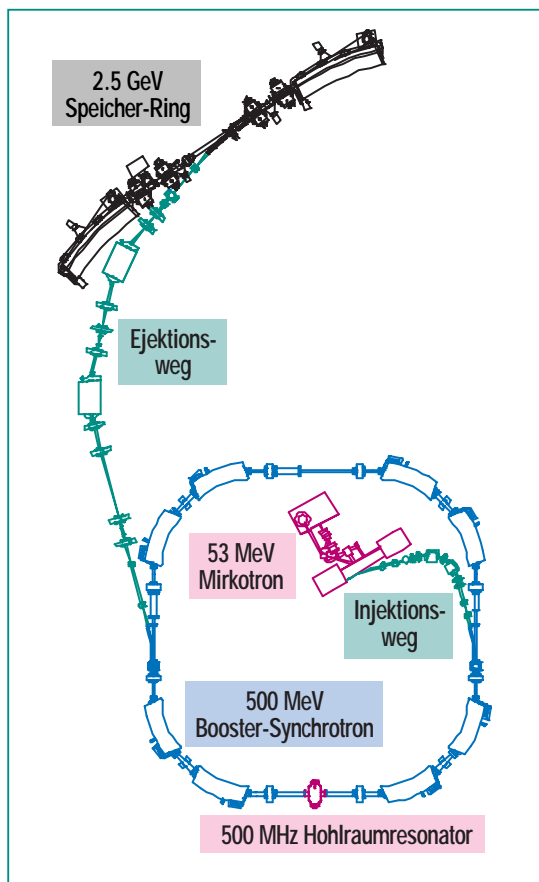


Abb. 1: Schematischer Aufbau des ANKA-Injektors, eingezeichnet sind das Mikrotron, der Injektionsweg, das Booster-Synchrotron und der Ejektionsweg.

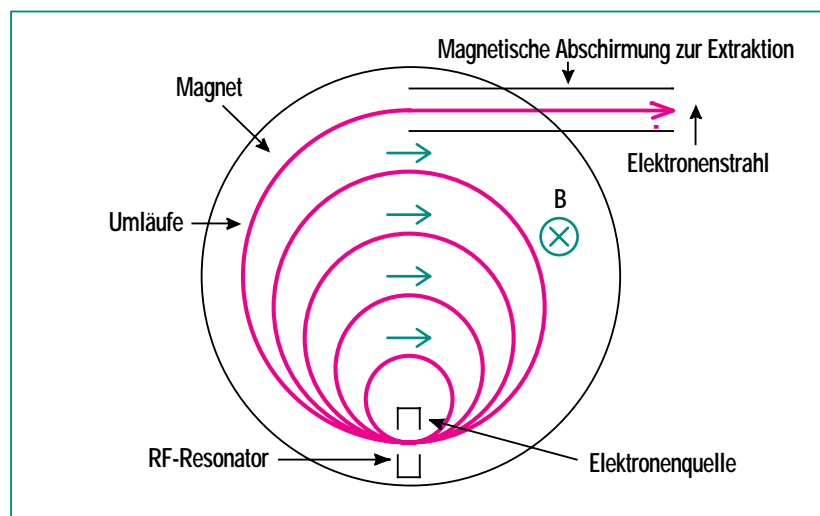


Abb. 2: Typisches Mikrotron

Entsprechend dieser Formeln bestimmt die Größe des Magneten die Endenergie des Elektronenstrahls. Um die Endenergie zu vergrößern, wird bei dem Race-track-Mikrotron der Resonator durch einen kurzen Linearbeschleuniger ersetzt und der Magnet wird in zwei 180° Magnete aufgeteilt. Eine solche Anordnung wird bei ANKA genutzt [4] (siehe Abb. 3). Der Linearbeschleuniger ist vom Los-Alamos-Typ (seitengekoppelt) und beschleunigt mit stehenden Wellen. Er lässt somit eine Beschleunigung in beiden Richtungen zu.

Nach dem ersten Durchgang durch den Linearbeschleuniger beträgt die Energie der Elektronen 5,3 MeV und die Elektronengeschwindigkeit ist nur 0,5% kleiner als die Lichtgeschwindigkeit. Die Richtung des Elektronenstrahls wird nach dem ersten Durchlauf mit Hilfe von zwei kleinen Dipolmagneten und einem der beiden Hauptdipole umgekehrt und der Strahl wird in den Linearbeschleuniger zurückgeschickt. Nach dem zweiten Durchlauf im Linearbeschleuniger beträgt die Energie des Strahles 10,6 MeV und die Elektronengeschwindigkeit ist fast gleich der Lichtgeschwindigkeit. Der Radius im folgenden Dipol ist nun so groß, dass der Elektronenstrahl den Linac rückwärts passieren kann. Nun durchläuft der Elektronenstrahl mehrmals den Linac und die Dipolmagneten und zwar bis er seine Endenergie von 53 MeV erreicht hat. Im Mikrotron sind kleine horizontale und vertikale Korrekturmagnete eingebaut, um die Strahlposition und

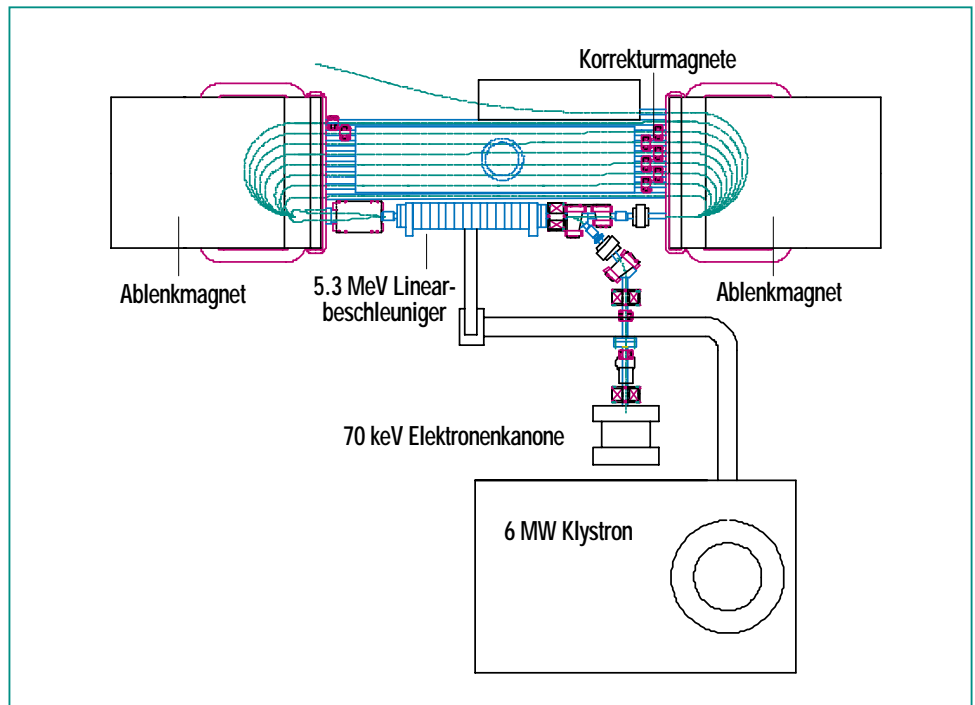


Abb. 3: Schematischer Aufbau des ANKA-Vorbeschleunigers, eingezeichnet sind die Elektronenkanone, das Klystron und das Race-track-Mikrotron.

-richtung in den Umläufen von 1 bis 9 korrigieren zu können. Nach zehn Durchläufen des Linearbeschleunigers und neun Umläufen im Mikrotron wird bei einer Energie von 53 MeV der Elektronen-

strahl mit Hilfe eines 15°-Dipolmagneten in den Transferweg vom Mikrotron zum Booster eingelenkt. Die Hauptparameter des Mikrotrons sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Parameter	Einheit	
Injektionsenergie	keV	70
Anzahl der Linac-Durchläufe		10
Energiegewinn pro Umlauf	MeV	5,3
Elektronen-Endenergie	MeV	53
Frequenz der Hochfrequenz	GHz	3
Impulsstrom	mA	10
Impulsdauer	µs	0,5 – 1,6
Wiederholungsrate	Hz	1 – 10
Energie-Unschärfe		< 0,3 %
Emittanz (hor./vert.)	mm mrad	≤ 0,2

Tab. 1: Hauptparameter des Race-track-Mikrotrons.

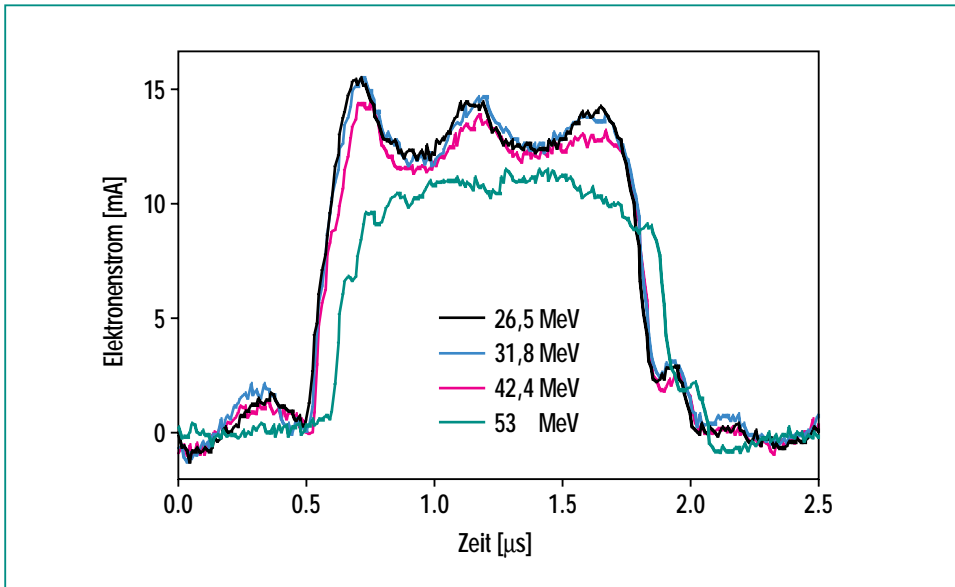


Abb. 4: Signale von den Strommonitoren in den verschiedenen Umläufen vom Mikrotron

Die Beschleunigung im Mikrotron ist nur dann möglich, wenn bezüglich der Hochfrequenzphase im Linearbeschleuniger folgende Bedingungen eingehalten werden:

1. Die Weglänge zwischen dem ersten und zweiten Durchgang durch den Linac muss ein Vielfaches der Wellenlänge ($\lambda_{HF} = 10 \text{ cm}$) im HF-System sein: ($\Delta L_0 = m \lambda_{HF}$).
2. Die Weglänge des ersten Umlaufes in dem Mikrotron muss ebenfalls ein Vielfaches von λ_{HF} sein ($\Delta L_1 = \mu \lambda_{HF}$).
3. Der Wegunterschied zwischen den verschiedenen Umläufen muss ebenfalls ein Vielfaches von λ_{HF} sein ($\Delta L = \omega \lambda_{HF}$).

Die Zahlen m , μ und ω werden als Arbeitspunkt des Mikrotrons bezeichnet. Diese werden durch eine sehr genaue Positionierung

der beiden 180-Grad-Dipolmagnete und des Linacs zwischen diesen Magneten erreicht. Weiterhin muss die magnetische Flussdichte B_0 in den Dipolmagneten ganz bestimmte Werte annehmen, damit die Bedingung 3. erfüllt wird.

Die Hochfrequenz-Leistung zum Betrieb des Linearbeschleunigers wird von einem 6-MW-Klystron über ein gepulstes Hochspannungsnetzwerk erzeugt (Modulator). Die Modulatorenenergie wird in einem Impulsformer-Netzwerk gespeichert und über einen

1:10-Transformator entladen. Die Hochfrequenzleistung wird zum Linearbeschleuniger über einen Wellenleiter transportiert, der mit Schwefelhexafluorid (SF-6) gefüllt ist.

Mittels Geräten zur Strahldiagnostik wird die Stromstärke, die Position und der Strahlquerschnitt des Elektronenstrahls im Mikrotron bestimmt. Neun Stromtransformatoren messen die Stromstärke von Umlauf zu Umlauf. In den ersten Umläufen sind drei Fluoreszenz-Monitore installiert und in den Umläufen von 5 bis 10 kann über das Synchrotronlicht die Lage des Elektronenstrahls beobachtet werden. Abb. 4 zeigt die entsprechenden Signale von den Strommonitoren in den verschiedenen Umläufen. Aus der Abbildung kann man entnehmen, dass die Verluste des Elektronenstrahls von Umlauf zu Umlauf relativ gering sind [5].

Der aus dem Mikrotron ausgeleitete Strahl ist maximal 1.6 μs lang und hat einen maximalen Strom von 16 mA. Im Normalbetrieb ist der Puls 1 μs lang bei einem Spitzenstrom von 8 bis 10 mA. Die Parameter des ausgeleiteten Elektronenstrahls sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Parameter	Einheit	Spezifikation	Erreicht bei Inbetriebnahme
Strom	mA	15	16
Impulsdauer	μs	1.0	1.6
Energie	MeV	53	53
Wiederholungsrate	Hz	10	6

Tab. 2: Eigenschaften des vom Vorbeschleuniger ausgelenkten Elektronenstrahls

Transferweg zwischen Mikrotron und Booster (Injektionsweg)

Aus geometrischen Gründen ist es nicht möglich, das Mikrotron unmittelbar am Booster-Synchrotron zu positionieren. Somit wird zwischen den beiden Beschleunigern ein Transferweg angebracht. Dieser Transferweg hat auch die Aufgabe, die Maschinenfunktionen des Mikrotrons an die des Booster-Synchrotrons anzupassen. Dies geschieht, wie in Abb. 5 dargestellt, über 2 Dipolmagneten und 5 Quadrupolen.

Das Booster Synchrotron

Das Prinzip der Beschleunigung ist im Booster-Synchrotron gleich

dem im Speicherring, daher ist das Booster-Synchrotron aus den gleichen Hauptkomponenten aufgebaut wie der Speicherring. Der schematische Aufbau des Booster-Synchrotrons ist in Abb. 5 dargestellt. Die Aufgabe des Booster-Synchrotrons ist es, die Energie der Elektronen von dessen Injektionsenergie (53 MeV) auf die Injektionsenergie des Speicherrings (500 MeV) zu beschleunigen. Das Booster-Synchrotron (siehe Abb. 5) besteht aus acht 45°-Rechteck-Dipolmagneten, dazwischen gibt es vier kurze und vier lange gerade Strecken, d. h. das Booster-Synchrotron hat eine 4-fache Symmetrie. Die horizontale Fokussierung des Strahls erfolgt durch Quadrupole in den langen Abschnitten, während die vertikale Fokussierung durch die

sogenannte Kantenfokussierung der Dipolmagneten erfolgt. Im Gegensatz zum Speicherring gibt es im Booster-Synchrotron keine Sextupole für die Bekämpfung der sogenannten Head-Tail-Instabilitäten, da die Ströme zu klein sind. Die Hauptparameter des Booster-Synchrotrons sind in Tab. 3 zusammengestellt.

Parameter	Einheit	
Endenergie	MeV	500
Maximales Dipolfeld	T	1,0
Umfang	m	26,4
Umlaufzeit	ns	88
Horizontaler Arbeitspunkt		1,776
Vertikaler Arbeitspunkt		1,173
Horizontale Chromatizität		-0,29
Vertikale Chromatizität		-2,69
Vertikale Akzeptanz	mm mrad	17
Energie-Akzeptanz	%	1,1
Momentum Compaction Factor		0,27
Horizontale Emittanz	mm mrad	0,15
Wiederholungsfrequenz	Hz	1
Umlaufstrom	mA	> 15
Extrahierter Strom	mA	> 7,5
Impulsdauer des abgelenkten Strahles	ns	≤ 56
HF-Frequenz	MHz	500

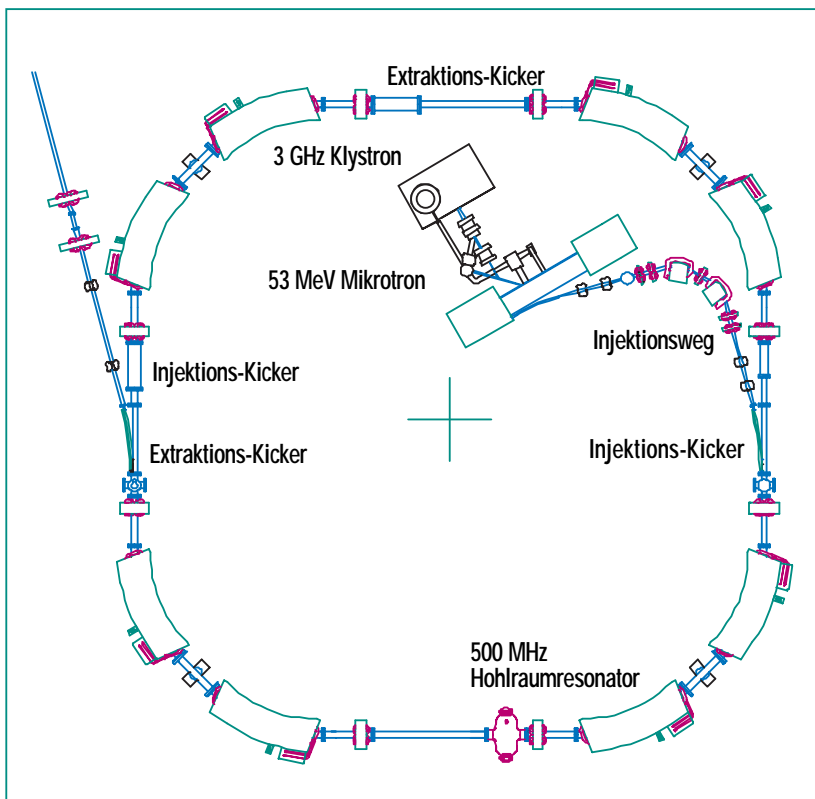


Abb. 5: Schematischer Aufbau des ANKA-Booster-Synchrotrons.

Tab. 3: Hauptparameter des Booster-Synchrotrons bei der Endenergie von 500 MeV.

Die Beschleunigung des Elektronenstrahles geschieht durch einen 500 MHz Hohlraumresonator.

Der Elektronenstrahl wird in folgenden Schritten auf 500 MeV beschleunigt:

1. Ein Elektronenstrahl mit einer Energie von 53 MeV wird vom Mikrotron erzeugt
2. Der Strahl wird im Booster-Synchrotron über mehrere Umläufe gespeichert und es können Strahlströme bis zu 30 mA erreicht werden.
3. Der Elektronenstrahl wird von 53 bis zu 500 MeV innerhalb von ca. 400 ms unter Erhöhung der Magnetfelder in den Dipolmagneten und Quadrupolen beschleunigt.
4. Der Elektronenstrahl wird aus dem Booster innerhalb eines Umlaufs ausgelenkt.

Dieser Vorgang wiederholt sich mit einer Frequenz von 1 Hz.

Während der Inbetriebnahme des Booster-Synchrotrons wurde beobachtet, dass beachtliche Strahlverluste während der ersten 50 Millisekunden nach der Injektion auftreten und zwar selbst dann, wenn die HF-Spannung so weit als möglich zurückgenommen wurde, um eine große Energieunschärfe bei der Anpassung der 3-GHz-Struktur aus dem Mikrotron an die 500-MHz-Struktur des Boosters zu vermeiden. Im Fach-Jargon spricht man von „beam-loading“. Das Problem wurde durch die Installation einer schnellen Rückkopplungsschleife im HF-System gelöst, die die Rückwirkung des Strahls auf die Hochfrequenzspannung [6] reduziert. In Abb. 6 ist das zeitliche Verhalten des Elektronenstromes bei ein- und ausgeschalteter Rückkopplungsschleife dargestellt.

Zur Beschleunigung der Elektronen im Booster-Synchrotron und

somit zur Erhöhung der Energie werden die Flussdichten in den Magneten vergrößert. Dies geschieht durch das „Hochfahren“ der entsprechenden Netzgeräte mit einer Wiederholrate von 1 Hz. Bei diesem Prozess entnehmen die Elektronen aufgrund der „Phasenfokussierung“ aus dem 500-MHz-HF-Resonator gerade die Energie, um auf einem konstanten Radius in den Dipolmagneten umzulaufen (wobei der Verlauf des Hochfahrens frei gewählt werden kann). Die vertikalen Korrekturspulen werden dagegen mit einem konstanten Strom betrieben.

Der 500-MHz-HF-Resonator wird mit einem 200-W-Transistorverstärker betrieben und erzeugt eine Beschleunigungsspannung von maximal 30 kV [7]. Die Stärke des im Booster-Synchrotron während der Beschleunigung gespeicherten Stroms ist in Abb. 7 dargestellt. Aus der Abbildung ist leicht zu entnehmen, dass die Stromverluste oberhalb von 200 MeV (circa 200 ms) sehr gering sind [8].

Nach Erreichen der Endenergie von 500 MeV wird der Elektronenstrahl im Booster-Synchrotron während eines einzigen Umlaufs mit Hilfe eines schnellen Kickers, eines gepulsten Septums und von „Bumpen“ (Zusatzwindungen in vier Dipolmagneten) in den Ejektionsweg ausgelenkt. Die Bumper verschieben die Bahn des Strahles im Booster während der letzten 40 ms vor dem Erreichen der Endenergie in Richtung Ejektionsseptum und der schnelle Kicker verschiebt die Bahn so, dass die Elektronen

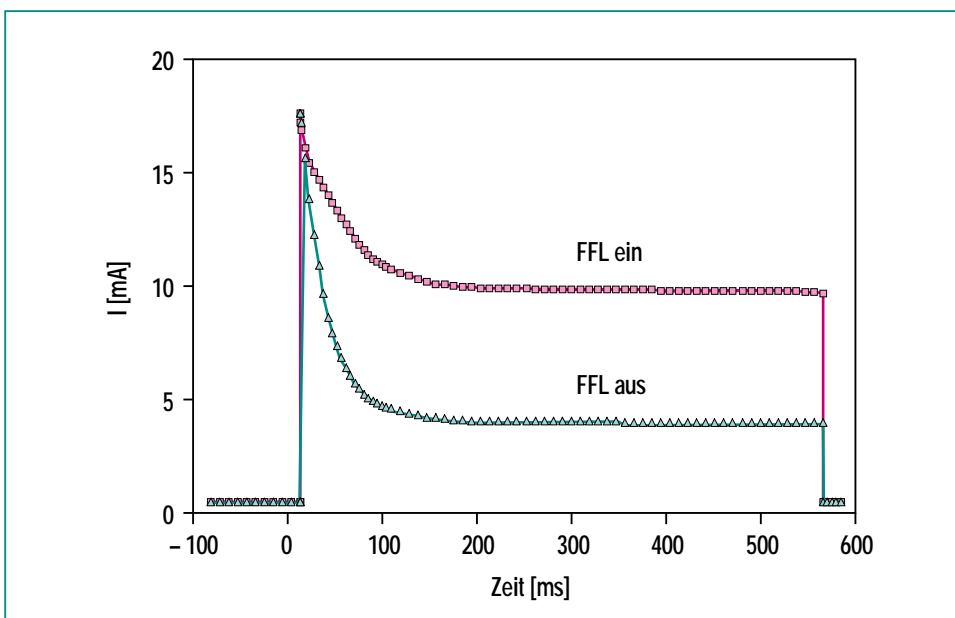


Abb. 6: Zeitliches Verhalten des Elektronenstromes bei ein- und ausgeschalteter Rückkopplungsschleife dargestellt.

durch das Septum in den Ejektionskanal gelangen. Bei der ersten Inbetriebnahme wurde die Bahn des Strahls durch das Streufeld des Septummagnet so gestört, dass Strahlverluste während der Auslenkung des Strahls auftraten. Nach verbesserter Abschirmung des Septumfeldes und der Installation von einer horizontalen Korrekturspulen, deren Stärke mit der Energie hochgefahren wird, und mit denen man die Bahn bei hoher Energie korrigieren kann, kann man fast 100 % des Strahls auslenken. Kicker und Korrekturspulen können dabei in einem weiten Bereich ohne Strahlverluste verändert werden.

Abb. 8 zeigt den zeitlichen Verlauf des ausgelenkten Elektronenstroms gemessen mit einem Stromtransformator in dem Strahlrohr zwischen Booster und Speicherring. Die Umlaufzeit im Booster-Synchrotron beträgt 88 ns, die Dauer des Kickerpulses ist 20-30 ns. Der ausgelenkte Elektronenstrahl hat daher eine Zeitdauer von typischerweise etwa 50 ns.

Transferweg zwischen Booster und Speicherring (Ejektionsweg)

Der Transferweg (Ejektionsweg) zwischen Booster-Synchrotron und Speicherring hat die Aufgabe, die Elektronen von einem zum anderen Beschleuniger zu führen und die Maschinenfunktionen der beiden Beschleuniger anzupassen. Entsprechend Abb. 1 geschieht dies über 2 Ablenkmagnete und 9 Quadrupole.

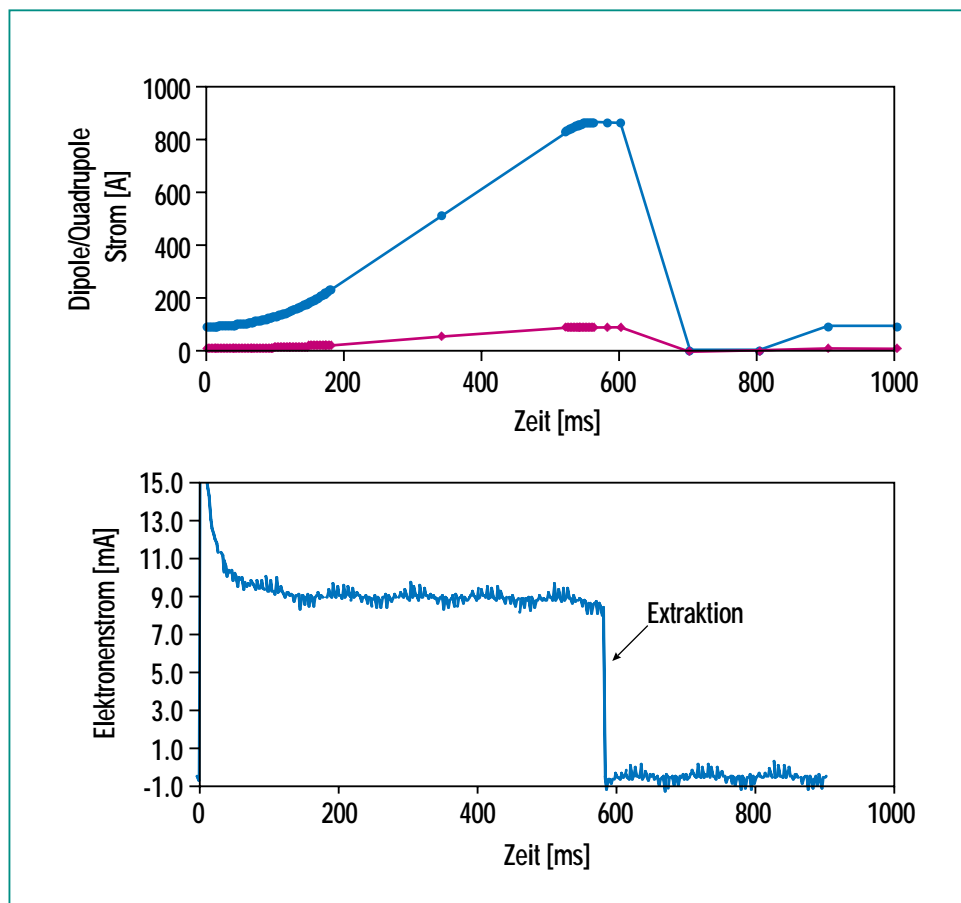


Abb. 7: Strom im Booster während der Beschleunigung sowie des Anstieges der Ströme im Dipol- und Quadrupol

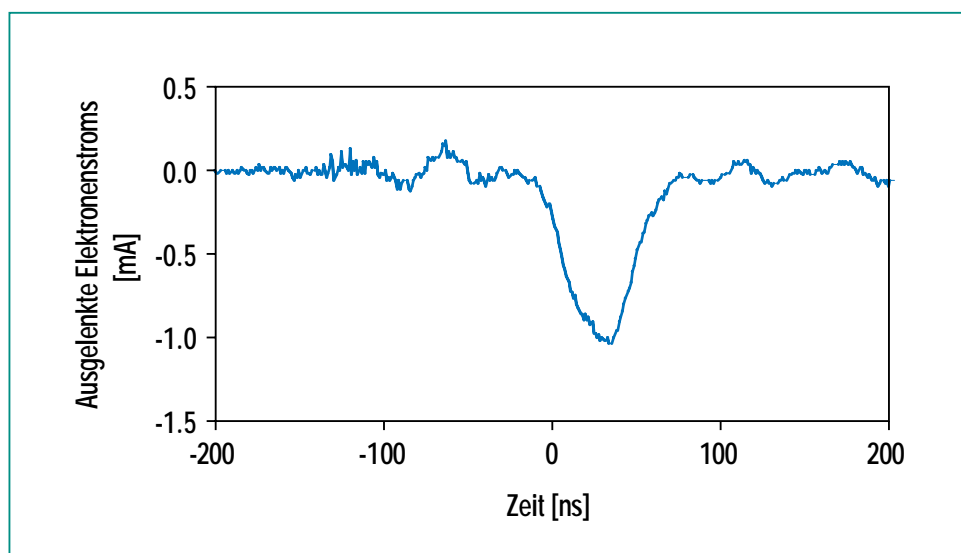


Abb. 8: Ausgelenkter Elektronenstrom gemessen mit einem Stromtransformator in den Ejektionsweg.

Zusammenfassung

Der Injektor für den Speicherring ANKA soll einen Elektronenstrahl erzeugen und die Elektronen auf 500 MeV beschleunigen, damit sie in den Speicherring injiziert werden können. Dies wird erreicht mit einer Kombination von einem Mikrotron und einem Booster-Synchrotron sowie den dazugehörigen Transferwegen. Insgesamt wird dieser Komplex

als Injektorsystem von ANKA bezeichnet.

Das Mikrotron liefert einen Puls von 1 μ s Länge und einem Strom von 10 mA. Die Energie des Elektronen ist beim Verlassen des Mikrotrons 53 MeV. Die Injektionsweg transportiert diesen Strahl zum Booster-Synchrotron, wo der Elektronenstrahl auf 500 MeV beschleunigt wird. Bei 500 MeV transportiert ein anderer Trans-

ferweg, der sogenannte Ejektionsweg, den Strahl zum Speicherring. Die Folgefrequenz ist 1 Hz.

In diesem Beitrag werden die verschiedenen Elemente des Injektors und ihre Funktionsweise beschrieben.

Literatur

- [1] H.O.Moser et al., *Particle Accelerator Conference, Dallas, 1995*
- [2] D.Einfeld, *diese Nachrichten*
- [3] H.Winick, *Synchrotron Radiation Sources, a primer, World Scientific, 1994*
- [4] H.Bach, D.Einfeld, N.Hertel, S.P.Moeller, B.R.Nielsen, F.Perez, L.Praestegaard, U.Ristau, R.Rossmannith, *European Particle Accelerator Conference, Stockholm 1998*
- [5] D.Einfeld, U.Ristau, R.Rossmannith, S.P.Moeller, N.Hertel, H.Bach, B.R.Nielsen, L.Praestegaard, *Particle Accelerator Conference, New York, 1999*
- [6] F.Perez, L.Praestegaard, S.P.Moeller, J.S.Nielsen, *European Particle Accelerator Conference, Wien 2000*
- [7] A.Fabris, C.Passotti, M.Svandrlík, D.Einfeld, F.Perez, S.Voigt, *European Particle Accelerator Conference, Stockholm 1998*
- [8] L.Praestegaard, H.Bach, D.Einfeld, N.Hertel, L.Kruse, S.P.Moeller, B.R.Nielsen, J.S.Nielsen, M.Pont, U.Ristau, *European Particle Accelerator Conference, Wien 2000*