

GROSSGERÄTE

Die Universalmaschine auf Kurs

In den nächsten Jahren soll mit FAIR ein internationales Beschleunigerzentrum für Experimente mit Ionen und Antiprotonen entstehen.

Oliver Kester, Hans-Dieter Krämer, Hartmut Eickhoff und Horst Stöcker

Mit der Facility for Antiproton and Ion Research in Europe (FAIR) entsteht an der GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH in Darmstadt ein weltweit einzigartiges Beschleunigerzentrum, das ein breit gefächertes Experimentierprogramm ermöglichen wird. FAIR wird Antiprotonen- und Ionenstrahlen mit bislang unerreichter Intensität und Qualität liefern, mit denen sich Wissenschaftler aus aller Welt Einblicke in den Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums seit dem Urknall erhoffen.

Die GSI betreibt mit ihren rund 1100 Mitarbeitern bereits jetzt ein einmaliges System von Schwerionenbeschleunigern, bestehend aus dem universalen Linearbeschleuniger UNILAC, dem Schwerionensynchrotron SIS18 und dem Experimentierspeicherring ESR. Mit diesen Maschinen und den drei verfügbaren Ionenquellenterminals können mehrere Experimente parallel stattfinden. Seit ihrer Gründung vor über 40 Jahren hat die GSI viele wichtige Beiträge zum Verständnis grundlegender physikalischer Zusammenhänge geliefert. So wurden in Darmstadt sechs neue Elemente entdeckt, und pro Jahr führen die über 1000 Nutzer aus aller Welt mehr als 50 Experimente aus der Kern- und Atomphysik, Materialforschung und Biophysik mit großem Erfolg durch. Dementsprechend befinden sich am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung die Kompetenzen, um mit FAIR eines der weltweit größten Vorhaben für die physikalische Grundlagenforschung zu realisieren [1].¹⁾ Etwa 3000 Wissenschaftler aus über 40 Ländern planen die Experimentier- und Beschleunigeranlagen. Neun Länder haben ein völkerrechtliches Abkommen über die Errichtung des Beschleunigerzentrums unterzeichnet, weitere haben ihr Interesse signalisiert. Die Kosten betragen 1,027 Milliarden Euro (Preisstand 2005).²⁾ Die Rodung hat begonnen, die Genehmigung des Bauantrags wird Ende Januar erwartet. 2018 soll FAIR in Betrieb gehen.

FAIR wird Antiprotonen- und Ionenstrahlen mit bisher unerreichter Intensität und Qualität liefern. Ein ausgeklügeltes, kosteneffizientes Beschleunigersystem kann Experimente der unterschiedlichen Forschungsgemeinschaften parallel mit Strahlen versorgen. Das weit gefächerte Forschungsprogramm beruht auf vier Säulen: Beim CBM-Experiment (Compressed Baryonic Matter) geht es darum, hochkomprimierte baryonische



In diesem Winter beginnt der Bau der Beschleunigeranlage FAIR in Darmstadt.

Materie – ein wenig erforschter, aber wesentlicher Bereich des Phasendiagramms stark wechselwirkender Materie – im Labor zu untersuchen. Die Erforschung von Atomkernen weit entfernt von der Stabilität wird tiefe Einblicke in die Nukleosynthese gewähren und somit zum Verständnis von der Entstehung der Elemente im Universum beitragen. Die Eigenschaften exotischer Kerne beeinflussen wesentlich die Dynamik explosiver astrophysikalischer Szenarien wie Supernovae, Novae oder Röntgenstrahlausbrüche. Diese Themen zählen zum Programm von NuSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions). PANDA (Proton ANtiproton annihilation DARMstadt) zielt darauf ab, den komplexen Aufbau von Hadronen und die dynamischen Prozesse in ihrem Inneren wesentlich besser zu verste-

1) Mehr Informationen über FAIR und die dafür geplanten Experimente finden sich auf www.gsi.de/portrait/fair.html und www.fair-center.de

2) Davon trägt Deutschland knapp drei Viertel, Hessen übernimmt rund 90 Millionen Euro.

KOMPAKT

- FAIR wird eine Vielfalt an Experimenten ermöglichen, wie z. B. die Untersuchung von Atomkernen fernab der Stabilität, von komprimierter baryonischer Materie bzw. von Materie unter extremen Bedingungen.
- Dafür stellt ein ausgeklügeltes System aus Beschleunigern und Speicherringen Partikelstrahlen mit hoher Intensität und Qualität zur Verfügung.
- Die Beschleuniger erfordern supraleitende Magnete, schnelle Feldrampen und strahlungsresistente Materialien sowie ein neuartiges Kollimatorsystem, das Verluste in den Synchrotronen reduziert.
- An Targets entstehen Sekundärstrahlen, Separatoren trennen die interessierenden Strahlen ab, und in Speicherringen lassen sie sich akkumulieren.

Prof. Dr. Oliver Kester, Dr. Hans-Dieter Krämer, Dr. Hartmut Eickhoff, Prof. Dr. Horst Stöcker, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt

hen. Der APPA-Verbund fasst Atomphysik, Plasmaphysik, Materialforschung und Biophysik zusammen und möchte Materie unter extremen Bedingungen (Dichte, Temperatur, Druck) experimentell erforschen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen zum Verständnis astrophysikalischer Plasmen im Inneren von Gasriesen oder an den Oberflächen von Neutronensternen beitragen. Ebenso gestattet es die FAIR-Anlage, biologische Strahlenschäden oder Materialmodifikationen, hervorgerufen durch relativistische Schwerionen, zu untersuchen. In einer späteren Projektphase sollen am Speicherring NESR atomphysikalische Präzisionsexperimente an schweren Wenig-Elektronensystemen und exotischen Nukliden stattfinden. Zudem lassen sich Ionen bzw. Antiprotonen abbremsen und zur Experimentierhalle FLAIR (Facility for Low Energy Antiproton and Ion Research) transferieren, um dort fundamentale Fragen zur Antimaterie zu untersuchen sowie neuartige Experimente mit niederenergetischen bzw. völlig abgebremsten Antiprotonen in Fallen durchzuführen.

Nur immer leistungsfähigere und präziser arbeitende Beschleunigeranlagen können viele der noch ungeklärten Fragen beantworten. So soll es an FAIR darum gehen, neben exotischen Nukliden auch Antimaterie und Hypermaterie (die Strange-Quarks enthält) zu erforschen. Die Wissenschaftler wollen u. a. dem Rätsel nachgehen, warum Antimaterie im Universum bis auf winzige Reste kaum vorkommt und warum die uns bekannte Materie, aus der wir bestehen und die uns umgibt, „bevorzugt“ ist. An FAIR können Forscher nach neuen Formen von Materie suchen, um auf diese Weise der rätselhaften Dunklen Materie auf die Spur zu kommen. Denn obwohl diese einen weitaus größeren Anteil im Universum ausmacht als die uns bekannte Materie, hat sie noch niemand direkt beobachtet.

An der geplanten Anlage wollen Forscher untersuchen, wie Sterne explodieren und welche Prozesse dabei ablaufen. Nach unserer heutigen Vorstellung entstehen bzw. entstanden die schweren chemischen Elemente in gewaltigen Sternexplosionen. FAIR kann Ionenstrahlen erzeugen, wie sie in der kosmischen Strahlung vorkommen. Dies ermöglicht es Wissenschaftlern, die Wirkung dieser Ionenstrahlen auf Materialien und Gewebeproben zu studieren. Sie möchten damit Komponenten

für die Satellitentechnik testen und strahlenbiologische Untersuchungen für bemannte Raummissionen und neue Anwendungen in der Medizin durchführen.

Um FAIR herum haben sich einzigartige Netzwerke entwickelt, in denen Wissenschaftler optimale Bedingungen finden, um an den größten wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen unserer Zeit ihre Talente zu entwickeln und zu beweisen (**Infokasten**). Um die Anlage zeitgerecht zu bauen, wurde eine modularisierte Startversion von FAIR entwickelt, welche die vorliegenden finanziellen Zusagen der nationalen und internationalen Partner berücksichtigt [2]. Danach gliedert sich FAIR in sechs Module auf. Zu der modularisierten Startversion zählen das Schwerionensynchrotron SIS100, die Experimentierhalle für CMB und die APPA-Kollaboration, der Super-Fragment-Separator und die Antiprotonenanlage, die u. a. den Kollektorring CR und den Hochenergiespeicherring HESR umfasst. Die fehlenden Module – FLAIR, die Speicherringe NESR und RESR sowie das SIS300 Synchrotron – sind für die Vollversion geplant.

Mit höchsten Intensitäten in physikalisches Neuland

Im Endausbau besteht FAIR aus acht Kreisbeschleunigern mit bis zu 1100 Metern Umfang, zwei Linearbeschleunigern und rund 3,5 Kilometern Strahlführungsröhren (**Abb. 1**). Die bereits existierenden GSI-Beschleuniger werden als Vorbeschleuniger dienen. Das Forschungszentrum Jülich entwickelt federführend den Hochenergiespeicherring HESR für die Forschung mit hochenergetischen Antiprotonen. Die GSI übernimmt zusammen mit den internationalen Partnern den Bau der übrigen Anlagen. Die **Tabelle** listet die wesentlichen Parameter der FAIR-Ringmaschinen auf.

Den Kern der FAIR-Anlage bildet das supraleitende Schwerionensynchrotron SIS100, das Ionen stabiler Elemente (von Protonen bis Uran), sog. Primärstrahlen, auf höchste Energien bringen kann. Das SIS100 wird in einem Tunnel installiert, der in einer späteren Ausbaustufe auch das Synchrotron SIS300 aufnehmen soll. Dieser in der Vollversion der FAIR-Anlage vorgesehene Stretcher-Ring kann die Energie der Pri-

KOOPERATION UND STRUKTUREN

Mit den benachbarten Universitäten Darmstadt, Frankfurt, Gießen, Heidelberg und Mainz sowie dem Frankfurt Institute for Advanced Studies wurden strategische Partnerschaften geschlossen, um gemeinsame Projekte effizient zum Erfolg zu bringen. Dazu gehört die durch die Helmholtz-Gemeinschaft geförderte **Doktorandenschule HGS-Hire for FAIR**, in der 250 junge Forscher der Universitäten direkt mit Spitzenphysikern aus aller Welt zusammenarbeiten. Darüber hinaus bestehen mit etlichen weiteren Universitäten und anderen Forschungszentren, wie dem KIT, dem FZ Jülich und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Verträge über Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Hinblick auf FAIR.

Mit dem **Helmholtz International Center (HIC) for FAIR** ist ein Exzellenzzentrum des hessischen Förderprogramms LOEWE entstanden mit über 30 neuen Professuren, die koor-

diniert an der Entwicklung und Forschung an FAIR arbeiten. Dazu gehören fünf Helmholtz-Nachwuchsgruppen. Die zwei Helmholtz-Institute in Mainz und Jena bündeln die komplexeren Kompetenzen vom GSI Helmholtzzentrum und den ansässigen Universitäten.

Ähnliche Netzwerke wie in Deutschland beginnen sich nun auch international zu etablieren. Im **ExtreME Matter Institute EMMI** der Helmholtz-Allianz „Cosmic Matter in the Laboratory“ mit Sitz beim GSI forschen 13 nationale und internationale Institutionen interdisziplinär an extremen Zuständen von Materie und liefern wesentliche Erkenntnisse für FAIR-Experimente. In Russland haben verschiedene Institutionen das **FAIR-Russia Research Center** gegründet, um die vielfältigen russischen Aktivitäten an FAIR zu koordinieren. Russland ist mit 200 Millionen Euro der größte internationale Partner.

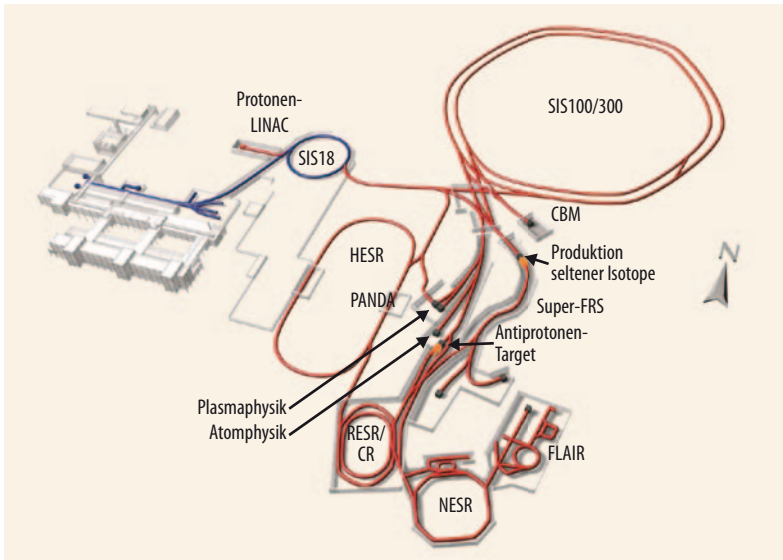


Abb. 1 Die GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH in Darmstadt mit dem FAIR-Beschleunigersystem. Dieses umfasst die Injektoren (UNILAC und SIS18), die bereits Teil der GSI-Beschleunigeranlage sind und künftig die FAIR-Maschinen bedienen sollen. SIS100 ist das Herzstück der neuen Anlage und versorgt Hochenergieexperimente sowie die Produktionsstationen für Sekundärteilchen mit stabilen Strahlen.

märstrahlen noch weiter erhöhen. Außerdem kann das SIS300 die Ionen langsam extrahieren und über einen Zeitraum von Sekunden zur Verfügung stellen.

Das SIS100 versorgt das CBM-Experiment und die APPA-Halle direkt mit Primärstrahlen. An zwei Targetstationen entstehen die Sekundärstrahlen. An den Experimenten stehen dann Intensitäten zur Verfügung, die um den Faktor 1000 bis 10 000 höher liegen als bei heutigen Anlagen. Bei den Sekundärteilchen handelt es sich z. B. um Ionen kurzlebiger Kerne oder Antiprotonen. Diese lassen sich in Gaszellen stoppen oder in den FAIR-Speicherringen sammeln bzw. für Präzisionsexperimente nutzen. Damit stellt FAIR Strahlen sämtlicher Elemente des Periodensystems, exotischer Nuklide und Antiprotonen zur Verfügung – dies ist weltweit einmalig.

Die FAIR-Speicherringe der finalen Ausbaustufe CR und RESR dienen im Wesentlichen dazu, Sekundärteilchen zu akkumulieren und ihre Strahlqualität zu verbessern, da dies für Präzisionsexperimente wesentlich ist. Üblicherweise entstehen Sekundärteilchen mit breiten Impuls- und Ortsverteilungen und damit ungenügender Strahlqualität. Aktive Phasenraumkühlung und dadurch verringerte Impulsunschärfe der Strahlen in den Speicherringen verbessern die Strahlqualität signifikant [3, 4]. Das Produkt aus beidem – höchste Strahlintensität und exzellente Strahlqualität – ermöglicht es erst, wissenschaftliches Neuland zu betreten.

Für den FAIR-Beschleuniger sind Herausforderungen in verschiedenen Bereichen der Beschleunigerphysik und -technik zu überwinden, die derzeit die Grenze des technisch Machbaren darstellen. Die hohen Strahlintensitäten erfordern supraleitende Magnete beim SIS100 und SIS300, die in weniger als einer Sekunde auf den maximalen Feldwert fahren können. Solche schnellen Feldrampen sind bisher noch nicht realisiert worden. Leistungsfähige und variable Beschleunigerstrukturen und Hochfrequenzsysteme müssen synchron mit den Magnetfeldrampen die Ionen in kürzester Zeit beschleunigen und sollen kurze intensive Pulse für die Produktion von Sekundärteilchen formen.

Verluste bei hohen Primärstrahlintensitäten führen zu einem Strahlungsuntergrund, der neue strahlungsresistente Materialien und Komponenten erfordert. Um die Strahlverluste sehr gering zu halten, ist es nötig, den Ringbeschleuniger sorgfältig zu modellieren und dabei realistische Magnetfeldverteilungen der Ringmagnete sowie Raumladungseffekte zu berücksichtigen. Beste Vakua in den komplizierten Röhren der Synchrotrone und Speicherringe minimieren Strahlverluste aufgrund von Kollisionen der Primär- und Sekundärteilchen mit Restgasatomen bei dem viele tausend Kilometer langen Pfad der Teilchen in den Beschleunigern.

Schwer beschleunigt

Das Synchrotron SIS100 als der zentrale neue Beschleuniger von FAIR erlaubt es, höhere Teilchenzahlen von Schwerionen, abhängig vom Ladungszustand, auf deutlich höhere Energien zu beschleunigen, als dies heute mit dem SIS18 möglich ist. Bei diesen Strahlenergien lassen sich auch Antiprotonen durch Beschuss von Nickeltargets mit Protonenstrahlen erzeugen. Diese Protonenintensitäten soll ein Protonenlinac (70 MeV, 35 mA) ermöglichen, der direkt als Protoneninjektor für das SIS18 dient. Die Endenergie der Ionen im SIS100 ist jeweils so gewählt, dass radioaktive Ionen und Antiprotonen mit optimaler Ausbeute in den Produktionstargets entstehen. Die hohen mittleren Intensitäten erfordern einen kurzen Beschleunigungs-

Systemparameter der FAIR-Ringmaschinen				
	SIS100/SIS300	CR / RESR	HESR	NESR
Umfang in m	1083 / 1083	215 / 240	575	223
Max. Strahlsteifigkeit in Tm	100 / 300	13 / 13	50	13
Injektionsenergie für Protonen oder Antiprotonen in GeV	4	3 / 3	3	3
Typische Injektionsenergie für Schwerionen in GeV/u	0,2 / 1,5	0,74 / 0,74	–	0,1 – 0,74
Maximale Teilchenintensität Protonen oder Antiprotonen/s	$2 \cdot 10^{13}$ / –	10^9 / 10^{11}	10^{11}	10^9
Maximale Teilchenintensität Ionen	$3 \cdot 10^{11}$ / $3 \cdot 10^{11}$	10^8 / 10^9	–	10^{10}
Erforderliche Vakua in mbar	$5 \cdot 10^{-12}$	$<10^{-10}$	10^{-9}	$< 10^{-11}$

zyklus des SIS100 von nur einer Sekunde. Durch Superferritmagnete, bei denen eine supraleitende Spule mit einem Eisenjoch kombiniert wird, reduzieren sich die elektrische Anschlussleistung und der Leistungsbedarf für den Betrieb.

Aufgrund der schnellen Magnetfeldrampen von 4 T/s heizen Wirbelströme die Magnete und ihre Vakuumkammern im SIS100 auf. Da ein Kühlen mit flüssigem Helium unerlässlich ist, erschwert dies die Entwicklung solcher Magnete und Kammern. Gleichzeitig dienen die heliumgekühlten Vakuumkammern als kryogene Pumpen, die extrem guten Vakua in den Synchrotronen ermöglichen und damit die Strahlverluste durch Umladung der Ionen im Restgas reduzieren.

Die Umladung von unvollständig ionisierten Ionen im Restgas wie z. B. U^{28+} aufgrund von Stoßionisation ist die Hauptursache für Strahlverluste in den Synchrotronen bei niedrigen Strahlenergien. Ohne Gegenmaßnahmen reduziert der „dynamische Vakuumeffekt“ die Ionenzahl im Ring drastisch (Abb. 2) [5, 6]. Wegen der hohen Strahlenergien und der hohen Ladungszustände ist dies beim LHC oder bei RHIC kein Problem. Beim SIS18 und beim SIS100 jedoch ist vor allem die Injektion kritisch, da hier die Ionen bei niedrigen Strahlenergien, bei denen die Wirkungsquerschnitte für Stoßionisation hoch sind, viele tausend Mal umlaufen müssen. Ändert sich der Ladungszustand eines Ions im Ring, so trifft es schließlich auf die Wand der Vakuumröhre. Am Auftreffpunkt lösen sich auf der Oberfläche der Wand angelagerte Gasteilchen ab und sorgen für einen lokalen Druckanstieg, der die Strahlverlustrate erhöht. Dieser Effekt verstärkt sich selbst und tritt bei allen Ionenringmaschinen mit hohen Strahlintensitäten auf.

Dieser Vakuumeffekt stand einer signifikanten Erhöhung der Ionenintensitäten im Wege. Daher haben Wissenschaftler von GSI und CERN in den letzten Jahren ein Kollimatorsystem entwickelt, das die umgeladenen Ionen an vordefinierten Stellen im Ring auffängt (Abb. 3). Diese Oberflächen, an denen die Ionen auftreffen, geben besonders wenige Teilchen je auftreffendem Ion ab. Gleichzeitig wurde im Bereich der

Kollimatoren die Saugleistung der Vakuumpumpen entsprechend erhöht. Am SIS18 der GSI konnten Wissenschaftler testen, wie sie den dynamischen Vakuumeffekt beherrschen können. Diese Erkenntnisse sind direkt in die Entwicklung des SIS100 eingeflossen.

Um die FAIR-Experimente optimal bedienen und einen Mehrstrahlbetrieb ermöglichen zu können, gelangen die Ionen auf zwei verschiedene Weisen aus dem SIS18 in das SIS100: Zum einen werden vier Pulse aus dem SIS18 innerhalb einer Sekunde in das SIS100 transferiert und anschließend beschleunigt. Zum anderen gelangt nur ein Puls in das SIS100, wo er sich mittels leistungsstarker Hochfrequenzresonatoren direkt beschleunigen lässt. Zusätzlich müssen weitere Hochfrequenzsysteme den Strahl nach der Beschleunigung in einem Zweistufenprozess in einen kurzen Puls komprimieren. Aufgrund der niedrigen Resonanzfrequenz von Ringresonatoren und der streng limitierten Einbaulängen in allen Ringen ist die kompakte Bauweise dieser Kavitäten eine sehr schwierige Designaufgabe und erfordert moderne Magnetic Alloy-Ringkernkavitäten [7]. Diese Resonatoren sind flexibel und verfügen über außerordentliche Betriebseigenschaften, daher kommen sie nicht nur in den Synchrotronen zum Einsatz, sondern auch in den Speicherringen der FAIR-Anlage. Die kurzen Strahlpulse sind Voraussetzung, um Sekundärstrahlen mit höchster Effizienz zu erzeugen. Nach der Beschleunigung lässt sich der Strahl wahlweise als kurzer Puls mit einer Dauer von weniger als 100 ns für den Einschuss in die nachfolgenden Speicherringe und für Plasmaphysikexperimente nutzen oder als nahezu kontinuierlicher Strom mit einer Dauer von mehreren Sekunden für Fixed-Target Experimente, wie CBM.

Super separiert

Das Kernstück für Untersuchungen im Rahmen des NuSTAR-Programms ist der mehrstufige Fragmentseparator „Super-FRS“, der ebenfalls supraleitende Magnete benötigt. Der Super-FRS stellt das weltweit

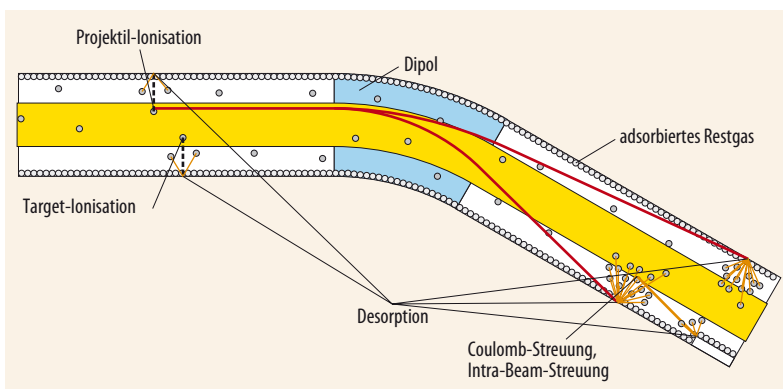


Abb. 2 Aufgrund von Stößen der Strahlionen (Projektile) mit Restgasatomen (Targets) kommt es in Beschleunigern zum dynamischen Vakuumeffekt. Wird ein hochenergetisches Ion (gelber Bereich) durch Stoßionisation umgeladen,

trifft es nach dem nächsten Dipol auf die Wand. Dabei werden Gasatome freigesetzt, die auf der Oberfläche haften. Diese sorgen für einen lokalen Druckanstieg und damit für höhere Verlustraten in diesem Beschleunigerabschnitt.

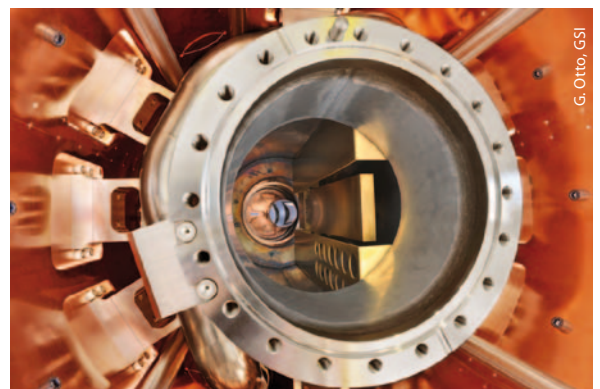


Abb. 3 Der Kryo-Kollimator für den geplanten supraleitenden FAIR-Beschleuniger SIS100 besitzt eine Goldbeschichtung, die dafür sorgt, dass beim Auftreffen von Strahlteilchen möglichst wenige Teilchen ins Strahlrohr abgegeben werden. Das ermöglicht ein stabiles Vakuum im Beschleuniger und hohe Strahlintensitäten im Schwerionenbetrieb.

leistungsfähigste System dar, um exotische Atomkerne bei relativistischen Strahlenergien zu trennen. Seltene Isotope aller Elemente bis hin zum Uran lassen sich produzieren und räumlich trennen. Hierzu werden die von der FAIR-Beschleunigeranlage bereitgestellten stabilen Primärstrahlen auf ein spezielles Target geschossen. Etwa 10 Prozent des Primärstrahls setzt sich dabei in Sekundärstrahlen um, wobei sich die kinetische Energie kaum ändert. Die verbleibenden 90 Prozent des Primärstrahles werden gezielt in Strahlfängern aus Graphit und Eisen vernichtet. Aufgrund des Produktionsmechanismus haben die Fragmentstrahlen sowohl hohe Energien als auch große Phasenraumvolumina, weshalb Magnete mit enormen Aperturen und hohen Feldgradienten nötig sind, also gewaltige, supraleitende Magnete. In der Nähe des Produktions-targets herrscht eine hohe Strahlenbelastung, daher verfügen die Magnete über eine Keramikisolation. Die Strahlleistung im Puls aus dem SIS100 beträgt 200 GW. Damit kann der Puls ohne Weiteres das Produktions-target zerstören, wenn dieses nicht sorgfältig geplant und konstruiert ist. Daher besteht das Super-FRS-Target aus einem rotierenden Rad, das den Strahl über eine entsprechend große Targetfläche führt.

Die produzierten Fragmentstrahlen bestehen generell aus einer sehr großen Vielzahl verschiedener Isotope aus dem gesamten Bereich der Nuklidkarte. Der Super-FRS filtert den zu untersuchenden Isotopenstrahl aus den Fragmentstrahlen heraus und leitet ihn an die verschiedenen Experimente weiter. Das Arbeitsprinzip des Super-FRS zur Teilchenseparation basiert auf einer Kombination aus Magnetfeldanalyse und elementabhängigem Energieverlust in speziell geformten Energieabsorbieren, den „Degradern“. Der Super-FRS besitzt drei Strahlzweige, welche die Verbindung zu den Experimentierplätzen bilden. Am Hochenergiemessplatz (HEB, High-Energy Branch) sind kinematisch vollständige Reaktionsstudien möglich, die höchste Fragmentstrahlintensitäten bei relativistischen Energien nutzen. Der Super-FRS dient dazu, exotische Kerne für Experimente in den Speicherringen des FAIR-Projektes bereitzustellen. In einer späteren Ausbaustufe ist ein Niederenergiemessplatz (LEB, Low-Energy Branch) hinter dem Super-FRS geplant, den sich verschiedene Experimentprogramme von NuSTAR teilen. Hier werden die exotischen Isotope in einer Gaszelle abgebremst und bei niedrigen Strahlenergien im keV-Bereich spektroskopisch untersucht.

Viele Experimente bei FAIR erfordern einen Strahl von Antiprotonen. Antiteilchen werden bei Kontakt mit Materie vernichtet, sodass es nicht möglich ist, sie als Primärstrahl zu erzeugen. Die Antiprotonen können z. B. in einem hochenergetischen Stoß zweier Kerne entstehen. Hierzu wird ein Metalltarget, ein Satz aus fünf etwa 10 cm langen Nickelzylindern, mit einem Primärstrahl von Protonen beschossen. Ist der Energieübertrag bei einem derartigen Stoß ausreichend hoch, kann sich ein Teil der Energie des Protons in ein Proton-Antiproton-Paar umwandeln. Dies geschieht ab einer Protonenenergie von 6 GeV. Allerdings ist

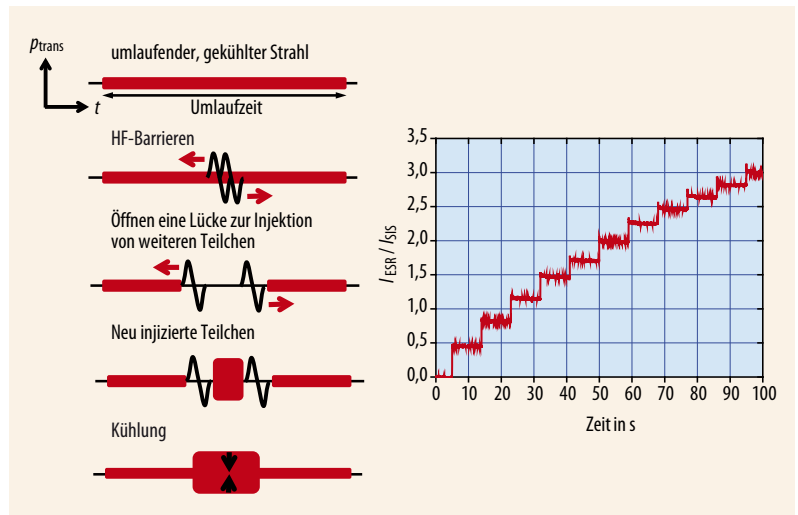


Abb. 4 Einfangs- und Kühlszenario zur Akkumulation von Teilchen in den Speicherringen HESR und NESR (links) und Messungen zum Test der Methode im ESR der GSI (rechts). Die Teilchen vertei-

len sich über den gesamten Ringumfang und werden dabei gekühlt. HF-Barrieren schaffen einen freien Bereich, in den sich weitere Teilchen injizieren lassen.

die Wahrscheinlichkeit, ein Antiproton zu erzeugen, bei dieser Energie noch äußerst gering, weshalb der SIS100 bei FAIR einen Protonenstrahl mit 29 GeV liefern soll. Bei dieser Strahlenergie des Primärstrahls wird bei etwa jedem zehntausendsten Proton, welches das Target trifft, ein Antiproton erzeugt, sodass mit bis zu 10^8 Antiprotonen pro Zyklus zu rechnen ist. Nach dem Target steht demnach ein Sekundärstrahl von Antiprotonen zur Verfügung. Gleichzeitig entsteht eine Vielzahl weiterer Sekundärteilchen, beispielsweise Neutronen, Protonen oder Pionen, deren Intensität diejenige der Antiprotonen um Größenordnungen übersteigt und damit Experimente mit den Antiprotonen erheblich beeinträchtigen würde. Daher ist es Aufgabe des Antiprotonen-Separators, der sich hinter dem Produktionstarget befindet, die Antiprotonen von den anderen Sekundärteilchen sowie von den Resten des Primärstrahls abzutrennen.

Gesammelt und gespeichert

Einer der wichtigsten Ringe für die Aufbereitung der Sekundärstrahlen ist der Kollektorring CR. Er erlaubt es Sekundärstrahlen zu nutzen, die aus den Produktionstargets austreten und eine große Unschärfe in der Strahlenergie und in der räumlichen Ausdehnung besitzen. Dadurch wären diese Strahlen für Präzisionsexperimente ungeeignet. Strahlkühlungssysteme verbessern die Qualität der Sekundärstrahlen um mehrere Größenordnungen. Dieser präparierte Strahl lässt sich anschließend in einen Speicherring transportieren und dort akkumulieren (Abb. 4), um ihn für Experimente zu nutzen. Bei der Akkumulation verteilen sich die gekühlten Teilchen über den Ringumfang. HF-Barrieren schaffen den Platz für die Injektion weiterer Teilchen [8]. Diese Teilchen besitzen größere transversale Impulse, die sich im nachfolgenden Kühlprozess aber

reduzieren. Am ESR der GSI wurde dieses Akkumulationszenario erstmals erfolgreich getestet.

So präpariert sollen z. B. Antiprotonen für Experimente im Hochenergiespeicherring HESR bereit stehen. Dort lassen sich die Antiprotonenpakete zu einem Strahl mit erhöhter Intensität sammeln und danach für das PANDA-Experiment zur Verfügung stellen. Das stochastische Kühlsystem des Kollektorings CR kühlt die Antiprotonen sowie radioaktive Strahlen. Ein Großteil der Experimente mit gekühlten radioaktiven Ionen ist allerdings erst nach Realisierung des New Experimental Storage Rings (NESR) möglich. Jedoch erlaubt es der CR, die Masse kurzlebiger radioaktiver Ionen im isochronen Betriebsmodus zu messen. In diesem speziellen ionenoptischen Modus hängt die Umlaufzeit der Teilchen nicht vom Impuls ab. Ein spezieller in den Speicherring eingebrachter Detektor ermittelt die Masse der Ionen direkt aus ihrer Umlaufzeit im Ring.

Um die Sekundärstrahlen effektiv zu nutzen, ist der CR als Speicherring mit enormer Akzeptanz ausgelegt. Die Magnete dieses Speicherrings haben ein großes nutzbares Feldvolumen, damit sie auch Teilchen, die stark von der Sollbahn abweichen, im Speicherring auffangen können. Da die Sekundärteilchen aus einem kurzen Paket von Primärteilchen entstehen, ist es zunächst erforderlich, das injizierte Teilchenpaket zeitlich zu dehnen. Dies ermöglicht ein spezielles Resonatorsystem, das für die Dauer einiger hundert Umläufe der Teilchen im CR eine Spannung hoher Amplitude erzeugt, die das kurze Teilchenpaket kontrolliert verlängert. Daraus resultiert ein Strahl, der sich gleichmäßig im Speicherring verteilt. Für diesen sorgt die Strahlkühlung dafür, dass die individuelle Teilchenbewegung nur wenig vom Sollwert abweicht und die Strahlqualität somit erheblich besser ist. Die Signalelektroden arbeiten bei einer Temperatur von 20 K und müssen transversal dem durch die Kühlung schrumpfenden Strahl nachfahren. Dies macht das stochastische Kühlsystem des CR zu einer technischen Herausforderung.

Der im finalen Ausbau geplante experimentelle Speicherring NESR versorgt die Forschungsgemeinschaften mit niederenergetischen Ionen- und Antiprotonenstrahlen; er kann Antiprotonen bis auf 30 MeV, sowie Schwerionen bis 4 MeV/u herunterbremsen und dem FLAIR-Experiment zur Verfügung stellen. Daher wird der NESR mit stochastischer Kühlung und einem Elektronenkühler ausgestattet, um die Strahlqualität nach dem Abbremsen zu erhalten. Hauptsächlich werden die Kollaborationen NuSTAR und SPARC den NESR nutzen. Es ist Platz für hochauflösende Spektrometer, interne Targets, Laserexperimente und einen Elektronenring für Streuexperimente vorgesehen. Auch im NESR soll das oben beschriebene Akkumulationsverfahren zum Einsatz kommen. Im endgültigen Ausbau von FAIR ist ein zusätzlicher Akkumulatorring, der RESR, vorgesehen, der die vorgekühlten Antiprotonen akkumuliert und dem HESR in höherer Intensität zur Verfügung stellt. Weiterhin ist es in diesem Ring möglich, kurzlebige Isotope schnell abzubremesen und zum NESR zu transferieren. Um kosteneffizient

zu bleiben, soll der RESR im gleichen Gebäude wie der Speicherring CR stehen.

Ausblick

Mit der Fertigstellung und der sukzessiven Inbetriebnahme der FAIR-Beschleuniger 2017 und 2018 wird die weltweit leistungsfähigste Ionen- und Antiprotonenbeschleunigeranlage in Betrieb gehen und neue Einblicke in die Struktur der Materie liefern. Die FAIR-Beschleuniger und -Experimente sind eine Herausforderung für die GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH und die beteiligten Partner im In- und Ausland, jedoch bieten sie einmalige wissenschaftliche und technische Möglichkeiten und erlauben es, Studenten und Nachwuchswissenschaftler im Umfeld wissenschaftlicher Exzellenz auszubilden. Seit der Unterzeichnung des völkerrechtlichen Abkommens zur Gründung der FAIR GmbH am 4. Oktober 2010 ist das Projekt gut vorangeschritten, erste technisch sehr anspruchsvolle Systeme wurden bereits ausgeschrieben.

Literatur

- [1] FAIR Baseline Technical Report, März 2006 www.fair-center.de/Publikationen.I71.0.html?&L=1
- [2] FAIR Green Paper – The Modularized Start Version, Oktober 2009, www.gsi.de/documents/DOC-2009-Nov_124-1.pdf
- [3] D. Mohl, G. Petrucci, L. Thorndahl und S. van der Meer, Phys. Rep. **58** 73 (1980)
- [4] G. I. Budker et al., Particle accelerators No. 7 197 (1976)
- [5] E. Mahner et al., Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams **6**, 013201 (2003)
- [6] H. Reich-Sprenger et al., Proceedings of EPAC 2004, Luzern, Schweiz, S. 1657
- [7] P. Hülsmann, G. Hutter und W. Vinzenz, Proceedings of EPAC 2004, Luzern, Schweiz, S. 1165
- [8] J. E. Griffin et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30 (1983) 3502

DIE AUTOREN

Oliver Kester (FV Atomphysik, Hadronen und Kerne) leitet den Bereich Beschleuniger an der GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH. Seine For-



schungsarbeiten konzentrieren sich auf die Erzeugung und den Transport von Ionen und Elektronenstrahlen sowie die Entwicklung moderner Resonatorstrukturen für die Beschleunigung.

Hans-Dieter Krämer (FV Hadronen und Kerne) ist technischer Direktor der FAIR GmbH.

Hartmut Eickhoff (FV Hadronen und Kerne, Strahlen- und Medizinphysik) arbeitet seit 1980 an der GSI, von 2005 bis 2010 hat er den Bereich Beschleuniger geleitet, seit 2009 ist er Technischer Geschäftsführer.



Horst Stöcker (FV Hadronen und Kerne) ist Wissenschaftlicher Geschäftsführer der GSI und Vizepräsident der Helmholtzgemeinschaft. Er hat seit 2004 den Judah M. Eisenberg-Lehrstuhl der Goethe-Universität Frankfurt inne. Er ist Senior Fellow am Frankfurt Institute for Advanced Studies.

