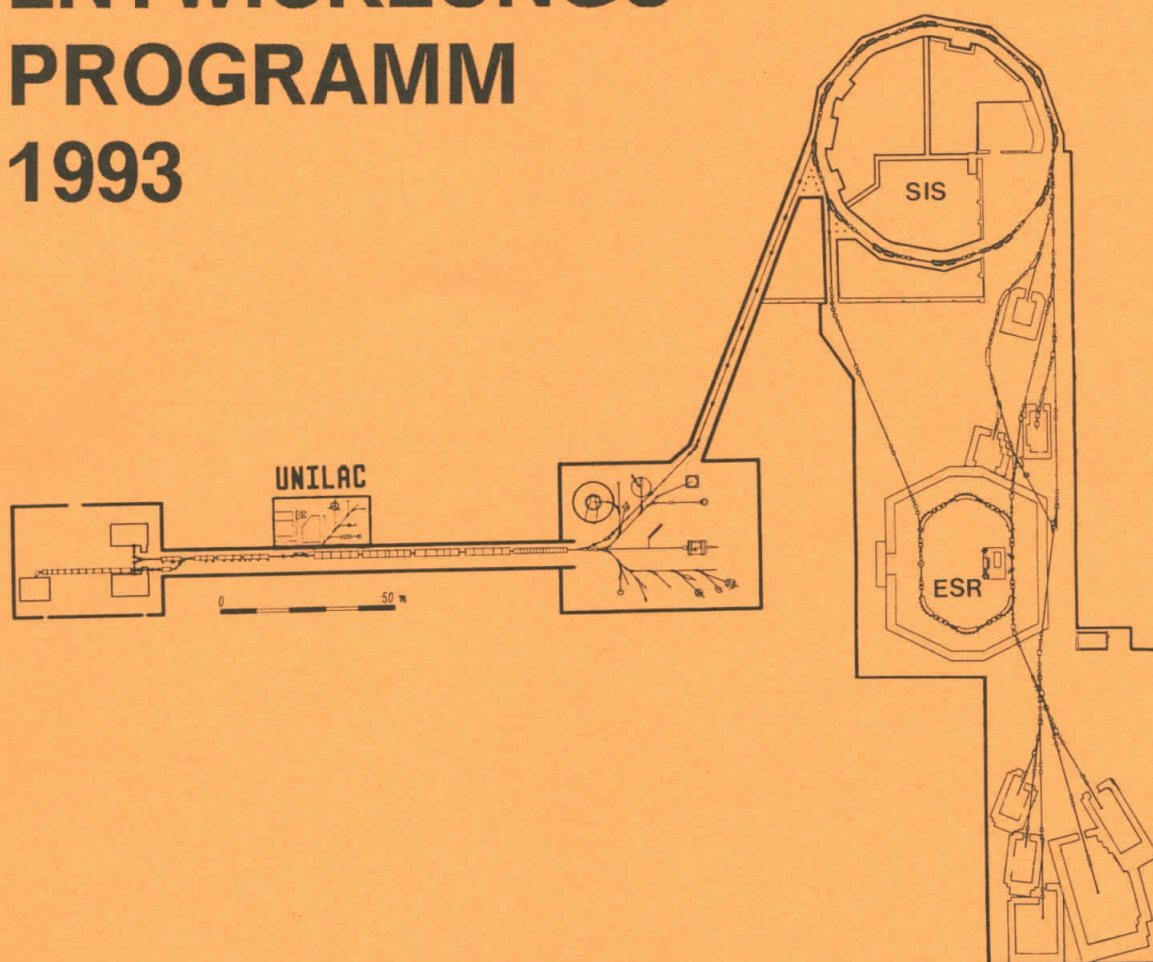




GSI-93-02
REPORT
ISSN 0171-4546

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGS- PROGRAMM 1993



**GESELLSCHAFT FÜR SCHWERIONENFORSCHUNG
DARMSTADT**

MITGLIED DER AGF

AUFGABEN, FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE UND GROSSGERÄTE DER GSI

Die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) ist eine Großforschungseinrichtung der Bundesrepublik Deutschland und des Landes Hessen. Zu ihren Aufgaben gehören der Bau und Betrieb von Schwerionenbeschleunigeranlagen sowie die Forschung mit beschleunigten schweren Ionen. Es werden wissenschaftliche Fragestellungen aus Kernphysik und Kernchemie, Atomphysik, Plasmaphysik, Materialforschung und Biophysik untersucht. Die Forschungsarbeiten werden in enger Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern von deutschen und von ausländischen Hochschulen und Forschungsinstituten durchgeführt.

Für die Durchführung der Schwerionenexperimente stehen bei der GSI folgende Großgeräte zur Verfügung:

- Der Linearbeschleuniger UNILAC zur Beschleunigung von Ionen aller Elemente bis zum Uran auf eine Maximalenergie von rund 20 MeV/u.
- Das Schwerionensynchrotron SIS mit dem UNILAC als Injektor, mit dem die Ionen auf eine Maximalenergie von 2 GeV/u beschleunigt werden können.
- Der Fragmentseparator FRS zur Erzeugung radioaktiver Strahlen mit Hilfe von Ionenstrahlen aus dem SIS.
- Der Experimentier-Speicherring ESR zum Speichern und Kühlen von Ionenstrahlen aus dem SIS und dem FRS.
- Mehrere Spektrometer und Detektorsysteme.

Für Schwerionenexperimente bei ultra-relativistischen Energien werden Einrichtungen des CERN genutzt.

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGS- PROGRAMM 1993

(einschließlich Programmbudget)

**GESELLSCHAFT FÜR SCHWERIONENFORSCHUNG
DARMSTADT**

MITGLIED DER AGF

Herausgeber
und Druck

Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH
Postfach 11 05 52
6100 Darmstadt

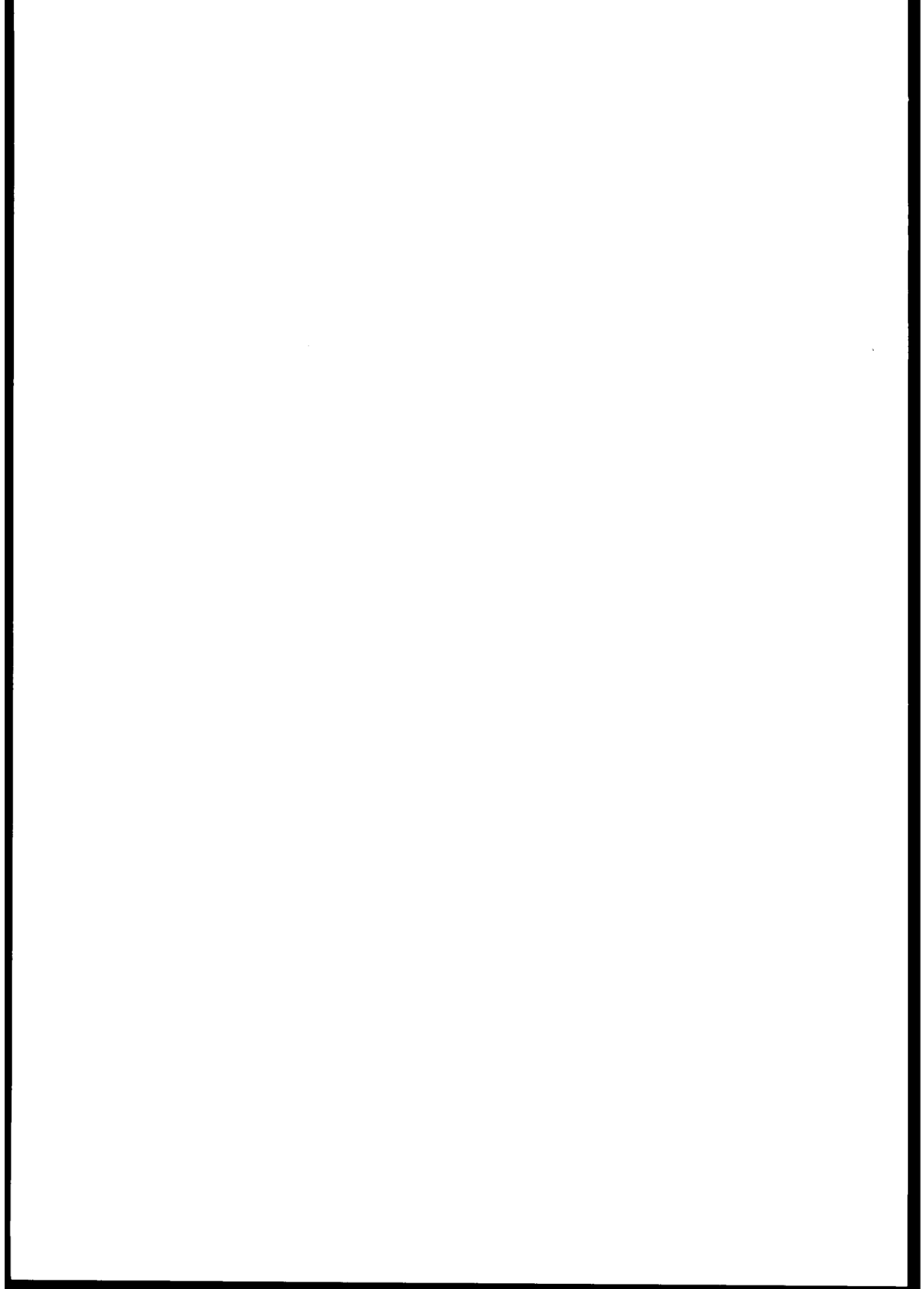
Redaktion

H. Ahrens † und K.-D. Groß

ISSN 0171-4546

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
ÜBERBLICK	1
1 NUKLEARE SCHWERIONENFORSCHUNG	3
UNILAC-Experimente	5
SIS-Experimente	8
ESR-Experimente	18
CERN-Experimente	20
Theorie	22
2 ATOMARE SCHWERIONENFORSCHUNG	25
UNILAC-Experimente	27
SIS-Experimente	29
ESR-Experimente	32
Theorie	36
3 FORSCHUNG MIT SCHWEREN IONEN AUF ANDEREN GEBIETEN	39
Plasmaphysik	41
Materialforschung	42
Biophysik	44
4 BESCHLEUNIGEREXPERIMENTE UND -ENTWICKLUNG	47
UNILAC	49
SIS	50
ESR	50
Collider-Studie	51
5 NEUE TECHNOLOGIEN UND METHODEN	53
Targetentwicklung	55
Detektorentwicklung	56
Experimentelektronik und Datenaufnahme	57
PERSONALEINSATZ UND MITTELAUFWAND	59
Einsatz von Planstellenpersonal	60
Aufwand an FuE-Investitionsmitteln	62
ANHANG	65
Überleitungen	66



ÜBERBLICK

An den drei Beschleunigern UNILAC, SIS und ESR werden im Jahr 1993 umfangreiche Experimentierprogramme verfolgt, die weitgehend parallel abgewickelt werden sollen.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Hochladungsinjektors soll am UNILAC die Synthese des Elements 110 vorangetrieben und mit verbesserten Spektrometern eine neue Phase zur Untersuchung der e^+/e^- -Paar-Produktion beim Schwerionenstoß begonnen werden.

Mit SIS-Strahlen sollen die erfolgreichen Experimente zur Untersuchung der Multi-fragmentation von Kernen zum Studium des Übergangs vom flüssigkeitsähnlichem zum gasartigen Aggregatzustand sowie zur Bestimmung der Zustandsgleichung der Kernmaterie bei hohen Dichten weitergeführt werden. Gleiches gilt für die Experimente zur Mesonenproduktion, die mit der Inbetriebnahme des 4π -Zentraldetektors durch Messung von Teilchenkorrelationen neue Perspektiven erhalten werden.

Mit radioaktiven Strahlen, die durch Projektilfragmentation erzeugt werden, sollen kernspektroskopische Untersuchungen an der Grenze der Stabilität vorangetrieben werden. Schwerpunkte sind hierbei die direkte Reaktionsspektroskopie sowie die Untersuchung hochangeregter kollektiver Zustände. Dazu wird auch mit dem Bau einer Strahlführung für radioaktive Strahlen in die Targethalle begonnen.

Am ESR werden die erfolgreichen Kühlexperimente zur Beobachtung von Strahlen mit sehr scharf definierter Umlauffrequenz sowie die Untersuchung des erstmals beobachteten β -Zerfalls in gebundene Zustände fortgesetzt. Die Massen von Reaktionsprodukten sollen mit Hilfe von Schottky scans und direkter Flugzeitmessung genau bestimmt werden. Erste Reaktionen mit gekühlten radioaktiven Strahlen sollen untersucht werden.

Zur Untersuchung der Eigenschaften von Hadronen, insbesondere von Pionen und ρ -Mesonen, in dichter hadronischer Materie soll mit dem Bau eines Dileptonenspektrometers großer Akzeptanz und mit gutem Massenauflösungsvermögen begonnen werden.

Am CERN wird der Schwerpunkt der Aktivitäten im Aufbau der Experimente für den ab 1994/1995 am SPS verfügbaren Blei-Strahl liegen.

Bei den atomphysikalischen Experimenten werden die Untersuchung der dielektronischen Rekombination und die Röntgenspektroskopie von Wenigelektronensystemen schwerer Elemente im Vordergrund stehen.

Die Arbeiten zur Herstellung und Strukturierung von Materialien durch Schwerionenbeschuß sollen verstärkt werden. Die radiobiologischen Untersuchungen werden mit leichteren Strahlen weitergeführt. Das Rasterscanverfahren soll als technische Grundlage für eine Tumorthherapie weiter erprobt und perfektioniert werden. Nach einem erfolgreichen Abschluß dieser Vorarbeiten können erste Schritte in Richtung strahlenmedizinischer Anwendungen für Krebspatienten unternommen werden. Die erfolgreich begonnenen Untersuchungen zur Erzeugung eines Plasmas hoher Dichte und Temperatur sollen mit erhöhten Leistungsdichten der Strahlen fortgesetzt werden.

Die Beschleunigerentwicklung wird sich schwerpunktmäßig mit der Intensitätserhöhung und dem Bau von gepulsten Hochstromquellen befassen.

Die Theoriegruppe wird in enger Zusammenarbeit mit vielen Hochschulgruppen weiterhin die Nutzer der GSI-Beschleuniger bei der Interpretation der neuen Daten unterstützen.

1 NUKLEARE SCHWERIONENFORSCHUNG

Einsatz von Planstellenpersonal (in Mannjahren)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
1.1 UNILAC-Experimente	13	12	12	12	12	12
1.2 SIS-Experimente	36	36	36	36	36	36
1.3 ESR-Experimente	5	7	7	7	7	7
1.4 CERN-Experimente	5	5	5	5	5	5
1.5 Theorie	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>
Nukleare Schwerionenforschung	62	63	63	63	63	63

Aufwand an FuE-Investitionsmitteln (in TDM)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
1.1 UNILAC-Experimente	800	550	580	610	800	880
1.2 SIS-Experimente	3300	2978	2975	3290	5200	5720
1.3 ESR-Experimente	1200	1350	1370	1490	2000	2200
1.4 CERN-Experimente	<u>1200</u>	<u>1000</u>	<u>700</u>	<u>1100</u>	<u>1300</u>	<u>1430</u>
Nukleare Schwerionenforschung	6500	5878	5625	6490	9300	10230

1.1 UNILAC-EXPERIMENTE

Mittelfristige Ziele

Der UNILAC mit den zugehörigen Experimentiereinrichtungen eröffnet weiterhin einzigartige Möglichkeiten, Kerne am Rand und außerhalb des bisher erschlossenen Bereichs der Nuklidkarte zu erzeugen und zu untersuchen. Durch die Konzentration auf Forschungsarbeiten am SIS und am ESR werden am UNILAC zunehmend einzelne, besonders interessante Experimente Vorrang haben, welche die besonderen Möglichkeiten des UNILAC und der bei der GSI verfügbaren Experimentiereinrichtungen nutzen. Neue Impulse für die Forschung bei UNILAC-Energien bringt die Verfügbarkeit des Hochladungsinjektors mit der EZR-Quelle. Zukünftige Schwerpunkte sind:

- Synthese von Kernen der schwersten Elemente, Untersuchung der Zerfallseigenschaften und der Chemie solcher Elemente, Erzeugung und Spektroskopie exotischer Kerne.
- Studien von Kernstruktureffekten, Untersuchung von Kernzuständen bei hohen Drehimpulsen sowie von kollektiven Zuständen bei höchsten Anregungsenergien.

Zur Durchführung dieser Messungen werden das Geschwindigkeitsfilter SHIP und der Nachseparator NASE, der on-line-Massenseparator sowie schnelle chemische on-line-Trennungen weiterentwickelt. Die im Rahmen des EUROBALL-Projekts bei der GSI begonnene Entwicklung eines hochauflösenden γ -Spektrometers wird fortgesetzt. Die Kristallkugel wird als dazu komplementäres Instrument bei der GSI in Betrieb genommen und soll auch für UNILAC-Experimente zur Verfügung stehen. Die Studien von Kernreaktionen an der Coulombbarriere sollen in geringerem Umfang fortgesetzt werden.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Synthese und Untersuchung neuer Elemente und Nuklide

Die Vorbereitungen zum Nachweis des neuen Elements 110 sind weiter fortgeschritten. Das neue Detektorsystem und die zugehörige Elektronik wurden getestet. Die erwarteten guten Auflösungen und Ansprechwahrscheinlichkeiten wurden auch unter den Bedingungen des Strahlzeitbetriebs erreicht. Ionenoptische Rechnungen der Kombination SHIP-NASE zeigen, daß wegen des großen Ablenkwinkels des magnetischen Dipols und der damit verbundenen Ladungsdispersion eine Transmission von mehr als 50 % bei den untersuchten Reaktionen nicht möglich ist. Diese Rechnungen ergeben außerdem, daß für die Untersuchung der schwersten Elemente mit Targets aus Blei und Bismut auch ein kleinerer Ablenkwinkel ausreicht. Es ist deshalb geplant, eine 10 Grad Ablenkung zu benutzen und die Reaktionsprodukte mit dem letzten Quadrupoltriplett des SHIP auf die Detektoren zu fokussieren. Nach diesen Umbauarbeiten können Experimente zur Optimierung der Strahlintensitäten und zur Messung der Anregungskurven für die Elemente 104 und 108 fortgesetzt werden. Die Kenntnis dieser Anregungskurven ist für die Einstellung der Projektilenergie der Reaktion $^{62}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{270}110^*$ von entscheidender Bedeutung.

Weitere Experimente zur Chemie des Elements 105 in der Gasphase haben deutlich unterschiedliche Flüchtigkeiten der Chloride und Bromide untereinander und relativ zu den leichten homologen Elementen ergeben. Die überraschend geringe Flüchtigkeit des Bromids des Elements 105 kann als Hinweis auf die Bildung eines Oxohalogenids angesehen werden. Die Ergebnisse sollen mit theoretischen Rechnungen verglichen werden. Erste Spontanspaltung-Röntgen-Koinzidenzmessungen

zur Untersuchung der Frage, ob das Isotop $^{262}_{105}$ selbst spontan spaltet oder der nach EC-Zerfall entstehende Tochterkern $^{262}_{104}$, wurden durch einen zu starken Untergrund im Photonenspektrum gestört. Die Methode und die Qualität der chemischen Trennung soll weiter verbessert werden, um entsprechende Messungen durchführen zu können. Vorgesehen sind α - γ -Koinzidenzmessungen zur besseren Abschätzung der Q_α -Werte ungerader Kerne schwerster Elemente.

Die Entwicklung chemischer Trennverfahren für das Element 106 ist so weit fortgeschritten, daß beabsichtigt ist, erste Experimente zur Suche nach einem möglichst langlebigen neutronenreichen Isotop des Elements 106 zu beginnen. Die Entwicklung von Detektionssystemen zur Messung von Alphazerfall und Spaltung direkt aus wässriger Lösung wird weiterbetrieben.

Am hauptsächlich von auswärtigen Gruppen genutzten on-line-Massenseparator wurden die systematischen Untersuchungen der Zerfallseigenschaften von neutronenarmen Kernen in der Nähe von ^{100}Sn und von ^{146}Gd fortgesetzt. Die Zerfälle dieser Kerne werden von $\pi g_{9/2} \rightarrow \nu g_{7/2}$ bzw. $\pi h_{11/2} \rightarrow \nu g_{9/2}$ Gamow-Teller Übergängen dominiert und eignen sich daher besonders gut zum Studium einer möglichen Unterdrückung der gemessenen Betastärke im Vergleich zu Schalenmodellvorhersagen. Neben hochauflösenden Spektroskopie-Methoden wurde 1992 auch ein Gamma-Totalabsorptionsspektrometer eingesetzt. Mit Hilfe dieser Methode sollen Q_{EC} -Werte und β -Stärke-Funktionen von Kernen weitab der Stabilität bestimmt werden, die aufgrund der komplexen Zerfallsschemata sonst nicht zugänglich wären. Die Untersuchung der Betazerfälle von $^{102,103}\text{Sn}$ wird vorbereitet, wobei eine Laser-Ionenquelle mittels 3-Stufen-Photoionisation für die unabdingbare technische Selektivität sorgen soll. Neben diesen Betazerfallsstudien ist geplant, nach Clusterzerfall von ^{114}Ba zu suchen, einer Zerfallsart, die bisher nur bei schweren Kernen oberhalb von Radium beobachtet worden ist.

Am on-line-Massenseparator wurden mit ^{208}Pb , ^{209}Bi -Strahlen und einem Wolframtarget Untersuchungen zu Wirkungsquerschnitten bei Protonentransfer-Reaktionen durchgeführt, wobei auch die neuen neutronenreichen Isotope $^{203,205}\text{Au}$ identifiziert werden konnten.

Kernreaktionen

Bei der Untersuchung der Dynamik von Schwerionenstößen wurde am TORI-Spektrometer erstmals die Stärke der radialen Reibungskräfte untersucht. Hierzu wurden bei der Reaktion Blei auf Blei bei 12.0 MeV/u die δ -Elektronen im Energiebereich von 1 bis 8 MeV nachgewiesen. Die Ausbeute an hochenergetischen δ -Elektronen stellt hierbei eine sensitive Größe für die radiale Verzögerung dar. Ein Vergleich mit dem Einteilchen-Dissipationsmodell zeigt, daß die dort vorhergesagten Reibungskräfte nicht ausreichen, die beobachtete hohe Ausbeute an hochenergetischen δ -Elektronen zu erklären. Erst eine Erweiterung des Einteilchen-Austauschmodelles um diabatische Prozesse ergibt eine befriedigenden Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Daraus läßt sich ein elastoplastisches Verhalten von Kernmaterie ableiten.

Radiochemische Messungen zur Untersuchung des extremen Ungleichgewichts in der Aufteilung der Anregungsenergie nach Bestrahlungen von Goldtargets mit Vanadiumprojektilen sollen bei nochmals erhöhter Einschußenergie fortgesetzt werden, um Aussagen über den Einfluß der einsetzenden Dissipations-Fluktuations-Prozesse zu gewinnen.

Kernstruktur

Die Fortführung der Experimente zur Laserspektroskopie von kurzlebigen Isotopen schwerverampflicher Elemente am SHIP ist geplant. Hierbei steht die Entwicklung von Strahldiagnoseelementen für den Einsatz in der neukonzipierten gekühlten Gaszelle im Vordergrund.

Das EUROBALL-Projekt hat das Ziel, im Rahmen einer europäischen Kollaboration ein modulares System von hochauflösenden, äußerst effizienten γ -Detektoren zu entwickeln und zu bauen. Entsprechend den Anforderungen der geplanten Experimente sollen diese Detektoren in Gruppen oder als kugelförmige Anordnung betrieben werden. Die EUROBALL-Gruppe der GSI war schwerpunktmäßig mit dem Entwurf und der Simulation der Detektor-Einheiten befaßt. Zwei Detektortypen werden zur Zeit realisiert:

- der CLUSTER-Detektor, der aus sieben gekapselten Germanium-Kristallen hexagonaler, konisch zulaufender Form besteht,
- der SEGMENTED-CLOVER-Detektor, eine Anordnung von acht jeweils vierfach unterteilten Germanium-Kristallen. Ein Prototyp wird bei der GSI gebaut und getestet. Mit der Entwicklung der dazu benötigten Compton-Abschirmung wurde begonnen. Neuartig dabei ist unter anderem der aktive Kollimator aus Szintillatormaterial, das mittels PIN-Dioden ausgelesen werden soll.

Die Entwicklung und der Bau der mechanischen Komponenten für beide Detektortypen sollen weitergeführt werden.

Mit dem bei der GSI aufgebauten Scanner sollen Kristalle und Detektoren ausgemessen werden. Weiterhin ist die Fortführung der Untersuchungen der Pulsform der Detektorsignale mit Flash-ADCs geplant. Insbesondere wird nach Analysekriterien gesucht, die zu einer Verbesserung der Zeit- und Ortsauflösung sowie der Neutronenerkennung führen. Das Datenaufnahmesystem auf VXI-Basis wird weiter aufgebaut.

Eine Projektgruppe *Germanium-Detektor-Technologie* befaßt sich mit der Verbesserung der Detektorpassivierung und der Einführung der Phosphorkontaktierung mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Germanium-Detektoren zu erhöhen. Nachdem bisher überwiegend mit planaren Detektoren gearbeitet wurde, sind 1993 Reihenuntersuchungen zur Prozeßoptimierung der Phosphor-Implantation von Coaxial-Detektoren geplant.

Zusammenarbeit

NRC Demokritos Athen
LBL Berkeley
HMI Berlin
Univ. Bonn
CEN Bordeaux
TH Darmstadt
JINR Dubna
MSU East Lansing
CERN Genf
Univ. Gießen
TH Göteborg
Univ. Göttingen
FH Hagen
MPI Kernphysik Heidelberg

Univ. Heidelberg
Univ. Helsinki
KFA Jülich
Univ. Jyväskylä
Univ. Köln
Univ. Krakau
INFN Legnaro
ZfI Leipzig
LLNL Livermore
Univ. Leuven
IPN Lyon
Inst. Rocasolano Madrid
Univ. Mainz
Univ. Manchester

Univ. Marburg
Univ. Milano
TU München
Univ. München
IPN Orsay
Univ. Oslo
LNPI St. Petersburg
Weizmann Inst. Rehovot

FZ Rossendorf
MSI Stockholm
SUNY Stony Brook
CRN Straßburg
Univ. Uppsala
IFIC Valencia
PSI Villigen
Univ. Warschau

1.2 SIS-EXPERIMENTE

Mittelfristige Ziele

Seit der Inbetriebnahme des Schwerionensynchrotrons SIS vor gut zwei Jahren ist der Experimentierbetrieb voll angelaufen. Lange Extraktionszeiten und die Beschleunigung auch schwerster Ionen auf maximale Energien lassen sich beinahe routinemäßig einstellen. Für die Untersuchung des Coulombauflaufs von extrem neutronenreichen Kernen gelang es vor kurzem sogar, einen im Fragmentseparator abgetrennten radioaktiven Sekundärstrahl über den ESR und die nachfolgende Strahlführung in die Targethalle zu fädern.

Die Mehrzahl der bisher begonnenen Experimente läßt sich der Untersuchung hochangeregter Kernmaterie oder der Erzeugung exotischer Kerne zuordnen:

- Die Untersuchung der Eigenschaften hochangeregter Kernmaterie in Abhängigkeit von der Kompression der Nukleonen - die sogenannte Zustandsgleichung der Kernmaterie - ist von zentraler Bedeutung für das Verständnis jeder Form hadronischer Materie und damit auch von Neutronensternen oder Supernova-Explosionen. Diese Experimente sind deshalb ein Schwerpunkt der Forschung mit relativistischen schweren Ionen. Die experimentelle Untersuchung erfolgt zum einen durch kinematisch vollständige Experimente, bei denen die Impulse möglichst aller Reaktionsprodukte gemessen werden, und zum anderen durch die Spektroskopie spezieller Teilchen, im allgemeinen Mesonen, die als Sonde für die Hochdichtephase des Stoßes dienen. Bisher lassen sich Mesonen jedoch wegen der zur Identifizierung notwendigen komplizierten Detektoren nur in einem eingeschränkten Bereich des Phasenraums nachweisen. Mit Fertigstellung der zweiten Ausbaustufe des FOPI-Detektors wird diese Beschränkung wegfallen, so daß dann im Einzelereignis Mesonen- und Nukleonenströme miteinander verglichen werden können.
- In Fragmentationsreaktionen können Kerne weitab der Stabilität gebildet werden, die sich durch ein extremes Neutron/Proton-Verhältnis auszeichnen. Während ursprünglich die Produktionsquerschnitte und die natürlichen Zerfallskanäle Ziel der Untersuchung waren, erlauben die günstigen kinematischen Bedingungen bei der Fragmentation relativistischer Projektile verbunden mit der Möglichkeit, dicke Targets zu verwenden, in zunehmendem Maße detaillierte spektroskopische Untersuchungen. Für sehr kurzlebige radioaktive Strahlen, die nicht im ESR gekühlt werden können, werden Experimentaufbauten mit hoher Nachweiswahrscheinlichkeit benötigt, wozu entweder die in der Targethalle aufgebauten großen Experimente benutzt oder neue, optimal an die Emittanz des Fragmentseparators angepaßte Aufbauten erstellt werden müssen.

Alle bisher bewilligten Experimentieraufbauten sind so weit fertiggestellt, daß die erste Runde von Experimenten abgeschlossen und zum Teil bereits publiziert werden

konnte. Mittelfristiges Ziel für die kommenden Jahre wird sein, das volle Potential dieser Aufbauten für die mit dem SIS möglichen neuartigen Experimente auszuschöpfen.

Zum weiteren Studium der Zustandsgleichung von heißer Kernmaterie wurde ein Dileptonenspektrometer vorgeschlagen. Über die Messung von Elektron-Positron-Paaren, Teilchen, die mit der umliegenden Kernmaterie nicht stark wechselwirken, soll bisher nicht zugängliche Information über die Konstituenten der Reaktionszone gewonnen werden. Dabei sind die Massen und Impulsverteilungen von Pionen, als dem wichtigsten Träger der starken Wechselwirkung, von besonderem Interesse. Inzwischen ist von einer internationalen Kollaboration ein Experimentiervorschlag ausgearbeitet und als letter of intent vorgelegt worden. Mittelfristig gilt es, RICH-Detektoren zu entwickeln, an die bei hoher Nachweiseffizienz extreme Anforderungen in Bezug auf Zählratenfestigkeit gestellt werden.

Zustandsgleichung von Kernmaterie

Die Untersuchung hochangeregter und komprimierter Kernmaterie ist ein zentrales Forschungsprogramm am SIS, das Aufschluß über Austauschkräfte und Mesonenströme bei reduziertem Nukleonabstand sowie verbreiteter Impulsverteilung liefern soll. Umfassende Information kann jedoch nur gewonnen werden, wenn es gelingt, den komplexen dynamischen Ablauf des Kern-Kern-Stoßes bei relativistischen Energien durch gezielte, möglichst exklusive experimentelle Beobachtungen zu entwirren.

Am FOPI-Detektor (4π -Detektor) der Phase I wurden Kern-Kern-Stöße für das System Gold auf Gold bei Einschußenergien zwischen 100 und 800 MeV/u untersucht. Aus den Daten soll neben der Zustandsgleichung schwerpunktmäßig die Rolle der impulsabhängigen Kräfte und der Streuquerschnitte bei der Abbremsung geklärt werden. Hierzu werden die Geschwindigkeitsverteilungen der auslaufenden Baryonen transversal zur Strahlrichtung gemessen, um daraus den Fluß der heißen Materie in zentralen und semizentralen Stößen in Abhängigkeit von der Geschoßenergie zu bestimmen. Ein Schwerpunkt liegt hier auf dem Nachweis von komplexen Fragmenten, die kollektive Impulsbeiträge besonders gut zu bestimmen erlauben. Großes Gewicht kommt auch der Suche nach globalen Meßgrößen zu, die für die Festlegung der Stoßgeometrie, wie Stoßparameter oder Reaktionsebene, aber auch der Fluktuationen von Bedeutung sind. Ein weiterer Vorteil der 4π -Messung ist, daß die Entstehung von Korrelationen zwischen verschiedenen Observablen verfolgt werden kann. Zur Analyse der Ergebnisse eignen sich vor allem solche Theorien, die wie die QMD (Quantum Molecular Dynamic) realistische Ereignisse liefern. Unerläßlich und aufwendig sind dabei systematische Simulationsstudien, um Autokorrelationseffekte in den Selektionskriterien, aber auch die Beeinflussung durch die experimentellen Beschränkungen aufzuklären.

Die Messung der geladenen Teilchen wird ergänzt durch den Nachweis von Neutronen mit dem Flugzeitspektrometer LAND, um erstmals den Neutronenfluß in zentralen Stößen bei hohen Energien zu bestimmen. Da LAND auch geladene Teilchen identifizieren kann, ist ein direkter Vergleich von Neutronen und Protonen möglich. Auf diese Weise soll untersucht werden, inwieweit die Coulomb-Wechselwirkung zu dem für geladene Teilchen beobachteten kollektiven Fluß beiträgt.

Am FOPI-Detektor der Phase II soll mit voller magnetischer Teilchenanalyse bei Energien um und oberhalb von 1 GeV/u die Entstehung von Kernmaterie mit einer hohen Zahl von Nukleonen in angeregten Zuständen, vor allem Δ -Zuständen, studiert werden. Im Vordergrund des Interesses steht dabei, ob diese Δ -Materie ein beobachtbares kollektives Verhalten, z. B. beim Zerfall, zeigt. Der häufigste Zerfall

dieser Zustände führt zur Emission von Pionen. Nach ersten Messungen zur Pionenemission und ersten Erfahrungen mit den Drahtkammern und der Spurenrekonstruktion wird sich entscheiden lassen, ob am FOPI-Detektor die seltenen K^+ -Teilchen möglichst untergrundfrei beobachtet werden können. Exklusive Hadronen-Messungen an FOPI mit gleichzeitiger Erfassung einer direkten Probe wie K^+ bleiben ein wichtiges Ziel dieses Projekts.

Während zentrale Stöße relativistischer schwerer Ionen zu sehr hohen Anregungsenergien führen, bei denen ein großer Teil der Nukleonen zur Δ -Resonanz umgewandelt wurde, kann in peripheren Stößen der Bereich um den Siedepunkt der Kernmaterie untersucht werden. Hier sollten, beim Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Zustand, kritische Phänomene beobachtbar sein. Für diese Untersuchungen wurde das Vorwärtsspektrometer ALADIN ausgelegt, das Fragmente des Projektils nach Ladung, Impuls und im Falle leichter Elemente auch nach Masse bestimmen kann. In einem ersten Experiment konnte gezeigt werden, daß bei bestimmten Stoßparametern der Aufbruch in mehrere Fragmente, die sogenannte Multifragmentation, der dominante Zerfallskanal ist. Weiter wurde gefunden, daß im Gegensatz zu den Erwartungen typische Nichtgleichgewichtseffekte, die bei niedrigen Einschußenergien beobachtet werden, stark unterdrückt sind.

Mittelfristig soll untersucht werden, ob mehrfache Absorption der beim Zerfall der Δ -Resonanz entstehenden Pionen Ursache für die beobachtete schnelle Equilibrierung ist. Weiterhin gilt es herauszufinden, ob die beobachtete Multifragmentation tatsächlich durch einen simultanen Aufbruch des expandierenden Systems erfolgt bzw. inwieweit sequentielle Zerfälle dazu beitragen. Vor allem soll untersucht werden, ob sich kritische Phänomene nachweisen lassen.

Die Spektroskopie der in hochenergetischen Schwerionenstößen emittierten Pionen, Eta-Mesonen, Kaonen und Antiprotonen ist eine wichtige Quelle der Information über die Eigenschaften von hochangeregter und komprimierter Kernmaterie. Wirkungsquerschnitt und spektrale Verteilung der erzeugten Teilchen spiegeln die der Reaktion zugrunde liegende Nukleon-Nukleon-Dynamik wieder und erlauben Rückschlüsse auf globale Größen wie Energie- und Nukleonendichte des Stoßes. Die Messung der Pionen eröffnet zudem die Möglichkeit, die Anreicherung der heißen und komprimierten Kernmaterie mit Delta-Resonanzen zu studieren.

Sensitiv auf die Zustandsgleichung von Kernmaterie sind insbesondere Teilchen, die bei Strahlenergien unterhalb der freien Nukleon-Nukleon-Schwelle erzeugt werden. Für diese *subthreshold*-Produktion sind mikroskopischen Transportmodellen zufolge vor allem Zweistufenprozesse verantwortlich, die intermediäre Pionen oder Delta-Resonanzen involvieren. Diese kooperative Erzeugung findet bevorzugt in der Hochdichtephase des Stoßes statt. Eine Schwierigkeit bei der Analyse der beobachteten Wirkungsquerschnitte ist, daß die meisten Mesonen und insbesondere die Antiprotonen stark absorbiert werden. Dies trifft nicht auf die K^+ -Mesonen zu, weshalb diese ideale Sonden für die Hochdichtephase sind.

Zum Nachweis der geladenen Mesonen dient ein doppeltfokussierendes QD-Magnetspektrometer mit großer Winkel- und Impulsakzeptanz, das mit Vieldrahtkammern, Plastiksintillatorzählern und Cherenkovdetektoren zur Impulsmessung und Teilchenidentifizierung ausgerüstet ist. Für ein detailliertes Studium der Erzeugungsprozesse der Mesonen und ihrer Wechselwirkung mit dem nuklearen Medium ist die Stoßcharakterisierung unerläßlich. Dies bedeutet, die Anzahl der am Stoß beteiligten Nukleonen und die Lage der Reaktionsebene relativ zur Emissionsrichtung des Mesons zu bestimmen. Dazu sind hinter dem Targetpunkt des Spektrometers zwei Teilchenhodoskope aufgebaut, die Reaktionsfragmente detektieren. Mit dem Kaonen-Spektrometer und seinem Detektorsystem wurden bereits mehrere Experimente erfolgreich durchgeführt. In den nächsten Jahren soll die Energie- und Mas-

senabhängigkeit der Kaonen - und Pionenproduktion mit guter Impulsauflösung und Untergrundunterdrückung systematisch vermessen werden. Mittelfristig sind Messungen von Meson-Meson-Korrelationen vorgesehen, um interferometrische Untersuchungen durchzuführen. Damit verbunden ist die Suche nach π^+/π^- - oder K^+/K^- -Resonanzen, deren Masse und Lebensdauer Aufschlüsse über die Eigenschaften der sie umgebenden Kernmaterie geben.

Für besonders seltene Ereignisse wie die Produktion von K^- -Mesonen und vor allem von Antiprotonen, für die eine besonders hohe Untergrunddiskriminierung notwendig ist, stellt der Fragmentseparator ein ideales Spektrometer dar. Es erlaubt bei maximalen Strahlströmen des SIS und der Verwendung dicker Targets Produktionsquerschnitte bis in den Bereich von Picobarn zu messen. Die bisher gefundenen Antiproton- und K^- -Produktionsraten sind wesentlich höher als aufgrund von Proton-Kern-Experimenten zu erwarten war. Ergänzende Messungen sollen die Abhängigkeit der Teilchenerzeugung von der Größe der Wechselwirkungszone und der Einschubenergie untersuchen. Das Ziel wird sein, diese ungewöhnlichen Prozesse mit abnehmender Energie noch weiter unterhalb der Produktionsschwelle und auch in sehr schweren Reaktionssystemen zu verfolgen. Sobald am SIS höhere Teilchenintensitäten für schwere Projektile zur Verfügung stehen, ist geplant, diese Messungen auf schwere Systeme auszudehnen.

Weitere wirkungsvolle Sonden für die Reaktionsdynamik von relativistischen Schwerionenstößen stellen Bremsstrahlungsphotonen und Photonen aus dem Zerfall neutraler Mesonen wie π^0 und η dar. Für die Photonenmessungen wurde ein modulares Spektrometer aufgebaut, das zunächst aus 256 und im Endausbau aus etwa 400 großvolumigen BaF_2 -Detektoren hexagonalen Querschnitts bestehen wird. Dieses Spektrometer, das in seiner Grundversion 1990 in ersten Experimenten am GANIL und am SIS erfolgreich eingesetzt wurde, ist vielseitig verwendbar, sowohl beim Studium der Bremsstrahlungsprozesse und der Produktion neutraler Mesonen in zentralen Stößen als auch bei Kernstrukturuntersuchungen wie der Vielfachanregung von Riesenresonanzen und deren Gammazerfallsbreiten. Die exzellente Energie- und Zeitauflösung der BaF_2 -Detektoren erlaubt Messungen mit bisher nicht erreichter Genauigkeit.

Kernstruktur und Reaktionen

Das kurzzeitig wirkende, starke elektromagnetische Feld in peripheren Schwerionenstößen bei hoher Energie führt zu einer Anregung hochliegender kollektiver Zustände, insbesondere der Dipolriesenresonanz. In zwei unterschiedlichen Experimenten konnten am SIS sogar die Zwei-Phononzustände dieser Resonanz nachgewiesen werden, zum einen über deren γ -Zerfall mit dem Photonenspektrometer TAPS, zum anderen über deren Neutronenzerfall mit dem Neutronendetektor LAND. Das weitere Interesse konzentriert sich auf Details der Anregungs- und Zerfallsmechanismen solcher Zustände, insbesondere aber auf die Suche nach höherliegenden Mehr-Phononzuständen.

Für die Spektroskopie angeregter Zustände in exotischen Kernen ist der möglichst vollständige Nachweis des Zerfalls über γ -Quanten notwendig. Die Darmstadt-Heidelberg-Kristallkugel ist hierfür besonders gut geeignet, da ihre 162 NaI -Detektoren den Nachweis von γ -Quanten im interessierenden Energiebereich mit annähernd 100 % Effizienz in 4π erlauben. Die hohe Granularität ermöglicht dabei eine adäquate Korrektur der bei relativistischen Teilchenenergien starken Dopplerverschiebung. Es ist daher geplant, bei der GSI ein experimentelles Programm mit der Kristallkugel, die zur Zeit an den Beschleunigern des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg betrieben wird, durchzuführen. Vorgesehen sind zunächst Experimente zur γ -Spektroskopie von exotischen Kernen nach Anregung in peripheren Stößen.

Experimente zur Bildung targetähnlicher Spaltisomere in (RHf,RHln)-Reaktionen über den Prozeß der Anregung und des Zerfalls der Dipol-Riesenresonanz sollen durchgeführt werden. Hierbei wird auch nach dem (RHf,RHly)-Kanal gesucht. Sollte dieses Experiment erfolgreich sein, eröffnet sich hierdurch die Möglichkeit, Strahlen superdeformierter Kerne zu erzeugen und weiter zu untersuchen.

Schließlich sollen die Bildung und der Zerfall von schweren targetähnlichen Hyperkernen mit der Rückstoß-Schattenmethode bei Energien an und unterhalb der Schwellenenergie studiert werden. Die gemessenen Wirkungsquerschnitte werden erste Informationen über die Wahrscheinlichkeit der theoretisch nur schwierig zu behandelnden Adsorption der Lambda-Hyperonen in den targetähnlichen Restkernen ergeben.

Radioaktive Strahlen und exotische Kerne

Der Fragmentseparator FRS ist das zentrale Instrument für die Produktion und Untersuchung exotischer Kerne durch Fragmentation schwerer Projektile bei relativistischen Energien. Als hochauflösendes Vorwärtsspektrometer ist er für ein breites Spektrum von Experimenten nutzbar. Mit Hilfe eines Degraders in der Mittelebene des Fragmentseparators können Ionenstrahlen radioaktive Kerne bis zum Uran und für Energien bis 1 GeV/u isotonenrein hergestellt werden. Dies erlaubt die Untersuchung des Fragmentationsprozesses, wobei auch schwache Produktionskanäle von der Proton-Drip-Line bis zum Gebiet bisher unbekannter neutronenreicher Kerne erfaßt werden können.

Der Fragmentseparator kann als Energieverlust-Spektrometer oder für hochauflösende Reaktions-Experimente mit Sekundärstrahlen eingesetzt werden. Wegen der guten Separationseigenschaften eignet sich der Separator außerdem für die Erforschung von Prozessen unterhalb der Reaktionsschwelle wie Kaon- oder Antiproton-Erzeugung.

In großem Umfang können kernspektroskopische Untersuchungen, Sekundärstrahl-experimente sowie Implantationen radioaktiver Kerne in Festkörpern für anwendungsorientierte Untersuchungen oder für die Festkörperforschung durchgeführt werden. Die höchstmöglichen Sekundärstrahl-Intensitäten werden am Meßplatz direkt hinter dem Fragmentseparator zur Verfügung stehen. Entsprechend der vielseitigen Nutzungsmöglichkeiten radioaktiver Strahlen sollen verschiedene Meßplätze versorgt werden.

Die erste Generation von Experimenten am Fragmentseparator umfaßt schwerpunktmäßig das Studium des Fragmentationsprozesses und seine theoretische Interpretation. Besonders interessant für das Verständnis des Reaktionsablaufes sind die peripheren Kollisionen. Insbesondere die rein elektromagnetische Dissoziation bei hohen Strahlenergien stellt einen Prozeß dar, der neuartige Kernstrukturuntersuchungen ermöglicht. Von besonderem Interesse sind Mehrstufenanregungen von Riesenresonanzen, eine bisher unbekannte Schwingungsform in Kernen, die im Extremfall zur kalten Separation der Protonen- und Neutronenmaterie führen kann. Die starke kinematische Vorwärtsfokussierung der Zerfallsprodukte bei Projektilanregung erlaubt eine vollständige Vermessung des Zerfallsprozesses und damit eine Rekonstruktion der primären Anregungszustände mit hoher Auflösung. Diese neue Spektroskopiemethode ist besonders interessant bei radioaktiven Strahlen weitab der Stabilität mit ungewöhnlichen Neutronen- zu Protonenverhältnissen. Durch Zerfall der Riesenresonanz können niedrig liegende Kernniveaus bevölkert werden, deren Untersuchung das Studium der Struktur exotischer Kerne möglich macht. Experimente zur Bestimmung der Isomerenverhältnisse aus der Fragmenta-

tion und über Spin-Ausrichtung von Projektilfragmenten ergänzen das Programm zur Erforschung der Kernstruktur.

Eine neue Generation von Experimenten wird in Verbindung mit dem ESR möglich sein. Gekühlte zirkulierende Strahlen exotischer Kerne können für die Messung von Grundzustandseigenschaften, Hyperfeinwechselwirkungen und den Kernzerfall hochgeladener Ionen oder für Reaktionsexperimente in inverser Kinematik am internen Target genutzt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die im Fragmentseparator abgetrennten Strahlen im ESR zu akkumulieren und zu kühlen und dann für Reaktionsexperimente in die Targethalle zu leiten.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Zustandsgleichung von Kernmaterie

Am FOPI-Detektor waren erste Messungen zur Bestimmung der Anregungsfunktion für das System Gold auf Gold sehr erfolgreich. Hauptziel dieser Messungen ist es, aus den Baryonengeschwindigkeitsverteilungen den gerichteten kollektiven Fluß quantitativ von den Komponenten der chaotischen thermischen Bewegung abzutrennen. Die bisher gefundenen kollektiven Anteile sind deutlich höher als erwartet. Dies führt zu einer verstärkten Fragmentbildung, die auch experimentell nachgewiesen wurde. Die Beobachtung eines klaren Signals des Nukleonенflusses läßt hoffen, daß nach genauem Modellvergleich ein besseres Verständnis der impulsabhängigen Kräfte sowie der Streuquerschnitte im Medium erzielt werden können.

Nach den ersten Experimenten mit FOPI der Phase I erscheint es überlegenswert, die Untersuchungen zum kollektiven Fluß mit dem vollständigeren Aufbau der Phase II und unter Veränderung der Kollisionsmasse fortzusetzen. Höhere Priorität haben zunächst aber Messungen zur Pionen-Produktion und insbesondere der Kaonen, sobald deren Identifizierbarkeit an FOPI feststeht.

Aus einem gemeinsamen Experiment des 4π -Detektors und von LAND liegen Daten für das System Gold auf Gold bei 250, 400, 600 und 800 MeV/u vor. Die Auswertung befindet sich noch in der Anfangsphase, da zunächst die Software für eine Unterscheidung der Neutronen von Photonen, Pionen und leichten Kernen entwickelt werden mußte. Diese Entwicklung ist weitgehend abgeschlossen und erste Ergebnisse liegen vor. Die Analyse der Daten wird sich 1993 auf den kollektiven Fluß der neutralen Kernmaterie - korreliert mit den kollektiven Eigenschaften der geladenen Teilchen - konzentrieren. Sie umfaßt Aspekte wie Azimuthverteilungen, Korrelation mit Stoßparameter und Reaktionsebene und Vergleich der Produktionsquerschnitte von Neutronen und geladenen Teilchen. In Verbindung mit Isotopenverhältnissen sind daraus Aufschlüsse über die Bildung mittelschwerer Fragmente zu erhoffen. Eine weitere interessante Fragestellung ist der Nachweis von Neutron-Neutron-Korrelationen, deren Analyse allerdings genaue Kenntnis der Response-Funktion von LAND bei verschiedenen Neutronen-Energien erfordert. Die erforderlichen Daten sollen durch Deuterium-Aufbruch gemessen werden.

In den bisher mit dem ALADIN-Spektrometer durchgeführten Strahlzeiten wurde die Fragmentierung von Goldprojektilen bei einer Reihe von Einschußenergien zwischen 150 und 600 MeV/u nach Beschuß verschiedener Targetkerne gemessen. Dabei konnten alle Zerfallskanäle, in denen der Restkern in Fragmente zerbrach, nachgewiesen werden. Während sich in der ersten Strahlzeit die Untersuchung im wesentlichen auf den Zerfall des Projektils konzentrierte, wurde in der zweiten Strahlzeit der Aufbau durch den Miniball aus MSU und ein Si-CsI-Hodoskop aus Catania, sowie durch den Einsatz von LAND vervollständigt, so daß eine weitgehend vollständige Messung durchgeführt werden konnte.

Ein wichtiges Ergebnis ist, daß die Summe der Ladungen, die nach dem Aufbruch des Projektils in Fragmenten gebunden bleibt, - das sogenannte Z_{bound} - ein optimaler Ordnungsparameter ist, mit dessen Hilfe Reaktionen an verschiedenen Targetkernen verglichen werden können. Werden die Multiplizität der Fragmente, aber auch komplizierte höhere Momente der Fragmentverteilungen, als Funktion von Z_{bound} aufgetragen, so ergibt sich für alle bisher untersuchten Targetkerne ein universelles Verhalten. Dies ist insofern erstaunlich, als ein bestimmter Wert von Z_{bound} für unterschiedliche Targetkerne ganz verschiedenen Stoßparametern entspricht. Die bisherige Auswertung der mit LAND gewonnenen Daten zeigt, daß eine Bestimmung der Anregungsenergie des Projektilrests durch die Messung der Neutronen möglich ist.

In der kommenden Strahlzeit soll die Bestimmung der Anregungsenergie verbessert werden, in dem gleichzeitig die vom Projektil verdampften Neutronen und Protonen gemessen werden. Weiter soll die Untersuchung auf Uran- und Xenon-Strahlen erweitert werden, um außer der Einschußenergie auch die Größe des zerfallenden Systems zu variieren.

Das Kaonen-Spektrometer KaoS wurde Anfang 1991 in Betrieb genommen. Das im Laufe der Experimente weiterentwickelte mehrstufige Triggersystem erlaubt es, Teilchen aufgrund ihrer Masse zu identifizieren und die gewünschten Ereignisse herauszufiltern. Damit konnten die entsprechend den SIS-Intensitäten steigenden Ereignisraten im Spektrometer selektiv verarbeitet werden. Bereits im ersten Experiment mit dem schweren Stoßsystem Gold auf Gold bei 1 GeV/u konnten Kaonen eindeutig identifiziert werden. Simultan beobachtete Reaktionsprodukte ermöglichen die Bestimmung der Reaktionsebene und der Anzahl der am Stoß beteiligten Nukleonen. So konnte experimentell nachgewiesen werden, daß *subthreshold* produzierte Kaonen vorzugsweise in zentralen Kern-Kern-Stößen entstehen, wo man die höchste Energie- und Nukleonendichte erwartet.

Die off-line-Teilchenidentifizierung und -Untergrundunterdrückung wurde durch den Einbau einer zweiten Vieldrahtkammer hinter dem Spektrometer entscheidend verbessert. Damit können jetzt über ein Trackingverfahren der Vertex rekonstruiert und gestreute Teilchen verworfen werden. Zur verbesserten Bestimmung von Teilchentrajektorien bei sehr hohen Strahlintensitäten ist eine weitere Vieldrahtkammer mit reduzierter Massenbelegung zwischen Quadrupol und Dipol vorgesehen.

Für die nächste Zukunft sind systematische Untersuchungen der Kaonen-Produktion in Kern-Kern-Stößen mit verschiedenen Massen und Strahlenergien geplant, um so Größe, Dichte und *Temperatur* des Reaktionsvolumens zu variieren. Vor allem aus dem Vergleich leichter und schwerer Stoßsysteme erwartet man wichtige Informationen über die Kompressibilität von Kernmaterie, da sich hierbei die theoretischen Unsicherheiten bezüglich des elementaren Kaonen-Wirkungsquerschnitts und der Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung im nuklearen Medium zumindest partiell kompensieren. Weiter soll die Sensitivität der K^- auf Kompression und Absorption im nuklearen Medium studiert werden.

Am Fragmentseparator wurden in drei Strahlzeiten die π^- , K^- und Antiprotonen-Produktionsquerschnitte für verschieden große symmetrische und asymmetrische Stoßsysteme ^{20}Ne auf Natriumfluorid, Kupfer, Zinn und Bismut sowie ^{58}Ni auf Nickel bei Strahlenergien zwischen 1.6 und 2.0 GeV/u, also unterhalb der Produktionsschwellen in Nukleon-Nukleon-Stößen für K^- und Antiprotonen, und Sekundärteilchen-Impulsen zwischen 0.5 und 2.75 GeV/c gemessen. Es wurde ein einfaches Skalierungsmodell gefunden, das die gemessenen Querschnitte für verschiedene Stoßsysteme, Einschußenergien und Sekundärteilchenarten und -impulse auf die Differenz zwischen der totalen Produktionsenergie und der im Nukleon-Nukleon-Stoß

verfügbaren Energie zurückführt. Die endgültige Auswertung der Meßdaten ist noch nicht abgeschlossen.

Mit dem Photonenspektrometer TAPS wurde die Produktion von π^0 - und η -Mesonen in den symmetrischen Stoßsystemen Neon auf Aluminium, Argon auf Calcium, Krypton auf Zirkonium und Gold auf Gold bei Einschußenergien bis 1.5 GeV/u untersucht. Zum Teil wurden die Messungen zusammen mit der Vorwärtswand des 4π -Detektors durchgeführt. Dadurch wird z. B. Exklusivität im Stoßparameter garantiert und die Möglichkeit gegeben, die Reaktionsebene ereignisweise festzulegen. Zentrale Stöße im GeV/u-Bereich liefern zahlreiche π^0 , so daß der kombinatorische γ -Untergrund bei der Unterscheidung von Photonen aus dem π^0 -Zerfall und von direkten Bremsstrahlungsphotonen Schwierigkeiten bereitet. Wie gut eine experimentelle Abtrennung des Bremsstrahlungsanteils möglich ist, hängt letztlich von der statistischen Genauigkeit der Messungen ab. Vereinbarungsgemäß wird das Photonenspektrometer TAPS im Jahr 1992 am Elektronenbeschleuniger in Mainz und bei GANIL eingesetzt. Das Ausbauprogramm sieht den Aufbau des fünften und sechsten Blocks mit je 64 BaF₂-Detektoren vor, außerdem eine Erweiterung der Aufnahmeelektronik, so daß die Energieverlustsignale der geladenen Teilchen in den Vetodetektoren ausgelesen werden können.

Kernstruktur und Reaktionen

In bisherigen Experimenten am SIS gelang erstmals der direkte Nachweis der elektromagnetischen Anregung von Zwei-Phonon-Zuständen der Dipolriesenresonanz, im ^{209}Bi durch Beobachtung des doppelten γ -Zerfalls und im ^{136}Xe durch Beobachtung des Neutron-Zerfallskanals. Ein entsprechendes Experiment für den doppeltmagischen Kern ^{208}Pb wird in Kürze durchgeführt werden. Des weiteren ist geplant, die Suche nach höheren Phonon-Zustände fortzusetzen, wobei insbesondere an die Verwendung von im ESR gekühlten Strahlen gedacht ist, was die Effizienz der Nachweismethode wesentlich erhöhen sollte.

Für Ende 1993 ist ein Umzug der Darmstadt-Heidelberg-Kristallkugel zur GSI geplant, was die Möglichkeit eröffnet, γ -Spektroskopie an radioaktiven Strahlen zu betreiben.

Die Testmessungen zum Nachweis der verzögerten Spaltung schwerer targetähnlicher Hyperkerne am Hochdosismeßplatz sind weitgehend abgeschlossen. Messungen der prompten Spaltung von Bismut mit Krypton- und Neonstrahlen im Bereich der Schwellenenergie mit Intensitäten bis zu etwa 10^9 pro spill zeigten, daß es von Vorteil ist, die Fragmente der prompten Spaltung nicht, wie ursprünglich geplant, auszublenden, sondern diese mitzumessen. Während die Datenrate auch bei den höchsten derzeit verfügbaren Strahlintensitäten kein Problem darstellt, ist der Gewinn an Information durch die dadurch ermöglichte koinzidente Messung des zweiten Spaltfragments erheblich und führt zu einer deutlich verbesserten Identifizierung der Komponente der verzögerten Spaltung. Die erfolgreiche Anwendung der Spaltspur-rekonstruktion in Kombination mit der Rückstoß-Schatten-Methode erlaubt die gleichzeitige Bestrahlung einer Reihe von Targets. In den Vorexperimenten konnten die Profile der Targetebenen scharf rekonstruiert werden. Dabei wurden auch einzelne Spaltungen im Schattenbereich gemessen. Diese können als erste Hinweise auf die Beobachtung des Zerfalls von Hyperkernen nach Bildung in relativistischen Schwerionenreaktionen interpretiert werden. Ein erstes Experiment zur Suche nach Hyperkernen ist geplant.

Eine Rückstoß-Schatten-Methode unter Verwendung des Experimentaufbaus, wie er für die Suche nach Hyperkernen entwickelt wurde, ist für den Nachweis targetähnlicher Spaltisomere nach Anregung und Zerfall der Dipol-Riesenresonanz getestet worden. In der Auswertung befinden sich die ersten Testexperimente, in denen ein ^{235}U -Target mit ^{197}Au und ein ^{240}Pu -Target mit ^{161}Dy von jeweils 1 GeV/u bestrahlt

wurde. Nach Bildung und Zerfall der Spaltisomere $^{239\text{mf}}\text{Pu}$, $^{234\text{mf}}\text{U}$ und $^{238\text{mf}}\text{U}$ soll in zukünftigen Experimenten gesucht werden.

Radioaktive Strahlen und exotische Kerne

Die Vermessung der ionenoptischen Eigenschaften und der Separationsgüte des Fragmentseparators wurde mit Fragmenten der leichten, mittelschweren und schweren Projektilen ^{40}Ar , ^{86}Kr , $^{129,136}\text{Xe}$ und ^{197}Au im Energiebereich von 0.5 bis 1 GeV/u fortgeführt. Durch Bahnverfolgung einzelner Teilchen mit Vieldrahtkammern wurden neben den Abbildungseigenschaften der einzelnen Separatorstufen auch die Phasenraumbelegung der Fragmente und die Veränderungen durch den Degradier am dispersiven Fokus vermessen. Diese Messungen sind von grundlegender Bedeutung für die Anpassung des Separators an den Speicherring. Messungen zur Optimierung des Degradierwinkels für optimale Isotopenseparation sowie für optimale Energieschärfe wurden mit verschiedenen Strahlen und Fragmenten durchgeführt, Informationen über Bildfehler zweiter Ordnung und die Korrektur durch Sextupole wurden gesammelt. Die Experimente zeigen, daß der Separator die nach den Monte-Carlo-Rechnungen erwartete Separationsgüte hat, ionenoptische Einstellungen wie Degradierwinkel und Linienbreiten der separierten Isotopenspektren mit den ionenoptischen Rechnungen sehr gut übereinstimmen, und wie erwartet isotopenreine Sekundärstrahlen relativistischer Schwerionen bis Gold zur Verfügung gestellt werden können.

Die Fragmentation als heißer Prozeß eignet sich besonders zur Produktion neutronenarmer Kerne. Experimente zur Suche nach Protonen- und Zweiprotonen-Emittern aus ^{58}Ni - und ^{78}Kr -Fragmentation sowie Sekundärstrahlexperimente mit Strahlen an der Protonenbindungsgrenze sind geplant. Im Experiment zur Fragmentation von ^{129}Xe konnte auf Anhieb ^{103}Sn beobachtet werden, damit scheint die Erzeugung des langgesuchten, doppelt magischen ^{100}Sn durch Xenon-Fragmentation, insbesondere bei Verwendung leichterer Xenon-Isotope möglich. Weiter sind Experimente zur Fragmentation von ^{238}U geplant. Hierbei soll zum einen geklärt werden, wie die Produktionsquerschnitte für schwere Fragmente durch Spaltkonkurrenz beeinflusst werden, zum anderen soll die elektromagnetische Dissoziation von schweren Kernen im Bereich der ($N=126$)-Neutronenschale untersucht werden, um den stabilisierenden Einfluß der Schale aus dem Verhältnis von Neutronenemission zu Spaltung zu bestimmen.

Als wichtige Voraussetzung für ein Experimentierprogramm zur Spektroskopie mittelschwerer neutronen- sowie protonenreicher Kerne wurden die Produktionsraten im Anfangsbereich des astrophysikalischen r-Prozeß-Pfades sowie an der Proton-Drip-Linie gemessen. Aus der systematischen Untersuchung der ^{86}Kr -Fragmentation bei 500 MeV/u konnten Erkenntnisse über den Einfluß des Neutronenüberschusses des Projektils auf die Fragmentationswirkungsquerschnitte, den Memory-Effekt, gewonnen werden. Erste Messungen zur Bestimmung der Lebensdauer nach β -Zerfall von neutronenreichen Kernen aus der Gegend um ^{78}Ni , welche in der ersten Stufe des astrophysikalischen r-Aufbauprozesses von Bedeutung sind, wurden erfolgreich durchgeführt und ausgewertet. Durch die kombinierte Messung Flugzeit, Energieverlust und Halbwertszeit konnten die Isotope eindeutig identifiziert werden. Die unbekannte Lebensdauer des ^{65}Fe wurde ermittelt. Für 1993 ist im Zuge der Experimente zur Spektroskopie an Fragmentationsprodukten die detaillierte Untersuchung der beta-verzögerten Protonenradioaktivität von ^{37}Ca geplant, was unter anderem von Interesse zur Lösung des Rätsels der solaren Neutrinos ist.

Als erste Experimente mit Sekundärstrahlen wurden hinter einem Sekundärtarget Elementverteilungen nach vollständig identifizierten Krypton-Fragmenten gemessen. Für neutronenarme Fragmente mit $N = Z$ ($T_z = 0$) sind die Querschnitte für die Änderung der Kernladung und die gebildeten Elementverteilungen in Überein-

stimmung mit Modellrechnungen deutlich verschieden von denen für stabile Strahlen.

Von besonderem Interesse sind leichte Kerne mit extremem Proton/Neutron-Verhältnis und schwach gebundenen Nukleonen. Durch Arbeiten an anderen Beschleunigern liegen Hinweise auf die Bildung eines Neutronenhalos bei ^{11}Li und ^{11}Be vor. Bei GSI wurde 1992 ein erstes Experiment an den Drip-Line-Kernen ^8He , ^{11}Li , ^{14}Be und Nachbarisotopen durchgeführt und die Impulskorrelationen zwischen Neutronen und Restkern nach diffraktiven Reaktionen oder Coulombauflbruch bei hohen Energien bestimmt. Diese Experimente, bei denen zum ersten Mal der Fragmentseparator, der ESR, das Vorwärtsspektrometer ALADIN und der Neutronendetektor LAND gleichzeitig eingesetzt wurden, sollen fortgesetzt werden. Da bei sehr protonenreichen leichten Kernen der analoge Effekt eines Protonenhalos erwartet wird, soll ^{20}Mg , ein Kern mit vier Protonen zusätzlich zu dem ^{16}O Core, in entsprechender Weise wie die Neutronenhalo-Kerne untersucht werden. Um das Verhalten der Kernradien bei etwas schwereren neutronenreichen Isotopen zu klären, ist geplant, die Wechselwirkungsradien von Kernen um ^{30}Na zu bestimmen und mit den aus Lasermessungen vorliegenden Daten zu vergleichen.

Für die geplante Installation des Kristallkugelspektrometers bei der GSI soll der Bau einer Plattform mit Haltegestell für die Detektoren fertiggestellt werden. Darüber hinaus ist die Erneuerung beziehungsweise Anpassung der Kristallkugelelektronik an das Datenaufnahmesystem der GSI vorgesehen. Diese vorbereitenden Arbeiten sollen bis Ende 1993 abgeschlossen werden.

Zusammenarbeit

Univ. Aarhus	INFN Legnaro
ANL Argonne	Univ. Lund
Univ. Bergen	IPN Lyon
LBL Berkeley	Univ. Mailand
Univ. Bochum	Univ. Mainz
CEN Bordeaux	Univ. Marburg
Univ. Bratislava	ITEP Moskau
CRIP Budapest	LPI Moskau
CIP Bukarest	MEPI Moskau
CIRIL Caen	Kurchatov Inst. Moskau
GANIL Caen	TU München
INFN Catania	Univ. München
Univ. Catania	Univ. Münster
CRL Chalk River	Univ. Nantes
LPC Clermont	IPN Orsay
TH Darmstadt	INFN Padua
MSU East Lansing	Inst. Curie Paris
INFN Florenz	SAV Preßburg
Univ. Florenz	NPI Rez
Univ. Frankfurt	FZ Rossendorf
CERN Genf	LNS Saclay
Univ. Gießen	Univ. Washington Seattle
TH Göteborg	MSI Stockholm
Univ. Göttingen	CRN Straßburg
ILL Grenoble	Univ. Tokio
KVI Groningen	INFN Triest
MPI Heidelberg	RIKEN Wako-shi
Univ. Heidelberg	Univ. Warschau
Univ. Krakau	Inst. Rudjer Boskovic Zagreb

1.3 ESR-EXPERIMENTE

Mittelfristige Ziele

Die Fertigstellung des ESR und die erfolgreichen Tests der Elektronenkühlung von Schwerionenstrahlen eröffnen neuartige Experimentiermöglichkeiten für die Kernphysik. Diese umfassen unter anderem

- Zerfallsexperimente an gespeicherten radioaktiven Kernen in hochionisierten Atomen, z. B. die erstmalige Beobachtung des gebundenen β^- -Zerfalls, der während der Elementsynthese vor vielen Milliarden Jahren eine wichtige Rolle gespielt hat.
- Kernreaktionen im Speicherring mit gekühlten Sekundärstrahlen guter Strahlqualität und mit dünnen Targets und dennoch guter Luminosität.
- Kühlung und Präparation sekundärer radioaktiver Strahlen für Reaktionen an externen Targets, z. B. für Studien der Isospinabhängigkeit der Kernzustandsgleichung in zentralen Stößen mit extrem neutronenreichen Projektilen.

Der ESR bietet die Möglichkeit, fundamentale Wechselwirkungen in hochgeladenen stabilen und instabilen Ionen zu untersuchen. Es ist zum ersten Mal möglich, Prozesse zu studieren, die sich z. B. in stellaren Hochtemperaturplasmen während der Synthese der Elemente abspielen. Aufgrund theoretischer Vorhersagen nimmt man an, daß bestimmte Kerne, welche in einem neutralen Atom stabil sind, in hochionisiertem Zustand instabil werden. Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang das als astrophysikalische Uhr benutzte Isotop ^{187}Re und der für das solare Neutrino-Problem wichtige Kern ^{205}Tl .

In Experimenten zur Massenmessung sollen ausgedehnte Regionen der Nuklidkarte vermessen und aussagekräftige Daten zum Test von Massenformeln gesammelt werden. Es gibt zwei Verfahren der Massenmessung; hohe Präzision ist mit gekühlten Strahlen erreichbar. Kurzlebige, mit geringen Raten erzeugbare Kerne weitab der Stabilität werden über die Umlauffrequenz einzelner Teilchen bei isochroner Einstellung des ESR gemessen. Im ESR kann eine große Anzahl von Isotopen mit ungefähr gleichem Verhältnis von Masse zu Ionenladung gespeichert werden. Es können somit gleichzeitig mehrere Isotope beispielsweise zur Massentrennung oder Mutterkerne und ihre radioaktiven Zerfallsprodukte oder Strahlen und deren Reaktionsprodukte aus Wechselwirkungen mit dem internen Gastarget gespeichert und gekühlt werden.

Die Kombination des Speicherrings mit dem Fragmentseparator bietet neue und einmalige Möglichkeiten. Durch Fragmentation im Separator erzeugte und nach Isotopen selektierte radioaktive Kerne können in den ESR eingeschossen werden. Durch Elektronenkühlung im ESR besteht damit die Möglichkeit, radioaktive Strahlen bester Qualität zu erzeugen. Die im Ring gespeicherten und gekühlten Strahlen höchster Brillianz können für Sekundärreaktions-Experimente mit zirkulierenden Strahlen am internen Gastarget genutzt oder extrahiert und den Experimentiereinrichtungen in der Targethalle zugeführt werden. Die verfügbaren Strahlenergien überstreichen das Gebiet von 3.5 MeV/u, d.h. unterhalb der Coulombbarriere, bis zu relativistischen Energien von 2 GeV/u bei Nutzung der Reinjektion und Nachbeschleunigung im SIS.

Studien zum Nukleonentransfer und zur inelastischen Streuung in inverser Kinematik sind in Vorbereitung. Ziel sind die Untersuchungen der effektiven Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung an doppeltmagischen Kernen weitab der Stabilität und die Kernspektroskopie an radioaktiven Kernen. Aus der elastischen Streuung von isobaren Kernen am gleichen Target kann die Isospin-Abhängigkeit von Kernpotentialen bestimmt werden.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Beim β^- -Zerfall eines Atomkerns wandelt sich ein Neutron in ein Proton um unter Emission eines Elektrons und eines Antineutrinos. Im Prinzip kann das Elektron statt in das Kontinuum auch in einen gebundenen Zustand in der Hülle des Tochteratoms gehen. Für neutrale Atome ist dieser Prozeß aber nur marginal, da die stark gebundenen Zustände in den inneren Elektronenschalen alle besetzt sind. Für hochionisierte Atome mit unbesetzten Orbitalen hingegen - die zum Beispiel in stellaren Plasmen während der Synthese der Elemente in großer Zahl vorhanden waren - ist der *gebundene β -Zerfall* ein wichtiger Zerfallskanal.

Dieser für die Astrophysik bedeutende Prozeß konnte am ESR zum ersten Mal beobachtet und quantitativ analysiert werden. Nackte $^{163}\text{Dy}^{66+}$ -Ionen wurden im ESR gespeichert; die Zahl der durch gebundenen β -Zerfall erzeugten $^{163}\text{Ho}^{66+}$ -Tochteratome wurde als Funktion der Speicherzeit gemessen und daraus die Halbwertszeit bestimmt. Weitere Experimente mit den astrophysikalisch wichtigen Kernen ^{205}Tl und ^{187}Re sind in Vorbereitung.

Nach Fragmentation von ^{20}Ne am FRS gelang es erstmals, radioaktive Ionenstrahlen - ^{19}Ne und ^{18}F - in den ESR zu injizieren und zu kühlen. In diesen Experimenten konnte gleichzeitig die hohe Massenauflösung des ESR unter Beweis gestellt werden. Die simultan gespeicherten Fragmente ^{18}F , ^{14}N und ^{12}C mit $A/Z = 2$ ergaben in den Schottky-Spektren sauber getrennte Signale, was einer Massenauflösung von $\sim 10^{-5}$ entspricht. Im Dysprosium-Experiment konnte eine weitere Verbesserung der Massenauflösung auf Werte von $\sim 10^{-6}$ erreicht werden.

Für die Untersuchung von Kernreaktionen in inverser Kinematik mit radioaktiven Strahlen wurde an der vorläufigen Experimentierkammer am internen Gastarget ein Luminositätsmonitor, bestehend aus drei Oberflächensperrschichtdetektoren zum Nachweis von rückgestreuten Targetkernen im Bereich des Grazingwinkels nahe 90° , aufgebaut. Ein systematisches Meßprogramm zur Bestimmung von Strahllebensdauern und Umladungsquerschnitten wurde begonnen. Die Konstruktion und der Bau einer multifunktionalen Experimentierkammer ist abgeschlossen. Der Einbau ist für Ende 1992 vorgesehen. Ein Prototyp eines UHV-tauglichen PIN-Dioden-Arrays wird ebenfalls Ende 1992 zur Verfügung stehen. Erste Experimente zum Studium direkter Reaktionen an radioaktiven Strahlen im ESR sind für 1993 geplant. Ein erstes Prototyp-Experiment zur inelastischen (p,p') -Streuung an ^{56}Ni wurde kürzlich am Fragmentseparator erfolgreich durchgeführt.

Zusammenarbeit

ANL Argonne
TH Darmstadt
JINR Dubna
Univ. Gießen
Univ. Krakau
LANL Los Alamos

Univ. Mainz
Kurchatov-Institut Moscow
TU München
Univ. München
Univ. Osaka
PNPI St. Petersburg

1.4 CERN-EXPERIMENTE

Mittelfristige Ziele

Die seit 1986 am CERN mit Sauerstoff- und Schwefelstrahlen von 200 GeV/u durchgeführten Experimente sind mit einer letzten Strahlzeit im April 1992 zu Ende gegangen. Die zukünftigen Arbeiten orientieren sich an drei Zielen:

- Abschluß der Auswertung der existierenden Daten,
- Aufbau neuer Experimente für den 1994/95 im SPS verfügbaren Bleistahl und
- Mitwirkung am Konzept eines Schwerionen-Collider-Detektors sowie die Mitarbeit an seiner Realisierung.

Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt zunächst im Aufbau der neuen Blei-Experimente WA98 und NA49 (als Folge-Experimente von WA93 bzw. NA35) bis Mitte 1994. Diese beiden Experimente sind komplementär auf den Nachweis der Photonen und anderer neutraler Teilchen bzw. auf den Nachweis und die Identifizierung der Hadronen gerichtet. Zielsetzung ist wie bisher die Beobachtung der Bildung eines Quark-Gluon-Plasmas sowie eine Reihe wichtiger Fragestellungen zur Reaktionsdynamik, zur Teilchenproduktion und zu den globalen Eigenschaften von Kernmaterie extrem hoher Energiedichte.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

WA93/98

Die Auswertung der Daten hat die deutliche Verbesserung der Sensitivität für π^0 - und η -Mesonen bei Transversalimpulsen unter 1 GeV/c gezeigt, was zu einer wesentlich gesteigerten Genauigkeit in der Bestimmung des η/π^0 Verhältnisses und zu einer höheren Empfindlichkeit für den Nachweis thermischer Photonen geführt hat. Folgende Komponenten des neuen Detektors wurden bereits gebaut und sind im Experiment eingesetzt worden:

- der Magnet GOLIATH mit vergrößerter Akzeptanz,
- der Photonen-Multiplizitätsdetektor (gegenwärtig mit 8000 Detektorelementen und CCD-Auslese),
- eine Si-Driftkammer und Tracking-Kammern zur Bestimmung des γ /Hadron Verhältnisses für jedes Einzelereignis, um vom normalen Verhältnis abweichende Ereignisse zu identifizieren.

Der bis zur Blei-Strahlzeit aus Gründen der höheren Multiplizität erforderliche Aufbau bzw. Umbau umfaßt:

- die Erweiterung des Bleiglas-Spektrometers auf 10000 Module,
- die Erweiterung des Photonen-Multiplizitätsdetektors auf 38000 Module,
- eine Verbesserung der Si-Driftkammern.

Diese Arbeiten und der Aufbau des Experiments müssen weitgehend bis Ende 1994 zum Abschluß kommen. Daneben wird in einem Entwicklungsprojekt das Konzept eines neuartigen TOF-Detektors erarbeitet (Pestov-Zähler), der in großer flächenhafter Ausdehnung zur Identifizierung von Hadronen mit Hilfe von Flugzeitmessungen in künftigen Experimenten dienen soll. Das neue Experiment ist auch mit einer beträchtlichen Erweiterung des Datenaufnahmesystems verbunden, an deren Entwicklung und Aufbau der GSI eine Hauptverantwortung zufällt.

Die mit diesem Experimentaufbau zu erzielende gute Auflösung und hohe Zählrate sollte es ermöglichen, auch große Pionenquellen mit Bose-Einstein-Korrelationen genau zu vermessen. Der Photonen-Multiplizitätsdetektor soll eine Anreicherung direkter Photonen im Einzelereignis sichtbar machen, deren Spektralverteilung dann in den Bleiglasdetektoren gemessen werden kann.

NA35/49

Beim letzten Experiment mit dem Schwefelstrahl wurden neben einer Aufrüstung der Streamerkammer auch neue Detektoren eingesetzt, die im Hinblick auf den Bleistrahlg entwickelt worden waren, und zwar

- eine vom MPI in München entwickelte TPC und
- ein Ring-Imaging-Cherenkov Detektor (RICH).

Zur Auswertung stehen 115000 Streamerkammerereignisse, 45000 RICH - und etwa 1 000 000 TPC-Ereignisse an. Mit dem automatischen Spur-Analyse System (eine Gemeinschaftsentwicklung der GSI und Universität Frankfurt) konnte die Auswerterate für voll-analyisierte Ereignisse um einen Faktor 30 erhöht werden. Bis jetzt wurden damit 5000 Streamerkammer-Ereignisse mit einer Multiplizität von 100 bis 180 geladenen Teilchen analysiert; dabei wurde die automatische Identifizierung von K^0 -, Λ - und $\bar{\Lambda}$ -Zerfällen erfolgreich implementiert. Studien mit hoher Statistik der Spektral-Verteilung der produzierten Teilchen, der Zwei-Pionen Interferometrie (HBT) und der Produktion von Seltsamen Teilchen werden jetzt und in der nächsten Zukunft gemacht. Schwerpunkte der Auswertung von TPC-Daten sind:

- Spektren identifizierter Pionen, Protonen und Antiprotonen,
- Pionen-Interferometrie,
- Kaonenspektren (in einem engen Akzeptanzbereich).

Die Beteiligung der GSI an den neuen apparativen Entwicklungen für das Blei-Experiment wird sich vor allem auf die erste Vertex-TPC konzentrieren, da hier wichtige Fragestellungen für die Pad-Geometrie und die Analog-Elektronik zu lösen sind, bei denen die spezifische Erfahrung der GSI-Beteiligten zum Tragen kommt. Eine Mitwirkung der GSI-Infrastruktur wäre hier sehr wünschenswert. Auch bei der Realisierung der Elektronik bei den Entwicklungsarbeiten für Hard- und Software der Datenanalyse hat die Mitwirkung der GSI traditionell großes Gewicht. Die künftigen Schwerpunkte der GSI auf all diesen Gebieten werden gegenwärtig intensiv diskutiert.

LHC-Schwerionen-Detektor

Im Hinblick auf die geplante Realisierung des Large-Hadron-Colliders (LHC) am CERN um die Jahrhundertwende hat sich eine Proto-Kollaboration gebildet, an der GSI maßgeblich beteiligt ist. Schon bei der Inbetriebnahme des LHC ist ein Schwerionenstrahl vorgesehen, und ein Schwerionen-Experiment ist ein integraler Bestandteil des LHC-Forschungsprogramms. Die derzeitige Hauptaufgabe ist die Erarbeitung eines Konzepts für einen Collider-Detektor. Aufgaben für diese Konzeptentwicklung wurden im Rahmen der Proto-Kollaboration auch von GSI-Mitarbeitern übernommen. Über die Übernahme von Aufgaben bei der Realisierung dieses Detektors muß zu gegebener Zeit beschlossen werden. Falls der LHC wesentlich später oder überhaupt nicht realisiert würde, müßte als Alternative eine Beteiligung an RHIC-Experimenten diskutiert werden (erster Goldstrahl 1997).

Zusammenarbeit

Univ. Athen
INFN Bari
Univ. Bari
LBL Berkeley
Panjab Univ. Chandigarh
Univ. Frankfurt
Univ. Freiburg
CERN Genf
Univ. Genf
KVI Groningen
Univ. Jammu
VEC Kalkutta

Univ. Tennessee Knoxville
Univ. Krakau
Univ. Lund
Univ. Marburg
Kurchatov Inst. Moskau
MPI für Physik München
Univ. Münster
ORNL Oak Ridge
Univ. Rajasthan
Univ. Utrecht
Univ. Warschau
Inst. Rudjer Boskovic Zagreb

1.5 THEORIE

Mittelfristige Ziele

Den vielseitigen experimentellen Fragestellungen entsprechend befassen sich die theoretischen Arbeiten mit der Dynamik von Kern-Kern-Stößen bei allen Energien. Mittel- und langfristig liegen die Schwerpunkte im SIS-Energiebereich und bei höheren Energien.

Mittelenergiebereich (SIS-Energien)

Die kernphysikalischen Experimente am SIS-Beschleuniger ermöglichen detaillierte Untersuchungen hadronischer Prozesse und erfordern zur Analyse theoretische Ansätze, die die Behandlung der mesonischen Freiheitsgrade sowie die Erzeugung von Teilchen und Antiteilchen erlauben. Auf der Basis effektiver Quantenfeldtheorien sollen Methoden entwickelt werden, die die Dynamik von Kern-Kern-Stößen im Rahmen verallgemeinerter Transportgleichungen beschreiben und gleichzeitig elementare Prozesse wie z. B. die Erzeugung von Δ -Anregungen, Pionen, Eta-Mesonen, Kaonen, Lambdas und Dileptonen berechnen lassen.

Um realistische Vorhersagen für konkrete Experimente machen zu können, ist es notwendig, die zu erwartenden großen Mediumeffekte zu erfassen. Die Untersuchungen sollen sich zunächst auf die Eigenschaften des Pions, der Deltaresonanz, des Eta-Mesons und der verschiedenen Vektormesonen in dichter heißer Kernmaterie konzentrieren. Eine konsistente Beschreibung dieser Freiheitsgrade im Medium ist erforderlich, um Informationen über die im Kern-Kern-Stoß kurzzeitig erzeugte heiße dichte Kernmaterie zu gewinnen. Dies gilt insbesondere für solche Experimente, die durch den Zerfall dieser Teilchen im Medium bestimmt sind, wie z. B. die Messung von Dileptonenspektren.

Weitere offene Fragen in semiklassischen kinetischen Modellen wie z. B. die Frage nach der Bedeutung höherer Korrelationen (Kohärenzphänomene) sollen in entsprechend verallgemeinerten quantenmechanischen Ansätzen und am Beispiel lösbarer einfacher Vielteilchenmodelle studiert werden.

Im *Hochenergiebereich* (CERN-Energien) sollen die Bildung eines Quark-Gluon-Plasmas und seine experimentellen Signaturen besser verstanden werden. Dazu gehören Untersuchungen der Materialisierungs-, Äquilibrierungs- und Expansions-

phase sowohl der baryonfreien als auch der baryonreichen Komponente. Von besonderem Interesse sind die Produktion von Hadronen mit Strangeness und ihrer Antiteilchen, sowie die Produktionsverhältnisse verschiedener Vektormesonen, die durch ihren Zerfall in Dileptonen beobachtbar sind.

Im *Niederenergiebereich* (UNILAC-Energien) sollen sich die Arbeiten auf einige spezielle Fragen der kollektiven Dynamik beschränken.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Mittelenergiebereich

Relativistische kinetische Gleichungen (relativistische Landau-Vlasov-Gleichungen) sind im Rahmen des Greenfunktionen-Formalismus hergeleitet und auf Schwerionenstöße bei SIS-Energien angewendet worden. Die Nukleon-Nukleon-Stoßterme zeigen eine starke Abhängigkeit von der effektiven Masse. Diese Mediumeffekte beschleunigen zusammen mit Mean-Field-Effekten den Äquilibrierungsprozeß. Starke Mediumeffekte zeigen sich auch im Reabsorptionsprozeß von Deltas und Pionen bei der Expansion des Feuerballs und sind verantwortlich dafür, daß die Pionmultiplizitäten in Schwerionenstößen für die Bestimmung der Zustandsgleichung von Kernmaterie ungeeignet sind. Kollektive Näherungen der relativistischen Transportgleichungen im Rahmen von Zwei- und Drei-Flüssigkeits-Modellen sind entwickelt und untersucht worden. Sie erlauben eine gute Beschreibung von Kern-Kern-Stößen mit einem minimalen Aufwand an Computerzeit. Es sind Anwendungen auf am SIS gemessene Reaktionen geplant. Als Ergänzung sollen Simulationsrechnungen auf der Basis relativistischer kinetischer Gleichungen durchgeführt werden.

Im Rahmen einer selbstkonsistenten Methode soll die Thermodynamik stark wechselwirkender Quantenfelder untersucht werden. Diese Verallgemeinerung der Thermodynamik wird auch einen Test für die Quasiteilchennäherung erlauben, die in der Formulierung von kinetischen Gleichungen üblicherweise verwendet wird. Darüber hinaus soll geklärt werden, inwieweit eine über die Quasiteilchennäherung hinausgehende realistische Behandlung des Nukleonenspektrums sich auf den Äquilibrierungsprozeß auswirkt.

Die Dileptonenerzeugung im Energiebereich der Rho- und Omegaresonanz wird als mögliche Signatur für die Hochdichtephase im Schwerionenstoß untersucht. Dazu wurde ein feldtheoretisches Modell entwickelt, das konsistent Pion, Deltaresonanz und Rhomeson in Materie beschreibt. Die sich ergebende starke Mediumabhängigkeit der Rhoresonanz führt zu einer entsprechenden Modifikation des Spektrums von Elektron-Positron-Paaren (Dileptonen), die aus der Vernichtung von Pionenpaaren entstehen. Mit analogen Ansätzen sollen die Eigenschaften des Etamesons in Kernmaterie berechnet werden. Dazu ist zunächst ein feldtheoretisches Modell für die Etaproduktion im Pion-Nukleon-Stoß konstruiert worden.

Im Modell einer relativistischen Molekulardynamik wurden mit einer feldstärkeabhängigen Kopplung des skalaren Felds Renormierungseffekte berücksichtigt. Es wird untersucht, inwieweit sich dadurch Kernmaterie, Nukleon-Kern- und Nukleon-Nukleon-Streuung in konsistenter Weise beschreiben lassen. In relativistischen Trajektorienrechnungen soll in semiklassischer Näherung die pionische Austauschwechselwirkung mit ihrer spezifischen Spin-Isospinstruktur berücksichtigt werden.

Das Modell der Fermionischen Molekulardynamik wird durch kurzreichweitige Korrelationen in der Wellenfunktion ergänzt, um damit die Effekte des abstoßenden Hard-Cores in der Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung zu berücksichtigen. Das Ziel ist

eine relativistische Molekulardynamik, die sich im nichtrelativistischen Grenzfall auf ein Bild ähnlich dem in einer Brueckner-Hartree-Fock-Theorie reduziert, während im relativistischen Limes mehr das Bild von klassischen Trajektorien angebracht ist.

Hochenergiebereich

Untersucht worden ist die Produktion von Hadronen mit Strangeness und von bestimmten Vektormesonen als Signale für ein Quark-Gluon-Plasma, das möglicherweise in zentralen Stößen entsteht. Insbesondere liefert der Zerfall der Vektormesonen in Leptonenpaare direkte Informationen über die Hochdichtephase der Reaktion. Im Rahmen transporttheoretischer Modelle ist der Übergang eines Quark-Gluon-Plasmas in die hadronische Phase berechnet worden. Hinweise auf die Bildung eines Quark-Gluon-Plasmas ergeben sich danach aus einer erhöhten Erzeugung von Hadronen mit Strangeness im Zusammenhang mit bestimmten Produktionsverhältnissen für Vektormesonen. Darüber hinaus lassen sich aus den relativen Häufigkeiten verschiedener Vektormesonen Rückschlüsse auf den Äquilibrierungsgrad im Reaktionsablauf ziehen. Das Modell soll erweitert werden, so daß auch die Impulsspektren der Teilchen berechnet werden können.

Komplementär und ergänzend zu diesen Untersuchungen werden die gleichen Observablen im Rahmen eines relativistischen Kaskadenmodells untersucht, welches keinerlei Mediumeffekte berücksichtigt.

Niederenergiebereich

Ergänzend zu bisherigen Arbeiten sollen dynamische Behinderungen von Fusionsreaktionen und elastoplastische Effekte in Schwerionenstößen untersucht werden. Außerdem soll der Zusammenhang von chaotischer Dynamik mit Dissipation und Fluktuation in der kollektiven Dynamik quantenmechanischer Vielteilchensysteme geklärt werden.

Zusammenarbeit

TH Darmstadt
JINR Dubna
Univ. Frankfurt
Univ. Gießen
Univ. Heidelberg

Kurchatov Inst. Moskau
TU München
LMU München
Univ. Regensburg
FZ Rossendorf

2 ATOMARE SCHWERIONENFORSCHUNG

Einsatz von Planstellenpersonal (in Mannjahren)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
2.1 UNILAC-Experimente	4	2	2	2	2	2
2.2 SIS-Experimente	5	5	5	5	5	5
2.3 ESR-Experimente	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>6</u>
Atomare Schwerionenforschung	14	13	13	13	13	13

Aufwand an FuE-Investitionsmitteln (in TDM)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
2.1 UNILAC-Experimente	210	200	210	220	250	280
2.2 SIS-Experimente	185	300	315	330	600	660
2.3 ESR-Experimente	<u>500</u>	<u>500</u>	<u>525</u>	<u>550</u>	<u>1350</u>	<u>1480</u>
Atomare Schwerionenforschung	895	1000	1050	1100	2200	2420

2.1 UNILAC-EXPERIMENTE

Mittelfristige Ziele

Der UNILAC bietet nach wie vor exzellente Möglichkeiten, mit schweren Ionen in einem weiten Energie- und Ladungsbereich atomphysikalische Fragestellungen zu untersuchen. Das experimentelle Programm der Atomphysik am UNILAC umfaßt dabei vier Gebiete: Positronenerzeugung, Atomare Reaktionen, Elementare Prozesse und Strukturstudien an schweren Ionen. Außer den Untersuchungen zur Positronenerzeugung sind die UNILAC-Experimente zum großen Teil Vorarbeiten für SIS- und ESR-Experimente.

Positronenspektroskopie

Mit der Aufnahme des Zweistrahlbetriebs in Verbindung mit der EZR-Quelle kann für UNILAC-Experimente ein unabhängiger Schwerionenstrahl zur Verfügung gestellt werden. Dies erlaubt die Wiederaufnahme der Untersuchungen zur Herkunft der korrelierten e^+/e^- -Paar-Emission. Richtungsweisende Ansätze liegen von theoretischer Seite nach wie vor nicht vor, so daß experimentell aufwendige systematische Untersuchungen zur Klärung des Phänomens begonnen werden müssen. Bei der GSI werden zwei Gruppen - EPOS und ORANGE - diese Messungen durchführen. Gleichzeitig nimmt am Argonne National Laboratory, USA, die dortige APEX-Gruppe Experimente mit gleicher Zielrichtung auf. Insbesondere werden Untersuchungen zur Verteilung der Öffnungswinkel der Dilepton-Paare sowie Messungen zur Stoßparameter- und Einschußenergieabhängigkeit und zur Identifikation des Reaktionskanals erforderlich sein.

Atomare Reaktionen

Bei energiereichen Stößen von schweren Ionen mit Atomen sollen die Reaktionsmechanismen wie Anregung, Ionisation und Elektroneneinfang studiert werden. Folgende Aspekte werden vorrangig bearbeitet: Das Studium von Elektroneneinfangmechanismen, insbesondere von Mehrelektronenprozessen, die Erforschung der Elektronenemission in Schwerionenstößen sowie die detaillierte Untersuchung der Reaktionsmechanismen bei der Erzeugung hochgeladener Rückstoßionen.

Elementare Prozesse

Der Wechselwirkung von hochgeladenen schweren Ionen mit freien Elektronen gilt aufgrund der Bedeutung der Elektronenkühler in Speicherringen besonderes Interesse. Es sollen deshalb an einem kollinearen Elektronentarget extrem hoher Dichte und besonderer Güte die Einfang- und Wechselwirkungsprozesse beim singulären Durchgang untersucht werden. Vor allem sollen die Einfangvorgänge bei sehr schweren Projektilen mit mittelhohem Ladungszustand verstanden werden. Mittelfristig soll auch der Einfluß von Laserstrahlen auf die Einfangmechanismen studiert werden.

Atomspektroskopie

Die genaue Struktur von Wenigelektronenionen soll bei starken Feldern, also bei möglichst hoher Kernladung, erforscht werden. Neben der Untersuchung sogenannter Grundzustandsübergänge in mittelschweren Systemen bietet sich am UNILAC die hervorragende Möglichkeit, ($\Delta n = 0$)-Übergänge sowohl im mittelschweren als auch im schweren Z-Bereich zu studieren. Das Studium isoelektronischer Sequenzen

dürfte dabei besonders aufschlußreich sein. Rydbergübergänge sollen Aufschluß über planetarische Atome geben.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Positronenspektroskopie

Bedingt durch Verschiebungen in der Inbetriebnahmephase des Hochladungsinjektors und des Zweistrahlbetriebs konnten neue Messungen bislang nicht begonnen werden. Der experimentell gesicherte Kenntnisstand zum Auftreten der Positronenlinien bleibt damit unverändert. Wichtig erscheint eine deutliche Stoßparameter- und Einschußenergieabhängigkeit. Die Linien werden überwiegend im elastischen Kanal bei zentralen Stößen schwerster Stoßsysteme beobachtet. Es wurde eine Summenlinie im $(U + Ta)$ -System dominierend in tiefinelastischen Stößen nachgewiesen. Die Breiten aller Summenlinien liegen deutlich unter den durch die Emittengeschwindigkeit bedingten Werten, was auf eine strenge Impulskorrelation der Leptonenpaare hinzuweisen scheint.

Erste Testmessungen mit dem neu aufgebauten EPOS-Spektrometer mit parasitärem Strahl haben die erwarteten instrumentellen Eigenschaften bestätigt. Durch vollständige Symmetrisierung des Geräts wurde der Leptonennachweis auf den gesamten Raumwinkel ausgedehnt und die Effizienz wesentlich erhöht. Das Doppel-Orangen-Spektrometer bleibt in seiner Grundkonstruktion erhalten, wird aber gegenwärtig mit neuen Leptonendetektoren ausgestattet. Damit wird eine um einen Faktor 3 verbesserte Leptonenwinkelauflösung und eine Verdopplung der Nachweiseffizienz erzielt. Außerdem soll die erhöhte Strahlfrequenz zu einer Intensitätssteigerung genutzt werden.

Atomare Reaktionen

Bei Untersuchungen zum Mehrelektroneneinfang wurde Evidenz für einen korrelierten Mehrelektronenprozeß gefunden. Korrelierte Mehrelektroneneinfangprozesse sollen weiter erforscht werden. Beim Beschuß von leichten und mittelschweren Gastargets mit schweren Projektilen zeigen die Elektronenemissionsspektren unerwartete Diffraktionsstrukturen. Ebenso traten bei der Erzeugung von Rückstößen im Schwerion-Atom-Stoß und der damit verbundenen Elektronenemission Korrelationsphänomene auf. Diese Reaktionsmechanismen sollen studiert werden. Die Rückstößenproduktion soll auf ihre anwendungstechnischen Möglichkeiten hin untersucht werden.

Elementare Prozesse

Das kollineare Elektronentarget für *merged* Elektronen-Ionen-Strahlenexperimente wurde erfolgreich im Betrieb getestet. Bei voller Elektronendichte und Güte des kollinearen Elektronentargets liegen erste Messungen zum radiativen Einfang und der dielektronischen Rekombination vor. Systematische Messungen an komplexen schweren Ionen sollen folgen, um auch dafür Verlustraten im Kühler abschätzen zu können. Mögliche Dichteeffekte, also die Wechselwirkung mit mehreren Elektronen gleichzeitig, sollen, sofern nachweisbar, genau vermessen werden. Geplant ist auch, die laserinduzierte Rekombination bei hohen Elektronendichten zu studieren. Außerdem soll die Detektorkammer so verändert werden, daß ein größerer Ionenbeziehungsweise Ladungsbereich zugänglich wird.

Atomspektroskopie

In der Ionenspektroskopie wurde bisher der extreme Vakuum-Ultraviolett-Bereich aus instrumentellen Gründen wenig erforscht. Mit dem aufgebauten Grazing-Incidence-Spektrometer konnten in diesem Bereich Übergänge in mittelschweren Projektilen extrem genau vermessen werden. Zur Vorbereitung geplanter Experimente an SIS und ESR mit den schwersten Ionen sollen mit Hilfe des EUV-Spektrometers im Bereich von $Z \approx 40$ Präzisionsmessungen an Wenigelektronenionen durchgeführt werden. Großes Gewicht wird auf die Bestimmung der ($\Delta n = 0$)-Übergänge in helium- und lithiumähnlichen Systemen gelegt. Zur präzisen Eichung des Spektrometers wird eine spezielle VUV-Kalibrierquelle montiert. Außerdem sollen Rydbergübergänge in den Projektilionen auf ihre Brauchbarkeit zur in situ Kalibrierung untersucht werden.

Zusammenarbeit

Univ. Aarhus
TH Darmstadt
Univ. Frankfurt
Univ. Gießen
MPI. Heidelberg
Univ. Heidelberg
INP Krakau
Univ. Krakau

Univ. Mainz
TU München
MSI. Stockholm
MPI Stuttgart
Univ. Stuttgart
Univ. Wien
MPI Heidelberg

2.2 SIS-EXPERIMENTE

Mittelfristige Ziele

Hinter dem SIS stehen für atomphysikalische Fragestellungen außer dem ESR im wesentlichen zwei experimentelle Einrichtungen zur Verfügung. In Cave A ist vor dem Biophysikmeßplatz ein Atomphysikmeßplatz aufgebaut. Die für atomphysikalische Fragestellungen sehr wichtige Ladungsanalyse der Ionen nach dem Target fehlt hier noch, soll aber möglichst bald vorgesehen werden. Experimente, die auf eine entsprechende Ladungsanalyse angewiesen sind, werden deshalb am Fragmentseparator durchgeführt. Der FRS mit seiner vielseitigen Ionenoptik und hohen Impulsauflösung bietet einzigartige Möglichkeiten, durch mehrmalige Ladungsseparation atomphysikalischen Fragestellungen nachzugehen. Dies betrifft insbesondere Experimente zur Umladung, zum Energieverlust und zum Ionenchanneling in Kristallen. Beide Plätze, sowohl Cave A als auch der FRS, können mittelfristig auch mit Strahlen aus dem ESR bedient werden.

Atomare Reaktionen

Als Arbeitsgrundlage für Experimente mit atomphysikalischen Fragestellungen müssen zunächst Umladereaktionen studiert, also Ladungs-, Energie- und Winkelverteilungen von relativistischen Ionen nach dem Durchgang durch Materie bestimmt werden. Ebenso soll das Abbremsverhalten von schweren Ionen in Materie im relativistischen Bereich untersucht werden. Einfangreaktionen kommt wegen der generellen Bedeutung für den Speicherring besonderes Gewicht zu. Die Einfangreaktionen sollen mittelfristig nicht nur an Gas und an amorphen Festkörpern untersucht werden, sondern auch an ausgerichteten Kristallen, wobei unter Channeling-Bedingungen ein dichtes aber relativ kaltes Elektronengas als Reaktionspartner zur Verfügung steht und die Reaktionen auf einen definierten Stoßparameterbereich

eingeschränkt werden. Im Bereich der Einfangreaktionen sollen besonders Resonanzphänomene, zum Teil auch unter Ausnutzung einer Wechselwirkung mit dem Kern, untersucht werden. Aber auch der Einfang in Rydbergzustände hochgeladener Ionen und deren Umbesetzung unter dem Einfluß des beim Ionendurchgang sich in Festkörpern ausbildenden elektrischen Feldes sollen erforscht werden.

Aufgrund der am SIS erreichbaren hohen Projektilladungszustände können hochgeladene Targetrückstoßionen äußerst effizient erzeugt werden. Zum einen soll die Dynamik der Vielfachionisation (Vielteilchen-Coulombwechselwirkung) mit Hilfe von Vielparameter-Koinzidenztechniken hochdifferentiell untersucht werden. Zum anderen sollen Innerschalen-Ionisationswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit vom Stoßparameter für schwere Targetatome und schwere hochgeladene Projektile bestimmt werden. Diese Experimente geben im Zusammenhang mit geplanten Messungen bei höchsten Energien systematischen Aufschluß über die Projektilgeschwindigkeits- und Kernladungsskalierung der Wirkungsquerschnitte.

Das Studium von Reaktionen in extrem langsamen Stößen mit hochgeladenen Ionen ist ein wenig erforschtes Gebiet, das in Zukunft große Bedeutung gewinnen wird. Mittelfristig ist vorgesehen, am abgebremsten Strahl nicht nur die spektroskopische Struktur und den Einfang zu studieren, sondern mit den neuen Möglichkeiten den quasimolekularen Reaktionsbereich erneut zu untersuchen. Bindungsenergien in superschweren Stoßsystemen sollen über die erwarteten Interferenzstrukturen in der quasimolekularen Strahlung vermessen werden.

Strukturuntersuchungen

Eines der fundamentalen Probleme der theoretischen Atomphysik ist die präzise Berechnung von Bindungsenergien in schweren Wenigelektronensystemen. Während bei wasserstoffähnlichen Ionen quantenelektrodynamische Probleme im Vordergrund stehen, ist bei heliumähnlichen Ionen die Elektron-Elektron-Wechselwirkung von besonderem Interesse. Erst in den letzten Jahren ist es gelungen, vielversprechende Ansätze zur Berechnung der Feinstruktur in heliumähnlichen Ionen bei hohen Kernladungszahlen zu entwickeln. Da an der neuen Beschleunigeranlage auch die schwersten wasserstoff- und heliumähnlichen Ionen für Experimente zur Verfügung stehen, zielt ein Teil des atomphysikalischen Programms auf die experimentelle Bestimmung der Niveauenergien solcher Systeme. Die Dynamik der Übergänge zwischen den Niveaus gibt ebenfalls Aufschluß über die Struktur von schweren Wenigelektronenionen.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Atomare Reaktionen

Die Möglichkeit, am Fragmentseparator bei wählbarem Ladungszustand der einlaufenden Ionen, den neuen Ladungszustand nach dem Wechselwirkungstarget zu bestimmen, soll genutzt werden. Neben der Vermessung von Ladungs-, Energie- und Winkelverteilungen schwerer Ionen nach dem Durchgang durch Materie soll vor allem der Einfang zustandsselektiv untersucht werden. Hier sind neben einfachen Röntgenmessungen, die zum Teil auch das Stark-Mixing im Wakefield bestimmen sollen, auch Röntgen-Teilchen-Koinzidenzmessungen geplant. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf resonanten Einfangprozessen, die auch die spektroskopische Untersuchung seltener Zerfälle metastabiler Niveaus erlauben.

Die Einfangreaktionen, insbesondere die Resonanzphänomene, lassen sich besonders effektiv unter Channeling-Bedingungen untersuchen. Deshalb wurde für den Fragmentseparator eine Apparatur für Channeling-Experimente aufgebaut. Erfolg-

reiche Vorexperimente zur Erzeugung eines Parallelstrahls haben gezeigt, daß grundlegende Channeling-Studien auch ohne gekühlte Strahlen mit aktiven Kristallen durchgeführt werden können. Schwerpunktmäßig soll zunächst der resonante Elektroneneinfang sowohl bei Hüllen- als auch bei Kernanregung untersucht werden. Channeling-Studien werden vor allem dann interessant, wenn eine Rückführung eines dichten gekühlten Ionenstrahls aus dem ESR über das SIS in den Fragmentseparator möglich ist, was für 1993 geplant ist.

Die Untersuchung der Rückstoßionenerzeugung im relativistischen Störbereich wurde mit einer neu entwickelten Apparatur, bisher meist am parasitären Strahl, begonnen, wobei vor allem die Ein- und Zweifachionisation von Helium untersucht wurde. Die Vielfachionisationsquerschnitte sollen nun auch bei schwereren Recoilionen systematisch vermessen werden, da diese Daten neben ihrer generellen Bedeutung für die Ionisationstheorien die Grundlage für die Absolutnormierung des zerstörungsfreien Restgasionisationsprofilmonitors ist, der 1993 in den ESR eingebaut werden soll. Des weiteren ist geplant, die Vielfachionisation, hier insbesondere auch die Doppelionisation von Helium, differentiell in Abhängigkeit vom Rückstoßionenimpuls zu vermessen. Hierzu wird ein kalter Gasjet aufgebaut, welcher es ermöglicht, Rückstoßionenimpulse mit hoher Präzision ($\Delta p \leq 1$ au) und einem Raumwinkel von etwa 50 % zu vermessen.

1993 sollte in Cave A routinemäßig ein aus dem ESR extrahierter, abgebremster und hochgeladener Schwerionenstrahl zur Verfügung stehen. Mit ersten Messungen soll der K-K-Ladungstransfer und dann die quasimolekulare Strahlung aus super-schweren Quasimolekülen untersucht werden. Die nötigen Apparaturen sind vorbereitet und werden vor Ort aufgebaut.

Strukturuntersuchungen

Nach der Inbetriebnahme des Hochladungsinjektors sollen sowohl mit einem hochauflösenden Kristallspektrometer als auch mit einem effizienten doppler-tuned Spektrometer in einer ersten Versuchsreihe die Grundzustands-Übergangsenergien wasserstoff- und heliumähnlicher schwerer Ionen wie Blei und Uran bestimmt werden. Erste aussagekräftige Resultate zur Lambshift, zu Elektronenkorrelationen und zu relativistischen Effekten in sehr starken atomaren Feldern liegen vor. Präzise Messungen sollen vornehmlich am Fragmentseparator mit verschiedenen schweren Ionen durchgeführt werden.

Bei genügend hoher Strahlintensität sollen außerdem Messungen zur Feinstruktur in heliumähnlichen schweren Ionen, insbesondere zur Bestimmung der (2^3P_0 - 2^3P_1)-Aufspaltung z. B. in heliumähnlichem Gold, begonnen werden. Dieser Übergang soll sowohl direkt gemessen als auch über die Lebensdauer indirekt bestimmt werden. Das letztere Experiment beruht auf der Bestimmung der Lebensdauer des 2^3P_0 -Zustands, der durch die Hyperfeinwechselwirkung mit dem 2^3P_1 -Zustand gemischt ist.

Zusammenarbeit

Univ. Aarhus
LBL Berkeley
CRNL Chalk River
Univ. Frankfurt
NIST Gaithersburg
Univ. Gießen
Univ. Krakow
INP Krakow

LLNL Livermore
Univ. Lyon
Univ. Mainz
KSU Manhattan
Univ. Curie Paris
Univ. Missouri Rolla
Univ. Stockholm
Western Michigan Univ., Kalamazoo

2.3 ESR-EXPERIMENTE

Mittelfristige Ziele

Der Experimentier-Speicherring ESR bietet auf dem Gebiet der Atomphysik einzigartige Möglichkeiten, die Wechselwirkung von hochgeladenen Ionen mit einzelnen Atomen im Gastarget, mit freien Elektronen im Kühler und mit Photonen aus Laserstrahlen zu untersuchen und damit die Struktur von Ionen, die Dynamik in Stößen sowie elementare Prozesse zu studieren. Mit einem gekühlten und abgebremsten Strahl, der auch extrahiert werden kann, eröffnen sich weitere faszinierende Forschungsmöglichkeiten bis hin zur sekundären Speicherung von völlig abgekühlten Ionen.

Messungen am internen Target

Am internen Gastarget soll die Dynamik von Einfangreaktionen studiert werden. Dabei ist vor allem auch an eine zustandsselektive Untersuchung des Elektroneneinfangs mit Hilfe von Teilchen-Röntgen-Koinzidenzen gedacht. Der Schwerpunkt soll bei den schwersten Ionen und dort bei relativ niedrigen Geschwindigkeiten liegen, aber auch Anregungs- und Ionisationsprozesse können studiert werden. Mittelfristig ist auch daran gedacht, die Ionisationsprozesse mit einem Elektronenspektrometer unter 0° zu erfassen. Unabhängig davon soll die Kinematik bei der Rückstoßionenproduktion untersucht werden. Der selektive Einfang in schwere, insbesondere auch nackte Ionen bei mäßigen Geschwindigkeiten unter ≤ 30 MeV/u bietet außerdem die einmalige Möglichkeit einer hochpräzisen Spektroskopie von Wenigelektronensystemen bei starken Feldern. Aufgrund der Reinheit der Röntgenspektren vom Gastarget und aufgrund der Verfügbarkeit von verschiedenartigen neuen hochauflösenden Röntgendetektoren werden extrem genaue Daten zur Struktur von schweren Wenigelektronenionen möglich. Anzumerken ist auch, daß die atomaren Reaktionen im Gastarget zur Identifikation der umlaufenden Ionen, wie z. B. beim β^- -Zerfall oder beim Operating des Rings ausgenutzt werden. Diese Methode, die bei der erstmaligen Beobachtung des *gebundenen* β^- -Zerfalls mit Erfolg angewendet wurde, soll auch bei weiteren Experimenten zum Nachweis dieser radioaktiven Zerfallsart (^{205}Tl , ^{187}Re) sowie zur Messung des Verhältnisses von *gebundenem* und Kontinuums- β -Zerfall angewendet werden.

Messungen am Elektronenkühler

Der Elektronenkühler am ESR bietet die Möglichkeit, die Wechselwirkungen zwischen hochgeladenen Ionen, Elektronen und Photonen bei extrem niedrigen Relativgeschwindigkeiten zu untersuchen. Die Daten, die bei entsprechenden Experimenten gewonnen werden können, sind nicht nur für die Plasma- und die Astrophysik von Interesse sondern auch von grundlegender Bedeutung für die Atomphysik. Sie liefern unter anderem direkt die Bindungsenergien wasserstoffähnlicher Ionen, die Struktur der Energieniveaus von Ionen mit nur wenigen Elektronen sowie Informationen über die Eigenschaften doppeltangeregter Zustände. Die Experimente umfassen dabei im wesentlichen die verschiedenen Elektroneneinfangprozesse wie strahlende Rekombination, Drei-Körper-Rekombination und dielektronische Rekombination sowie deren Modifikation durch das Einstrahlen von intensivem Laserlicht. Insbesondere liefern die Messungen zur dielektronischen Rekombination neuartige Aussagen zu doppeltangeregten schweren Wenigelektronenionen, die erlauben, Elektronenkorrelation in starken Coulombfeldern zu untersuchen. Darüberhinaus liefern alle Rekombinations-Experimente wichtige Daten zur Diagnose der Qualität des Ionen- und des Elektronenstrahls.

Messungen mit Lasern

Laserlicht wird in der Atomphysik als Sonde mit hoher Energieauflösung und großer Empfindlichkeit verwendet. Der ESR, der hochgeladene gekühlte schwere Ionen bis hin zu U^{92+} mit relativistischen Geschwindigkeiten zur Verfügung stellt, bietet dabei neue Möglichkeiten. Erste Laserexperimente betreffen die Spektroskopie hochgeladener wasserstoffähnlicher Ionen, Untersuchungen zur Elektron-Ion-Wechselwirkung durch laserinduzierte Rekombination sowie Präzisionsmessungen an relativistischen ${}^7\text{Li}^+$ -Ionen.

Da die Hyperfeinstruktur-Aufspaltung proportional zu Z^3 ist, liegen Hyperfeinstruktur-Übergänge im Grundzustand wasserstoffähnlicher schwerer Ionen im optischen Bereich und können daher mit Laserlicht angeregt werden. Durch Analyse der über Fluoreszenz erhaltenen Linienbreite lassen sich Aussagen über die Impulsunschärfe der gespeicherten Ionen gewinnen. Präzisionsmessungen solcher Aufspaltungen lassen sich für einen Test der QED im starken Coulombfeld hochgeladener Kerne heranziehen. Der größte die Aufspaltung beeinflussende QED-Beitrag ist derjenige zum magnetischen Moment des Elektrons. Dieser Beitrag sollte sich von demjenigen in niedrigen elektrischen Feldern, der durch präzise (g-2)-Messungen getestet wurde, unterscheiden.

Mit Hilfe von laserinduzierter Rekombination soll die Wechselwirkung zwischen im ESR gespeicherten nackten Ionen und den Elektronen des Kühlers bei niedrigen Relativenergien untersucht werden. Das zweikomponentige Plasma aus Ionen und Elektronen im Kühler ist trotz seiner niedrigen Temperatur vollständig ionisiert. Dieser äußerst ungewöhnliche Zustand erlaubt es, neuartige Phänomene zu studieren und den Bereich in der Nähe der Ionisationsgrenze, in dem Kontinuum- und Rydbergzustände vorliegen, abzutasten. Entstehen beim Eindringen eines nackten Ions hoher Ladung in das Elektronenplasma des Kühlers Debye-Kugeln, so ist ein Übergang in einen Vielelektronen-Rydbergzustand möglich. Durch einen laserinduzierten Übergang sollen die Elektronen zu tiefer liegenden Zuständen geführt werden, die Zustandsbevölkerung soll durch Durchstimmen der Laserwellenlänge analysiert werden.

Ziel der Präzisionsmessungen an relativistischen ${}^7\text{Li}^+$ -Ionen ist ein Test der Zeitdilatation in der speziellen Relativitätstheorie. Hierzu wird der gespeicherte Ionenstrahl mit zwei gegenläufigen Laserstrahlen parallel überlagert, womit sich linearer und nichtlinearer Anteil des Doppler-Effekts extrahieren lassen. Durch die Möglichkeit des Laserkühlens sowie durch den außerordentlich großen Doppler-Effekt bei der hohen Ionengeschwindigkeit im ESR erwartet man eine Genauigkeit, die die bisheriger Experimente um mehrere Größenordnungen übertrifft.

Studien zu HITRAP

Viele Untersuchungen - vor allem Präzisionsexperimente - erfordern das Abbremsen der hochgeladenen, schweren Ionen auf möglichst niedrige Geschwindigkeiten. Mittelfristig sollen in einer Studie zu HITRAP (Heavy Ion Trap) die Grenzen für das Speichern extrahierter und abgebremster Ionen in einer Falle erforscht werden. Es ist geplant, Ionen, die im ESR akkumuliert und gekühlt werden, auf möglichst kleine Energien abzubremesen und dann zu extrahieren; durch weitere externe Abbremsung könnten sie auf so niedrige Energien gebracht werden, daß sie in einer elektromagnetischen Falle eingefangen werden können. Gedacht ist dabei hauptsächlich an nackte Ionen höchster Massenzahl und an radioaktive Isotope vom Fragmentseparator. Mit den eingefangenen Ionen sollen atom- und kernphysikalische Präzisionsexperimente durchgeführt werden. Auch ist daran gedacht, Fragestellungen der Plasmaphysik nachzugehen und die Möglichkeit der Kristallisation von gefangenen

nackten Schwerionen zu untersuchen. Die Studien zu HITRAP sollen 1993 aufgenommen werden.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Messungen am internen Target

Durch kontinuierliche Verbesserungen wurde am internen Gastarget inzwischen eine Massenbelegung von 1×10^{12} Atomen/cm² für Stickstoff und von 6×10^{12} Atomen/cm² für Argon erreicht. Das Dichteprofil wurde mit unterschiedlichen Methoden wie der Messung der Umladungsrate der gespeicherten Ionen beziehungsweise der Photonenrate als Funktion der Strahlverlagerung bestimmt. Es ergab sich eine Halbwertsbreite in transversaler Richtung von 4 - 6 mm bei einer Basisbreite von 8 - 10 mm. Aus der Doppler-Breite charakteristischer Projektil-Röntgenstrahlung konnte der Schluß gezogen werden, daß der Gasstrahl auch in longitudinaler Richtung, also in Richtung der gespeicherten Ionen, nur wenige mm ausgedehnt ist. Der aufintegrierte Halo der Gasverteilung im Ring beträgt weniger als 10 % des gesamten Gasanfalls. Damit sind, bezüglich Geometrie und Luminosität, die Voraussetzungen für atomphysikalische Umlademessungen (Wirkungsquerschnitte für e⁻-Einfang und e⁻-Verlust), Koinzidenzmessungen zwischen charakteristischer Röntgenstrahlung und Umladung, sowie für zustandsselektive Röntgenspektren erfüllt. Inzwischen wurden Messungen an nackten oder wasserstoffähnlichen Ionen, z. B. an Ne¹⁰⁺ und Au⁷⁹⁺ sowie an Dy⁶⁶⁺ und Dy⁶⁵⁺, durchgeführt. Damit konnten Umladequerschnitte simultan, also mit identischer Luminosität unter Einzelstoß-Bedingungen und mit definierten Anfangs- und Endzuständen bestimmt werden.

In Koinzidenz mit den umgeladenen Ionen Au⁷⁸⁺ oder Dy⁶⁵⁺ wurde charakteristische Projektil-Röntgenstrahlung detektiert, die entsteht, wenn das gespeicherte Ion ein Elektron im Gastarget in angeregte Zustände der Elektronenhülle einfängt. Diese Spektren sind - unter den extrem sauberen Bedingungen des ESR - vollständig untergrundfrei und stellen eine ideale Grundlage für eine immer weiter verbesserte Röntgenspektroskopie wasserstoffähnlicher schwerer Ionen dar, die auch die Vorteile von abgebremsten Ionenstrahlen ausnutzen werden. Gegenwärtig ist die Genauigkeit noch limitiert durch die zur Zeit verwendeten Ge(i)-Detektoren. Im nächsten Schritt - vor dem Einsatz von Kristallen, von denen die höchstmögliche Präzision erhofft wird - sind ortsempfindliche Germanium-Röntgendetektoren beziehungsweise der Einsatz von Absorptions-Filtern (*Dopplertuning*) vorgesehen, womit die jetzt erreichte Auflösung um einen Faktor 5 - 10 verbessert werden kann. Solche präzisen Messungen an schwersten Ionen sind für 1993 geplant.

Des weiteren sollen Restgasionisationsdetektoren als genaue Strahlprofilmonitore in den ESR eingebaut werden. Ebenso wird in die neue zentrale Streukammer, die Anfang 1993 meßbereit sein sollte, ein weiterer Rückstoßionendetektor eingebaut. Neben der Möglichkeit, die Stoßparameterabhängigkeit der Innerschalenionisation in schweren Wenigelektronensystemen zu untersuchen, soll dieser Detektor als Luminositätsmonitor den Überlapp zwischen Ionen- und Atomstrahl ortsauflösend registrieren. Restgasionisations- bzw. Rückstoßionendetektoren dürften auch eine wichtige Voraussetzung für Präzisionsexperimente in der Spektroskopie sein.

Messungen am Elektronenkühler

Die bisherigen Experimente zur Elektronenkühlung schwerer Ionen waren sehr erfolgreich. Bei allen Ionensorten, die im ESR gespeichert wurden, konnten die longitudinalen Impulsunschärfen $\Delta p/p_0$ von anfänglich $\sim 10^{-3}$ auf Werte $< 10^{-5}$ reduziert werden. Mit den im Ring eingebauten ortsempfindlichen Umladedetektoren konnten die Raten für den radiativen Elektroneneinfang im Kühler bestimmt werden.

Aus der Zeitabhängigkeit dieser Raten wurden die *Lebensdauern* der gespeicherten Ionen bezüglich Elektroneneinfang im Kühler ermittelt. Es zeigte sich, daß mit einem Kühlerstrom von nur 0.1 A alle bisher gespeicherten Ionen ausreichend gekühlt wurden, selbst bei Einsatz des *vollen* Gastargets. Für nackte, gespeicherte Ionen konnten Lebensdauern bis zu 60 h für Ne^{10+} erreicht werden; selbst für die schwersten Ionen wie Au^{79+} und Bi^{83+} lagen die gemessenen Lebensdauern noch bei 45 Minuten. Die Einfangraten skalieren, von Ne^{10+} bis Bi^{83+} , sehr gut mit Z^2 - was zwar theoretisch erwartet, aber keineswegs sicher war.

In mehreren Experimenten wurde der Zusammenhang von Einfangrate, bestimmt durch die transversale Elektronentemperatur, und Strahlgröße studiert. Dabei zeigte sich, daß sich diese Größen in gewisser Weise gegenläufig verhalten: Bei maximaler Rate ist der Strahldurchmesser nicht minimal und umgekehrt. In einer ersten Erklärung wird dies auf die Anregung transversaler Instabilitäten bei optimaler Kühlung zurückgeführt. Dieses interessante und für die praktische Durchführung von Experimenten wichtige Phänomen bedarf aber noch eingehender Untersuchungen.

Nach den ersten erfolgreichen Testmessungen des strahlenden Elektroneneinfangs und der dielektronischen Rekombination mit hochgeladenen Bi^{80+} -Ionen wurden diese Prozesse für hochgeladene Au^{76+} -Ionen im Mehrladungsbetrieb untersucht. Die sehr gute Übereinstimmung der gemessenen Daten mit theoretischen Voraussagen erlaubt, relativistische Effekte auf die Resonanzenergien und Autoionisationsraten im Detail zu studieren. Die Meßreihe wird mit der Untersuchung von weiteren schweren Ionen in einem erweiterten Spektralbereich fortgesetzt. Durch den Einsatz von neuen Meßmethoden - wie z. B. HF-Abbremsen der Ionen und getaktete Kühlerregelung, wird das Ziel verfolgt, auch KLL-Dielektronische Rekombination in schweren Ionen zu untersuchen. Außerdem soll versucht werden, Hyperfeinstruktureffekte beim resonanten Einfang zu sehen. Besonderes Interesse gilt der Anwendung der dielektronischen Rekombination als Mittel zur Diagnose der Elektronenkühlung und der Möglichkeit, die Rekombination generell zur langsamen Extraktion von Ionen aus dem ESR zu nutzen. Die beim Einfang entstehende Röntgenstrahlung soll ebenfalls mitgemessen werden.

Messungen mit Lasern

Am ESR wurden erste Strahlzeiten zur Laser-induzierten Elektron-Ion-Rekombination mit Nachweis durch einen Umladedetektor im Dipolmagneten durchgeführt, wobei neben der Vieldrahtkammer auch ein neu entwickelter Szintillationsdetektor erfolgreich eingesetzt wurde. In der Zwischenzeit ist die Laserstrahlführung vervollständigt und neue Laserdurchtrittsfenster mit besserer Qualität am ESR sind eingebaut. Weitere Maßnahmen zur genauen Diagnose der Strahlage im Kühler sind notwendig, um einen optimalen Überlapp des Laserstrahls mit dem Ionenstrahl sicherzustellen und damit genügend Energiedichte zur Signalerzeugung zu gewährleisten.

Eine Diagnosemöglichkeit besteht in der optischen Anregung mit Fluoreszenznachweis an bekannten Grundzustandsübergängen leichter bis mittelschwerer Ionen. Solche Messungen sind auch als Vorbereitung der Spektroskopie der Hyperfeinstruktur wasserstoffähnlicher schwerer Ionen geplant, da auch eine detaillierte Auswertung der Messung an Bi^{82+} bisher kein statistisch signifikantes Fluoreszenzsignal ergab. Diese Messung soll mit einem neu entwickelten effizienten Nachweissystem wieder aufgenommen werden, sobald die Diagnose des Überlapps zwischen Laser und Ionenstrahl sichergestellt ist. Das neue Nachweissystem deckt einen größeren Raumwinkel ab, ohne das Stacking-Verfahren zur Füllung des Speicherrings zu beeinträchtigen.

Zur Untersuchung des relativistischen Doppler-Effekts werden zunächst die Messungen am TSR in Heidelberg mit Li^+ weitergeführt. Mit dem dort erarbeiteten

Spektroskopieschema und durch die Anbindung der Laserwellenlängenmessung an dopplerfreie Referenzspektren von molekularem Jod soll bereits eine wesentliche Verbesserung gegenüber vorhandenen Literaturwerten erreicht werden. Für die Li^+ -Messungen am ESR ist es erforderlich, in einer ersten Strahlzeit den Anteil an metastabilen Ionen mittels Laserfluoreszenz zu bestimmen.

Zusammenarbeit

Univ. Frankfurt
NIST Gaithersburg
Univ. Gießen
MPI. Heidelberg
Univ. Heidelberg
Univ. Krakow

INP Krakow
Univ. Mainz
Univ. Paris
Univ. Stockholm
Univ. Stuttgart

2.4 THEORIE

Mittelfristige Ziele

Die Atomphysik bei SIS-Energien bildet einen Schwerpunkt der theoretischen Studien. Quantenelektrodynamische Beiträge zur Hyperfeinstruktur in wasserstoffartigen Systemen sollen ausgewertet werden. Bislang sind weder das Vorzeichen noch der Betrag der Strahlungskorrekturen bekannt. Im Zusammenhang mit der Präzisionsspektroskopie hochgeladener schwerer Ionen wird der Einfluß quantenelektrodynamischer Strahlungskorrekturen höherer Ordnung auf atomare Übergänge berechnet.

Begleitend zu den geplanten Positronenexperimenten bei der GSI und in Argonne werden die theoretischen Positronenemissionswahrscheinlichkeiten ermittelt. Der Zusammenhang zwischen nuklearen Reaktionen im Energiebereich an der Coulomb-Barriere und der Positronenerzeugung soll eingehend beleuchtet werden. Im Zusammenhang mit der vorhergesagten spontanen Positronenemission in überkritischen Feldern werden nukleare Reaktionskanäle mit relativ langen Kontaktzeiten gesucht.

Ebenso stellt die Erzeugung neuer Teilchen in hochenergetischen Schwerionenstößen ein umfangreiches Forschungsprojekt dar.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Motiviert durch die beobachteten linienartigen Strukturen in den Positronenspektren werden die Winkelkorrelationen der emittierten Elektronen und Positronen bei Konversionsprozessen und atomaren Produktionsmechanismen detailliert studiert. Die Dynamik dissipativer Schwerionenstöße wird mit Hilfe von Elektronenanregungsprozessen analysiert. Die Deltaelektronenemission wird unter der Annahme unterschiedlicher nuklearer Trajektorien berechnet. Hinweise auf besonders lange Kontaktzeiten sowie auf außergewöhnlich tiefe Potentiale werden verstärkt untersucht.

Als Test der Quantenelektrodynamik in starken Feldern wird angestrebt, Selbstenergiekorrekturen höherer Ordnung als Beitrag zur Lamb-Shift in schweren Atomen

zu berechnen. Gleichbedeutend wird die Delbrück-Streuung von Photonen an Atomkernen mit hoher Ordnungszahl bestimmt.

Die Multiplizität produzierter Elektron-Positron-Paare in ultrarelativistischen Schwerionenstößen wird berechnet. Besonderes Interesse gilt exotischen Prozessen, z. B. der Formation von Higgs-Bosonen, Glue-Bällen und Z^0 -Bosonen bei LHC-Energien. Nichtstörungstheoretische Verfahren im Rahmen des Wignerschen Transporttheorie-Formalismus werden entwickelt, Paarerzeugungsprozesse sollen quantitativ ausgewertet werden.

Zusammenarbeit

Univ. Frankfurt
Univ. Gießen

GH Kassel
TU München

3 FORSCHUNG MIT SCHWEREN IONEN AUF ANDEREN GEBIETEN

Einsatz von Planstellenpersonal (in Mannjahren)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
3.1 Plasmaphysik	3	3	3	3	3	3
3.2 Materialforschung	4	4	4	4	4	4
3.3 Biophysik	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>
Forschung mit schweren Ionen auf anderen Gebieten	10	10	10	10	10	10

Aufwand an FuE-Investitionsmitteln (in TDM)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
3.1 Plasmaphysik	360	250	260	270	400	440
3.2 Materialforschung	280	250	260	270	450	500
3.3 Biophysik	<u>150</u>	<u>150</u>	<u>160</u>	<u>170</u>	<u>300</u>	<u>330</u>
Forschung mit schweren Ionen auf anderen Gebieten	790	650	680	710	1150	1270

3.1 PLASMAPHYSIK

Mittelfristige Ziele

Strahlen schwerer Ionen sind ein idealer und effizienter Energieträger für die Erzeugung hoher Energiedichte in Materie. Die zu erwartende hohe Intensität der Strahlpulse von SIS und ESR erlaubt die Erzeugung dichter Plasmen von schweren Elementen wie Xenon und Gold, die Untersuchung ihrer hydrodynamischen Entwicklung sowie die Bestimmung thermodynamischer Eigenschaften von Materie unter extremen Bedingungen von Druck und Temperatur. Die Erzeugung solch intensiver Strahlen profitiert von dem hohen Entwicklungsstand der Beschleunigertechnologie im allgemeinen und von den speziell bei der GSI gegebenen Möglichkeiten, durch Elektronenkühlung im ESR hohe Phasenraumdichten für Strahlen schwerer Ionen bereitzustellen. Die Untersuchung von Wechselwirkungsprozessen zwischen schweren Ionen und Plasmen, sowie die Herstellung von Plasmen mit intensiven Schwerionenstrahlen stellen einen entscheidenden Schritt für ein tiefergehendes Verständnis trägheitseingeschlossener Fusionsplasmen dar. Die mittelfristigen Ziele der geplanten Experimente richten sich sowohl auf die Untersuchung solcher Plasmen als auch auf die Erzeugung von kurzen Strahlpulsen hoher Intensität.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Der Meßplatz für Experimente mit hohen Strahlströmen ist seit Mitte 1991 in betriebsbereitem Zustand. Erste Messungen mit verschiedenen Ionenstrahlarten wie Neon, Argon und Nickel haben gezeigt, daß das Feinfokussiersystem entsprechend der geforderten Spezifikationen arbeitet. Bisher konnten Fokusdurchmesser von $800\text{ }\mu\text{m}$ erzielt werden. Für intensive Ionenstrahlen hoher Phasenraumdichte ($\epsilon < 1.5\pi\text{ mm} \times \text{mrad}$), die durch Elektronenkühlung im ESR erzeugt werden, lassen sich damit Strahldurchmesser von $200\text{ }\mu\text{m}$ erzeugen.

Die Intensität der Ionenpulse, die im augenblicklichen Ausbauzustand des Beschleunigersystems erzeugt werden können, sind noch zu gering, um Plasmen in kleinen Materieproben zu erzeugen. Für die experimentellen Arbeiten steht daher zur Zeit die Entwicklung von Diagnostikverfahren für dichte, nicht ideale Plasmen im Vordergrund. Hier bieten sich spektroskopische Verfahren zur Messung der Starkverschiebung von Emissionslinien an. Dieses Verfahren wurde an Ionenstrahlgetriebenen Xenon-Plasmen getestet. Weitere Diagnostikverfahren, die in ersten Experimenten am Hochintensitätsplatz untersucht wurden, basieren auf der Spektroskopie der charakteristischen Projektil- und Targetstrahlung und auf der Analyse von Ladungsaustauschreaktionen.

Ein zentrales Thema im Zusammenhang mit der Erzeugung hoher Energiedichte in Materie ist die Entwicklung von neuen Fokussiermethoden für intensive Ionenstrahlen. In Zusammenarbeit mit einer Gruppe der Universität Erlangen konnte ein neues Prinzip einer Plasmalinse, basierend auf einer homogenen wandstabilisierten Plasmaentladung, entwickelt und zur Anwendung gebracht werden. Diese Linse besitzt eine sehr hohe Abbildungsqualität, die durch die Anpassung der Entladegeometrie an die Skintiefe der Entladung im Plasma und an den Durchmesser des zu fokussierenden Ionenstrahls erreicht wird. Mit dieser Anordnung wurden Fokusdurchmesser von $250\text{ }\mu\text{m}$ erzielt. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Experimente wird ein neues, wesentlich leistungsstärkeres Feinfokussiersystem mit einer Plasmalinse am Hochintensitätsmeßplatz des SIS entwickelt.

Hohe Strahlintensitäten stehen zur Zeit schon am RFQ-Maxilac-Beschleuniger bei sehr niedrigen Ionenenergien von 45 keV/u zur Verfügung. Hier werden zur Zeit

Messungen zum Energieverlust von intensiven Schwerionenstrahlen in vollständig ionisiertem Wasserstoffplasma durchgeführt. Da die Projektilgeschwindigkeit in der gleichen Größenordnung wie die thermische Geschwindigkeit der Elektronen im Plasma liegt, handelt es sich damit um den Energiebereich des Energieverlustmaximums in ionisierter Materie. Erste Messungen zeigen bereits einen um einen Faktor 10 höheren Energieverlust im Vergleich zu kaltem Wasserstoffgas. Die hohen Dichten freier Elektronen, die in einer Plasmaentladung zur Verfügung gestellt werden, haben auch einen Einfluß auf den Ladungszustand des Projektilions. Es wird erwartet, hohe Intensitäten von > 10 mA von mehrfach ionisierten schweren Ionen wie Kr^{7+} mit der Methode des Plasmastrippens erzeugen zu können. Diese Experimente werden auch im Hinblick auf die Konzeption eines Hochstrominjektors durchgeführt.

Die Experimente zur Wechselwirkung von schweren Ionen mit einem vollständig ionisierten Wasserstoffplasma im Energiebereich zwischen 1.4 und 6 MeV/u wurden abgeschlossen. Es wurde experimentell gezeigt, daß der Energieverlust von Ionen in vollständig ionisierter Materie höher ist als in kalter Materie bei gleicher Dichte. Aufgrund der geringen Einfangquerschnitte freier Elektronen stellt sich zudem ein höherer Ladungszustand des Projektils ein. Zur Zeit werden Messungen mit Plasmen höherer Ordnungszahl durchgeführt und Diagnostikverfahren für Plasmen von Helium, Neon und Argon entwickelt. Plasmen von Elementen mit hoher Ordnungszahl liegen nicht in vollständig ionisiertem Zustand vor. So können Bedingungen simuliert werden, wie sie in der Ablatorregion eines Fusionstargets auftreten, und es können Energiedepositionsprofile in teilweise ionisierter Materie untersucht werden. Die ersten vorläufigen Ergebnisse der Messungen deuten darauf hin, daß wiederum ein erhöhter Energieverlust beobachtet wird, der auf den effektiveren Energieübertrag bei der Wechselwirkung von Ionen mit freien Elektronen zurückzuführen ist. Der Ladungszustand der Projektilionen bleibt jedoch annähernd gleich dem, der auch bei Wechselwirkung mit kalter Materie beobachtet wird.

Die Untersuchung schwerioneninduzierter kurzwelliger Laser wird von einer Arbeitsgruppe der TU München fortgeführt, mit der eine enge Zusammenarbeit besteht.

Zusammenarbeit

Fraunhofer Inst. Aachen
TH Darmstadt
Univ. Erlangen
Univ. Frankfurt
MPQ Garching
Univ. Giessen
INFN Legnaro

Univ. Mailand
ITEP Moskau
TU München
Univ. Neapel
Univ. Orleans
IPN Orsay

3.2 MATERIALFORSCHUNG

Mittelfristige Ziele

In den kommenden Jahren sollen die Möglichkeiten der GSI-Beschleunigeranlage verstärkt für die Materialforschung genutzt werden. Dies gilt sowohl für den Bereich der niedrigen Energien, für den mit dem neuen 1.4-MeV/u-Hochladungsinjektor ein neues leistungsfähiges Gerät verfügbar sein wird, als auch für den Bereich der UNILAC- und SIS-Energien. Bei den niedrigen Energien sollen auf dem Gebiet der Materialmodifizierung durch Ionenimplantation die Zusammenarbeit mit Hochschulen

intensiviert und die Bestrahlungsmöglichkeiten verbessert sowie eine diagnostische Grundausrüstung bei der GSI aufgebaut werden. Am Hochladungsinjektor sind die Voraussetzungen für Grundlagenforschung auf dem Gebiet des Ionenstrahlmischens und der Materialstrukturierung sowie zur Filterherstellung zu schaffen. Bei den Bestrahlungen am UNILAC soll ein Zuwachs an Qualität und Umfang durch eine verbesserte Diagnostik und Dosimetrie sowie durch den Einsatz einer Mikrostrahlanlage und einer Bandbestrahlungseinrichtung erreicht werden. Für Bestrahlungen am SIS, insbesondere für Tests von elektronischen Komponenten für den Einsatz im Welt-raum, werden zunächst die experimentellen Einrichtungen anderer Gruppen ausreichen.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Am Testinjektor (300 kV und 45 keV/u) werden in Zusammenarbeit mit externen Gruppen Ionenimplantationen zur Materialmodifizierung in Metallen, Keramiken und Kunststoffen sowie in Grenzschichten von Materialkombinationen durchgeführt. Die implantierten Ionendosen liegen im Bereich von 10^{14} bis 10^{19} Ionen/cm², die Reichweiten bei 0.05 bis 2 μ m. Die Charakterisierung der bestrahlten Proben erfolgt in Zusammenarbeit mit umliegenden Hochschulinstituten oder bei den anderen Kollaborationspartnern. Für einfache tribologische Untersuchungen ist bei der GSI ein Labor eingerichtet. Der im Aufbau befindliche Bestrahlungsplatz am Hochladungsinjektor (300 keV/u und 1.4 MeV/u) wird den Energiebereich für Ionenimplantationen erweitern. Folgende Arbeiten sind geplant:

- Implantation von Stickstoff in Titan und Titanlegierungen.
- Experimente zur Haftverbesserung durch Ionenbeschuß an Metall/Keramik- und Metall/Polymergrenzschichten.
- Modifizierung von Stahloberflächen durch Metallionenimplantation.
- Herstellung von Wellenleitern in Polymeren durch Ionenbeschuß.
- Modifizierung von Keramik-Einkristallen durch Ionenstrahlen.
- Tests für Bestrahlungen bei Temperaturen bis 600 °C.
- Verbesserung der Dosimetrie bei Großflächenbestrahlungen.

Auf dem Gebiet der Strukturierung von isolierenden Materialien existieren bei der GSI verschiedene Verfahren mit Anwendungsmöglichkeiten in der Oberflächentechnik (Antireflexbehandlung optischer Oberflächen), der medizinischen Diagnostik (Herstellung von Membranen mit definierter Lochzahl zur Bestimmung der Verformbarkeit von roten Blutkörperchen) und der Filtertechnik (Herstellung von Kernspurfiltern hoher Selektivität). Neben dem existierenden Bestrahlungsplatz X0 hinter dem UNILAC (Reichweiten bis 300 μ m) wird am Hochladungsinjektor eine weitere Bestrahlungsmöglichkeit (Reichweiten bis 30 μ m) zur Verfügung stehen. Um Anfragen - besonders aus der Industrie - nach großflächigen Bestrahlungen erfüllen zu können, ist an X0 eine Bandbestrahlungsapparatur in Betrieb genommen und weiterentwickelt worden. Am Hochladungsinjektor ist eine entsprechende Apparatur im Aufbau. Die Erzeugung von Einzelspurstrukturen mit einer Auflösung von $\pm 1 \mu$ m ist Ziel der Entwicklung an der Mikrosonde nach deren Wiederinbetriebnahme am Meßplatz X0 bei UNILAC-Energien. Am SIS können Hochenergiebestrahlungen zur Eichung von Kernspurdetektoren oder zum Test elektronischer Komponenten von Satelliten vorgenommen werden. Folgende Arbeiten werden fortgesetzt oder sind geplant:

- Grundlagenuntersuchungen zur Ätzbarkeit latenter Spuren in verschiedenen Isolator-Materialien sowie metallischen Gläsern.
- Gasdiffusion durch latente und sensibilisierte Spuren.
- Elektrolytische Messungen an sensibilisierten Spuren.
- Röntgen- und Neutronen-Kleinwinkel-Streuung zur Untersuchung latenter und sensibilisierter Proben.

- Einsatz von Einzellochmembranen mit spezieller Formgebung in einem Superfluidsensor.
- Bestrahlungen an der 12-cm-Bandbestrahlungsanlage zur Herstellung stabiler Membranen großer Dicke beziehungsweise hoher Porosität.
- Verbesserung der Dosiskontrolle und Vorbereitung einer Anlage für 30 cm Bänder.
- Erzeugung von Mikrostrukturen mit Einzel-Ionen-Schuß-Technik an der Mikrosonde.
- Ortsauflösende Untersuchungen von Funktionsstörungen integrierter Schaltungen durch gezieltes Einschießen einzelner Ionen am UNILAC mit der Mikrosonde.
- Untersuchung des Einflusses von Schwerionenstrahlen auf die Eigenschaften von Hochtemperatur-Supraleitern.
- Untersuchungen an steuerbaren Polymeren mit reversibel veränderbarer Porengröße.
- Eichung von extraterrestrischen Teilchenspuren.
- Studien von Replika-Techniken.

Ein Rastertunnel- und ein Rasterkraft-Mikroskop (RTM und RKM) stehen zur Untersuchung der Strahlenschäden in den oben genannten Energiebereichen zur Verfügung. Es sollen verschiedenartige Substanzen nach der Bestrahlung untersucht werden. Folgende Arbeiten sind geplant:

- Untersuchungen an bestrahlten Polymeren, amorphen Metallen, Glas sowie kristallinen und Schicht-Materialien mit RTM und RKM.
- Untersuchungen mit einem UHV-tauglichen Rasterkraft-Mikroskop.
- Entwicklung und Anwendung kontrastverstärkender RTM- und RKM-Methoden zur verbesserten Abbildung von Schwerionensystemen.

Zusammenarbeit:

Univ. Bayreuth
CIRIL Caen
GANIL Caen
Colorado State Univ.
Telekom Darmstadt
TH Darmstadt
TU Dresden
JINR Dubna
Hoechst AG Frankfurt
Univ. Frankfurt
Univ. Freiburg
GKSS Geesthacht
ILL Grenoble

MPI Halle
Univ. Heidelberg
KFA Jülich
GH Kassel
Univ. Köln
ZfI Leipzig
Univ. Marburg
FZ Rossendorf
Univ. Siegen
Daimler-Benz AG Stuttgart
Univ. Stuttgart
JAERI Takasaki
Aeskulap AG Tuttlingen

3.3 BIOPHYSIK

Mittelfristige Ziele

Das Ziel der Biophysik-Experimente bei der GSI ist, die biologische Wirkung von hochenergetischen geladenen Teilchen zu verstehen. Dieses Verständnis ist wichtig für den geplanten Einsatz von leichten Ionen in der Strahlentherapie, für Strahlenschutzprobleme der bemannten Raumfahrt und für den Strahlenschutz insgesamt. Die Experimente untersuchen die Strahlenwirkung auf verschiedene zelluläre und

subzelluläre Strukturen, vor allem die DNA, sowie auf die Zellmembran. Die Spätfolgen ionisierender Strahlung wie genetische Mutation und Transformation werden an zellulären Systemen bestimmt. In Monte-Carlo-Simulationen wird die radiale Dosis und die Ionisationsverteilung in den Teilchenspuren auf Grund von theoretischen oder gemessenen Deltaelektronen-Spektren berechnet. Außerdem wurde ein Modell zur Erklärung des Sättigungseffekts bei hohen LET-Werten entwickelt. Am UNILAC sollen die Untersuchungen der zellulären Wirkung von niederenergetischen Ionen sowie die Messungen der Deltaelektronen-Emission aus Festkörpertargets fortgesetzt werden. Am Biophysik-Meßplatz hinter dem SIS werden vor allem Arbeiten zur Vorbereitung der Therapie durchgeführt. Das sind neben den radiobiologischen Messungen technische und physikalische Untersuchungen, wie die Messung der Strahlfragmentierung in dicken Wassertargets als Gewebeäquivalent und die technische Erprobung schneller ortsempfindlicher Detektoren und Positronenkameras. Außerdem wird mit einem schnellen intensitätsgesteuerten magnetischen Ablensystem (Rasterscan) die Technik einer tumorkonformen dreidimensionalen Bestrahlung erprobt.

Wenn alle physikalischen und technischen Vorarbeiten für eine Tumorthherapie mit leichten Ionen vollständig abgeschlossen und an biologischen Materialien erfolgreich erprobt worden sind, sollen erste Patientenbestrahlungen durchgeführt werden. Der kostengünstigste Weg dahin ist noch offen.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Am UNILAC und am SIS werden die Experimente zur Wirkung von fraktionierter Bestrahlung mit normalen und mit Tumorzellen fortgesetzt. Die Ergebnisse dieser Messungen bei geeigneter Fraktionierung, eine Verstärkung der Strahlenwirkung bei niedrigen Energien sowie eine Abschwächung bei hohen Energien, bilden eine Grundlage der Teilchentherapie.

Messungen der Chromosomenschädigung in synchronen Zellen durch Teilchenstrahlen sollen fortgesetzt und auf vorzeitige Chromosomenkondensation (PCC) ausgedehnt werden. Die Untersuchungen mit reparaturdefizienten Säugetierzellen zur Analyse des Reparaturpotentials nach Schwerionenbestrahlung werden ebenfalls weitergeführt. Diese Experimente sind komplementär zu den Messungen der Reparatur von intrazellulären DNA-Brüchen in eukaryotischen Zellen, die einen Schwerpunkt der Experimente am UNILAC und am SIS bilden. Experimente zur Mutationsinduktion durch schwere Ionen in Säugetierzellen werden fortgesetzt.

Die Radikalproduktion in DNA-Bausteinen sowie die Schädigung von Membranen durch Schwerionenbeschuß werden an einem Elektronenspinresonanz-Spektrometer gemessen. Erste Messungen an DNA-Radikalen sollen auf Temperaturen von flüssigem Helium ausgedehnt werden. Die Messungen zur Hämolyse menschlicher Erythrozyten deuten einen anderen Schädigungsmechanismus an als er bei DNA gemessen wurde. Die Messungen der Membranschäden sollen deshalb auf den molekularen Bereich ausgedehnt werden.

Am Biophysik-Meßplatz hinter dem SIS wurde ein schnelles magnetisches Ablensystem zur großflächigen Bestrahlung von biologischen Proben installiert. Dieser Rasterscan wird auch dazu benutzt, mit einer zusätzlichen Reichweitevariation eine dreidimensionale Bestrahlung von irregulären Volumina zu erreichen, wie sie später für die Tumorthherapie benötigt wird. Dazu werden reguläre und irreguläre Flächen mit vorgegebenen Teilchendichten belegt. Durch eine schnelle Steuerung der Schreibgeschwindigkeit durch die Intensität des extrahierten Strahls konnten Homogenitätsabweichungen auf den bestrahlten Flächen von weniger als $\pm 5\%$ erzielt werden. In ersten Strahlzeiten werden durch eine aktive Energievariation im

Beschleuniger einfache dreidimensionale Volumina bestrahlt. Die Technik soll verfeinert werden und auf irreguläre Volumina ausgedehnt werden.

Kernfragmentierung in einem Wasserphantom wurde in Cave A und am Fragmentseparator für Neon- und Sauerstoff-Strahlen gemessen. Die Strahlfragmentierung in dicken Wasserschichten als Gewebeäquivalent soll für Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Neon-Ionen gemessen und mit Modellrechnungen verglichen werden. Mit der HIDAC-Positronenkamera wurde am Fragmentseparator die Lokalisation eines ^{19}Ne -Strahls in verschiedenen Plastikphantomen mit einer Genauigkeit von einigen Millimetern gemessen. Außerdem wurde gezeigt, daß die Fragmentierung eines stabilen Neonstrahls in dicken Targets zur Lokalisation des Bragg-Maximums ausreicht. Die Messungen sollen auf stabile Kohlenstoff- und Sauerstoff-Strahlen ausgedehnt und in theoretischen Modellen untersucht werden.

Zusammenarbeit

LBL Berkeley
MDC Berlin
Univ. Bonn
GANIL Caen
LPC Clermont
TH Darmstadt
Med. Akad. Dresden
JINR Dubna
CEN Fontenay aux Roses
Univ. Frankfurt

Univ. Gießen
Univ. Heidelberg
GH Kassel
DLR Köln
Univ. München
GSF Neuherberg
CAL Nizza
IPN Orsay
FZ Rossendorf
Univ. Saarbrücken

4 BESCHLEUNIGEREXPERIMENTE UND -ENTWICKLUNG

Einsatz von Planstellenpersonal (in Mannjahren)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
4.1 UNILAC	12	12	12	12	12	12
4.2 SIS	11	12	13	12	12	12
4.3 ESR	14	14	14	13	13	13
4.4 Collider-Studie	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>
Beschleunigerexperimente und -entwicklung	38	40	40	40	40	40

Aufwand an FuE-Investitionsmitteln (in TDM)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
4.1 UNILAC	1600	1000	1000	1100	1400	1540
4.2 SIS	600	450	410	380	470	520
4.3 ESR	800	610	550	500	630	690
4.4 Collider-Studie	<u>0</u>	<u>190</u>	<u>0</u>	<u>500</u>	<u>800</u>	<u>880</u>
Beschleunigerexperimente und -entwicklung	3000	2250	1960	2480	3300	3630

4.1 UNILAC

Mittelfristige Ziele

Im Mittelpunkt der Arbeiten der nächsten Jahre steht die Entwicklung des UNILAC im Hinblick auf seine Doppelfunktion als SIS-Injektor und als Beschleuniger für Niederenergie-Experimente. Zur Erhöhung der Strahlintensität am SIS/ESR sind Ionenquellen- und Beschleunigerentwicklungen für einen neuen Hochstrom-RFQ-Injektor durchzuführen, der für kleines Tastverhältnis die Intensitäten am UNILAC-Ausgang um den Faktor 100 bis 1000 erhöhen soll; die Strahldiagnose ist diesen neuen Bedingungen anzupassen. Für das UNILAC-Experimentierprogramm steht die Weiterentwicklung des UNILAC für hohes Tastverhältnis in Verbindung mit dem Hochladungsinjektor und den EZR-Ionenquellen für Strahlen verschiedenster Elemente an. Der Testinjektor spielt sowohl für die Tests von Hochstrom-RFQ-Prototypen als auch für Entwicklungen der Hochenergie-Ionenimplantation eine wichtige Rolle.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Der Schwerpunkt der Ionenquellenentwicklung liegt bei den EZR-Quellen. An der 10-GHz-EZR-Quelle werden gegenwärtig mechanische und elektrische Umbauten für eine forcierte Ionen-Extraktion mittels gepulstem Magnetfeld vorgenommen. Für 1993 ist dazu ein umfangreiches Meß- und Entwicklungsprogramm geplant. An der 14-GHz-Quelle des Hochladungsinjektors laufen Tests mit verschiedenen Elementen im CW-Betrieb. Die bisher im CERN eingesetzte 14-GHz-EZR-Quelle soll für den Betrieb mit gepulster Mikrowelleneinspeisung umgebaut und optimiert werden, wodurch kurzzeitig (0.5 bis 1 ms) Stromüberhöhungen um etwa einen Faktor 10 für den Einschub in das SIS möglich erscheinen. Die Experimente zum Einsatz von Laserquellen für sehr kurze Ionenstrahlpulse werden ebenso wie die Entwicklungen an den CHORDIS-, MEVVA- und MUCIS-Hochstromquellen mit geringerer Priorität weitergeführt.

Am Hochladungsinjektor wird den Arbeiten zur Transmissionsverbesserung der 108-MHz-RFQ-Struktur höchste Priorität eingeräumt.

Für eine mittelfristige Erhöhung der SIS-Injektionsströme werden nunmehr zwei Injektorkonzepte verfolgt. Für den zunächst geplanten Niederladungs-Hochstrominjektor wurde ein 27-MHz-RFQ-Prototyp aufgebaut und ersten HF- und Strahltest unterworfen. Theoretische und Modell-Studien für den kompletten RFQ-Hochstrom-Vorbeschleuniger sind für 1993 geplant. Parallel dazu wird auf der Basis einer magnetisch gepulsten EZR-Quelle für höhere Ladungszustände ein alternatives Hochstrom-RFQ-Vorbeschleuniger-Konzept verfolgt. Dabei soll auch die Verwendung der IH-Struktur für den Hochstrombetrieb untersucht werden.

Für den Hochstrombetrieb am UNILAC sind Prototypenentwicklungen für zerstörungsfreie Strom-, Positions- und Profilmessungen in Arbeit. Sie sollen in Strahlexperimenten getestet und im Hinblick auf die Intensitäts- und Ionenumtastung am UNILAC zur Betriebsreife gebracht werden.

Zusammenarbeit

LBL Berkeley
Univ. Frankfurt
CERN Genf
CEN Grenoble

Univ. Heidelberg
ITEP Moskau
TU München

4.2 SIS

Mittelfristige Ziele

Im Zusammenhang mit der starken Strahlzeitnachfrage müssen am SIS Weiterentwicklungen in zwei Richtungen zielen:

- Steigerung der Strahlintensität entsprechend dem Intensitätserhöhungsprogramms am UNILAC.
- Steigerung der angebotenen Strahlzeitstunden.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Durch Lernerfolge bei der Maschineneinstellung sind die anfänglich großen Transmissionsverluste des Synchrotrons beseitigt worden. Für leichte Ionen liegen die Intensitäten bei 10^{10} Teilchen pro Zyklus, bei schweren Ionen bei ca. 10^7 , begrenzt durch die Intensität des UNILAC-Strahlstroms. Zur mittel- und längerfristigen Erhöhung der SIS-Injektionsströme um einen Faktor 10-1000 werden am UNILAC verschiedene Konzepte zur Intensitätssteigerung verfolgt.

Die Extraktionseffizienz liegt bei etwa 80 %. Eine weitere Reduzierung der internen Strahlverluste ist zur Begrenzung der Komponentenaktivierung beziehungsweise zur Vermeidung längerer Abklingzeiten vor Reparaturarbeiten geboten. Die Genauigkeit der internen und externen Strahlstrommessung muß um möglichst eine Größenordnung verbessert werden, um durch entsprechende Maschinenstudien die Verluste weiter zu reduzieren.

Während die Einstellung des Synchrotrons befriedigend schnell geht und die zugehörigen Anwenderprogramme der Rechnersteuerung vorwiegend Pflege- und Anpassungsarbeiten erfordern, ist die Einstellung der Hochenergie-Strahlführung und die Optimierung der Strahltransmission oftmals zeitaufwendig. Es müssen Strahldiagnosemittel vervollständigt werden und softwaremäßige Setzprozeduren für Magnetwerte verbessert werden. Weitere Studien können unter Umständen zu Änderungen und Ergänzungen der strahloptischen Elemente führen.

1993 wird auch die Reinjektionsstrahlführung dem Betrieb voll zur Verfügung stehen.

Zusammenarbeit

CERN Genf

4.3 ESR

Mittelfristige Ziele

Nachdem in den Jahren 1991 und 1992 am ESR die Priorität auf der Vorbereitung und Durchführung von atom- und kernphysikalischen Experimenten mit den gespeicherten Ionenstrahlen lag, sind in den kommenden Jahren wieder in verstärktem Umfang Maschinenexperimente zur Weiterentwicklung des Speicherrings geplant. Schwerpunkte bilden dabei die Abbremsung von gekühlten Strahlen, die

Nachkühlung bei niedrigen Ionenenergien sowie die langsame und schnelle Extraktion gekühlter Strahlen. Durch Verbesserungen der Feldstabilität in den Hauptdipolen und der Regelung der Beschleunigungsspannung des Elektronenkühlers soll die Gleichgewichtstemperatur im Ionenstrahl noch weiter gesenkt werden. Parallel dazu ist die Strahldiagnose für extrem kalte Ionenstrahlen und für sehr kleine Ionenströme zu verfeinern.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Durch Verbesserungen am Verfahren der Strahlakkumulation konnten im ESR deutlich höhere Ionenströme gespeichert werden, z. B. 7 mA Ne^{10+} - und 2 mA Dy^{66+} -Strahlen. Da auch die Dicke des internen Gasstrahltargets auf Werte bis zu $6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ gesteigert wurde, sind mit den erreichten Luminositäten gute bis sehr gute Bedingungen für die überwiegende Zahl der vorgeschlagenen Experimente geschaffen. Einige wichtige Experimente konnten bereits erfolgreich abgeschlossen werden.

Der Aufbau der Pickup- und Kickersysteme für die stochastische Strahlkühlung hat sich durch nicht tolerierbare Fertigungsmängel an wichtigen Einzelteilen stark verzögert. Der Einbau dieser Systeme im Ring, für den mindestens drei Monate anzusetzen sind, ist nun frühestens ab Herbst 1993 möglich.

Die neue Wechselwirkungskammer wird nach den notwendigen Prüfungen auf einem Teststand voraussichtlich Mitte 1993 installiert. Bei gleicher Gelegenheit wird auch der übrige Teil der geraden Strecke am internen Target überarbeitet.

Durch mechanische Veränderungen an den Verbindungen zwischen Hochspannungsterminal und Elektronenkanone bzw. -kollektor soll die Spannungsfestigkeit des Elektronenkühlers, welche derzeit bei rund 200 kV liegt, Schritt für Schritt auf den Nennwert von 320 kV gebracht werden.

Über eine Reparatur des Elektronenkühlers, den Erdschluß eines Driftrohres, wird in den kommenden Monaten entschieden, sobald Erfahrungen mit alternativen Methoden der Energievariation für die Experimente zur dielektronischen Rekombination vorliegen. Gegebenenfalls werden die Reparaturarbeiten gleichzeitig mit dem Einbau der stochastischen Kühlung durchgeführt.

4.4 COLLIDER-STUDIE

Mittelfristige Ziele

Um mit der Teilchenenergie im Schwerpunktsystem deutlich über die am SPS im CERN in absehbarer Zeit möglichen Fixed-Target-Experimente hinauszukommen, wäre eine Collider-Anlage bei GSI angesichts der vorhandenen Injektorkette UNILAC/SIS/ESR eine kostengünstige Lösung. Als Grundlage einer detaillierten Diskussion über das mögliche physikalische Programm an einem solchen Collider sollen Maschinendaten wie Teilchenenergie und Luminosität gesichert ermittelt werden.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Die Inbetriebnahme von HERA hat bestätigt, daß ein Feldhub von einem Faktor 20 zulässig ist. Bedingt durch die Endenergie des SIS für schwerste Ionen kann damit für den Collider eine Endenergie von 34 GeV/u für Uran und 53 GeV/u für Neon angegeben werden. Ob der Feldhub durch Verringerung der Filamentstärken des Supraleiters weiter gesteigert werden kann, müßte an einem Prototypen, nicht notwendigerweise bei der GSI, ermittelt werden.

Inzwischen haben Messungen am ESR mit leichten und schweren Ionen und bei um drei Größenordnungen variierten Teilchenzahlen die klassische Intrabeamschattering-Theorie bestätigt. Damit scheint es unausweichlich, daß der Teilchenstrahl bei der Kollisionsenergie gekühlt werden muß, will man die Luminosität deutlich über $10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ steigern. Aufgrund der knappen Finanzmittel können diesbezügliche Konzeptstudien in 1993 leider nur mit geringer Priorität durchgeführt werden.

5 NEUE TECHNOLOGIEN UND METHODEN

Einsatz von Planstellenpersonal (in Mannjahren)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
5.1 Targetentwicklung	1	1	1	1	1	1
5.2 Detektorentwicklung	3	3	3	3	3	3
5.3 Experimentelelektronik und Datenaufnahme	<u>12</u>	<u>12</u>	<u>12</u>	<u>12</u>	<u>12</u>	<u>12</u>
Neue Technologien und Methoden	16	16	16	16	16	16

Aufwand an FuE-Investitionsmitteln (in TDM)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
5.1 Targetentwicklung	50	50	50	55	100	110
5.2 Detektorentwicklung	200	150	160	165	200	220
5.3 Experimentelelektronik und Datenaufnahme	<u>150</u>	<u>120</u>	<u>125</u>	<u>130</u>	<u>200</u>	<u>220</u>
Neue Technologien und Methoden	400	320	335	350	500	550

5.1 TARGETENTWICKLUNG

Mittelfristige Ziele

Verschiedene Technologien werden eingesetzt, um geeignete Schwerionentargets aus den unterschiedlichsten Elementen vom Wasserstoff (als Polyethylen) bis zum Uran herzustellen, zu vermessen und zu untersuchen. Entsprechend werden auch Degrader aus Aluminium sowie Stripper aus Kohlenstoff gefertigt. Die verwendeten Schichtdicken sind $2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ bis $20 \text{ g}/\text{cm}^2$ für Experimente mit Projektilenergien von 200 keV bis 2 GeV/u. Die Weiterentwicklungen von Rotationstargetsystemen für Versuche zur Synthese der schwersten Elemente am SHIP und die Neuentwicklungen von Target-, Degrader- und Abbremsystemen für den Fragmentseparator stehen dabei im Vordergrund. Mit den vorhandenen Apparaturen werden zudem in Einzelfällen Prototypen von Detektorschichten und Zählerfenstern entwickelt.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Für Reaktionsexperimente am SHIP mit Bildungsquerschnitten im Picobarn-Bereich werden die rotierenden Targeträder ständig verbessert, um die thermische Belastbarkeit zu erhöhen, den Untergrund durch Streustrahlung zu reduzieren und Strahlbetrieb mit unterschiedlicher Makropulsstruktur aus verschiedenen Injektoren akzeptieren zu können.

Am Fragmentseparator ist der Prototyp einer gekühlten Targetleiter mit 15 Positionen bereits im Einsatz. Zusätzlich werden Targetsysteme kurzfristig an laufende Experimente angepaßt. Für Langzeitbestrahlungen wird ein wassergekühltes Automatikssystem mit etwa 50 Targetpositionen entwickelt. Datenaufnahme und -auswertung für Belastungstests mit einer Elektronenstrahlkanone sind auf rechnergestützte Systeme zu übertragen, um genauere Werte zu erhalten.

Zur Herstellung planparalleler zylinderförmiger Targets mit Oberflächen-Rauhtiefen von $r \leq 0.5 \mu\text{m}$ wurden eine Trenn- und eine Schleif-Apparatur aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Bearbeitungsparameter für nahezu alle metallischen Elemente und für eine Reihe von chemischen Verbindungen sind zu erarbeiten. Zur Charakterisierung der genannten Targetparameter wurden bisher opto-elektrische Schichtdickenuntersuchungen, mechanische Rauhtiefenmessungen und Analysen von REM-Oberflächenprofilen eingesetzt. Erste Ergebnisse liegen für Aluminium, Titan, Kupfer und Zirkonium vor mit Oberflächen-Rauhtiefen von etwa $0.3 \mu\text{m}$, die um den Faktor 10 bis 50 besser sind als frühere Werte.

Für den Fragmentseparator werden die verwendeten Prototypen der variablen Degradersysteme weiterentwickelt. Die bis $200 \times 500 \text{ mm}^2$ großen und bis 50 mm dicken Einzelbauteile bestehen aus Aluminium. Berechnete Abbremsprofile liegen für schwerere Systeme bis Blei vor. Mit einem neu installierten opto-elektrischen Differenz-Messverfahren können die Degrader beidseitig mit einer Genauigkeit von $0.1 \mu\text{m}$ abgerastert und deren Schichtdicken-Profile, die zum Einstellen der Teilchenbahnen im Fragmentseparator erforderlich sind, bestimmt werden. Das Verfahren muß noch automatisiert und zur Datenauswertung an ein Rechnersystem angeschlossen werden.

5.2 DETEKTORENTWICKLUNG

Mittelfristige Ziele

Bei komplexen kernphysikalischen Reaktionen werden viele Teilchen gleichzeitig die ortsbestimmenden Zähler durchqueren. Bei einer unabhängigen Bestimmung der beiden Koordinaten in der Zählerebene tritt dabei das Problem auf, daß sich bei mehreren Teilchen die X- und Y-Koordinaten nicht mehr eindeutig zuordnen lassen. Abhilfe schafft hier nur eine Unterteilung der Ausleseebene in kleine Flächenelemente, Pixel, von denen jedes einzeln ausgelesen wird. Da die Größe der Pixel im wesentlichen die Ortsauflösung bestimmt, ergibt sich sehr rasch eine große Zahl von Auslesekanälen, und die zugehörige Elektronik und der Datentransfer werden sehr aufwendig. Eine elegante Möglichkeit der Auslese besteht darin, das bei der Gasverstärkung entstehende Licht mit einer CCD-Kamera auszulesen.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Der mechanische Aufbau für die erwähnte optische Auslese von gasgefüllten Zählern ist abgeschlossen. Ein wesentlicher Teil der Untersuchungen konzentriert sich auf das geeignete Zählgas, um eine möglichst hohe Lichtausbeute im optimalen Wellenlängenbereich der CCD-Kamera zu erzielen. Die Hard- und Software zur Auslese der CCD und der Darstellung der digitalisierten Pixelamplituden am Monitor eines PC ist fertiggestellt.

Die beiden konzentrischen Ringe der großen radialen Driftkammer HELITRON sind aufgebaut und werden zur Zeit sorgfältig auf ihre Rundheit vermessen. Durch Auswahl einer geeigneten Halterung muß erreicht werden, daß sich der äußere Ring nicht um mehr als 1 mm deformiert, da sonst die dünnen Zähldrähte reißen würden. Das Spannen der etwa 2000 Drähte wird per Hand durchgeführt und wird die nächsten Monate in Anspruch nehmen. Andere Teile des HELITRON wie die Kathodenebenen und die beiden Fenster, werden außerhalb der GSI gefertigt.

Ein häufig auftretendes Problem ist die Bestimmung von hohen Teilchenintensitäten > 1 MHz. Die üblichen Szintillationszähler sind nicht mehr einsetzbar. Einen Ausweg bieten Ionisationskammern, deren Ausgangsstrom auch bei sehr hohen Intensitäten dem Teilchenfluß proportional sind. Die Kalibrierung erfolgt bei niedrigen Zählraten mit Szintillationszählern. Mehrere Typen, darunter auch ortsempfindliche, wurden am Beschleuniger erfolgreich getestet. Die Untersuchungen werden weitergeführt.

Bei kernphysikalischen Experimenten werden die Meßdaten der Teilchen, z. B. Ort, Energie und Zeit, pro Ereignis gemessen und aufgezeichnet. In manchen Applikationen, z. B. bei Bestrahlungsexperimenten in der Biophysik, ist gefordert, die Verteilung der Intensität auf der Fläche des Detektors während eines gewissen Zeitintervalls, z. B. während der Pulsdauer des SIS, zu messen. Dies erfordert ein neues Ausleseverfahren der Vieldrahtproportionalkammern, bei dem das Meßsignal während einer einstellbaren Meßzeit integriert und dann ausgelesen wird. Durch eine neuartige Gatingmethode der Vieldrahtproportionalkammer konnte die Zahl der Auslesekanäle von 256^2 auf 256 reduziert werden. Nach den ersten Messungen wurde mit einem neuen Design der Ausleseelektronik begonnen, um insbesondere die Auslesezeit zu verkürzen.

Zusammenarbeit

KFKI Budapest
TH Darmstadt
TU München

Univ. Heidelberg
FZ Rossendorf

5.3 EXPERIMENTELEKTRONIK UND DATENAUFNAHME

Mittelfristige Ziele

Die Entwicklung neuer Elektronik und Software zur Datenaufnahme muß die sehr unterschiedlichen Anforderungen der Experimente bei der GSI berücksichtigen. Sowohl Großexperimente mit tausenden von Datenkanälen als auch konventionelle, kleinere Experimente, die vielen unterschiedlichen Experimentiergruppen zur Verfügung stehen, sollten diese neuen Komponenten gleich gut nutzen können. Wegen der geringen Personalkapazität sind in der GSI nur unter diesen Voraussetzungen eigene Entwicklungen möglich. Das schließt die begrenzte Entwicklung individueller Lösungen nicht aus. Besonderer Wert wird auf folgende Entwicklungen gelegt:

- Analogelektronik zur Messung von Detektorsignalen im Pikosekunden-Bereich.
- Beteiligung an der Entwicklung integrierter Schaltungen zur Datenauslese und -verarbeitung.
- Digital steuerbare Analogelektronik im CAMAC- oder VME-Bus.
- Ein einheitliches System von Frontendprozessoren und Prozeßrechnern.
- Integration von neuen Rechnerarchitekturen und standardisierter Software.

Gegenwärtiger Stand und geplante Arbeiten 1993

Die Arbeiten am Datenaufnahmesystem GOOSY (GSI-Online/Offline-System) mit Frontendprozessoren und VAX-VMS-Datenaufnahme und -verarbeitung werden auch 1993 intensiv fortgesetzt. Dabei werden folgende Arbeiten im Vordergrund stehen:

- Verwendung der RISC-Rechnerarchitektur (Reduced Instruction Set Computer) für die Datenaufnahme und -auswertung unter dem VMS-Betriebssystem.
- Integration standardisierter Software für Rechnernetze (TCP/IP, später auch OSI) und für Betriebssysteme (POSIX) in das existierende Datenaufnahmesystem.
- Erstellung von Programmen zur Steuerung von experimentellen Einrichtungen.

Neben den Rechneraktivitäten werden in der Elektronik folgende Projekte bearbeitet:

- Entwicklung neuer Analogelektronik zur Messung sehr schneller Detektorsignale bei hoher Zeitauflösung.
- Entwicklung neuer Analogelektronik, die über CAMAC digital steuerbar ist.
- Weiterentwicklung des VME-basierten Frontendsystems.
- Entwicklung eines Signalprozessorsystems, das in die Datenaufnahme integriert ist. Damit soll eine erhebliche Datenreduktion bereits nach der Konvertierung der Daten von analogen Signalen zu digitalen Werten erfolgen.

Zusammenarbeit

CERN Genf
DEC München

Univ. Warschau

PERSONALEINSATZ UND MITTELAUFWAND

EINSATZ VON PLANSTELLENPERSONAL (In Mannjahren)*

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
1.1 UNILAC-Experimente	13	12	12	12	12	12
1.2 SIS-Experimente	36	36	36	36	36	36
1.3 ESR-Experimente	5	7	7	7	7	7
1.4 CERN-Experimente	5	5	5	5	5	5
1.5 Theorie	3	3	3	3	3	3
Nukleare Schwerionenforschung	62	63	63	63	63	63
	1991	1992	1993	1994	1995	1996
2.1 UNILAC-Experimente	4	2	2	2	2	2
2.2 SIS-Experimente	5	5	5	5	5	5
2.3 ESR-Experimente	5	6	6	6	6	6
Atomare Schwerionenforschung	14	13	13	13	13	13
	1991	1992	1993	1994	1995	1996
3.1 Plasmaphysik	3	3	3	3	3	3
3.2 Materialforschung	4	4	4	4	4	4
3.3 Biophysik	3	3	3	3	3	3
Forschung mit schweren Ionen auf anderen Gebieten	10	10	10	10	10	10

* Der Einsatz von Planstellenpersonal für die Durchführung des Forschungs- und Entwicklungsprogramms in den Jahren 1994 bis 1996 basiert auf dem Gesamtstellenplan für 1993. Zusätzlicher Bedarf an Planstellen für diese Jahre wurde angemeldet.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
4.1 UNILAC	12	12	12	12	12	12
4.2 SIS	11	12	13	12	12	12
4.3 ESR	14	14	14	13	13	13
4.4 Collider-Studie	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>
Beschleunigerexperimente und -entwicklung	38	40	40	40	40	40

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
5.1 Targetentwicklung	1	1	1	1	1	1
5.2 Detektorentwicklung	3	3	3	3	3	3
5.3 Experimentelekttronik und Datenaufnahme	<u>12</u>	<u>12</u>	<u>12</u>	<u>12</u>	<u>12</u>	<u>12</u>
Neue Technologien und Methoden	16	16	16	16	16	16

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
1 Nukleare Schwerionenforschung	62	63	63	63	63	63
2 Atomare Schwerionenforschung	14	13	13	13	13	13
3 Forschung mit schweren Ionen auf anderen Gebieten	10	10	10	10	10	10
4 Beschleunigerexperimente und -entwicklung	38	40	40	40	40	40
5 Neue Technologien und Methoden	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>	<u>16</u>
FuE-Programm	140	142	142	142	142	142

AUFWAND AN FuE-INVESTITIONSMITTELN (In TDM)*

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
1.1 UNILAC-Experimente	800	550	580	610	800	880
1.2 SIS-Experimente	3300	2978	2975	3290	5200	5720
1.3 ESR-Experimente	1200	1350	1370	1490	2000	2200
1.4 CERN-Experimente	<u>1200</u>	<u>1000</u>	<u>700</u>	<u>1100</u>	<u>1300</u>	<u>1430</u>
Nukleare Schwerionenforschung	6500	5878	5625	6490	9300	10230

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
2.1 UNILAC-Experimente	210	200	210	220	250	280
2.2 SIS-Experimente	185	300	315	330	600	660
2.3 ESR-Experimente	<u>500</u>	<u>500</u>	<u>525</u>	<u>550</u>	<u>1350</u>	<u>1480</u>
Atomare Schwerionenforschung	895	1000	1050	1100	2200	2420

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
3.1 Plasmaphysik	360	250	260	270	400	440
3.2 Materialforschung	280	250	260	270	450	500
3.3 Biophysik	<u>150</u>	<u>150</u>	<u>160</u>	<u>170</u>	<u>300</u>	<u>330</u>
Forschung mit schweren Ionen auf anderen Gebieten	790	650	680	710	1150	1270

* Der für die Jahre 1993 und 1994 angegebene Aufwand an FuE-Investitionsmitteln basiert auf dem für 1992 festgelegten niedrigen Mittelansatz unter der Annahme einer Teuerungsrate von etwa 5 % pro Jahr. Zusätzlicher Bedarf an FuE-Investitionsmitteln für diese Jahre wurde angemeldet. Ab 1995 ist eine wesentliche Erhöhung dieses Ansatzes unbedingt erforderlich, da für die zweite Generation von Experimentaufbauten hinter dem SIS und dem ESR zusätzliche FuE-Investitionsmittel benötigt werden.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
4.1 UNILAC	1600	1000	1000	1100	1400	1540
4.2 SIS	600	450	410	380	470	520
4.3 ESR	800	610	550	500	630	690
4.4 Collider-Studie	<u>0</u>	<u>190</u>	<u>0</u>	<u>500</u>	<u>800</u>	<u>880</u>
Beschleunigerexperimente und -entwicklung	3000	2250	1960	2480	3300	3630

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
5.1 Targetentwicklung	50	50	50	55	100	110
5.2 Detektorentwicklung	200	150	160	165	200	220
5.3 Experimentelekttronik und Datenaufnahme	<u>150</u>	<u>120</u>	<u>125</u>	<u>130</u>	<u>200</u>	<u>220</u>
Neue Technologien und Methoden	400	320	335	350	500	550

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
1 Nukleare Schwerionenforschung	6500	5878	5625	6490	9300	10230
2 Atomare Schwerionenforschung	895	1000	1050	1100	2200	2420
3 Forschung mit schweren Ionen auf anderen Gebieten	790	650	680	710	1150	1270
4 Beschleunigerexperimente und -entwicklung	3000	2250	1960	2480	3300	3630
5 Neue Technologien und Methoden	<u>400</u>	<u>320</u>	<u>335</u>	<u>350</u>	<u>500</u>	<u>550</u>
FuE-Programm	11585	10098	9650	11130	16450	18100

ANHANG

ÜBERLEITUNG ZUM STELLENPLAN 1993

Für die Durchführung des Forschungs- und Entwicklungsprogramms 1993 werden 142 Mannjahre an Planstellenpersonal direkt eingesetzt. Dieses Personal übernimmt auch den Betrieb der Experimentiereinrichtungen bei deren Nutzung durch auswärtige Gruppen. Das übrige Planstellenpersonal unterstützt die FuE-Arbeiten im Rahmen von wissenschaftlichen, technischen und administrativen Dienstleistungen. Dazu gehören folgende Aufgabenbereiche und Funktionen:

- Wissenschaftlich-technische Infrastruktur:
Beschleunigerbetrieb und -service, Beschleunigerausbau, Betrieb und Service von Elektronik und DV-Anlagen, Targetherstellung, Strahlenschutz, Bibliothek und Dokumentation, Konstruktion, Werkstätten, Betriebstechnik.
- Leitung, Verwaltung, Allgemeine Dienste:
Geschäftsführung, Stabsstellen, Betriebsrat, Finanzwesen, Einkauf und Materialwesen, Personal- und Sozialwesen, Allgemeine Dienste.

	Mannjahre
FuE-Personal	142
Beschleunigerbetrieb und -service	80
Sonstige wissenschaftlich- technische Infrastruktur	197
Leitung, Verwaltung, Allgemeine Dienste	71
	490

ÜBERLEITUNG ZUM WIRTSCHAFTSPLAN 1993

MITTELBEDARF	TDM	TDM
Betriebsmittel		
Personalausgaben	56.038	
Sächliche Verwaltungsausgaben	47.318	103.356
Investitionsmittel		
Laufende Investitionen		
FuE-Programm	9.650	
Sonstige Investitionen	9.239	18.889
Ausbauinvestitionen		5.500
		127.745
FINANZIERUNG		TDM
Zuwendungen (Bund und Land Hessen)		126.645
Einnahmen, Erträge		1.100
		127.745

ÜBERLEITUNG ZUR LEISTUNGSPLANSYSTEMATIK DES BUNDES FÜR 1993

(Hochrechnung vom Aufwand an FuE-Investitionsmitteln auf den Gesamtaufwand)

	%	MDM
B Sonderbereiche der Grundlagenforschung	92.9	118.7
E Plasmaphysik	2.7	3.4
G Biophysik	1.7	2.2
L Materialforschung	2.7	3.4
	100.0	127.7

