



JAHRESBERICHT

2. Halbjahr 1999/2000

FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF

Jahresbericht

2. Halbjahr 1999/2000

Herausgeber: Vorstand
Redaktion: Dr. Silke Ottow
FZR-327

Impressum:

Herausgeber: Forschungszentrum Rossendorf e. V.
Postfach 51 01 19
01314 Dresden

Telefon: (03 51) 260-0
Telefax: (03 51) 269-0461
e-Mail: kontakt@fz-rossendorf.de
Internet: <http://www.fz-rossendorf.de>

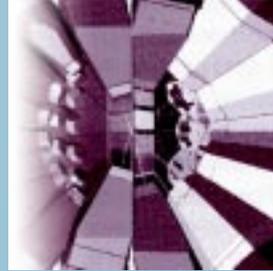
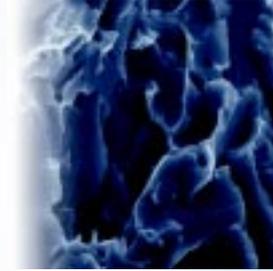
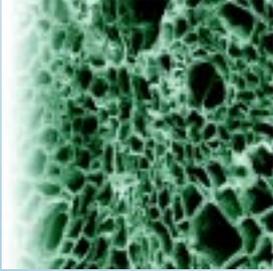
Schriftenreihe: Wissenschaftlich-Technische Berichte
FZR-327
August 2001
ISSN 1437-322X

Fotos: Jürgen Jeibmann, Dresden:
U1 l. u. m.; S. 3 (4. v. l.); S. 19 (4. v. l.); S. 49 (4. v. l.);
Fotos ohne Quellenachweis stammen
von Mitarbeitern des FZR und dem FZR-Fotoarchiv

Gesamtherstellung: Initial Satz & Grafik Studio, Rossendorf

Als Manuscript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

Diesen Jahresbericht in elektronischer Form (PDF-Format) finden Sie im Internet unter:
www.fz-rossendorf.de/jahresbericht



EINLEITUNG

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
Ereignisse	11
Ausgezeichnete Arbeiten	13
Das FZR bekommt beste Noten	16
Eine Ära geht zu Ende	16
EXPO am Meer – Titanic ohne Untergang	17
Hannover Messe 2000 – Melkmaschinen und BKA	17
Lehrerfortbildung 1999 und 2000	18
Tag der offenen Tür 1999 und 2000	18
Neue Institutsdirektoren berufen	18
Ergebnisse	19
Das Erdmagnetfeld im Labor	21
Strahlende Stützen	27
Den Atomen auf den Kern gefühlt	30
Moleküle unter der Lupe	37
Vom Züchten und Zähmen	42
Daten und Fakten	49
Organigramm	51
Organe und Gremien	52
Überblick 1999/2000	54
Übersicht über die Forschungsschwerpunkte und -vorhaben 1999/2000	55
Übersicht über die zentrumsübergreifende Zusammenarbeit 1999/2000	56
Überblick über die Institute und die wissenschaftlich-technische Infrastruktur	57
 Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung	59
 Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie	63
 Institut für Radiochemie	68
 Institut für Kern- und Hadronenphysik	70
 Institut für Sicherheitsforschung	74
 Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik	78
 Zentralabteilung Neue Beschleuniger	80
 Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung	82
 Projektgruppe ESRF-Beam-Line	84
 Projektgruppe ELBE-Quelle/Arbeitsgruppe Strahlführung und Strahldiagnose	86
 Administrative und technische Infrastruktur	88

Vorwort

Das Forschungszentrum Rossendorf e. V. (FZR) wurde 1992 gegründet. Es widmet sich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung und trägt mit seinem Profil – Materialforschung, Biomedizin-Chemie, Umwelt, Sicherheitsforschung, Kern- und Strahlungsphysik – zur Lösung wichtiger Probleme unserer Zeit bei. Das FZR ist die größte außeruniversitäre Forschungseinrichtung Sachsens.

Den Kern des Forschungszentrums bilden die fünf Institute:

- Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung
- Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie
- Institut für Radiochemie
- Institut für Sicherheitsforschung
- Institut für Kern- und Hadronenphysik.

Die Institute arbeiten sowohl nach eigenständigen wissenschaftlichen Programmen als auch an interdisziplinären Projekten, die nur instituts- und fachübergreifend zu realisieren sind. Unterstützt werden sie dabei von Projektgruppen, von technischen und ingenieurwissenschaftlichen Abteilungen, einem Rechenzentrum, einer Bibliothek und der administrativen Infrastruktur.

Das FZR ist Mitglied der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz e. V. (WGL) und wird zu je 50 Prozent von der Bundesrepublik Deutschland und den Ländern, vor allem dem Freistaat Sachsen, getragen. Es verfügte am 31. Dezember 2000 über 419,5 Planstellen, ergänzt durch 109 Drittmittelstellen. Daneben wurden 34 Doktoranden und 19 Postdoktoranden aus Annex-, HSP III- und Drittmitteln beschäftigt. Außerdem befanden sich 28 Azubis in elf Berufen in der Ausbildung. Ab Juli 1999 wurden weitere 9 und damit seit 1995 insgesamt 26 kW-Vermerke vollzogen; 18,5 Stellen sind noch mit derartigen Vermerken versehen. Mit seinem Personalbestand und einer Zuwendung von 86,5 Millionen DM im Jahr 2000 stellt das FZR die größte Einrichtung der WGL dar. Zusätzlich zur institutionellen Förderung werden Drittmittel aus nationalen und europäischen Förderprogrammen sowie über Forschungsverträge in Höhe von jährlich etwa 13 Millionen DM eingeworben. Für den Drittmittelbereich ist vor allem die erfreuliche Erhöhung der Einwerbung von Projekten innerhalb des 5. Rahmenprogramms der Europäischen Union zu erwähnen.

Zu den Höhepunkten der Jahre 1999/2000 gehörten zweifellos die umfangreiche Vorbe-

reitung auf die Evaluation sowie die erfolgreiche Präsentation des FZR und seiner wissenschaftlichen Ergebnisse vor dem Wissenschaftsrat vom 18. - 20. April 2000. Aus dem Bewertungsbericht des Wissenschaftsrates haben insbesondere die drei folgenden zentrumsübergreifenden, zentralen Empfehlungen Bedeutung:

- Eine stärkere Vernetzung der wissenschaftlichen Arbeiten der fünf Institute des FZR soll durch die Einführung von Projektstrukturen erreicht werden.
- Im FZR sollte die biologische und/oder biomedizinische Kompetenz verstärkt und gebündelt werden.
- Das FZR sollte die treibende Kraft und die ausführende Organisation beim Bau des Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder sein. Der Vorschlag zur Errichtung dieses Labors sollte so rasch als möglich detailliert ausgearbeitet werden.

Darüber hinaus enthält der Bericht eine Vielzahl von Einzelempfehlungen. Die wichtigsten Feststellungen der insgesamt sehr positiven Stellungnahme lauten: „Das FZR erbringt insgesamt gute bis sehr gute wissenschaftliche Forschungsleistungen auf dem Gebiet der anwendungsorientierten Grundlagenforschung in der Kernphysik, Materialforschung, Biomedizin, Chemie, Umwelt und Sicherheit. Die Arbeit des Instituts ist von überregionaler Bedeutung und gesamtstaatlichem wissenschaftspolitischen Interesse. Die Integration des FZR in eine Hochschule wird wegen der Notwendigkeit der querschnittsorientierten Struktur der Forschung an der Schnittstelle zwischen Grundlagenorientierung und Anwendung nicht empfohlen. ... Der Wissenschaftsrat empfiehlt die Weiterförderung des Forschungszentrums Rossendorf als Forschungseinrichtung der Blauen Liste.“

Für die **Strahlungsquelle ELBE** wurden das Gebäude sowie die Helium-Verflüssigungsanlage fertiggestellt und übergeben. Der 250-keV-Injektor wurde aufgebaut, getestet und optimiert. Anschließend wurde der erste 20-MeV-Abschnitt des Beschleunigers aufgebaut. Parallel dazu schritten die Arbeiten zur Auslegung der Undulatoren und optischen Komponenten der Freie-Elektronen-Laser voran. Im Berichtszeitraum wurden der Baufortschritt von ELBE sowie die weiteren konzeptionellen Arbeiten zweimal durch das externe Machine Advisory Committee begutachtet, wobei dieses insbesondere im Oktober 2000 den erreichten Stand sehr positiv

bewertete. Vor allem um einen möglichst reibungslosen Übergang von der Errichtung zur Inbetriebnahme von ELBE zu gewährleisten und um rechtzeitig eine hoch qualifizierte Betriebsmannschaft zu formieren, wurde im Dezember 2000 die Gründung der Zentralabteilung „Strahlungsquelle ELBE“ mit 18 Mitarbeitern zum 1. Januar 2001 beschlossen.

Das FZR-**Strahlrohr ROBL** an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle in Grenoble erhielt gegen Ende des Jahres 1999 nach dem Ionenstrahlzentrum als zweite größere Experimentiereinrichtung des FZR den Status einer „Large Scale Facility“ der Europäischen Union. Dort wird inzwischen ein umfang- und erfolgreiches eigenes Forschungsprogramm realisiert; weitere 19 Experimente wurden im Berichtszeitraum von externen Nutzern durchgeführt.

Als herausragendes Ergebnis des **Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung** sei genannt, dass in Kooperation mit der Mikroelektronik-Industrie erstmalig ein nicht-flüchtiger 256-kByte-Speicher (SRAM) mit einer Speicherzelle auf der Basis nanoclusterhaltiger Siliziumdioxid-Schichten hergestellt wurde. Dieses Ereignis sowie die erstmalige Herstellung und erfolgreiche Erprobung eines monolithisch integrierten Optokopplers in reiner Silizium-Prozesstechnologie fanden auch in der Öffentlichkeit entsprechende Beachtung. Weiterhin ist erwähnenswert, dass im vergangenen Jahr die Abteilung „Halbleiterspektroskopie“ aufgebaut wurde und das Mitarbeiter des Instituts zwei technologieorientierte Firmen gründeten: Angewandte Puls Technik GmbH und nanoparc GmbH.

Im Institut für **Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie** gelang es, im Verlauf intensiver Untersuchungen zur Entwicklung von Technetiumtracern für Neurorezeptoren Derivate zu erhalten, die einen neuen Chelatbildner enthalten und damit in vivo sehr stabil sind und sehr gute Bindungswerte zum Serotoninrezeptor aufweisen. Weiterhin wurden für die „no-carrier-added“-Präparation von Technetium-Gemischtligandkomplexen Verfahren entwickelt, die Markierungsprodukte in hoher Ausbeute liefern. Radioaktive Stents werden als wichtiges therapeutisches Instrument bei Herzarterienverschluss angesehen: In einem gemeinsam mit der Schering AG entwickelten Verfahren wurde eine definiert-homogene Beladung der Stentoberfläche erreicht, die die geforderte optimale Dosisverteilung in der Stentumgebung gewährleistet und unerwünschte Nebeneffekte ausschließt. Diese Stents befinden sich in der tierexperimen-

mentellen Erprobung. In dem gemeinsam mit dem Universitätsklinikum der TU Dresden betriebenen **PET-Zentrum** des FZR wurden in den Jahren 1999/2000 insgesamt 487 bzw. 665 Patienten untersucht.

Als eines der wichtigsten Ergebnisse des **Instituts für Radiochemie** ist zu nennen, dass nach Neptunium mit Plutonium ein weiteres Transuranelement am radiochemischen Messplatz des Strahlrohrs ROBL untersucht wurde. Bindungsabstände und Koordinationszahlen von Plutonium-(III)- und Plutonium-(VI)-Hydraten wurden mittels EXAFS-Spektroskopie bestimmt. Außerdem wurden die röntgenabsorptionsspektroskopischen Untersuchungen an Neptunium-(IV)-, Neptunium-(V)- und Thorium-(IV)-Humaten und -Fulvaten fortgesetzt. Hervorhebenswert ist dabei, dass ein spezieller, auf der Faktorenanalyse beruhender mathematischer Algorithmus entwickelt wurde, der es erstmalig ermöglicht, EXAFS-Spektren von Mischungen quantitativ auszuwerten und die Anzahl, die relative Konzentration und die EXAFS-Strukturparameter der einzelnen Komponenten zu bestimmen.

Das vom **Institut für Sicherheitsforschung** gemeinsam mit der Universität Riga und der Technischen Universität Dresden in Riga im November 1999 weltweit erstmals durchgeführte so genannte Dynamo-Experiment zum Nachweis der Selbsterregung von Magnetfeldern in Flüssigmetallströmungen („Erzeugung des Erdmagnetfelds“) wurde unter verbesserten Bedingungen im Sommer 2000 wiederholt. Dabei konnte zum ersten Mal bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten des flüssigen Natriums das selbsterregte Magnetfeld bis in die Sättigung von über 200 Gauss getrieben werden. Die Ergebnisse dieses Experiments haben große Publizität, unter anderem in „Nature“ und „Science“, erfahren. Weiterhin wurde innerhalb von nur 18 Monaten gemeinsam mit der TU Dresden ein weltweit neuartiges Verfahren zur Visualisierung von periodisch veränderlichen Gasgehaltsverteilungen von der grundlegenden Idee bis zur Erprobung des fertigen Messsystems entwickelt. Es handelt sich um einen Gamma-Tomographen, der die Gasgehaltsverteilung im Laufrad einer Axialpumpe bei Kavitation oder der Förderung zweiphasiger Medien mit einer räumlichen Auflösung von etwa fünf Millimetern misst. Der Aufbau des Thermohydraulik-Versuchsstands TOPFLOW ist durch die Übernahme der Anlage NOKO aus dem FZ Jülich und zügige Bauarbeiten am Gebäude 68, das im Sommer 2000 vom VKTA übernommen wurde, sichtbar vorangeschritten.

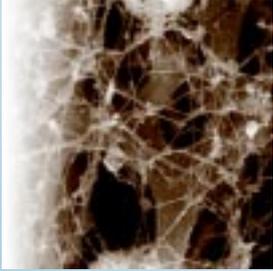
Die Arbeiten im **Institut für Kern- und Hadronenphysik** konzentrieren sich zunehmend auf die Vorbereitung von Experimenten an der Strahlungsquelle ELBE. Die im Institut entwickelte PET-Kontrolle von Tumorbehandlungen mit Kohlenstoffstrahlen wird mittlerweile als klinische Routinemethode an der experimentellen Schwerionen-Therapieanlage bei der GSI Darmstadt eingesetzt. Bis zum Ende des Jahres 2000 wurden mehr als 2600 Behandlungsfraktionen bei 78 Patienten mit PET überwacht. Außerdem konnte die Gruppe zeigen, dass die entwickelte Methode auch für die Kontrolle der Protonentherapie ein erhebliches Potenzial besitzt. Von der Kernstrukturtheorie-Gruppe wurde 1997 vorhergesagt, dass die Rotation von Atomkernen unter bestimmten Umständen zur Ausbildung einer Händigkeit oder Chiralität der Kernbewegung führt. Wie mit Hilfe des Rossendorfer Tilted-Axis-Cranking-Modells berechnet wurde, liegt Chiralität in Kernen dann vor, wenn typische Linien im emittierten Gammaskpektrum rotierender Kerne doppelt auftreten. Diese vorhergesagte Verdopplung der Linien wurde jetzt von einer amerikanischen Gruppe tatsächlich bei der Untersuchung von Nukliden mit der Neutronenzahl 75 beobachtet. Zurzeit vertreten etwa 15 führende Wissenschaftler das FZR in mehr als 30 angesehenen überregionalen Wissenschaftsgremien; sechs sind Mitherausgeber von acht wissenschaftlichen Zeitschriften.

Frank Pobell
Wissenschaftlicher Direktor

Seit dem 16. März 2000 gehört das FZR dem neu gegründeten **Kompetenzverbund „Nukleare Sicherheit und Entsorgung“** an. Weitere Mitglieder sind die Forschungszentren in Jülich und Karlsruhe sowie die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. Gemäß der Aufforderung des BMBF an die großen Wissenschaftsorganisationen, ihre Planungen für Großgeräte mit einem Investitionsvolumen von mindestens 30 Millionen DM vorzulegen, hat die Leibniz-Gemeinschaft Ende Juni 2000 den gemeinsamen Vorschlag fünf Dresdner Institute zur Errichtung eines „Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder in Dresden“ als einen ihrer beiden Großgerätevorschläge eingereicht. Derzeit liegt das Projekt dem Wissenschaftsrat zur Begutachtung vor. Im Rahmen der Evaluation des FZR hatte der Wissenschaftsrat bereits empfohlen, dass das FZR bei der Planung und gegebenenfalls Realisierung dieses Projekts die treibende und ausführende Kraft sein solle. Ein entsprechendes Vorprojekt wurde inzwischen erfolgreich abgeschlossen.

Auf den folgenden Seiten finden sich Berichte über die wichtigsten Ereignisse des vergangenen Jahres und zu je einer besonders herausragenden wissenschaftlichen Arbeit aus den Instituten.

Gerd Parniewski
Kaufmännischer Direktor



EREIGNISSE

Ausgezeichnete Arbeiten

Christoph-Schmelzer-Preis für Kathrin Lauckner

Dr. Katrin Lauckner hat für ihre Arbeit „Entwicklung eines iterativen 3D-Rekonstruktionsverfahrens für die Kontrolle der Tumorbehandlung mit Schwerionen mittels Positronen-Emissions-Tomographie“ den Christoph-Schmelzer-Preis erhalten. Sie teilt sich den Preis, den sie im Dezember 1999 in Darmstadt entgegennahm, mit Dr. Caterina Brusasco von der Gesellschaft für Schwerionenforschung. Verliehen wurde er vom Verein zur Förderung der Tumorthherapie mit schweren Ionen e. V.



Dr. Katrin Lauckner erhielt den Christoph-Schmelzer-Preis 1999.

Erwin-Schrödinger-Preis für Wolfgang Enghardt

Die Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren hat im November 1999 erstmals den Erwin-Schrödinger-Preis für interdisziplinäre Forschung vergeben. Der vom Stifterverband der deutschen Wirtschaft initiierte und mit 100 000 DM dotierte Preis ging zur Hälfte an Professor Dr. Gerhard Kraft, Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, die andere Hälfte erhielten zu gleichen Teilen Dr. Wolfgang Enghardt, Forschungszentrum Rossendorf, und Dr. Dr. Jürgen Debus, Radiologische Universitätsklinik Heidelberg und Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg.

Die Gemeinschaft hat damit die herausragenden Beiträge der Wissenschaftler zur Vorbereitung, Entwicklung und klinischen Einführung der Krebstherapie mit Ionenstrahlen gewürdigt. Die Ionenstrahltherapie erlaubt eine wirksame Bekämpfung von bislang nicht oder nur schwer zugänglichen, lokal begrenzten Krebserkrankungen. Mit dem neu entwickelten Verfahren ist es möglich, tief liegende Tumore auf den Millimeter genau durch elektrisch geladene Atome (Ionen, zum Beispiel die des Kohlenstoffs) zu zerstören, ohne das umliegende gesunde Gewebe zu schädigen. Auf diese Weise können Mediziner auch Tumore behandeln, die in unmittelbarer Nähe besonders empfindlicher Organe wie dem Sehnerv oder dem Hirnstamm liegen.

Die Kollegen aus Darmstadt und Heidelberg haben Pionierarbeit bei der komplizierten Steuerung des Beschleunigers für die Erzeugung des Therapiestrahls und bei der medizinischen Betreuung geleistet. Die „Augen des Chirurgen“, mit denen die Mediziner noch auf der Behandlungsliege („in situ“) Ort und Größe der bestrahlten Körperregion aufzeichnen können, stammen aus dem Institut für Kern- und Hadronenphysik des FZR. Unter der Leitung von Wolfgang Enghardt hat ein halbes Dutzend Rossendorfer Wissenschaftler eine sogenannte Positronen-Kamera und die nötige



Vom Landesvorsitzenden des Stifterverbandes der deutschen Wirtschaft, Dr. Arend Oetker, erhielten Professor Dr. Gerhard Kraft, Dr. Dr. Jürgen Debus und Dr. Wolfgang Enghardt (von links nach rechts) den Erwin-Schrödinger-Preis.
Foto: Fotostudio Querbach, Wesseling/Köln

Analyse-Software entwickelt und gebaut. Positronen-Emissions-Tomographie ist ein bildgebendes Verfahren in der Nuklearmedizin. Im Unterschied zum dort üblichen Vorgehen muss den Patienten in Darmstadt aber keine radioaktive Substanz injiziert werden. Die Gruppe um den Kernphysiker macht sich den Umstand zunutze, dass bei einer Bestrahlung mit Kohlenstoff-Ionen in der betroffenen Körperregion sehr geringe Mengen radioaktiver Kerne entstehen. Diese senden die Antiteilchen der Elektronen, so genannte Positronen, aus. Treffen Positronen mit Elektronen aus dem umliegenden Gewebe zusammen, wird Energie in Form von zwei Gammaquanten frei; diese Röntgenstrahlung misst die Positronen-Kamera. Aus den Aufzeichnungen lässt sich am Computer der Ort des Zerfalls rekonstruieren und die bestrahlte Region präzise darstellen. Das kooperative Projekt der Wissenschaftler aus Darmstadt, Rossendorf und Heidelberg zur Krebstherapie mit Ionenstrahlen steht international an vorderster Front, heißt es in der Begründung der Jury unter Vorsitz von Frau Professor Karin Mölling von der Universität Zürich. An keiner anderen Stelle seien die Probleme so umfassend, zielgerichtet und mit so vielen neuen Ideen und Methoden von Medizinern, Physikern, Radiologen und Ingenieuren angegangen worden.

Dr. Lars Rebohle erhielt den Jahrespreis der Geiger-Stiftung 2000.



Jahres-Preis der Geiger-Stiftung für Lars Rebohle

Für seine Arbeit „Lumineszenzeigenschaften ionenimplantierter nanokristalliner SiO₂-Schichten“ hat Dr. Lars Rebohle im Juni 2000 den Jahrespreis der „Professor Dr. Jürgen Geiger Stiftung“ erhalten. Die Stiftung vergibt Preise an Diplomanden und Doktoranden, die Ideen entwickeln, die zu herausragenden Ergebnissen in der Experimentalphysik, dem Forschungsgebiet des Stiftungsvaters, führen. Der Preis ist mit 2000 DM dotiert.

Thoralf Gebel



Erich-Glowatzky-Preis für Thoralf Gebel

Im Oktober 2000 wurde Thoralf Gebel mit dem Erich-Glowatzki-Preis sowie mit der Erich-Glowatzki-Ehrennadel in Gold ausgezeichnet. Er erhielt den Preis wegen seiner großen Vorbildwirkung für junge Akademiker und junge potentielle Gründer. Gebel hat sein Studium der Physik mit Auszeichnung abgeschlossen und fertigt im FZR seine Doktorarbeit zum Thema „Implantationsinduzierte Si- und Ge-Nano-cluster in SiO₂-Schichten: elektrische und optoelektronische Eigenschaften“ an. Im Rahmen seiner Forschungen entwickelte er ein Patent zu einem integrierten Optokoppler auf Siliziumbasis, zu dessen Vermarktung er im Juli 2000 mit vier weiteren Gesellschaftern eine eigene Firma gegründet hat. Thoralf Gebel ist Geschäftsführer der Firma.

FZR-Preise – Ausgezeichnete Arbeiten für Anwendungen und Patente

Alle Jahre wieder kurz vor Weihnachten, prämiert das Forschungszentrum Rossendorf besondere Arbeiten des vergangenen Jahres in den Bereichen Forschung, Technologie und für die beste Doktorarbeit. Bei der Auswahl dieser Arbeiten beachtet das Preiskomitee für jeden der drei Preise ganz bestimmte Kriterien: Beim Technologiepreis liegt ein besonderes Augenmerk auf dem Technologietransfer und der Patentwürdigkeit der technischen Arbeiten. Für den Forschungspreis wählt das Komitee eine interdisziplinäre Arbeit aus, und es steht eine mögliche Anwendung im Vordergrund. Für den Doktorandenpreis werden drei Arbeiten nominiert. Den Preis erhält nach einem Vortrag der Wissenschaftler, dem es am besten gelungen ist, die Arbeit einem fachfremden Publikum verständlich zu präsentieren.



Institutspreise 1999
Die Preisträger: Dr. Gunter Gerbeth, Dr. Mathias Strobel, Dr. Frank Wüst, Dr. Katrin Lauckner und Dr. Horst-Michael Prasser (von links nach rechts). Mathias Strobel und Katrin Lauckner erhielten eine Auszeichnung für ihre Doktorarbeit.



Institutspreise 2000
Die Preisträger: Dr. Matthias Friebe, Dr. Wolfgang Skorupa, Dr. Lars Rebohle, Thoralf Gebel, Dr. Hans Krug und Rainer Hinz (von links nach rechts). Lars Rebohle und Rainer Hinz erhielten eine Auszeichnung für ihre Doktorarbeiten.

Forschungspreis 1999

Dr. Vladimir Galindo und Dr. Gunter Gerbeth

„Magnetfelder für Kristallzüchtungstechnologien – Theorie, Numerik und industrielle Umsetzung“.

Diese Forschungsarbeit hat wesentliche Beiträge zur Zucht großer Silizium-Einkristalle geliefert. Industrielle Anwendung ist zum Beispiel das so genannte „300-Millimeter-Wafer“-Projekt in der Chipproduktion.

Doktorandenpreis 1999

Dr. Frank Wüst

„Rhenium- and Technetium-containing steroids as ligands for the estrogen receptor, progesterone receptor and androgen receptor“.

Für die meisten Krankheiten gilt: Je früher man sie erkennt, umso besser sind die Heilungschancen. Frank Wüst hat sich mit den chemischen und radiochemischen Grundlagen für die Anwendung von neuartigen Metallkomplexen in der nuklearmedizinischen Diagnostik beschäftigt. Dazu hat er verschiedene Metall-Steroidkomplexe hergestellt und ihre Bindung an spezielle Rezeptoren untersucht. Die Ergebnisse der Arbeiten sind ein wichtiger Beitrag für die weitere Entwicklung von Radiopharmaka zur Diagnose von Brust- und Prostatakrebs.

Technologiepreis 2000

Dr. Hans Krug und Dr. Robert Kratz

für die Entwicklung und den Aufbau einer 1-Megajoule-Pulsanlage zur Erzeugung hoher magnetischer Felder.

Die Forscher haben die Energieversorgung für das Dresdner Hochfeldlabor entwickelt. Bei diesem Großprojekt, an dem mehrere Forschungseinrichtungen beteiligt sind, sollen Magnetfelder erzeugt werden, die in ihrer Stärke auf der Welt bisher einzigartig sind. Für Bruchteile von Sekunden wären dafür gigantische Energiemengen notwendig, für die der Strom nicht direkt „aus der Steckdose“ entnommen werden könnte. Die Entwicklung einer entsprechenden Stromversorgung war daher eine ganz besondere Herausforderung, die Hans Krug und Robert Kratz mit Hilfe einer Kondensatorbank sehr elegant gelöst haben. Dabei laden sich die Kondensatoren langsam auf und geben die Energie blitzartig wieder ab.

Technologiepreis 1999

Dr. Horst-Michael Prasser

für seine Entwicklungsarbeiten zur Zweiphasenmesstechnik.

Mit der im FZR entwickelten Messtechnik ist es möglich, die Verteilung von zwei verschiedenen Phasen in Flüssigkeitsströmungen zu messen. Das kann zum Beispiel Gas im Kühlwasser eines Kraftwerks sein. Die Arbeit hat zunächst zu einem besseren Verständnis dieser Strömungen beigetragen; darauf folgten konkrete technische Lösungen für die Praxis.

Forschungspreis 2000

Dr. Wolfgang Skorupa, Dr. Lars Rebohle und Thoralf Gebel

„Blaue Elektrolumineszenz aus siliziumbasiertem Material“.

Noch vor wenigen Jahren waren Wissenschaftler überzeugt, dass es nicht möglich sei, Silizium zum Leuchten zu bringen. Doch inzwischen strahlt der Stoff, aus dem die Mikroelektronik ist, nicht nur rot, sondern er sendet sogar energiereiches blaues Licht aus. Wolfgang Skorupa, Lars Rebohle und Thoralf Gebel haben es nun auch noch geschafft, dem Material so viel blaues Licht zu entlocken, dass daraus eine Lichtquelle für die Anwendung werden kann. – Ein Patent ist schon eingereicht.

Doktorandenpreis 2000

Dr. Matthias Friebe

„Amingruppentragende Technetium(V)- und Rhenium(V)-Verbindungen: Synthese und Untersuchungen von Zusammenhängen molekularer Eigenschaften und dem Transport über die Blut-Hirn-Schranke“

Wie ein Pförtner überwacht die Blut-Hirn-Schranke die Schaltzentrale Gehirn; und sie lässt nur Stoffe passieren, die den richtigen Code kennen. Auf diese Weise verhindert sie, dass unliebsame Substanzen in das Denkgorgan eindringen. Für die Medizin hat der Sicherheits-Check allerdings einen Nachteil: Auch viele Medikamente scheitern an dieser Barriere. Matthias Friebe hat in seiner Doktorarbeit Substanzen maßgeschneidert, die gut ins Gehirn eindringen können. Dort sollen die Stoffe als Signalgeber für ein spezielles bildgebendes Verfahren in der Medizin dazu dienen, Störungen von Hirnfunktionen sichtbar zu machen.

Das FZR bekommt beste Noten



Durch Gespräche mit den Mitarbeitern des FZR wollte sich der Wissenschaftsrat ein Bild von der Atmosphäre der Beschäftigten untereinander machen.

Das Forschungszentrum Rossendorf ist im Jahr 2000 vom Wissenschaftsrat (WR) evaluiert worden. Ein Vorgang, der die Mitarbeiter viel Aufregung und Arbeit gekostet hat; fast eineinhalb Jahre beschäftigten Vorbereitung und Durchführung der Evaluierung das Zentrum. Doch der Aufwand hat sich gelohnt, das FZR hat hervorragende Noten bekommen. In dem über 80 Seiten umfassenden Bericht hebt der WR hervor: „Das FZR [hat] wegen seiner internationalen Ausstrahlung eine hohe Anerkennung in der scientific community gefunden und betreibt auf durchgehend hohem Niveau anwendungsorientierte Grundlagenforschung in der Kernphysik, Materialforschung, Biomedizin, Chemie, Umwelt und Sicherheit. Das Forschungszentrum versteht es ausgezeichnet, wichtige und innovative Themen aufzugreifen und sich an gro-

ßen gemeinsamen Experimentieranlagen maßgeblich zu beteiligen.“

Bereits im Sommer 1999 hatten die verschiedenen Abteilungen begonnen, die Unterlagen für die Gutachter-Kommission anzufertigen. Darin enthalten waren neben dem Jahres- und Tätigkeitsbericht Antworten auf verschiedenste Fragen, wie die zu den Hauptarbeitsrichtungen des FZR und deren Bedeutung im nationalen und internationalen Vergleich sowie zu seiner personellen und materiellen Ausstattung oder seiner Nachwuchsförderung.

Mit einem Kleinbus brachte die Fahrbereitschaft des Forschungszentrums die Evaluierungsunterlagen zum WR nach Köln.

– Insgesamt acht Kilogramm Papier, das in 25-facher Ausführung pünktlich zum 30. November 1999 dem WR vorliegen musste. Im April 2000 stand dann der dreitägige Besuch der Kommission im FZR an. Die Gutachter haben viele Gespräche mit dem Vorstand und den Institutsdirektoren geführt und alle fünf Institute des Forschungszentrums besucht. Dabei befragten sie die Wissenschaftler zu ihren Arbeiten, um zu einer Bewertung der wissenschaftlichen Arbeit und der Arbeitsbedingungen im Zentrum zu gelangen. In einem zusätzlichen Gespräch der Kommission mit den Mitarbeitern des Forschungszentrums machten sich die Gutachter ein Bild von der Zusammenarbeit und dem Klima der Beschäftigten untereinander.

Für das Forschungszentrum Rossendorf war es nach 1991 und 1993 die dritte und umfangreichste Begutachtung durch den Wissenschaftsrat.

Eine Ära geht zu Ende

Im Dezember 1999 hat Professor Frank Pobell das Zyklotron U-120 abgeschaltet. Es ging nach über 41 Jahren Forschungsbetrieb in den Ruhestand. Dr. Hartmut Guratzsch, Leiter der Zentralabteilung Neue Beschleuniger, erinnerte an die fruchtbaren Ergebnisse der Forschungen mit diesem Gerät der „ersten Stunde“ am Forschungsstandort und an die Bedeutung der Service- und Dienstleistungen, die das U-120 bis zuletzt für Forschung und Industrie erbrachte.

Der Teilchenbeschleuniger Zyklotron U-120 beschleunigte Protonen, Deuteronen sowie Alphateilchen, zusätzlich lieferte er Neutronen. Damit diente er unter anderem zur Erzeugung



kurzlebiger Radiotracer für medizinische Zwecke, für die radiochemische Forschung und zu Verschleißuntersuchungen im Maschinenbau.

EXPO am Meer – Titanic ohne Untergang



„Strömungskontrolle am Schiff“ war das Thema, mit dem das FZR auf der EXPO am Meer in Wilhelmshaven vertreten war. – Auf 160 Quadratmetern Ausstellungsfläche, die dem FZR kostenlos zur Verfügung standen, konnten sich die Besucher zum Beispiel darüber informieren, wie man Schiffe manövrierbarer machen kann. 100 000 Gäste haben diese Möglichkeit genutzt und dabei erfahren, dass eine Anord-

nung von Permanentmagneten und Elektroden am Ruder weiterhilft. Soll ein Schiff eine Kurve fahren, muss man das Schiffsruder anstellen. Doch das geht nur bis zu einem ganz bestimmten Winkel; dann reißt das Wasser vom Ruder ab, und es bilden sich Wirbel – das Schiff ist nicht mehr manövrierfähig, es reagiert nicht mehr auf sein Ruder. Die Konsequenz: Schiffe können keine engen Kurven fahren und somit auch nicht vor plötzlich auftauchenden Hindernissen ausweichen. Ein Nachteil, der nicht nur beim berühmtesten aller Schiffsunglücke, dem Untergang der Titanic, die Ursache war.

Doch für Schiffe, die auf den Weltmeeren unterwegs sind, lässt sich die Manövrierfähigkeit deutlich steigern. Das haben Wissenschaftler der Abteilung Magnetohydrodynamik im Institut für Sicherheitsforschung des FZR in einem gemeinsamen Projekt mit der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt herausgefunden. Meerwasser ist eine schwach leitfähige Flüssigkeit; eine wichtige Voraussetzung für das Prinzip, das die Forscher entwickelt haben: Versieht man das Schiffsruder mit Permanentmagneten und Elektroden in einer ganz bestimmten Anordnung, baut sich ein so genanntes elektromagnetisches Feld auf, das die Wirbelbildung unterdrückt. Das Wasser „haftet“ besser am Ruder und reißt auch dann nicht ab, wenn das Ruder stark angestellt ist.



Das FZR auf der EXPO am Meer in Wilhelmshaven.

Hannover Messe 2000 – Melkmaschinen und BKA



Das FZR war mit zwei Ständen auf der Hannover-Messe der Industrie 2000 vertreten: In Halle 4, als Partner im Innovationszentrum „Ingenieur-Werkstoffe“ – ein auf spezielle Kundschaft ausgerichteter, vom Institut für Ionenstrahlphysik eigenständig betreuter Stand, auf dem die Forscher Verfahren zur Oberflächenmodifikation mit Ionenstrahlen präsentiert haben.

Auf dem zweiten Stand in Halle 18 (Forschung und Technologie) stellten Wissenschaftler verschiedene Forschungsaspekte des FZR dar. Die Interessenten für die Exponate kamen dabei aus den verschiedensten Bereichen: Vom Formel-1-Team bis hin zum Bundeskriminalamt interessierte man sich für die Modifikation und chemische Analytik mit Ionenstrahlen. Ob man mit einer speziell angepassten Version des Gittersensors – ein Messinstrument, mit dem man in Zwei-Phasen-Systemen (z. B. Wasser/Gas) die genaue Verteilung der Bestandteile bestimmen kann, – Melkmaschinen steuern könne, wollte ein Vertreter eines Landwirtschaftsverbandes wissen. „Dann könnte sich die Melkmaschine automatisch abschalten, wenn der Luftanteil in der Milch zu groß wird, das Euter also leer ist“ – eine auf der Hand liegende Einsatzmöglichkeit, die den Wissenschaftlern sicher verschlossen geblieben wäre, würden sie nicht vor Ort mit potenziellen Anwendern reden.



Der Sächsische Wirtschaftsminister, Dr. Kajo Schommer am Stand des Forschungszentrums Rossendorf.



Lehrerfortbildung 1999 und 2000

Die Lehrerfortbildung im August 1999 hatte das Thema „Teilchenbeschleuniger in der modernen Forschung“, im August 2000 konnten die Lehrer etwas über „Natürliche und künstliche Radioaktivität in der Umwelt“ erfahren. Die Veranstaltungen zogen fast 140 Lehrer ins Forschungszentrum. Dabei konnten sie von den Referenten nicht nur erfahren, wie

die Praxis theoretisch aussieht. Bei einem anschließenden Rundgang durch das Forschungszentrum hatten die Lehrer die Möglichkeit, die in der Theorie gelernten Methoden aus nächster Nähe kennen zu lernen.



Tag der offenen Tür 1999 und 2000

Die Tage der offenen Tür im September 1999 und 2000 standen unter dem Motto „Wissenschaft zum Anfassen“. Fast 3000 Gäste haben in den beiden Jahren die Möglichkeit genutzt, nach Lust und Laune die verschiedensten Bereiche des Forschungszentrums anzuschauen. Zwar können Gruppen wie zum Beispiel Schulklassen das ganze Jahr über das FZR besuchen, doch dann ist in der Regel nur die Besichtigung von wenigen Anlagen und Projekten möglich. Mit 7 beziehungsweise 9 Vorträgen und 22 und 26 Besichtigungsstationen konnten sich die Besucher an den Tagen der offenen Tür auch die Bereiche anschauen, die sonst für Gäste nicht zugänglich sind. Das gilt zum Beispiel für das PET-Zentrum, in dem die Mediziner großen Wert darauf legen, dass sich die Patienten ungestört den Untersuchungen unterziehen können.



Professor Manfred Helm

Neue Institutsdirektoren berufen

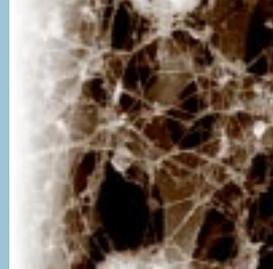
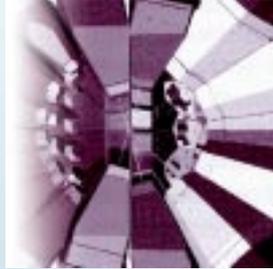
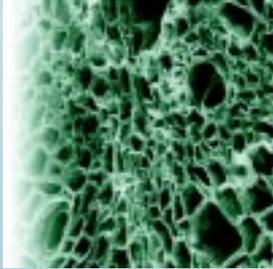
Im Februar 2000 haben zwei neue Direktoren im Forschungszentrum ihren Dienst angetreten. Im Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung ist nun die Stelle des zweiten Institutsdirektors und im Institut für Radiochemie ist die Nachfolge von Professor Nitsche besetzt.

Dr. Thomas Fanghänel ist Direktor des Instituts für Radiochemie. Durch seine bisherigen Forschungsarbeiten verfügt er über besondere Voraussetzungen, die Arbeiten des Instituts weiter auszubauen und voranzutreiben. Er hat unter anderem zum Verhalten von Radionukliden in der Umwelt, zur Langzeitsicherheitsforschung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, in der aquatischen Chemie und Thermodynamik von Actiniden und deren Spaltprodukte und in der geochemischen Modellierung geforscht.



Professor Thomas Fanghänel

Professor Dr. Manfred Helm widmet sich im Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung vor allem der Aufgabe, die neue Forschungsrichtung „Spektroskopie an Halbleitern“ aufzubauen. Dabei hat er die Leitung der bestehenden Arbeiten zur Halbleiterphysik in diesem Institut übernommen und wird bei seinen weiteren Forschungen den im Bau befindlichen Freie-Elektronen-Laser am Elektronenbeschleuniger ELBE nutzen.



ERGEBNISSE

Das Erdmagnetfeld im Labor

F. Stefani, G. Gerbeth, Th. Gundrum

Institut für Sicherheitsforschung

Wer den Magnetismus tatsächlich entdeckt hat, wird sich wohl nie mehr feststellen lassen. Sicher ist, bereits Thales (um 600 v. Chr. G.) kannte die bemerkenswerte Eigenschaft von Magneteisenstein, Eisen anzuziehen. Auch in China ist das Phänomen schon lange bekannt: Wahrscheinlich schon zwei Jahrhunderte vor unserer Zeitrechnung haben die Chinesen aus Magneteisenstein den ersten Kompass in der Form eines Löffels hergestellt. Er konnte sich auf einer glatten Unterlage frei drehen. Die ersten Erklärungsversuche für dieses Verhalten waren allerdings sehr gefühlsbetont: Die Chinesen beispielsweise bezeichneten den Magnetit als „liebenden Stein“. Nachdem der Kompass etwa im 12. Jahrhundert nach Europa gekommen war, haben die Menschen den Polarstern für dessen Nordausrichtung verantwortlich gemacht. Mit Petrus Perigrinus Abhandlung „Epistola de Magnete“ aus dem Jahre 1269 begann dann ein neues Kapitel in der Erforschung des Magnetismus. Im Gegensatz zu manchem seiner spekulierenden Zeitgenossen ließ er sich von den Beobachtungen leiten, die er in eigenen Experimenten mit Magneteisenstein gemacht hatte. Auf Perigrinus geht der Begriff der Pole zurück; er zeigte, dass sich gleichnamige Pole abstoßen und entgegengesetzte Pole anziehen. Zudem entdeckte er die magnetischen Längenkreise. Dass er – wohl im Überschwang – gleich noch ein magnetisches Perpetuum mobile vorgeschlagen hat, kann angesichts solcher Verdienste wohl als lässliche Sünde durchgehen.

Danach dauerte es noch mehr als dreihundert Jahre bis William Gilbert, ebenfalls von verschiedenen Experimenten an Kugeln aus Magneteisenstein inspiriert, die Erdkugel selbst als großen Magneten beschrieben hat („magnus magnes ipse est globus terrestris“). Dabei erklärte er die Deklination, das heißt die Abweichung der Kompassnadel von der tatsächlichen Nordrichtung, durch die zusätzliche magnetische Anziehung der Kontinente (Abb. 1). – Die Erde als große Kugel aus Magneteisenstein: Diese Vermutung hat er durch seine Beobachtung gut begründet, durch seine Experimente zusätzlich gestützt und ziemlich konsequent gedacht. Nur ist sie leider falsch.

Inzwischen kennen wir die Struktur des Erdinneren sehr genau (Abb. 2); und wir wissen, was weder Perigrinus noch Gilbert wissen

konnten: Im Inneren der Erde ist es viel zu heiß für jegliche Art von Ferromagnetismus, die Eigenschaft, die Eisen magnetisch macht. Bringt man zum Beispiel einen Eisennagel in ein Magnetfeld, richten sich alle seine atomaren Dipole, also die magnetischen Momente seiner Atome, entlang der magnetischen Feldlinien aus und stellen sich parallel. Das ist allerdings lediglich in Festkörpern und dann auch nur bis zu einer ganz bestimmten Temperatur, der so genannten Curie-Temperatur, möglich. Steigt die Temperatur weiter an, geht die Ordnung verloren. – Es ist kein Material bekannt, das bei Temperaturen von etwa 5000 Grad Celsius, wie sie im Erdkern herrschen, noch ferromagnetisch ist. Darüber hinaus weiß man inzwischen, dass neben der Erde und anderen Planeten auch Sterne und ganze Galaxien Magnetfelder besitzen, bei denen sich jeder Gedanke an Ferromagnetismus von selbst verbietet.

Doch welche Quellen kosmischer Magnetfelder kommen noch in Betracht, wenn Ferromagnetismus offenbar ausscheidet? Ampère hatte entdeckt, dass elektrische Ströme Magnetfelder erzeugen. Aber was für elektrische Ströme können das in Planeten, Sternen und Galaxien sein, und von welcher „Batterie“ werden sie angetrieben? Diese Frage war bis Anfang des 20. Jahrhunderts ohne Antwort: Noch Einstein hatte sie 1905 als eines der großen Rätsel der Physik angesehen. Nur ganz langsam hat sich die Theorie kosmischer Magnetfelder, wie sie sich uns heute darstellt, durchgesetzt. Danach sind es elektrisch leitfähige Fluide, also Flüssigkeiten oder Gase, deren Strömungen die Magnetfelder hervorbringen. Das zugehörige Phänomen heißt: homogener Dynamoeffekt – und das Zauberwort zu seinem Verständnis: Selbsterregung.

Selbsterregung

Gewöhnlich wird Werner von Siemens (1867) als Entdecker der Selbsterregung – oder des Dynamoprinzips – genannt; aber offenbar lag die Erfindung damals in der Luft, da sie in der Literatur gelegentlich auch anderen (Ányos Jedlick, Charles Wheatstone) zugeschrieben wird.

Ein einfaches Experiment, bei dem Selbsterregung auftritt, ist der so genannte Scheibendynamo (Abb. 3). Dabei ist eine metallische

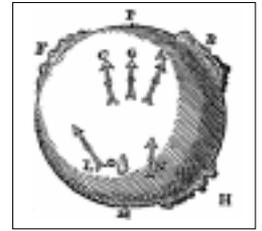


Abb. 1
Gilberts Vorstellung: Die Erde ist ein großer Magneteisenstein. Die Deklination, das heißt die Abweichung der Kompassnadel von der Nordrichtung, erklärte er dabei durch die Verteilung der Kontinente.

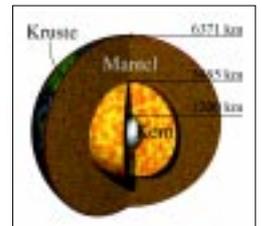


Abb. 2
Heutige Vorstellung vom Erdaufbau, wie sie vor allem seismische Messungen hervorgebracht haben. Das Magnetfeld wird durch Strömungen im flüssigen äußeren Kern erzeugt. Diese entstehen durch Auftriebskräfte und die Rotation der Erde.

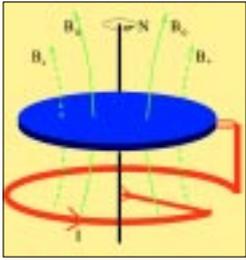


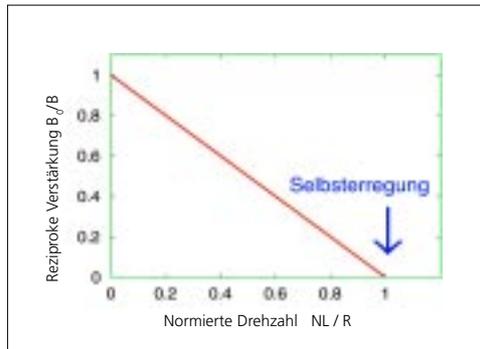
Abb. 3

Bullards Scheibendynamo: Eine metallische Scheibe dreht sich in einem äußeren Magnetfeld B_0 . Über Schleifkontakte wird ein Strom abgegriffen und so um die Achse geführt, dass das zusätzliche Magnetfeld B_s zur Verstärkung des angelegten Magnetfeldes B_0 führt.

Scheibe auf einer Achse drehbar gelagert. Achse und Scheibe sind über einen Draht miteinander verbunden, und für die nötige elektrische Leitung sorgt an beiden Enden des Drahtes je ein Schleifkontakt – der Stromkreis ist also geschlossen. Aber der Draht führt nicht beliebig von der Scheibe zur Achse, sondern er ist kreisförmig um die Achse gelegt. Beginnt die Scheibe nun zu rotieren und ist sie dabei einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, treibt eben dieses Magnetfeld einen elektrischen Strom durch den Draht; es ruft einen Strom hervor, der von der Scheibe durch den Draht wieder zurück in die Scheibe fließt. Dieser Strom erzeugt nun ein Magnetfeld, das durch die besondere Art, in der der Draht um die Achse führt, parallel zum äußeren Magnetfeld verläuft. Mit anderen Worten: Das ursprüngliche Feld wird verstärkt, und zwar umso mehr, je höher die Drehzahl der Scheibe und je niedriger der elektrische Widerstand des Stromkreises ist. Ab einer bestimmten, kritischen Drehzahl wird die Verstärkung des äußeren Magnetfeldes unendlich; dies ist der Punkt, an dem die Selbsterregung einsetzt (Abb.4).

Abb. 4

Der reziproke Wert der Verstärkung des ursprünglich angelegten Magnetfeldes ist in Abhängigkeit von der Drehzahl N dargestellt. Durch sie wird das Maß der Verstärkung bestimmt, wobei L die gegenseitige Induktivität zwischen Winding und Scheibe und R den Gesamt-widerstand des Stromkreises bezeichnet. Bei der kritischen Drehzahl wird die Verstärkung formal unendlich. Dies ist der Punkt, an dem die Selbsterregung eines Magnetfeldes einsetzt.



Geht man mit der Drehzahl über den kritischen Punkt hinaus, beginnt das Magnetfeld exponentiell zu wachsen. Doch kann dieser extreme Anstieg unbegrenzt weitergehen, ist also doch ein magnetisches Perpetuum mobile möglich? Tatsächlich gibt es eine Grenze des Wachstums, und diese wird durch zwei Effekte hervorgerufen: Zum einen wird die Scheibe durch den stärker werdenden Strom warm, und ihr elektrischer Widerstand wächst. Dadurch setzt die Selbsterregung später ein. Zum anderen erzeugt das Magnetfeld zwar in dem bewegten Leiter einen Strom, doch auf diesen wirkt wiederum eine Kraft, die der Bewegung der Scheibe genau entgegen wirkt – die Scheibe wird gebremst (Lenz'sche Regel). In diesem Konkurrenzkampf der Kräfte stellt sich schließlich ein Gleichgewicht ein, und das Feld wächst nicht mehr weiter an. All diese Erscheinungen – Verstärkung eines angelegten Feldes, Selbsterregung, Sättigung – findet man auch beim homogenen Dynamo wieder; obwohl die Zwänge, denen der Stromfluss im Scheibendynamo unterliegt, in einer Flüssigkeit nicht vorhanden sind.

Homogene Dynamos

Je nachdem, welchen kosmischen Dynamo wir betrachten, ob also Planeten, Sterne oder Galaxien ein Magnetfeld ausbilden, wir haben es immer mit einem anderen leitfähigen Fluid zu tun. Auch die Strömungen, denen die Fluide ausgesetzt sind, variieren von Fall zu Fall, von Galaxie zu Planet. Eines allerdings haben die kosmischen und irdischen Magnetfelder gemeinsam: Die Dynamowirkung ihrer Strömung ist immer sehr eng mit einer bestimmten geometrischen Eigenschaft verknüpft – mit ihrer Schraubenförmigkeit oder Helizität.

In guten elektrischen Leitern verhalten sich magnetische Feldlinien so, als wären sie eingefroren, in leitfähigen Flüssigkeiten werden sie dadurch von der Strömung mitgenommen. Im speziellen Fall einer schraubenförmigen Strömung zum Beispiel, wird die Feldlinie von der Flüssigkeitsbewegung sowohl ausgebeult als auch verdreht (Abb. 5b). Dabei entsteht eine Feldlinienschleife, mit der ein zu ihr senkrecht stehender Strom verknüpft ist. Das Resultat: Die Wechselwirkung einer Mag-

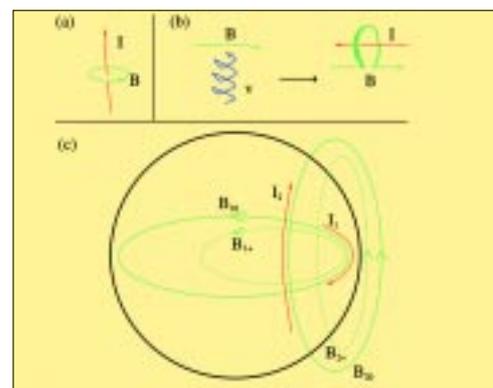


Abb. 5

Magnetfelder in elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten:
a zeigt das ampèresche Gesetz, wonach ein Strom ein Magnetfeld erzeugt.
b der α -Effekt: Eine Magnetfeldlinie wird unter dem Einfluss einer schraubenförmigen Flüssigkeitsbewegung ausgebeult und verdreht. Mit der entstandenen Magnetfeldschleife ist ein Strom verbunden, der parallel zur ursprünglichen Magnetfeldlinie gerichtet ist.
c ein einfacher Dynamoeffekt: Aufgrund des α -Effektes entstehen aus zwei Magnetfeldlinien B_{10} und B_{20} die Ströme I_1 und I_2 , welche das jeweils andere Magnetfeld um B_{2+} und B_{1+} verstärken.

netfeldlinie mit einer schraubenförmigen Flüssigkeitsbewegung hat einen Strom erzeugt, der parallel zum ursprünglichen Magnetfeld gerichtet ist. Für die Selbsterregung von Magnetfeldern in einer Flüssigkeit braucht man lediglich die Kombinationen zweier solcher Prozesse (Abb. 5c):

Ein gedachter, kugelförmiger Himmelskörper möge irgendwoher zu zwei magnetischen Feldlinien gekommen sein, die nun in seinem Inneren unter den Einfluss einer schraubenförmigen Strömung kommen. Dadurch entsteht parallel zu den Feldlinien je ein Strom. Jeder dieser beiden Ströme erzeugt wiederum ein Magnetfeld, welches das jeweils andere Magnetfeld verstärkt.

Genau wie im Fall des Scheibendynamos gibt es auch hier einen Wettbewerb zwischen verstärken und dämpfen, und auch hier entscheiden Strömungsgeschwindigkeit und elektrische Leitfähigkeit der Flüssigkeit über die Selbsterregung des Magnetfeldes – Faktoren, die in der so genannten magnetischen Reynoldszahl enthalten sind. Übersteigt die Zahl eine kritische Größe, ist Selbsterregung möglich. Die Verhältnisse sind also ganz ähnlich, wie beim Scheibendynamo: Auch hier hing die Verstärkung von der Drehzahl der Scheibe und vom elektrischen Widerstand, beziehungsweise der Leitfähigkeit des Stromkreises ab.

Möchte man die Flüssigkeitsströmungen im Erdkern voraussagen und die resultierenden Magnetfelder berechnen, ist ein enormer Rechenaufwand notwendig. Das Magnetfeld der Erde ist in der Vergangenheit immer wieder umgeklappt; die letzte Umpolung dieser Art fand vor etwa 800 000 Jahren statt. Wissenschaftler haben die Computer-Simulationen in den letzten 50 Jahren immer mehr verfeinert und sehr beeindruckende Berechnungen für den Erddynamo durchgeführt, in denen sie sogar das sporadische Umklappen der Magnetfeldpolung simulieren konnten [1]. Trotzdem reichen die derzeitigen Computerleistungen bei weitem nicht aus, um die Prozesse im Erdkern in der notwendigen räumlichen Auflösung realistisch zu berechnen, sodass man verschiedene Vereinfachungen und Annahmen einführen muss, um die tatsächliche Situation angenähert zu beschreiben. So eindrucksvoll die erhaltenen Ergebnisse dieser numerischen Berechnungen auch sein mögen: Angesichts der erwähnten Unzulänglichkeiten ist es seit Jahrzehnten ein Wunschtraum gewesen, den homogenen Dynamoeffekt tatsächlich einmal im Labor nachzuwei-

sen. – Und damit zu zeigen, wie realistisch die gemachten Annahmen sind, und vor allem, um nachzuweisen, dass man das Prinzip des „Erddynamos“ verstanden hat. Zudem sind viele Fragen der Theorie noch offen, und Experimente sind unerlässlich, um dann im Zusammenwirken mit Simulationen den Dynamoprozess wirklich zu verstehen.

Der lange Weg zum Labordynamo

Aber worin liegt das Problem, den homogenen Dynamoeffekt im Labor nachzubilden? Wir hatten bereits die magnetische Reynoldszahl als diejenige Zahl identifiziert, welche über das Schicksal von Magnetfeldern in leitfähigen Flüssigkeiten entscheidet. Übersteigt ihr Wert eine kritische Größe, kann die Selbsterregung eines Magnetfeldes einsetzen. Nun ist diese Zahl aber abhängig von der Leitfähigkeit der Flüssigkeit, ihrer Strömungsgeschwindigkeit und der Ausdehnung der Flüssigkeitsströmung. – Hierin liegt beim Versuchsaufbau die Hürde: Selbst wenn man Natrium als den besten flüssigen Leiter wählt, muss man entweder ein sehr großes Gefäß verwenden oder die Strömungsgeschwindigkeit entsprechend erhöhen, um eine magnetische Reynoldszahl zu erreichen, bei der Selbsterregung einsetzt. Für ein Experiment in einer Kugel von zwei Metern Durchmesser ist beispielsweise selbst in flüssigem Natrium immer noch eine Geschwindigkeit von über zehn Metern pro Sekunde erforderlich. Kosmische Körper hingegen erreichen die nötigen magnetischen Reynoldszahlen selbst für geringere Leitfähigkeiten und Strömungsgeschwindigkeiten sehr einfach durch ihre Ausdehnung. – Der Aufbau eines Dynamoexperimentes ist also ein aufwendiges Unterfangen, was nicht zuletzt auch an den Sicherheitsvorkehrungen liegt, denn Natrium entzündet sich an der Luft sehr leicht von selbst.

Die Rigaer Dynamoanlage

In unserem Dynamoexperiment, das wir gemeinsam mit der Universität Riga durchgeführt haben, mussten wir das flüssige Metall zu einer definierten spiralförmigen Bewegung anregen. Dafür haben wir keinen Erdkern nachgebildet, sondern wir haben eine Anlage von ganz anderer Gestalt gewählt. Den richtigen Weg hatte uns ein Versuch unter der Leitung von Agris Gailitis aufgezeigt, den er 1987 mit Wissenschaftlern vom Efremov-Ins-

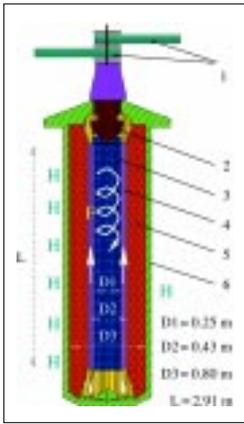


Abb. 6
Zentraler Modul der Rigaer
Dynamoanlage:
1 Keilriemen zu den Motoren
2 Propeller
3 Innerer Kanal mit schraubenförmiger Strömung
4 Rückströmkanal
5 Stehendes Natrium
6 Thermische Isolierung
H Äußere Hallsensoren
F Fluxgate-Sensoren und Induktionsspulen

titut in Leningrad durchgeführt hat. Es war ihnen dabei gelungen, eine Verstärkung des Magnetfeldes zu messen.

Seit Anfang der neunziger Jahre haben Forscher am Institut für Physik der Universität Riga und der Abteilung Magnetohydrodynamik des Instituts für Sicherheitsforschung des FZR in Riga eine verbesserte Variante des Leningrader Experiments aufgebaut. Das Herzstück dieses Dynamoversuchsstandes: Drei mit flüssigem Natrium gefüllte Edelstahlröhren von etwa drei Metern Länge und einem Außendurchmesser von knapp einem Meter (Abb. 6).

In der inneren Röhre wird das Natrium mittels eines Propellers schraubenförmig nach unten gepumpt, wo es umgelenkt und durch Leitbleche seine weitere Rotation verhindert wird. Dadurch strömt es im zweiten Zylinder geradlinig nach oben, wo es wiederum in die Propellerregion gelangt. Der dritte Zylinder enthält stehendes Natrium; er dient lediglich dazu, dass sich die elektrischen Ströme besser ausbreiten können – damit verringert sich der Widerstand, und die Selbsterregung des Magnetfeldes kann eher eintreten. In dieser Anordnung erreicht das Natrium Geschwindigkeiten von fünfzehn Metern pro Sekunde.

Was hier sehr einfach klingt, basiert auf jahrzehntelangen theoretischen Vorarbeiten, die zeigen mussten, wie das Experiment angelegt sein muss: Zunächst hatte Juri Ponomarenko 1973 nachgewiesen, dass durch die schraubenförmige Bewegung eines leitenden Mediums in einem unendlich langen, festen Zylinder einerseits zwar ein Wachstum eines Magnetfeldes auftritt, sich dieses Feld aber in dem Zylinder fortbewegt, so dass man an einem festen Punkt kein Wachstum messen kann.

Nur die Rückströmung im zweiten Zylinder bewirkt eine Art Rückkopplung des entstandenen Magnetfeldes. Effektiv bildet sich dabei eine stehende Magnetfeldwelle aus. Durch diese Anordnung konnten wir dann tatsächlich ein anwachsendes Magnetfeld beobachten.

Die Beiträge des Instituts für Sicherheitsforschung an dem Experiment waren vielfältig: Sie reichten von sicherheitstechnischen Vorarbeiten und numerischen Simulationen des Dynamos über die Optimierung der Strömungsstruktur bis hin zur Entwicklung der Messtechnik für die Magnetfelder.

Dynamisch währt's am längsten

Im Experiment des Scheibendynamos tritt vor der Selbsterregung zunächst die Verstärkung des angelegten Feldes auf. Diese Verstärkung zu untersuchen, war unser vorrangiges Ziel für das erste Experiment im November 1999. Dazu hatten wir um den Dynamo eine Spule gewickelt, durch die ein Wechselstrom floss (1 Hertz), wir haben also der Anlage durch den Spulenstrom ein Magnetfeld aufgezwungen, dessen Verstärkung wir messen wollten. Dieses Ziel haben wir erreicht, und nicht nur das: Schon mit diesem ersten Experiment haben wir weltweit zum ersten Mal die Selbsterregung eines Magnetfeldes in einer Flüssigmetallströmung nachgewiesen.

Doch wie hat sich die Selbsterregung gezeigt? In bestimmten Drehzahlbereichen (500 bis 1800 Umdrehungen pro Minute) verlief der Zuwachs des Feldes ganz ähnlich wie im Scheibendynamo (Abb. 7). Das war der Bereich der Verstärkung. Alle Messungen in diesem Drehzahlbereich bestanden aus zwar verstärkten, ansonsten aber erstaunlich reinen Magnetfeld-Schwingungen mit exakt der Frequenz des angelegten Wechselstromes.

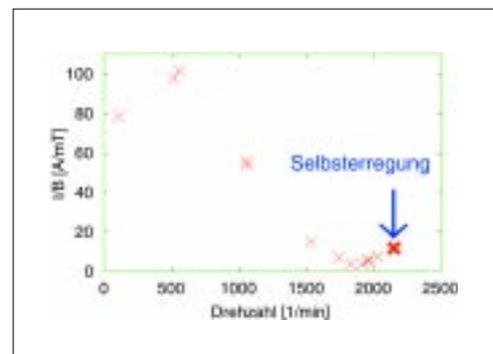


Abb. 7
November 1999: Reziproke Verstärkung in Abhängigkeit von der Drehzahl, gemessen am Rigaer Dynamo. Angegeben ist das Verhältnis des angelegten Stroms in der Erregerspule zum innen gemessenen Magnetfeld. Am äußersten rechten Punkt tritt zusätzlich zur Verstärkung des angelegten Feldes Selbsterregung auf.

Das Bild änderte sich aber plötzlich bei einer Drehzahl von 2150 Umdrehungen pro Minute. Das Signal, welches wir bei dieser Drehzahl über einen Zeitraum von fünfzehn Sekunden aufgezeichnet haben, ist ganz offensichtlich eine Schwebung, das heißt eine Überlagerung von zwei Signalen unterschiedlicher Frequenz. Wir haben sie in zwei Bestandteile zerlegt (Abb. 8): Während das erste das verstärkte, aber dem Dynamo von außen aufgeprägte 1-Hertz-Signal darstellt, bringt

der Dynamo das zweite selbst hervor; und dieses Signal steigt langsam, aber deutlich an. – Die Selbsterregung trat tatsächlich ein!

In einer zweiten Serie im Juli 2000 konnten wir zeigen, dass sich auch hier, ähnlich wie beim Scheibendynamo, durch das Magnetfeld und die entstehenden Ströme Kräfte entwickeln, die der Flüssigkeitsbewegung entgegenwirken, diese also abbremsten [3]. Dabei haben wir das Magnetfeld mit Hilfe eines von außen angebrachten Magnetfeldsensors registriert; zusätzlich haben wir das Feld im Inneren des Zylinders gemessen. Bei unserer Messung zeigt sich die Selbsterregung in einem oszillierenden Signal, das sich bei einer Drehzahl von etwa 1900 Umdrehungen pro Minute entwickelt und exponentiell zu wachsen beginnt (Abb. 9). Die Messungen zeigen verschiedene Phasen: eine Anfangsphase mit vernachlässigbarem Magnetfeld, eine Phase mit exponentiellem Wachstum, eine Sättigungsphase sowie eine Abklingphase nach dem Herunterfahren der Drehzahl (Abb. 10a). – Im Inneren des Dynamos haben wir bei unseren Messungen Feldstärken von bis zu 50 Millitesla (Tausendstel Tesla) erreicht; das Erdmagnetfeld an der Erdoberfläche hat einen typischen Wert von 50 Mikrottesla (Millionstel Tesla).

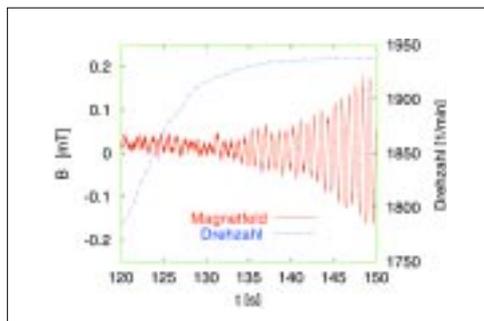


Abb. 9
Juli 2000: Beginn der Selbsterregung.

Ich weiß, dass ich nichts weiß?

Wir hatten das Experiment in weiten Bereichen vorher simuliert. Im Bereich der Verstärkung und der Selbsterregung stimmen die simulierten Werte mit den gemessenen gut überein. Angesichts der vielen Annahmen und Vereinfachungen, die wir dabei machen mussten, kann man die Übereinstimmung wohl als erstaunlich bezeichnen. Abgesehen von Details, haben wir diese Phasen also ziemlich gut verstanden. Vor allem aber im Sättigungsbereich sind noch einige Fragen of-

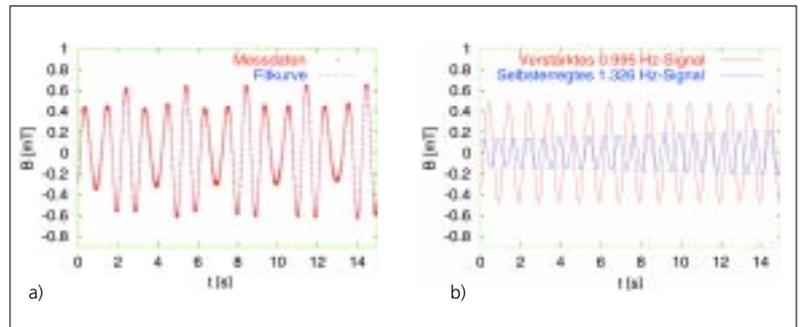


Abb. 8
November 1999:
Gemessenes Signal bei 2150 Umdrehungen pro Minute (a) und Zerlegung in zwei Anteile unterschiedlicher Frequenz (b).

fen – wir stehen in Hinblick auf ein volles Verständnis gerade dieses Bereiches noch am Anfang. Hierfür werden noch viele numerische Simulationen, aber auch weitere Messungen an der Anlage nötig sein. Insbesondere eine direkte Messung der Geschwindigkeit des strömenden Natriums wäre höchst wünschenswert. Vielversprechend scheint aber auch der Versuch zu sein, im Sinne einer inversen Dynamotheorie aus den gemessenen Daten auf die Strömungsstruktur zurückzuschließen, wozu bereits erste Arbeiten laufen.

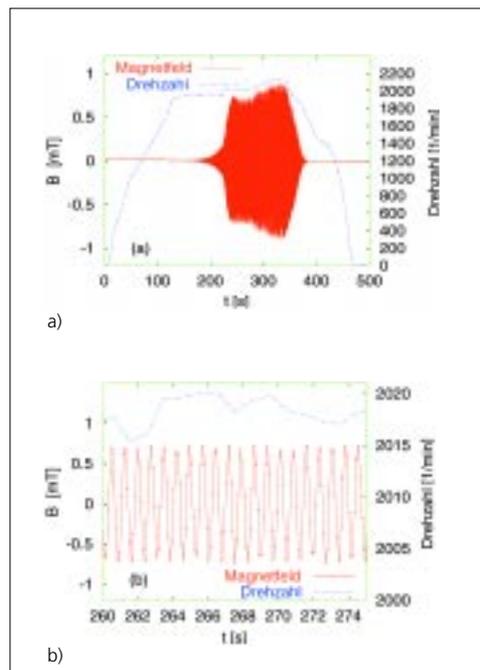


Abb. 10
Juli 2000: Ein Experiment, dokumentiert am Signal eines äußeren Hall-Sensors. Gesamtverlauf über 500 Sekunden (a). Ausschnitt im Sättigungsregime (b). Dabei ist das Magnetfeld in ganz besonderer Weise von der Drehzahl abhängig: Abbildung 10b zeigt eine fast gleichförmige Sinusschwingung, mit einer nahezu konstanten Amplitude.

Bei einer Drehzahl von etwa 1900 Umdrehungen in der Minute entwickelt sich aus dem Rauschen heraus ein oszillierendes Signal, das exponentiell zu wachsen beginnt. Abb. 10a zeigt das Signal, das ein außen angebrachter Magnetfeld-Sensor registriert. Es besteht aus einer Anfangsphase mit einem sehr kleinen Magnetfeld (Phase I), einer Phase exponentiellen Wachstums (II), einer Sättigungsphase (III) (Abb. 10b), und einer Abklingphase (IV), nach dem Herunterfahren der Drehzahl.

An einer um den Dynamo gewickelten Erregerspule lag ein Signal von einem Hertz an; die Verstärkung des vom Spulenstrom erzeugten Magnetfeldes haben wir gemessen. Das Verhältnis von angelegtem Strom zum gemessenen Magnetfeld, die reziproke Verstärkung, haben wir in Abhängigkeit von der Drehzahl des Propellers aufgetragen (Abb. 7). In einem Bereich zwischen 500 und 1800 Umdrehungen pro Minute, verläuft die Gerade ganz ähnlich, wie die für den Scheibendynamo (Abb. 4). Für kleinere und größere Drehzahlen weicht die Kurvenform allerdings ab. Die Ursache hierfür liegt darin, dass der Rigaer Dynamo eben kein simpler Scheibendynamo ist – die Struktur ist komplizierter. Alle Punkte in Abb. 7 – bis auf den äußersten rechten – entspringen aus verstärkten, erstaunlich reinen Sinusschwingungen mit exakt der Frequenz des angelegten Feldes. Dieses Verhalten änderte sich erst mit Beginn der Selbsterregung (2150 Umdrehungen pro Minute). Abb. 8a zeigt das Signal, welches wir bei dieser Drehzahl für einen Zeitraum von fünfzehn Sekunden aufgezeichnet haben. In Abb. 8b haben wir dieses Signal in zwei Bestandteile unterschiedlicher Frequenz zerlegt; während das eine dem von außen aufgeprägten 1-Hertz-Signal entspricht, bringt der Dynamo das zweite Signal selbst hervor; hier ist auch ein langsamer exponentieller Anstieg zu erkennen. Weltweit erstmalig haben wir damit die Selbsterregung eines Magnetfeldes in einer Flüssigmetallströmung experimentell nachgewiesen [2].

Das erste erfolgreiche Experiment in Riga war ein Durchbruch in der experimentellen Erforschung des homogenen Dynamoeffektes. Der spezielle Aufbau der Anlage lässt der Strömung genügend Freiraum, wodurch wir erstmals interessante Rückwirkungseffekte untersuchen konnten. Haben wir mit diesen Experimenten also den Ursprung des Erdmagnetfelds verstanden? Den Ursprung schon, aber natürlich sind durch die Experimente neue Fragen aufgetaucht.

Das Rigaer Experiment hat die Tür zum experimentellen Teil der Dynamowissenschaft aufgestoßen, hinter der – davon sind wir überzeugt – noch viele Überraschungen auf uns warten.

Danksagung

Unser Dank gebührt vor allem unseren Rigaer Kollegen Agris Gailitis, Olgerts Lielausis und Ernests Platacis für die langjährige fruchtbare Zusammenarbeit. Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Innovationskollegs „Magnetofluidynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten“.

Literaturverzeichnis:

- [1] G. A. Glatzmaier, P. H. Roberts, A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal, *Nature* 377 (1995) 203-209
- [2] A. Gailitis, O. Lielausis, S. Dement'ev, E. Platacis, A. Civersons, G. Gerbeth, Th. Gundrum, F. Stefani, M. Christen, H. Hänel, G. Will, Detection of a flow induced eigenmode in the Riga dynamo facility, *Phys. Rev. Lett.* 84 (2000) 4365-4368
- [3] A. Gailitis, O. Lielausis, E. Platacis, S. Dement'ev, A. Civersons, G. Gerbeth, Th. Gundrum, F. Stefani, M. Christen, G. Will, Magnetic field saturation in the Riga dynamo experiment, *Phys. Rev. Lett.* 86 (2001) 3024-3027

Strahlende Stützen

Radioaktiv markierte Stents zur Verhinderung von Restenose

Bernhard Noll¹, Ludger Dinkelborg², Bernd Johannsen¹

¹Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie

²Forschungslaboratorien Schering AG, Berlin

Ein schweres Druckgefühl hinter dem Brustbein mit starken Schmerzen, die in Hals, Oberbauch und Arm ausstrahlen können; diese Symptome, verbunden mit Unruhe und Todesangst, begleiten zwei Drittel aller Fälle von Herzinfarkt. Eine Herzkreislaufkrankung, die alleine in Deutschland jährlich über 280 000 Menschen erleiden, mehr als die Hälfte der Erkrankten sterben daran. Grund für diese schwere Durchblutungsstörung des Herzens ist in den meisten Fällen eine Verengung oder sogar der Verschluss eines Herzkranzgefäßes – die so genannte Arterienverkalkung oder Arteriosklerose. Bei dieser Art der Verkalkung verändert sich die Arterienwand durch wucherndes Bindegewebe; die Gefäßwand wird immer dicker, verhärtet und verliert ihre Flexibilität. Zusätzlich lagern sich Cholesterin, Fettsäuren sowie Kalk ab. Die Folge sind eine mangelhafte Blut- und Sauerstoffversorgung der Gewebe, die zum Beispiel im Herzen zum Herzinfarkt und im Gehirn zum Schlaganfall führen kann. – In den entwickelten Ländern ist Arterienverkalkung die häufigste Todesursache.

Warum verschließt sich das Gefäß wieder?

Zwar gibt es Möglichkeiten, die verschlossenen Gefäße wieder zu öffnen, doch es ist bisher nicht gelungen, eine wirksame Heilmethode zu finden, die nach dem Öffnen des Gefäßes seinen erneuten Verschluss dauerhaft verhindert. In vielen Fällen behandelt der Kardiologe das verschlossene Gefäß mit Hilfe eines Katheters; er dient als mechanisches Werkzeug. Dabei kann der Arzt durch Aufdehnen eines Ballons an der Katheterspitze die Engstelle beseitigen und das Blutgefäß wieder öffnen.

Doch diese Maßnahme alleine reicht oft nicht aus, denn die Gefäßwand bleibt verkrustet; das Blutgefäß bleibt starr und unflexibel und würde ohne eine zusätzliche Stütze in sich zusammenfallen. Zwar ist für dieses Problem eine Lösung gefunden: Als Stütze dienen so genannte Stents (Abb. 1); das sind feine Drahtgeflechte aus medizinischem Edelstahl, die der behandelnde Arzt nach der Katheterbehandlung in dem Gefäß verankert. Doch

durch den eingesetzten Fremdkörper treten neue Probleme auf.

Einmal in die Arterie eingebracht, presst ein Ballon den Stent an die Arterienwand; doch die harte, zum Teil verkrustete und immer noch etwas verengte Gefäßwand wird durch den Stent stark aufgeweitet (Abb. 2b). Das geht nicht spurlos an den empfindlichen Adern vorüber, sie werden bei diesem Vorgang verletzt. – Darauf und auf den Fremdkörper selber antwortet der Körper mit unkontrolliertem Zellwachstum. Die Folge sind wilde Wucherungen, und genau an der Stelle, die schon einmal verschlossen war, bilden sich neue Verengungen, so genannte Restenosen oder In-Stent-Restenosen (Abb 2c).

Die in diesem Falle schädliche Reparaturantwort des Körpers zu verhindern, ist nicht nur das Ziel unserer Forschungen, viele andere Forschergruppen beschäftigen sich ebenfalls mit dem Thema. So hat es zum Beispiel Versuche gegeben, die Wucherungen mit Medikamenten [1] oder gentherapeutisch [2] zu verhindern – bislang ohne Erfolg.

Eine wirkungsvolle Behandlung der Restenosen gelingt bisher nur mit Hilfe ionisierender Strahlung, denn diese unterdrückt, ähnlich wie bei der Behandlung von Tumoren, das Zellwachstum. Damit die Strahlung an ihren Zielort, also in das Blutgefäß gelangt, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Zum einen ist eine Bestrahlung des Blutgefäßes von außen mit Hilfe von Röntgenstrahlen denkbar, in einer anderen Variante lässt sich die Strahlung mit Hilfe radioaktiver Substanzen direkt in das Gefäß hineinbringen.

Gibt es eine sichere Methode?

Eine Bestrahlung mit Hilfe einer externen Röntgenquelle hat den Nachteil, dass sie relativ großflächig erfolgt und die Dosis vergleichsweise hoch sein muss. Eine direkte Strahlenbehandlung des betroffenen Gefäßes dagegen ist wesentlich gezielter möglich. Dabei bringt der Kardiologe die Strahlungsquelle mit Hilfe eines Schlauches oder Katheters direkt in das Blutgefäß ein. Das Blutgefäß ist während der Behandlung, die in der Regel bis zu einer halben Stunde dauern kann, verschlossen. Doch auch bei dieser Variante

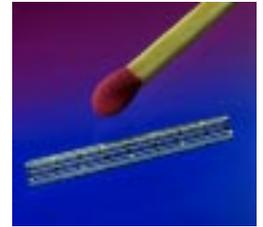


Abb. 1
Je nachdem in welchem Blutgefäß der Stent eingesetzt werden soll, kann er von etwa einem bis zu mehreren Zentimetern lang sein. Hier ein koronarer Palmaz-Stent für ein Herzkranzgefäß im Größenvergleich zu einem Streichholz (Palmaz P204, Cordis, Warren, NJ).

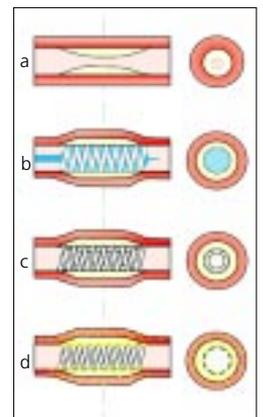


Abb. 2
Schematische Darstellung, wie die In-Stent-Restenose entsteht.

- a - Arterie mit sklerotischem Gewebe
- b - Arterie nach Ballondilatation mit implantiertem Stent
- c - In-Stent-Restenose
- d - Verhinderung der In-Stent-Restenose durch radioaktiv markierten Stent

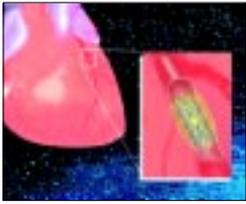


Abb. 3

Schematische Darstellung eines Stents nach erfolgter Implantation in die Herzarterie.



Abb. 4

Prototyp eines Wolfram-188/Rhenium-188 Generator-systems mit Bleiabschirmung aus Oak Ridge [4]. Ein solcher Isotopengenerator ermöglicht einen ständigen Zugriff auf das Tochternuklid Rhenium-188, das sich im Ergebnis des radioaktiven Zerfalls aus dem Mutterradionuklid Wolfram-188 bildet. Das Mutternuklid ist auf einem Trägersystem (Aluminiumoxid) fixiert, und das Rhenium-188 kann abgelöst werden. Die große Halbwertszeit des Wolfram-188 (69 Tage) garantiert eine tägliche Verfügbarkeit des Tochternuklids über einen längeren Zeitraum.



Abb. 6

Elektronenmikroskopische Aufnahme des Metallgitters eines Rhenium-186 markierten Stents (oben), zum Vergleich die Aufnahme eines unbehandelten Stents (unten) (500-fache Vergrößerung).

muss die Strahlendosis relativ hoch sein. Schließlich soll hier eine Behandlung von wenigen Minuten die Narbenbildung für die nächsten Jahre oder sogar Jahrzehnte verhindern. Das ist weder für das Klinikpersonal noch für den Patienten unbedenklich. Daher scheint die einfachste und sinnvollste Variante darin zu bestehen, den Stent selbst mit einem geeigneten Radionuklid zu markieren und in die Arterie zu implantieren – schließlich wird der Stent ohnehin schon in der Arterie verankert (Abb. 2d) [3,4]. In diese Richtung bewegt sich unsere Forschung. Ein solches Vorgehen hat bedeutende Vorteile: Während bei der Bestrahlung mit allen oben genannten Methoden eine sehr hohe Strahlendosis und zusätzlicher apparativer Aufwand erforderlich ist, kann ein radioaktiv markierter Stent auf das Gefäß direkt und über einen längeren Zeitraum wirken. Dabei ist auf dem Stent nur eine geringe Aktivitätsmenge nötig, und einfache Strahlenschutzmaßnahmen reichen für Personal und Patienten völlig aus (Abb. 3). Die potentielle Strahlenbelastung sowohl der Patienten als auch des medizinischen Personals ist deutlich reduziert.

Welches ist das geeignete Radionuklid?

Für erste Versuche mit markierten Stents haben Wissenschaftler vom Forschungszentrum Karlsruhe das radioaktive Isotop Phosphor-32 verwendet. Dazu haben sie ein Verfahren entwickelt, bei dem sie den Phosphor mit Hilfe von Ionenstrahlen in den Stent geschossen, die Phosphorionen in den Stent implantiert, das heißt verankert, haben [5]. Der Nachteil dieser Variante: Die Wissenschaftler müssen die Stents in einem technisch aufwändigen Verfahren, es sind ein Zyklotron und eine sehr spezielle Ionenquelle erforderlich, lange vor ihrem klinischen Einsatz mit dem Phosphor-32 markieren. Da die Kliniken ihren Bedarf an Gefäßstützen aber nicht planen können, müssten immer ausreichend markierte Stents zur Verfügung stehen. Nachdem die Strahlung auf dem Stent abgeklungen ist, ist er nicht mehr zu gebrauchen, er müsste weggeworfen werden. Bei einem Preis von rund 5000 Mark pro Stentbesteck ist das ein nicht unerheblicher Kostenfaktor. Daher haben wir nach Möglichkeiten gesucht, die Stents mit dem radioaktiven Substrat einfach und ohne umfangreiche technische Hilfsmittel in einem chemischen Verfahren zu markieren. Das Verfahren sollte mög-

lichst schnell sein, damit die Kliniken ihre Stents nach Bedarf selber radioaktiv markieren können. Die Strahlungsenergie der Isotope darf weder zu hoch, aber auch nicht zu niedrig sein; schließlich sollen sie gesundes Gewebe nicht zerstören, trotzdem aber die Restenose wirksam unterdrücken. Diesen Weg haben wir mit den Radioisotopen Rhenium-188 und Rhenium-186 gefunden. – Zwei Isotope, die eine optimale Strahlencharakteristik zeigen und zudem leicht verfügbar sind: So könnten sich die Kliniken das Isotop Rhenium-188 mit einem speziellen Generator, der in einfacher Weise Wolfram-188 in Rhenium-188 umwandelt, selbst herstellen (Abb. 4). Auch Rhenium-186 eignet sich gut; verschiedene Firmen stellen es durch Neutronenbestrahlung aus dem stabilen Isotop Rhenium-185 her, von diesen könnten die Kliniken das Isotop also regelmäßig beziehen.

Wann kann man damit Menschen behandeln?

Viele Tests und tierexperimentelle Studien haben gezeigt, dass die radioaktiven Stents inzwischen optimal an die Bedingungen im Körper angepasst sind und die In-Stent-Restenose wirkungsvoll unterdrücken (Abb. 5). Zusätzlich sind einige weitere wichtige Voraussetzungen erfüllt: Die behandelten Stents haben durch die verschiedenen Reaktionsschritte ihre besonders glatte Oberfläche nicht verloren, sind also nicht angegriffen und aufgeraut (Abb. 6). Das ist unerlässlich, denn an einer rauen Oberfläche besteht die Gefahr, Thrombosen zu entwickeln. Das ist im Falle der radioaktiv markierten Stents nicht der Fall – in keinem Tierexperiment traten Thrombosen auf. Eine weitere wichtige Frage war die, ob sich die radioaktiv markierte Schicht auf den Stents unter den Bedingungen, wie sie im Körper herrschen, ablösen würde. Doch auch

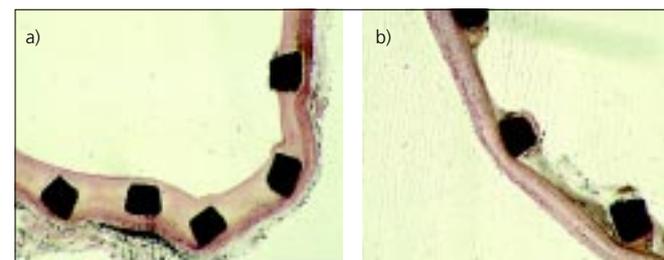


Abb. 5

Querschnitt durch stentimplantierte Arterien:
a) Kontroll-Stent
b) Ein mit Rhenium-186 markierter Stent

hier haben Untersuchungen in isotonischer Kochsalzlösung und in menschlichem Blut gezeigt: Selbst nach 72 Stunden bei 37 Grad Celsius waren noch mehr als 95 Prozent der Rhenium-Aktivität auf dem Stent gebunden. Und auch im Tierexperiment blieben nach vierzehn Tagen mehr als 90 Prozent des aufgebrauchten Rheniums-186 auf der Stentoberfläche. Eine weitere sehr wichtige Voraussetzung für den medizinischen Einsatz ist eine besonders gleichmäßige Verteilung der markierten Schicht auf dem Stent. Und auch diese ist nicht beeinträchtigt: Die Radioaktivität ist nahezu gleichmäßig entlang der Symmetrieachse des Stents verteilt (Abb. 7). Viele Pluspunkte für unser Verfahren: Nicht nur, dass es entsprechend ausgerüsteten Kli-

niken in einfacher Weise ermöglicht, Stents mit den Radioisotopen Rhenium-188 und Rhenium-186 zu markieren, die Markierung ist dabei absolut reproduzierbar, und die markierte Schicht ist nahezu gleichmäßig auf dem Stent verteilt. Zudem lässt sich die aufgebrauchte Radioaktivität in einem weiten Bereich variieren und ermöglicht es, die vom Mediziner gewünschte Aktivität innerhalb kürzester Zeit auf dem Stent zu fixieren. Bis so ein Stent allerdings tatsächlich in einem menschlichen Herzen oder einer Beinarterie seine Wirkung entfalten kann, müssen noch weitere experimentelle Daten an größeren Tieren, deren Kreislauf mit unserem vergleichbar ist, gewonnen werden. Hierbei gilt es, die optimale Strahlendosis zu finden.

Die Markierung der Stents

Zum Markieren der Stents haben wir ein einfaches Verfahren entwickelt: Dabei führen wir zunächst alle nicht radioaktiven Komponenten zusammen und geben erst im letzten Schritt die radioaktive Komponente hinzu. Diese letzte Komponente, das radioaktive Rhenium-188, erhalten wir aus einem speziellen Generator als wässrige Natriumperhenat-Lösung (NaReO_4) (Abb. 4). Im Perrhenat hat das Rhenium die höchste und zugleich die stabilste Oxidationsstufe von +7. Damit wir es in definierter Radioaktivitätsmenge auf dem Stent abscheiden können, überführen wir es anschließend durch reduzierende Agenzien in eine niedrigere Oxidationsstufe. Doch die dabei entstehende radioaktive Schicht auf dem Stent ist zunächst instabil: Durch eine spezielle Nachbehandlung des markierten Stents wird sie dann erst auf der Stentoberfläche fixiert. Durch unser Verfahren können wir beliebige Aktivitäten, also Radioaktivitätsmengen, auf den Stents abscheiden; diese sind lediglich abhängig von der Reaktionszeit und der vorgelegten Radioaktivitätsmenge (Abb. 8). Zudem eignet es sich, um Stents sowohl mit dem radioaktiven Isotop Rhenium-188, aber auch mit Rhenium-186 zu markieren; sodass sich für Kliniken die Möglichkeit ergibt, mit dem Rhenium-Generator zu arbeiten oder das Rhenium-186 von den entsprechenden Anbietern zu beziehen.

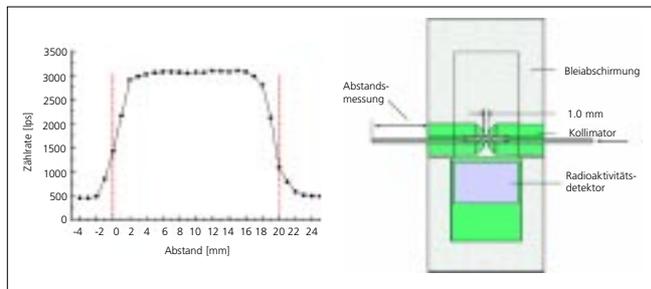


Abb. 7
Aktivitätsverteilung auf dem Stent und die entsprechende Messanordnung.

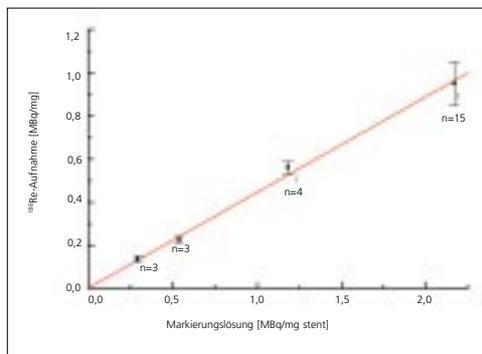


Abb. 8
Radioaktivitätsaufnahme von Palmaz-Stents in Abhängigkeit von der eingesetzten Rhenium-188-Aktivitätsmenge.

Literaturverzeichnis:

- [1] S. Silber: Restenose und intrakoronare Bestrahlung in „Aktuelle Trends in der invasiven Kardiologie 1998“, Hrsg. R. Bach und S. Spitzer, AKA-Verlag Berlin, 101-110, 1998
- [2] P.W. Serruys, M.J.B. Kutryk, N. Bruining, M. Sabate, D.P. Foley, M. van den Brand, J.N. Hamburger, W.J. van der Giessen, M. H. Eijgelshoven, P.J. de Feyter: Antisense oligonucleotide against c-myc administered with the Transportos delivery catheter for the prevention of in-stent restenosis. Results of the randomized, ITALICS trial. *Circulation* 98: 1-363, 1998
- [3] T.A. Fischell, B.K. Kharma, D.R. Fischell, P.G. Loges, C.W. Coffey, D.M. Duggan, A.J. Naftilan: Low-dose, beta-particle emission from 'stent' wire results in complete, localized inhibition of smooth muscle cell proliferation. *Circulation*. 1994 Dec;90(6): 2956-63.
- [4] R. Waksman: Intracoronary brachytherapy in the Cath Lab. *Physics dosimetry, technology and safety considerations*. *Herz*. 1998 Sep;23(6): 401-6. Review.
- [5] P. Fehsenfeld, K. Schlösser, H. Schweickert, HZY NACHRICHTEN-Forschungszentrum Karlsruhe Jahrg. 32 1-2/ 2000, 81-86
- [6] F.F. Jr. Knapp, A.L. Beets, S. Guhlke, P.O. Zamora, H. Bender, H. Palmedo, H.J. Biersack: Availability of rhenium-188 from the alumina-based tungsten-188/rhenium-188 generator for preparation of rhenium-188-labeled radiopharmaceuticals for cancer treatment. *Anticancer Res* 1997 May-Jun;17(3B):1783-95

Den Atomen auf den Kern gefühlt

Rossendorfs Beitrag zum internationalen EUROBALL-Projekt

Friedrich Dönau und Ronald Schwengner

Institut für Kern- und Hadronenphysik

Der Blick auf einzelne Atome – auf diese unvorstellbar winzigen Gebilde mit einer Ausdehnung von nur etwa einhundert milliardstel Millimetern –, er ist heute mit Hilfe der Rastertunnelmikroskopie kein Problem mehr. Sie macht in einem Verbund einzelne Atome erkennbar. Allerdings vermitteln solche eindrucksvollen Bilder lediglich eine Vorstellung von der vergleichsweise riesigen Elektronenhülle des Atoms; der Atomkern selbst ist noch einmal zehntausend Mal kleiner, ihn zu betrachten ist nicht möglich.

Die Erforschung der im Einzelnen nur unvollständig bekannten Eigenschaften und Verhaltensweisen der Atomkerne ist Gegenstand der Kernstrukturforschung. Sie zielt darauf ab, möglichst präzise Daten über das Innerste von Atomen zu gewinnen und aus deren Bewertung grundlegende Fragen zu beantworten: Wie sehen die den Kern zusammenhaltenden Kräfte aus? Wie reagieren stoßende Kerne miteinander? Welche Form haben sie bei welcher Energie? ...

Im Kern des Geschehens

Der Atomkern stellt ein einzigartiges „Quantenlabor“ dar. Die Nukleonen, die durch extrem starke anziehende Kernkraft auf kleinstem Raum zusammengehalten werden, bilden ein mikroskopisches System, das den Gesetzen der Quantentheorie unterliegt und das sich deshalb gänzlich anders verhält als zum Beispiel makroskopische Systeme magnetisierter Kugeln. Das bedeutet, dass Atomkerne nicht wie klassische Vielteilchensysteme bei einem Stoß beliebige, kontinuierliche Energiemengen aufnehmen oder abgeben können.

In Ruhe nimmt ein Atomkern vorzugsweise seinen energetisch niedrigsten Zustand ein und wird durch eine quantisierte, also genau portionierte Energiezufuhr in angeregte Zustände befördert (Abb. 1). Unter bestimmten Bedingungen beginnt der Kern dabei zu rotieren. Die Energie, die er aufnimmt, um in einen bestimmten Rotationszustand zu gelangen, wird durch einen ganzzahligen (gequantelten) Wert des Kerndrehimpulses festgelegt. Hat er einmal eine bestimmte Energiemenge aufgenommen, gibt er diese wieder ab: Und das geschieht ebenfalls in gequantelten Portionen.

Abb. 1
Schematische Darstellung der kollektiven Rotation eines Atomkerns. Ein Atomkern mit einer deformierten (nicht-sphärischen) Massenverteilung kann um eine Achse, die verschieden von der Symmetrieachse ist, kollektiv rotieren. Im Bild ist ein Kern mit einer Rugbyballform gezeigt, der um eine Achse senkrecht zur Längsachse (Symmetrieachse) rotiert.

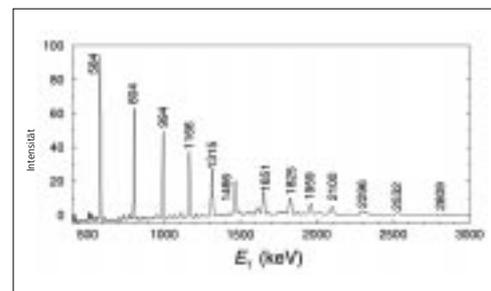
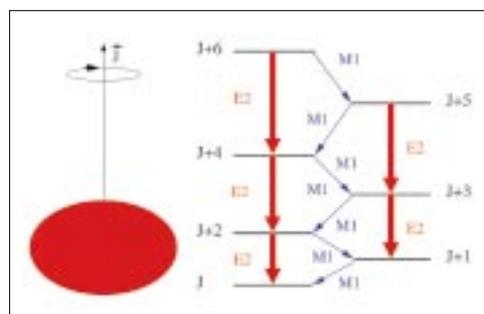


Abb. 2
Beispiel für ein Gammaspektrum, das bei der Abregung von Rotationszuständen entstanden ist. Entsprechend der diskreten Energie der Gammaquanten beobachtet man scharfe Linien im Spektrum. Die etwa gleiche Energiedifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden Maxima ist indirekt proportional zum Trägheitsmoment.

Als Folge dieser Quantenbedingung kann ein Photon oder γ -Quant (ein sehr kurzwelliges elektromagnetisches Strahlungsquant) von einem Atomkern nur dann absorbiert oder emittiert werden, wenn die im Photon enthaltene Energie genau der Energiedifferenz zwischen benachbarten Rotationszuständen entspricht. Misst man die Intensität der Gammastrahlung als Funktion der Energie der γ -Quanten, die die rotierenden Kerne emittieren, erhält man ein Spektrum aus diskreten Linien (Abb. 2). Dabei bestimmt das Kerntägheitsmoment den Linienabstand, der im Idealfall immer gleich groß ist. Umgekehrt erlaubt die Messung eines solchen Spektrums von γ -Quanten den Schluss, dass das betrachtete Nukleonensystem tatsächlich rotiert. Mehr noch: Aus den Lagen der Linien kann man die Abweichung von der Kugelgestalt des rotierenden Systems berechnen.

Damit ist die Gammaskopie, die Spektralanalyse der von angeregten Kernen emittierten γ -Quanten, eine der reichsten Quellen

für das Wissen über die Kernstruktur. Daraus haben wir unsere Kenntnisse über die Eigenschaften der etwa 200 stabilen Nuklide, die in den chemischen Elementen auf der Erde natürlich vorkommen (Ordnungszahl 1 bis 92), und über die instabilen Nuklide in der Nähe der „stabilen Straße“ gewonnen (Abb. 3). Doch zusätzlich existieren noch mehr als 1500 bekannte instabile, sehr schnell zerfallende radioaktive Nuklide, über die wir noch sehr wenig wissen. Gerade diese spielen aber eine entscheidende Rolle für den Ablauf der energieliefernden Kernreaktionen in Sternen. Sie beeinflussen damit die Bildung, Entwicklung und das Ende dieser Himmelskörper. Die spezifischen Eigenschaften der Nuklide bestimmen zum Beispiel auch den Energiegehalt der Sonne.

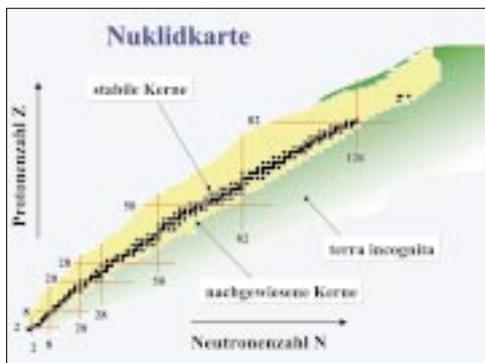


Abb. 3
Die Karte der Nuklide in Abhängigkeit von ihrer Protonenzahl und Neutronenzahl. Die stabilen Kerne sind schwarz gekennzeichnet. Das gelbe Gebiet repräsentiert die experimentell nachgewiesenen instabilen Kerne. Die linke Grenze dieses Gebiets fällt in etwa mit der so genannten Proton-Dripline zusammen. Sie verbindet extrem protonenreiche Kerne miteinander, die unter Protonenemission zerfallen. Das grüne Gebiet enthält die bisher unerforschten Nuklide.

Mit einem leichten Neutronenüberschuss ist in stabilen Kernen die aus Protonen und Neutronen gebildete Kernmaterie im energetischen Gleichgewicht. Ein Vorstoß zu Nukliden mit extremen Verhältnissen von Neutronenzahl zu Protonenzahl bedeutet die Erforschung der Kernmaterie in neuen, weitab des Gleichgewichtes liegenden Gebieten, für die es bis jetzt nur wenige verlässliche Daten gibt. Die Raten für die Erzeugung solcher Kerne sind extrem klein und die Untersuchung im Labor daher sehr schwierig oder sogar unmöglich. Jedoch werden die Möglichkeiten, die Eigenschaften dieser exotischen, kurzlebigen Nuklide in größerem Stil zu erforschen, von Wissenschaftlern weltweit durch den Bau spezieller Beschleunigeranlagen für Strahlen radioaktiver Ionen geschaffen.

Experimente mit Zielscheibe

Wenn wir etwas über die Eigenschaften eines Atomkerns lernen wollen, regen wir ihn gezielt an und beobachten die vielfältigen Prozesse, die daraufhin ablaufen. Anregung heißt in dem Fall: Wir führen dem untersuchten Nukleonensystem Energie und Drehimpuls zu. Das erreicht man durch den Beschuss eines geeigneten Targets (Zielscheibe) mit schnellen Ionen. Deren Bewegungsenergien reichen von einigen zehn bis einigen hundert Millionen Elektronenvolt (MeV; Mega-Elektronenvolt) pro Ion. Der Zusammenprall löst eine Kernreaktion zwischen Projektilkernen und den im Targetmaterial enthaltenen Kernen aus, sie verschmelzen nach dem Auftreffen miteinander und bilden ein hochangeregtes Verbundsystem (Compoundkern) (Abb. 4). Trifft das Projektil dabei auch noch seitlich auf sein Ziel, so überträgt es nicht nur Energie, sondern auch Drehimpuls – der Compoundkern rotiert.

Die Bildung des heißen Compoundkerns ist schon in Bruchteilen von trillionstel (Trillion: eine Million Billionen) Sekunden abgeschlossen (nach etwa 10^{-20} Sekunden). Danach kühlt sich das Compoundsystem sehr schnell durch Verdampfen von einzelnen Nukleonen und leichten Kernbruchstücken wie zum Beispiel Alphateilchen (Heliumkernen) ab. – Der Teilchen emittierende Compoundkern ändert also ständig seine Zusammensetzung. Anfänglich gleiche Compoundkerne können dabei durchaus verschiedene Abkühlungswege durchlaufen und so am Schluss verschiedene Endkerne erreichen.

Allerdings führt die Emission von Teilchen kaum Drehimpuls aus dem Compoundsystem ab, sodass in den Endkernen eine hohe Rotationsenergie zurückbleibt. Mit Ende der Teilchenemission erreichen die abgekühlten Compoundkerne das so genannte Gebiet der Rotationszustände (etwa 10^{-18} Sekunden nach der Verschmelzung). Um ihre verbleibende Restenergie loszuwerden, setzt ein vergleichsweise langsamer elektromagnetischer Prozess ein: Die Emission von γ -Quanten. Die Kerne durchlaufen dabei lange Kaskaden von verschiedenen Rotationszuständen (Banden), wobei sich mit jedem abgestrahlten γ -Quant

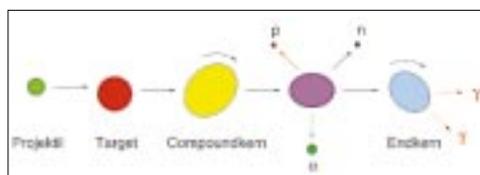


Abb. 4
Schematische Darstellung einer Compoundkernreaktion. Das Projektil, ein Ion aus dem Strahl eines Schwerionenbeschleunigers, trifft auf einen Kern im Targetmaterial. Beide verschmelzen zu einem hochangeregten Compoundkern. Dieser gibt zunächst seine überschüssige Energie durch Emission von Protonen, Neutronen und Alphateilchen ab. Wenn dafür nicht mehr genügend Energie zur Verfügung steht, regt sich der entstandene Endkern weiter über die Aussendung von γ -Quanten ab (vgl. Abbildungen 1 und 2), bis er seinen Grundzustand erreicht.

die Rotationsfrequenz verringert. Die mittlere Lebensdauer eines bestimmten Rotationszustandes liegt bei hochliegenden Rotationszuständen im Bereich von Femtosekunden (billiardstel Sekunden) und verlängert sich zu energetisch niedrigeren Zuständen hin auf Nanosekunden (milliardstel Sekunden). Am Ende dieses Abregungsprozesses befindet sich der Kern im Grundzustand.

Durch eine geeignete Kombination von Projektil und Target kann man mittels der beschriebenen Verschmelzungs-Verdampfungs-Reaktion sowohl stabile als auch instabile Kerne in Zuständen mit hoher Anregungsenergie und hohem Drehimpuls erzeugen. In Abhängigkeit von der gewählten Einschussenergie entsteht im Allgemeinen eine Serie von Endkernen; Art und Anzahl lässt sich mit Hilfe von existierenden Reaktionsmodellen theoretisch abschätzen und somit für ein bestimmtes Nuklid optimieren.

Photonen sortieren und zählen

Die Gammaskopie kann man mit der traditionsreichen optischen Spektralanalyse vergleichen: In beiden Fällen misst man die Intensität der aus einer Probe (hier dem Target) kommenden elektromagnetischen Strahlung (γ -Quanten) in Abhängigkeit von der Frequenz oder in Abhängigkeit der zur Frequenz direkt proportionalen Energie. Die im oben beschriebenen Experiment vom Target ausgesandte Gammastrahlung entsteht durch spontane elektromagnetische Übergänge von angeregten Kernen aus energetisch höher liegenden Zuständen in energetisch niedriger liegende, wobei der Kern ein γ -Quant mit der jeweiligen Differenzenergie abstrahlt. Indem wir fortlaufend jedes aus der Probe kommende Photon sortiert nach seiner Energie zählen und die jeweiligen Photonenzahlen über den zugehörigen Energien in einem Diagramm auftragen, erhalten wir das Gammaskopie (Abb. 2). Die in den so gewonnenen Spektren auftretenden Linien sind die gesuchten charakteristischen Signale, die es ermöglichen, das abstrahlende Nuklid zu identifizieren und detaillierte Aussagen über die Natur der angeregten Kernzustände abzuleiten. In der Praxis sind diese Linien mehr oder weniger scharfe Glockenkurven, aus deren Lagen und Höhen wir in zeitaufwendigen Auswertungen die Niveauschemata, also die energetische Ordnung der Anregungszustände, und die elektromagnetischen Über-

gangsstärken bestimmen. Durch den zufälligen Charakter des radioaktiven Zerfalls hat jede Zählung von Zerfallsereignissen prinzipiell einen statistischen Fehler. Dieser wird mit wachsender Zahl der Ereignisse relativ kleiner. Eine genaue Analyse der Intensitäten der γ -Quanten erfordert daher, die Messzeiten genügend lang zu halten und die vom Target in alle Raumrichtungen fliegenden γ -Quanten möglichst vollständig zu erfassen. Diese Voraussetzung erreichen wir heute mit ballförmigen Anordnungen aus sehr vielen Detektoren, die den gesamten Raumwinkel abdecken.

Der EUROBALL: Auf vielen Augen sehend

Die Entdeckung interessanter neuer Kernstrukturen hängt entscheidend davon ab, neuartige Techniken und Methoden zu entwickeln, mit denen sich die Empfindlichkeit und Effektivität der Spektrometer erhöhen lassen. In diesem Zusammenhang hat die Verwendung von großvolumigen hochreinen Germanium-Detektoren in den letzten Jahren zu einer wesentlichen Verbesserung der Nachweiseffektivität und der Energieauflösung bei der Messung von Gammaskopie geführt.

Mit dem Spektrometer EUROBALL, einem Multidetektorsystem der neuesten Generation, ist ein beträchtlicher Schritt zu einer deutlich höheren Empfindlichkeit getan. Das Pro-



Abb. 5

Blick in eine der beiden Kugelhälften des EUROBALL-Spektrometers. Man erkennt die auf einer Kugelschale montierten Germanium-Detektoren. Links im Bild sind konventionelle Einzeldetektoren angeordnet, senkrecht zum waagrecht verlaufenden Strahlrohr die CLOVER- und rechts die CLUSTER-Detektoren. Weiter rechts ist die geöffnete kugelförmige Targetkammer zu sehen, die sich im geschlossenen EUROBALL im Zentrum der Detektoren befindet. Die zylindrischen Gefäße hinter den Detektoren enthalten flüssigen Stickstoff, der die Detektoren auf einer Temperatur von etwa Minus 190 Grad Celsius hält. Der Außendurchmesser der gesamten Anordnung beträgt etwa 3 Meter.

jekt ist eine gemeinsame Aktivität von Kernstrukturgruppen aus sechs europäischen Ländern (Deutschland, Dänemark, Frankreich, Großbritannien, Italien, Schweden). Dabei sind allein aus Deutschland verschiedene Universitätsgruppen aus Bonn, Göttingen, Köln sowie Gruppen des Max-Planck-Instituts Heidelberg, der Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt (GSI) und der Forschungszentren Jülich und Rossendorf an dem Projekt beteiligt.

Der EUROBALL ist eine Detektorkugel, in der drei verschiedene Detektortypen zum Einsatz kommen. Er verfügt über insgesamt 239 einzelne Detektoren, die in jeder Raumrichtung γ -Quanten erfassen können (Abb. 5). Während des Experimentes ist in seiner Mitte das mit dem Ionenstrahl beschossene Target angebracht. Sendet das Target nach dem Beschuss γ -Strahlung aus, wird diese von den auf einer Kugelschale angeordneten Detektoren aus hochreinem Germanium (HPGe) registriert. Einzeldetektoren messen die in Strahlrichtung vorwärts aus dem Target emittierten γ -Quanten. Auf einem Ring unter 90 Grad zum Strahl sind so genannte Clover-(engl.: Kleeblatt)-Detektoren angeordnet, die aus einem Verbund von vier einzelnen Germanium-Kristallen in einer kleeblattartigen Geometrie bestehen. Unter Rückwärtswinkeln sind Cluster-Detektoren angeordnet, die sieben einzeln gekapselte Kristalle enthalten.

Im Cluster-Detektor sind eine Reihe neuer zukunftsweisender Entwicklungen zum Einsatz gekommen, durch die zum Beispiel die Handhabung oder die Beseitigung von Schäden, die Neutronen hervorrufen, deutlich einfacher beziehungsweise erst möglich geworden ist. Dabei haben die Universität zu Köln und das FZ Jülich Pionierarbeit geleistet (Abb. 6): Die sieben einzelnen Kapseln, die in dem Detektor dichtgepackt in einem gemeinsamen Kryostaten untergebracht sind, enthalten je etwa sieben Zentimeter lange Kristalle aus hochreinem Germanium (HPGe).

Dringt ein Photon in diesen halbleitenden HPGe-Kristall ein, erzeugt es dort mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (Nachweiseffizienz) einen Ladungsimpuls. Der Impuls weist das Photon und seine an den Detektor abgegebene Energie nach.

Der EUROBALL ist mit seiner großen Anzahl von hocheffizienten Detektoren ein hervorragendes Instrument für Koinzidenzexperimente. In solchen Experimenten zeichnet die

elektronische Datenaufnahme nur solche Zerfallsprozesse (Ereignisse) auf, bei denen zwei oder mehrere Einzeldetektoren innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls zugleich ein Signal liefern. Ein typisches Intervall kann zum Beispiel eine Mikrosekunde sein (Millionstel Sekunde). Solche Koinzidenzdaten erlauben es, die gemessenen Spektren in Bezug auf bestimmte Nuklide zu filtern und sind damit ein entscheidendes Hilfsmittel bei der Konstruktion der Niveauschemata schwach angeregter Endkerne. Im Zusammenspiel mit Zusatzdetektoren zeichnen wir dabei Koinzidenzen zum Beispiel von γ -Quanten und emittierten Protonen, Alphateilchen und Neutronen oder anderen bei der Abregung des Compoundkerns herausfliegenden Teilchen auf.

Die Koinzidenzdaten verschaffen uns die Möglichkeit, durch das Setzen von Fenstern, so genannten „Gates“, in den zweidimensionalen Energiespektren Korrelationen zwischen beobachteten Peaks herauszufinden, die die Übergänge zwischen den beteiligten Kernniveaus repräsentieren. Damit lassen sich zum Beispiel die zu einer bestimmten Rotationsbande gehörenden γ -Quanten in den Koinzidenzspektren identifizieren. Wir fragen dabei ab, welche der γ -Quanten mit einem bei einer bestimmten Übergangsenergie liegenden γ -Quant in Koinzidenz sind.

Der Endkern im Heuhaufen

Wie oben angedeutet, werden in einer Compoundkern-Reaktion immer mehrere Endkerne mit einer nur ungenau abschätzbaren Rate erzeugt. Das Experiment konfrontiert uns daher mit der Schwierigkeit, dass die gemessenen Gammasppektren nicht nur die Linien eines Nuklids, sondern die von allen produzierten Endkernen enthalten – die wir bei der Auswertung voneinander trennen müssen. Dabei sind in der Regel gerade die Erzeugungsraten für die astrophysikalisch wichtigen Kerne besonders klein; die interessante Kernstrukturinformation befindet sich also genau in den schwachen Linien der Spektren. Hier schaffen eine Reihe verschiedener Zusatzdetektoren die benötigte Hilfe:

Um emittierte Neutronen zu messen, entfernen wir das Vorwärtssegment der Einzeldetektoren der Germanium-Kugelschale aus dem EUROBALL und ersetzen es durch ein Segment von speziellen Neutronendetektoren. Die bei der Reaktion entstehenden Protonen und Alphateilchen können wir mit einem Teil-



Abb. 6
Der geöffnete Kryostat des CLUSTER-Detektors mit den sieben Kapseln, die die Germanium-Kristalle im Vakuum enthalten. Im Betrieb sind die Kapseln von einem gemeinsamen Kryostaten umgeben, der mit dem oben im Bild sichtbaren wabenförmigen Deckel abschließt. Im Kryostaten herrscht ein Vakuum von etwa 10^{-10} bar.



Abb. 7

Der Silizium-Detektorball RoSiB. Er ist aus 42 Fünfecken und Sechsecken zusammengesetzt. Im Bild sieht man die Außenseiten der weißen Keramikunterlagen, auf deren Innenseiten die Siliziumscheiben angebracht sind. In der Mitte der Keramikplättchen befinden sich jeweils zwei Nadeln, an die mittels spezieller Stecker die Betriebsspannung der Detektoren angelegt wird. An den Rändern der Plättchen sind Aluminiumhalterungen angebracht, die über kleine Brücken miteinander verschraubt werden. Durch diese freitragende Konstruktion kann auf Rahmen für die Detektoren verzichtet werden, die einen Verlust an abgedecktem Raumwinkel mit sich bringen würden. Der Außendurchmesser des Balls beträgt 13 Zentimeter. Er kann in die Targetkammer im Zentrum des EUROBALL-Spektrometers eingebaut werden (vgl. Abb. 5).

Abb. 8

Ein Bandenabbruch: Im linken Bild sind alle Nukleonen gepaart, das heißt, ihre Drehimpulsvektoren koppeln zu null. Zur Erzeugung eines von null verschiedenen Kerndrehimpulses müssen Nukleonenpaare aufgebrochen werden, deren Drehimpulsvektoren zum Gesamtdrehimpuls koppeln (mittleres Bild). Zum Erreichen hoher Kerndrehimpulse richten sich die einzelnen Drehimpulsvektoren immer mehr aus, bis alle parallel sind. Dann ist der maximale Drehimpuls der betrachteten Teilchenkonfiguration erreicht, und die Folge der Anregungszustände bricht ab.

chen-Detektorball messen, den wir in dem kugelförmigen Hohlraum um das Target herum unterbringen. – Ein Detektor, der Teilchen registriert, Photonen aber passieren lässt. Diesen Silizium-Detektorball (RoSiB) hat die Kernstrukturgruppe vom Forschungszentrum Rossendorf entwickelt. Die 42 Detektorelemente des RoSiB sind die Facetten einer Polyederanordnung aus Silizium-Scheiben. Diese sind nur einen halben Millimeter dick – ausreichend, um geladene Teilchen zu registrieren, gleichzeitig dünn genug, um emittierte Photonen ungeschwächt passieren zu lassen (Abb. 7). Die Güte der Teilchenunterscheidung haben wir dabei durch eine spezielle Bauweise der Detektoren in Verbindung mit einer dafür entwickelten elektronischen Schaltung zur Impulsformanalyse erreicht. Den Siliziumball und die spezielle Elektronik hat das FZR in Kooperation mit den Gruppen des HMI Berlin (Hahn-Meitner-Institut) und Instituten der Universitäten in Swierk und Stockholm entwickelt und gebaut.

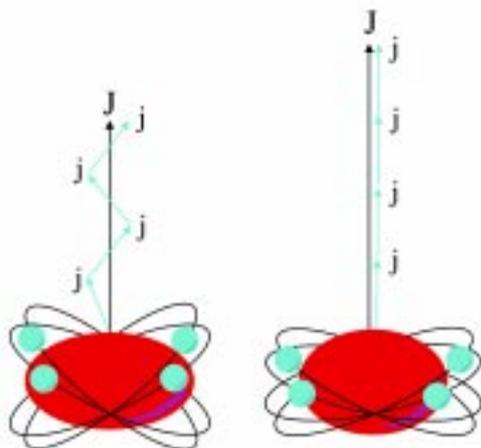
Auch von den insgesamt acht Cluster-Detektoren, die in Deutschland das BMBF finanziert hat, haben wir in Rossendorf allein drei aufgebaut und getestet. Ein weiterer in Rossendorf gebauter Cluster-Detektor ist ein hocheffektives Instrument für eigenständige Experimente unserer Gruppe. Wir haben ihn bereits in gemeinsamen Experimenten bei CERN, der GSI Darmstadt und am Elektronenbeschleuniger SDALINAC der Technischen Universität Darmstadt eingesetzt. Zudem wird er bei den geplanten künftigen Kernstrukturuntersuchungen am Rossendorfer ELBE-Beschleuniger eine wichtige Rolle spielen. Der EUROBALL ist ein unikales Spektrometersystem der Sonderklasse, das nur in dem US-amerikanischen System GAMMASPHERE ein

Pendant hat. Daher haben sich die in der Kernstrukturforschung führenden Beschleunigerlabors als Standort für die Installation des EUROBALLs beworben. Und so geht EUROBALL auf die Reise: Er war von 1997 bis Ende 1999 im italienischen Nationallabor Legnaro bei Padua installiert. Nach dieser ersten Messperiode erfolgten Abbau und Transport des Instruments in das Institut für Subatomare Physik in Strasbourg. Dort haben Wissenschaftler den Experimentierbetrieb dank optimaler Organisation bald wieder aufgenommen; bis 2003 wird das Spektrometer in Strasbourg bleiben. Geplant ist dann ein mit einer weiteren Modernisierung verbundener Umzug an die GSI Darmstadt. Dort wird der EUROBALL erstmals in Verbindung mit einer Anlage zur Erzeugung radioaktiver Ionenstrahlen betrieben werden.

Die Palette der Experimentvorschläge für EUROBALL ist wie an anderen begehrten Großgeräten weit größer als die an den Beschleunigern verfügbare Strahlzeit. Ein Beratungskomitee (Project Advisory Committee; PAC) entscheidet über die Vergabe von Experimenten an die vorgeschlagenen Gruppen. Dabei gibt es keine Bonuspunkte für den materiell geleisteten Anteil an den Aufbautarbeiten des EUROBALLs – es zählt nur der physikalische Ideengehalt.

Rossendorf am EUROBALL

Die Struktureigenschaften mittelschwerer Kerne mit Massenzahlen von etwa 70 bis 90 verändern sich relativ schnell mit der Nukleonenzahl; so kann sich die Form eines Kernes alleine durch Hinzufügen eines einzelnen Nukleons schon wesentlich ändern. Ähnlich sieht es mit den typischen Eigenschaften der Rotationsstruktur mit steigender Rotationsfrequenz aus. – Ein Verhalten, das sie zu interessanten Objekten für Experimente macht und unsere Kernstrukturgruppe im FZR dazu bewogen hat, sich auf die Untersuchung genau dieser mittelschweren Kerne zu spezialisieren. Wollen wir aber die Fragen klären, die hinter dem Mechanismus dieser Phänomene stecken, sind nicht nur aussagekräftige Experimente, sondern vor allem auch geeignete theoretische Modelle notwendig, die die Experimente unterstützen. Und genau darin besteht ein wesentlicher Vorteil der Rossendorfer Kernstruktur-Untersuchungen: Experimentatoren und Theoretiker arbeiten hier eng zusammen. Das erste Rossendorfer Experiment zielte auf protonenreiche Kerne mit Massenzahlen um



70 ab; auf instabile Kerne, in denen die Anzahl der Protonen etwa gleich der Neutronenzahl ist. Eine Besonderheit von solchen Kernen ist, dass sich dort Proton-Neutron-Paare bilden können; in den stabilen Nukliden entstehen solche Paare wegen des Neutronenüberschusses nicht. Uns interessiert dabei zum Beispiel die Frage, wie sich solche Kerne bei hoher Rotationsfrequenz verhalten. Die Theorie sagt für hohe Frequenzen den abrupten Abbruch der Rotationsstruktur voraus: Wenn der Kern seine Form und Rotationsachse mit wachsendem Spin in einer ganz bestimmten Weise ändert, ist irgendwann keine kollektive Rotation mehr möglich. Dann kann ein höherer Gesamtdrehimpuls nur noch dadurch erzeugt werden, dass sich die Drehimpulse aller aktiven Nukleonen allmählich in eine Richtung ausrichten. Bei maximaler (paralleler) Ausrichtung der Nukleondrehimpulse hört die Folge der Rotationszustände auf (Abb. 8).

Für die Beobachtung von Rotationszuständen bietet das EUROBALL-Spektrometer optimale Voraussetzungen. Der Rossendorfer Experimentvorschlag beinhaltete die Messung solcher Strukturen in Kernen, die beim Beschuss eines Kalzium-40-Targets mit einem Strahl von Kalzium-40-Ionen der Energie 185 Mega-Elektronenvolt in einer Compoundkernreaktion entstehen. Die Experimente haben wir in Kooperation mit Kernstrukturgruppen aus Göttingen, Köln und Legnaro durchgeführt. Bei diesem Experiment haben wir etwa drei Milliarden Dreifach- γ -Koinzidenzen und Teilchen- γ -Koinzidenzen gesammelt, in denen wir insgesamt fünfzehn Nuklidsorten identifiziert haben.

Bei der Auswertung der Daten konzentrierte sich unser Interesse auf die beiden Isotope Brom-72 und Brom-73 [1,2]. Dabei konnten wir sowohl im Brom-72 als auch im Brom-73 neue Rotationsstrukturen bis zu sehr hohen Drehimpulsen identifizieren, die eine Reihe ungewöhnlicher Eigenschaften aufweisen. Die bemerkenswerteste Struktur ergibt sich in Brom-72: Dort manifestiert sich im Experiment der seltene Fall einer so genannten Bandenüberkreuzung oder Signaturinversion (Abb. 10). Eine theoretische Analyse dieser Struktur-anomalie haben wir in Zusammenarbeit mit der Theoriegruppe der Universität Lund (Schweden) durchgeführt. Sie hat ergeben, dass der rotierende Kern nicht etwa wie vermutet axialsymmetrisch ist (Rotationsellipsoid), sondern eine an die Kiwi-Frucht erinnernde, dreiaxial elliptische Form hat, deren Gestalt sich

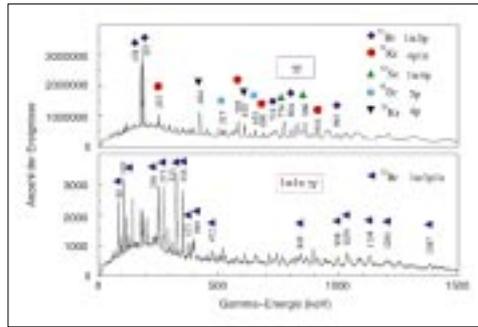


Abb. 9 Gamma-Gamma-Koinzidenzspektren, die wir aus der Messung mit dem EUROBALL unter Nutzung der Reaktion Kalzium-40 Kalzium-40 bei einer Einschussenergie von 185 Mega-Elektronenvolt gewonnen haben. Das obere Bild zeigt ein Spektrum, das alle $\gamma - \gamma$ Ereignisse enthält. Im unteren Bild ist ein $\gamma - \gamma$ Spektrum in Koinzidenz mit einem Alphateilchen und einem Neutron gezeigt. Hier sind alle Reaktionskanäle, die nicht mit der Emission von einem Alphateilchen und einem Neutron verbunden sind, stark unterdrückt. Der schwache Reaktionskanal, der dieser Koinzidenzbedingung genügt und im oberen Bild verdeckt ist, tritt dagegen deutlich hervor. Dies zeigt, welchen Vorteil die aufwendige Experimentier-technik bei der Untersuchung sehr schwach angeregter Isotope bringt. Je mehr zusätzliche Koinzidenzbedingungen man allerdings stellt, umso weniger Ereignisse sind noch in den Spektren enthalten. Das sieht man deutlich, wenn man die Maßstäbe an den y-Achsen der einzelnen Spektren vergleicht. Die Forderung nach der Koinzidenz mit einem Alphateilchen und einem Neutron wird nur von etwa einem Promille der aufgetragenen Ereignisse erfüllt. Der auf diese Weise selektierte Endkern ist im gezeigten Beispiel das Brom-72.

zudem noch mit der Rotationsfrequenz schrittweise ändert [1]. Zusätzlich haben wir in Brom-73 den bisher höchsten Wert für eine Rotationsfrequenz gefunden, den Wissenschaftler je in einem rotierenden Atomkern gemessen haben. – Und den Abbruch der Rotationsstruktur haben wir ebenfalls festgestellt: Die theoretische Analyse der Daten hat gezeigt, dass eine der Rotationsbanden tatsächlich den maximal möglichen Drehimpuls erreichte, bei dem der zuvor beschriebene Bandenabbruch auftritt. Zunächst rotiert der Kern in einer dreiaxialen Form, geht aber zu höheren Drehimpulsen mehr und mehr in die Form einer symmetrischen Scheibe über und rotiert beim höchsten Drehimpuls nahezu strahlungslos um die Symmetrieachse der Scheibe (Abb. 10) [2].

Unser neuestes Experiment haben wir im Juni dieses Jahres am EUROBALL in Strasburg durchgeführt. Es zielt auf die Beobachtung eines ganz neuen Strukturphänomens: der Chi-

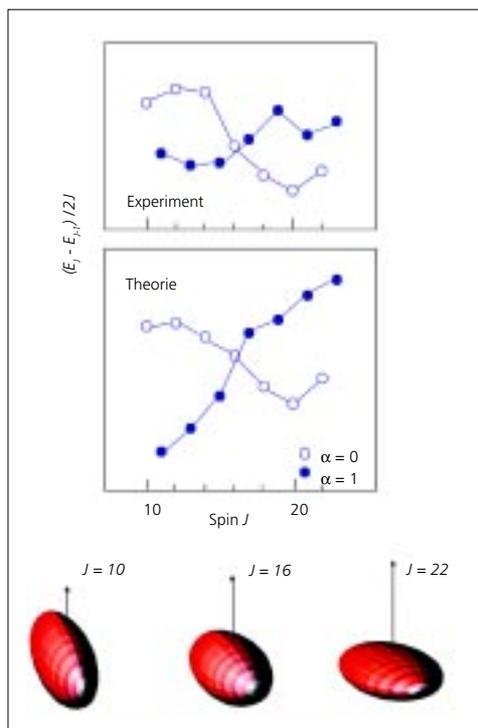


Abb. 10 So genannte Bandenberkreuzung im Brom-72 und die Formänderung des Kerns, durch die sie hervorgerufen wird. Der Kern durchläuft mit wachsendem Spin verschiedene triaxiale (nicht axial-symmetrische) Kernformen (ähnlich einer Kiwi-Frucht): Bei kleinen Spins rotiert er um die mittlere Hauptachse. Bei etwa $J = 16$, wo die Inversion passiert, hat er eine axial-symmetrische Form und nimmt mit weiter wachsendem Spin wieder triaxiale Formen an, wobei er nun um die kurze Hauptachse rotiert. Es konnte erstmals gezeigt werden, dass diese veränderlichen triaxialen Formen die Ursache für den seltsamen Effekt der Signaturinversion sind. Hält man den Parameter, der die Abweichung von axial-symmetrischen Formen beschreibt, in der Rechnung fest, so wird die experimentell gefundene Signaturinversion nicht reproduziert.

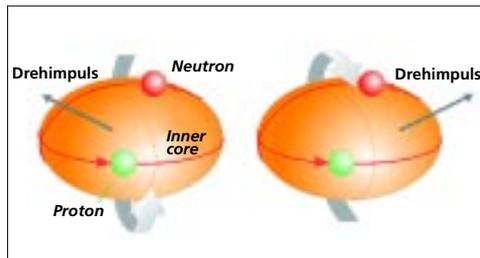
ralität in Atomkernen. Unter Chiralität versteht man den links- oder rechtshändigen Schraubensinn, den man im Mikrokosmos zum Beispiel bei links- und rechtsdrehenden Fettmolekülen seit langem kennt. Die Rossendorfer Kernstrukturtheorie-Gruppe hat vorhergesagt, dass die Rotation von Atomkernen unter bestimmten Umständen zur Ausbildung einer Händigkeit oder Chiralität der Kernbewegung führt (Abb. 11) [3, 4]. Eine amerikanische Gruppe hat dieses Phänomen bereits in Experimenten am GAMMASPHERE-Spektrometer für eine Kette von Nukliden mit 75 Neutronen beobachtet [5]. Wir vermuten, dass dieses Phänomen auch in leichteren Kernen mit einer Massenzahl von etwa 80 in der Nähe einer Neutronenzahl von 50 auftreten könnte.

Abb. 11

Chiralität: Links- und rechtshändige Kerne.

In dreiaxial elliptischen Kernen, die einer Kiwi-Frucht ähneln, entsteht eine Händigkeit durch die zwei Möglichkeiten (links oder rechts) wie sich der Drehimpuls des Rumpfes (grauer Ring um das Core) relativ zu den Bahnen der beiden äusseren Nukleonen (Proton und Neutron) ausrichtet.

Der resultierende Gesamtdrehimpuls (schwarz) eines solchen Kerns steht dann schief zu allen Hauptachsen der Kernform. Im Experiment zeigt sich Chiralität durch die Beobachtung von Zwillingen von Doppellinien [5, 6], die der unabhängigen Rotation der links- und rechtshändigen Konfiguration entsprechen.



Unzählige Möglichkeiten

Trotz seiner extremen Kleinheit besitzt der Atomkern eine riesige Fülle von Bewegungsmöglichkeiten, die sein Verhalten bestimmen und die sich in einer entsprechenden Komplexität und Vielfalt der Spektren ausdrückt (für eine Atommasse um 100 existieren mehr als 10^{40} Zustände). Experimentelle Fortschritte auf dem Gebiet können wir nur durch die ständige Verbesserung der spektralen Auflösung und Empfindlichkeit und die Verbesse-

rung der Auswertemethoden erzielen. Diese Entwicklung ist notwendig, um in den Spektren die charakteristischen Muster zu erkennen, die signalisieren, dass bestimmte Bewegungstypen vorliegen. Unter der Vielzahl von Moden in den oben genannten Objekten spielen die kollektiven Bewegungen eine besondere Rolle, bei denen durch das Zusammenwirken der individuellen Bestandteile des komplexen Quantensystems geordnete Bewegungen entstehen. Solche Phänomene zu erklären, ist eine der zentralen Fragestellungen zum Verständnis von Vielkörperquantensystemen überhaupt. Die besondere Herausforderung des Systems Atomkern entsteht durch seine Rolle in der Bildung der Elemente im Universum. Es ist zu hoffen, dass hier in nächster Zukunft Nuklide weitab der Stabilität experimentell zugänglich werden und wir die bestehenden grossen Wissenslücken schließen können. Die entscheidende Voraussetzung liefern dabei die im Bau befindlichen Anlagen zur Erzeugung radioaktiver Ionenstrahlen, mit denen man die bisher nicht zugänglichen Kerne kurzzeitig erzeugen und untersuchen kann. Aber auch bei den γ -Spektrometern ist mit der Entwicklung neuer Detektorsysteme die nächste Generation schon in Sicht. Bei diesen kann man, ähnlich wie in der Hochenergiephysik, die Spur eines γ -Quants durch die HPGe-Kristalle verfolgen und auswerten. Auf diese Weise lässt sich gegenüber den weltgrößten Spektrometern EUROBALL und GAMMASPHERE der Kernstrukturforschung eine weitere Steigerung der Nachweiseffektivität um mehrere Grössenordnungen erreichen. Dies schafft ganz neue experimentelle Perspektiven, um die terra incognita der Nuklidkarte und die dort auftretenden Phänomene des nuklearen Vielteilchensystems zu erforschen.

Literaturverzeichnis:

- [1] C. Plettner et al. Physical Review Letters 85 2454 (2000)
- [2] C. Plettner et al. Physical Review C 62 014313 (2000)
- [3] S. Frauendorf und J. Meng, Nucl. Phys. A617 131 (1997)
- [4] V.I. Dimitrov, S. Frauendorf und F. Dönau, Phys. Rev. Lett. 84 5732 (2000)
- [5] K. Starosta et al., Phys. Rev. Lett. 86 971 (2001)
- [6] Left-Handed Nuclei: <http://focus.aps.org>, 31. Jan. 2001
- [7] Nuclei Crash Through The Looking-Glass: Science 291 no. 5506 962 (2001)
- [8] Linkshändige Kerne: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 14. Februar 2001

Moleküle unter der Lupe

Strukturuntersuchungen in der Radioökologie mit Hilfe von Synchrotronstrahlung

Tobias Reich, André Roßberg, Gerhard Geipel, Lutz Baraniak, Harald Funke, Christoph Hennig, Gert Bernhard

Institut für Radiochemie

Während der Uranerzgewinnung in den Jahren 1946 bis 1990 hat die Wismut AG in Sachsen und Thüringen 220 000 Tonnen Uran gewonnen. Damit war die ehemalige DDR der viertgrößte Uranerzeuger weltweit. Alleine die Lagerstätte Schlema/Alberoda im Westerzgebirge brachte über 80 500 Tonnen Uran – sie war die ergiebigste Lagerstätte der Region [1].

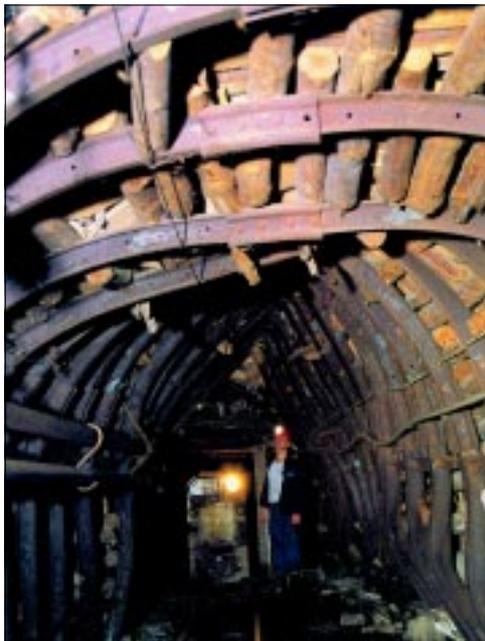


Abb. 1
1 400 km Stollen wurden mit vier Millionen Festmetern Fichtenholz ausgebaut.
Foto: bode-Verlag, Kugler

Der Abbau hat ein ausgedehntes Grubensystem hinterlassen, das im harten Phyllit- und Granitgestein in der Region Schlema bis zu einer Teufe von 1 800 Metern reicht und alle 45 Tiefenmeter in ein weit verzweigtes Stollensystem mündet. So ist über die insgesamt vier Jahrzehnte Uranerzabbau ein bergmännischer Gesamtvortrieb von mehr als 4 000 Kilometern mit einem unterirdischen Hohlraum von 36 Millionen Kubikmetern entstanden [2]. Inzwischen werden die Gruben, in denen immer noch nennenswerte Mengen Uran und andere Schwermetalle enthalten sind, nach und nach geflutet. Beim Ausbau der Schächte und Stollen haben die Bergleute diese mit etwa vier Millionen Kubikmetern Holz stabilisiert (Abb. 1). Sind die Stollen einmal mit Wasser aufgefüllt, gerät das Grubenholz unter hohen Druck (bis zu 20 Megapascal) und ist da-

bei zusätzlich Temperaturen bis zu 65 Grad Celsius ausgesetzt. Diese Bedingungen sorgen für den hydrothermalen und mikrobiellen Abbau aller Holzbestandteile. Während sich allerdings die Cellulose relativ schnell zersetzt und durch Mikroorganismen zu CO_2 „veratmet“ wird, verläuft der Abbau des Lignins wesentlich schwieriger (Abb. 2); denn dieser Holzbestandteil ist aus hochmolekularen phenolischen Polymeren (Baueinheit Coniferylalkohol) aufgebaut, die nur durch wenige Mikroorganismen wie zum Beispiel die Weißfäulepilze angegriffen werden [3]. Sehr langsam entstehen dabei relativ stabile phenolische Zwischenprodukte wie Protocatechusäure (PCS), aber auch Ferulasäure, Vanillin und Vanillinsäure (Abb. 3); alle Verbindungen enthalten Carboxylgruppen und phenolische Hydroxylgruppen, die Schwermetallionen wie zum Beispiel Uran komplexieren und damit deren chemische und toxische Eigenschaften verändern. Und mit diesen Eigenschaften verändert sich auch das Ausbreitungsverhalten von Uran. – Dabei ist bisher noch unklar, wie sich das Uran in Zukunft in

Abb. 2
Struktur von Fichtenholzlignin
nach E. Adler, Wood Sci. Technol. 11 (1977) 169.

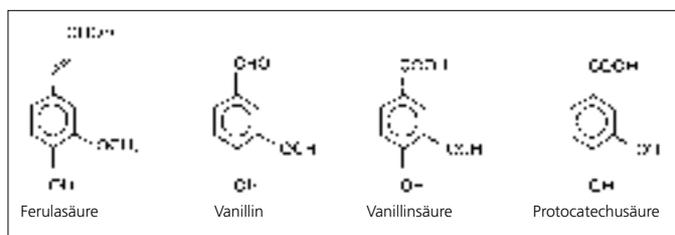
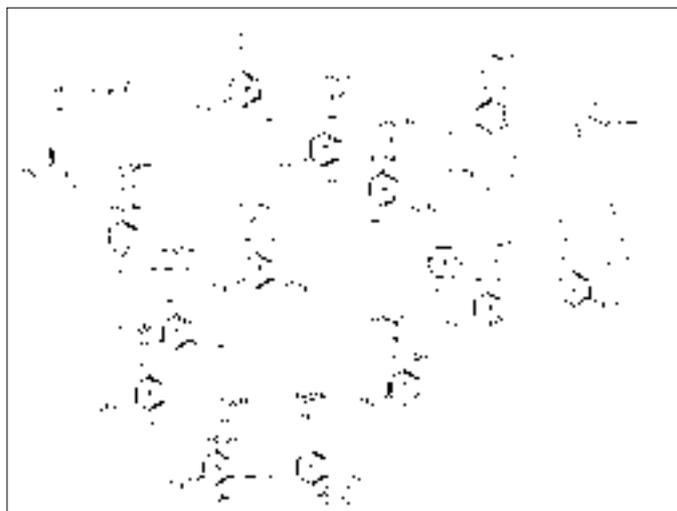


Abb. 3
Zersetzungsprodukte von Fichtenholzlignin.

den Oberflächenwässern aber auch in unterirdischen Wasserleitern in der Umgebung verteilt wird.

In unseren Studien gehen wir der Struktur der Holz-Abbauprodukte und deren Wechselwirkung mit den Schwermetallen auf den Grund. Denn nur wenn die thermodynamischen Daten für das Zusammenwirken von Uran mit den Bestandteilen des wässrigen Mediums bekannt sind, lässt sich berechnen, in welcher chemischen Form das Uran vorliegt. Und nur so können Wissenschaftler Aussagen darüber machen, ob sich das Uran ausbreitet oder nicht – und einschätzen, welches Gefahrenpotential vom Uran für die Umgebung der ehemaligen Uranbergwerke und Erzaufbereitungsanlagen ausgeht und von Fall zu Fall entscheiden, wie Sanierungsmaßnahmen aussehen können.

Die Röntgen-Lupe

Um die Molekülstrukturen der Uranverbindungen zu untersuchen, haben wir im Institut für Radiochemie des Forschungszentrums Rossendorf in einem umfangreichen Projekt die Komplexbildung von Uran und Protocatechusäure (PCS) mit Hilfe einer potentiometrischen pH-Titration untersucht. Um allerdings aus den ermittelten Daten die Stabilität der Komplexe endgültig bestimmen zu können, brauchen wir zusätzlich Aussagen über Zusammensetzung und Struktur der verschiedenen Urankomplexe. – Da sie bei den üblichen chemischen und spektroskopischen Methoden „unsichtbar“ bleiben, haben wir sie unter die „Röntgen-Lupe“ genommen. Röntgenstrahlen können nicht nur das Innere eines Menschen sichtbar machen, sondern auch den Aufbau von Molekülen. Für Flüssigkeiten und Feststoffe ist die Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS; X-ray Absorption Spectroscopy) eine wichtige Methode; damit kann man zum Beispiel die Struktur der unmittelbaren atomaren Umgebung eines mit Röntgenstrahlung angeregten Atoms ermitteln. Anstelle des Lineals dient dann besonders intensive Röntgenstrahlung, die Synchrotronstrahlung, dazu, die Abstände zwischen den Atomen zu bestimmen. Zudem können wir so auch die Art und die Anzahl der Nachbaratome ermitteln und die Struktur des Zentralatoms in seiner unmittelbaren Umgebung auf atomarer und molekularer Ebene beschreiben. Allerdings ist dafür eine um mehrere Größenordnungen intensivere Strahlungsquelle als

die von Wilhelm Conrad Röntgen benutzte Röhre notwendig. XAS-Untersuchungen lassen sich daher auch nicht in einem normalen Laboratorium durchführen – dafür sind spezielle Synchrotron-Speicherringe notwendig. An solch einem Speicherring, der Europäischen Synchrotronstrahlungs-Einrichtung (ESRF) in Grenoble, Frankreich, hat das Forschungszentrum Rossendorf daher ein eigenes Strahlrohr, die Rossendorf Beamline (ROBL), errichtet. Es wird vom Institut für Radiochemie und vom Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung genutzt und ist die einzige Einrichtung dieser Art, an der radioaktive Proben gemessen werden können.



Abb. 4
SynchrotronSpeicherring der ESRF am Zusammenfluss von Drac und Isere in Grenoble. Foto: ESRF

Die ESRF ist eine europäische Großforschungseinrichtung und die modernste Synchrotronquelle für harte Röntgenstrahlung in der Welt. Das Herzstück der ESRF ist ein Speicherring mit einem Umfang von fast 850 Metern, in dem sich Elektronenbündel im Vakuum mit nahezu Lichtgeschwindigkeit und einer konstanten Energie von sechs Giga-Elektronenvolt (Milliarde Elektronenvolt) viele Stunden bewegen (Abb. 4). Werden die Elektronen durch magnetische Felder auf ihre Kreisbahn gezwungen, senden sie so genannte Synchrotronstrahlung aus, die – ähnlich dem Scheinwerfer eines Autos in einer Kurve – tangential zu ihrer gekrümmten Bahn vom Speicherring wegstrahlt (Abb. 5). Aufgrund der hohen Energie der Elektronen, liegt diese im harten und sehr harten Röntgenbereich.

Im Bergwerk – im Labor

Bei unseren Untersuchungen haben wir uns an den Bedingungen, wie sie im sanierten Bergwerk herrschen, orientiert; der pH-Wert in den gefluteten Bergwerken liegt im neutralen bis schwach alkalischen Bereich. Unsere

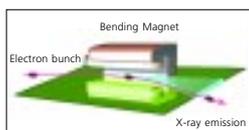


Abb. 5
Ablenkmagnet - Quelle der Synchrotronstrahlung für das Strahlrohr ROBL.
Zeichnung: ESRF

Strukturuntersuchungen haben wir mit den verschiedenen Abbauprodukten des Lignins in Gegenwart von Uran bei einem niedrigen und einem hohen pH-Wert durchgeführt. Zusätzlich haben wir am Beispiel der Protocatechusäure (PCS) bei den Röntgenabsorptions-Messungen einen weiten pH-Bereich abgedeckt (pH 4,3 bis pH 10). Dazu haben wir Uran(VI) in verdünnten Lösungen mit PCS unter Ausschluss von CO₂ präpariert und in Abhängigkeit vom pH-Wert gemessen.

In einem typischen Absorptionsspektrum tritt bei einer für jedes chemische Element charakteristischen Energie eine so genannte Absorptionskante auf, bei der die Absorption sprunghaft zunimmt (Abb. 6). Die XAS ist also eine elementspezifische Methode, sodass die Spektren verschiedener, in einer Probe enthaltener Elemente unabhängig voneinander gemessen werden können. Für Uran liegt diese Energie bei 17 166 Elektronenvolt, dann nämlich reicht die Energie des Röntgenstrahls aus, die kernnahen Elektronen (2p_{3/2}-Niveaus, L3-Niveaus) zu ionisieren, wobei sie auf ein höheres Energieniveau übergehen.

Oberhalb der Absorptionskante nimmt die Absorption der Probe mit zunehmender Energie wieder ab; in dem Gebiet sind über einen weiten Energiebereich kleine Oszillationen erkennbar. Und genau dieser so genannten kantenfernen Feinstruktur des Röntgenabsorptions-Spektrums (EXAFS - Extended X-ray Absorption Fine Structure) galt das Hauptaugenmerk unserer Untersuchungen (Abb. 7).

Die Signale entstehen durch die Interferenz der vom Uranatom ausgehenden und den an seinen unmittelbaren Nachbaratomen elastisch zurückgestreuten Elektronenwellen (Abb. 6). Dadurch entstehen Maxima und Minima, aus deren Analyse wir die Strukturparameter der Proben bestimmen können. Der Abstand zwischen dem Zentralatom, in unserem Falle also dem Uranatom, und seinen Nachbaratomen, lässt sich dabei mit einer Genauigkeit von 0,02 Angström (zehnmillionstel Millimeter) bestimmen. Auch die Anzahl der Nachbaratome eines bestimmten Typs, also die Koordinationszahl des Uranatoms, erhalten wir dabei – in dem Falle auf einen Fehler von etwa 15 Prozent genau. In den Urankomplexen haben wir es mit Uran in seiner stabilsten Oxidationsstufe, sechsfach positiv, zu tun. Typischerweise liegt es dort als Uranylkation (UO₂²⁺) vor. Die beiden Sauerstoffatome stehen in dem Ion axial (O_{ax}), das heißt aus der Ebene nach oben und unten heraus; zusätzlich umgibt sich das Uran mit

mehreren weiteren Sauerstoffatomen, die alle in einer Ebene, also äquatorial liegen (O_{äq}). Unsere Messungen und Berechnungen haben ergeben, dass das Uranatom in der Lösung bei pH 4,3 von zwei Sauerstoffatomen in einem kürzeren Abstand (1,79 Angström) und von sechs Sauerstoffatomen, die etwas weiter entfernt sind, umgeben ist (2,45 Angström). Während der axiale Uran-Sauerstoff-Abstand in allen Proben gleich bleibt, verkürzt sich der mittlere Abstand zwischen Uran und den äquatorialen, also weiter entfernten Atomen, mit zunehmendem pH-Wert (2,36 Angström). Doch wie lässt sich diese Abstandsverkürzung erklären?

Für die Uran(VI)-Lösungen mit PCS sind die an der Uran L3-Kante gemessenen EXAFS-Spektren in Abb. 7 gezeigt. Besonders in dem Bereich von $6 \leq k \leq 8 \text{ \AA}^{-1}$ ist eine deutliche Änderung des EXAFS-Spektrums als Funktion des pH-Wertes sichtbar, die auf eine Veränderung der Struktur des Uran-Komplexes schließen lässt. Nach einer Fouriertransformation des EXAFS-Signals erhält man eine Pseudoradialverteilung für das Uran. Im Koordinatenursprung befindet sich das Uran. Die deutlichen Peaks in der transformierten Kurve können verschiedenen Koordinationsschalen zugeordnet werden. Die beiden axialen Sauerstoffatome (O_{ax}) des für das sechswertige Uran charakteristischen Uranylkatons, UO₂²⁺, sind die Ursache für den ersten Peak bei 1,3 Angström in der Fouriertransformierten. In der äquatorialen Ebene ist das Uran von mehreren Sauerstoffatomen (O_{äq}) umgeben, die zu dem zweiten Peak bei 1,9 Angström führen.



Abb. 6 Uran L3-Kante XAS-Spektrum und schematische Darstellung des Ursprungs der EXAFS-Oszillationen.

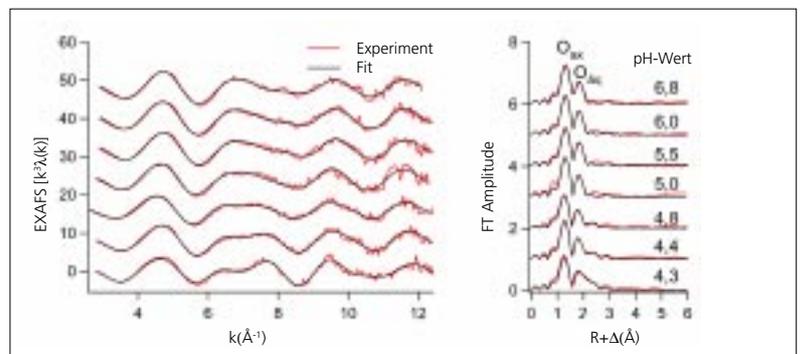


Abb. 7 Uran L3-Kante EXAFS-Spektren und Fouriertransformierte für 1 mM Uran(VI) und 50 mM Protocatechusäure als Funktion des pH-Wertes.

Koordination ist alles

An den Benzolring der Protocatechusäure sind drei funktionelle Gruppen gebunden: Eine Carboxylgruppe (-COOH) und zwei Hydroxylgruppen (-OH), die der Carboxylgruppe gegenüber stehen. So ergeben sich für das Uran zwei verschiedene Bindungsstellen. Es kann an die beiden Sauerstoffatome der Carboxylgruppe oder an die beiden OH-Gruppen am Ring koordinieren. Vergleiche mit zahlreichen Uran(VI)-Referenzverbindungen aus eigenen EXAFS-Messungen und der Literatur haben gezeigt, dass ein längerer Uran-Sauerstoff-Abstand nur bei einer

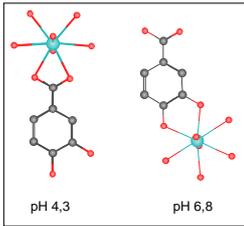


Abb. 8

Links: Bidentate Koordination des Urans mit der Carboxylgruppe der Protocatechusäure (PCS).

Rechts: Fünfgliedriger Chelatring des Urans mit den Hydroxylgruppen der PCS. Blau - Uran; rot - Sauerstoff; grau - Kohlenstoff. Zur Vereinfachung sind die Wasserstoffatome weggelassen.

Koordination des Urans über die beiden Sauerstoffatome der Carboxylgruppe der PCS auftritt (Abb. 8).

Der kürzere Abstand bei höheren pH-Werten ist also ein deutlicher Hinweis darauf, dass das Uran nicht mehr an die Carboxylgruppe gebunden ist – es bildet sich mit den beiden benachbarten (ortho ständigen) phenolischen Hydroxylgruppen der PCS ein fünfgliedriger Chelatring. Und dieser Ring ist durch seine zangenförmige Struktur und seine günstigen Bindungswinkel ganz besonders stabil. „Höhere pH-Werte“ hieß in unserem Fall, dass sich der Komplex bereits ab einem Wert von 4,7 zu bilden beginnt.

Mittels der EXAFS-Spektroskopie haben wir also eine molekulare Erklärung für die sehr hohe Stabilitätskonstante der Urankomplexe mit PCS gefunden und können damit ebenfalls Rückschlüsse auf die Bindungsverhältnisse des Urans mit den anderen Abbauprodukten des Lignins ziehen. Die Ergebnisse unserer Untersuchungen sind in Verbindung mit den Erkenntnissen verschiedener anderer chemischer und physikalischer Untersuchungsmethoden ein wichtiger Baustein, der helfen kann, Gefahrenpotential und Sanierungsmaßnahmen einschätzen zu lernen.

Plutonium – ein Meilenstein

Da der Radiochemie-Messplatz in Grenoble eigens für radioaktive Substanzen ausgestattet ist, eignet er sich besonders für Messungen an hoch radiotoxischen Elementen wie Plutonium. Auch diesem gilt unser Augenmerk, denn gerade in den USA und den Nachfolgestaaten der ehemaligen Sowjetunion sind infolge der Kernwaffenproduktion große Gebiete radioaktiv verseucht und die angrenzenden Regionen der Gefahr einer Kontamination ausgesetzt (Abb. 9). Probleme

matisch dabei ist vor allem, dass das Plutonium an die im Boden enthaltenen natürlichen Huminstoffe bindet und sich gemeinsam mit diesen ausbreitet.

Auch hier wollten wir wissen, wie und an welche Bestandteile der Huminstoffe sich das Plutonium bindet, um dann Aussagen darüber machen zu können, wie stabil die entstandenen Komplexe sind, welche Gefahr also von ihnen ausgeht. Mit einem Spezialtransport wurden die Proben, die insgesamt eine Aktivität von 14 Megabecquerel (Millionen Zerfälle pro Sekunde) besaßen, nach Grenoble gebracht. Dort haben wir sie innerhalb von 48 Stunden nach ihrer Präparation am radiochemischen ROBL-Messstand untersucht.

Dabei haben wir zunächst Versuche mit Plutonium-Hydrat, der chemisch einfachsten Form dieses Schwermetalls in wässriger Lösung, unter den verschiedensten Bedingungen durchgeführt. Die Kenntnis der Strukturparameter der Hydrathülle des Plutoniums ist besonders wichtig für die Interpretation von komplizierteren Plutonium-Verbindungen, in denen die Wassermoleküle gegen einen oder mehrere Liganden ausgetauscht sind. Auch hier haben wir charakteristische Unterschiede zwischen den verschiedenen Plutonium-Wertigkeiten gefunden, die zum Teil den Strukturen in den Uranverbindungen sehr ähnlich sind.

Bevor wir in naher Zukunft die Wechselwirkung von Plutonium(III) mit Huminsäuren untersuchen werden, sind uns damit erste Schritte zu einem besseren Verständnis des Umweltverhaltens von Plutonium gelungen. Zudem waren die Messungen der Plutoniumproben am Strahlrohr ROBL ein wichtiger Meilenstein für uns, denn sie haben gezeigt, dass in Rossendorf und Grenoble alle Voraussetzungen für die Präparation, den Transport und die Experimente solch hoch radiotoxischer Lösungen erfüllt sind.

Zu den bisher vom Institut erfolgreich am Strahlrohr ROBL untersuchten Radionukliden zählen Technetium, Thorium, Uran, Neptunium, Plutonium und Americium. Die XAS ist zwar eine anspruchsvolle Methode, sie liefert aber unverzichtbare Informationen zur elektronischen und molekularen Struktur von Actiniden in Lösungen und Feststoffen. Insbesondere bei Lösungen und röntgenamorphen Festphasen kann man mit keiner anderen Methode Bindungsabstände und Koordinationszahlen bestimmen. Da die Methode außerdem elementspezifisch ist, kann man sie zur

Abb. 9
Doppelwandige Behälter für flüssigen Abfall der Plutonium-Produktion in Hanford, Washington, USA.
Foto: Physics Today 50(6) (1997) 36



Bestimmung des Oxidationszustandes von Actiniden in einer komplexen Matrix einsetzen, und die mit dieser Methode bestimmten molekularen Strukturen dienen zur Validierung von Komplexierungsmodellen; sei es bei der Wechselwirkung von Radionukliden in Lösungen, mit Pflanzen und Mikroorganismen oder bei

der Sorption an Gesteins- und Mineraloberflächen. Das an der ESRF vom Forschungszentrum errichtete und betriebene Strahlrohr ROBL bietet mit seinem radiochemischen Messplatz dafür in Europa und in der Welt einmalige Möglichkeiten, die auch anderen Forschungseinrichtungen zur Nutzung offen stehen.

Das Synchrotronstrahlrohr in Grenoble

Mit Hilfe mehrerer optischer Komponenten des Strahlrohrs ROBL (Abb. 10) können 2,8 mrad aus dem horizontalen Fächer der Synchrotronstrahlung selektiert und für die Experimente nutzbar gemacht werden. Auf seinem 38 Meter langen Weg vom Ablenkmagneten zur Probe wird der Synchrotronstrahl an zwei 1,20 Meter langen Siliziumspiegeln und einem Si(111)-Doppelkristallmonochromator reflektiert und in seinen Eigenschaften geändert. Für eine hohe Energieauflösung muss ein möglichst paralleler Strahl auf den ersten Kristall des Monochromators treffen. Eine pneumatische Einrichtung krümmt den ersten Spiegel auf einen Radius von etwa 21 Kilometern und kollimiert damit den divergierenden Synchrotronstrahl. Die auf den Spiegel im streifenden Einfall treffende Strahlung erzeugt so viel Wärme, dass der Spiegel mit Wasser gekühlt werden muss, ebenso der erste Siliziumkristall des Monochromators. Der Monochromator selektiert aus dem polychromatischen Synchrotronstrahl einen monochromatischen Strahl mit der gewünschten Energie, die zwischen 5 und 35 Kiloelektronenvolt liegt. Der zweite Spiegel fokussiert den monochromatischen Strahl auf die Probe.

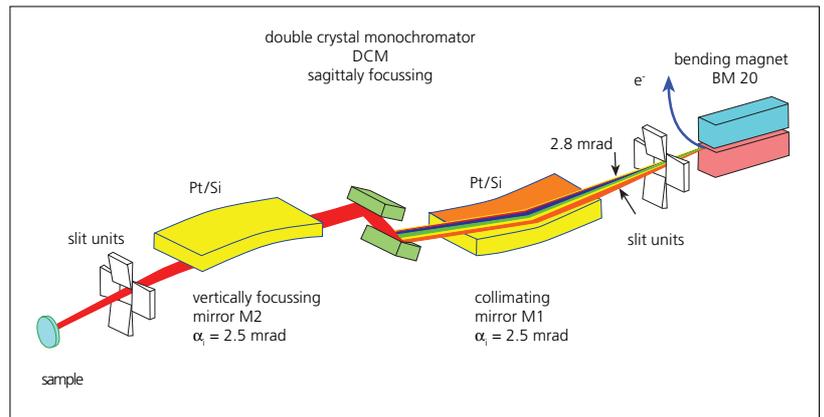


Abb. 10
Schematische Darstellung der Röntgenoptik.
Zeichnung: W. Matz

Der Radiochemiemessplatz

Der sehr intensive und äußerst stabile Synchrotronstrahl des Strahlrohrs ROBL wird abwechselnd an zwei Messplätzen für Experimente genutzt. Der Messstand der Materialforschung ist mit einem hochpräzisen Diffraktometer zur Untersuchung von Werkstoffen mit Röntgendiffraktion ausgestattet. Am in Europa einzigartigen Messplatz der Radiochemie werden radioaktive Proben mit der eingangs erwähnten Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS) untersucht. Der Umgang mit radioaktiven Substanzen, insbesondere mit Actiniden, erfordert besondere Vorkehrungen für den Schutz und die Sicherheit der dort arbeitenden Personen, der Umgebung und der Geräte. Deshalb wurde am Strahlrohr ROBL ein radiochemisches Laboratorium mit einem entsprechenden Ventilations- und Sicherheitssystem inklusive der Messgeräte für die kontinuierliche Überwachung der Raum- und Abluft errichtet, das allen deutschen und französischen Gesetzesanforderungen genügt und ein sicheres Arbeiten mit den radioaktiven Proben garantiert. In dem radiochemischen Laboratorium (Abb. 11) befindet sich eine Handschuhbox, in der die Proben zur Messung kommen und in gewissem Umfange chemisch modifiziert werden können. Die französischen Behörden haben den Umgang mit alpha-emittierenden Radionukliden (Thorium, Uran, Neptunium, Plutonium, Americium, Curium) und dem in der Radiopharmazie wichtigen Betastrahler Technetium-99 bis zu einer maximalen Aktivität von 185 Megabecquerel (Millionen Zerfälle pro Sekunde) genehmigt. Für natürliches Thorium oder Uran erlaubt dieser Grenzwert eine Höchstmenge von einem Kilogramm Substanz am radiochemischen Messplatz. Da eine Messprobe maximal 20 Milligramm Substanz erfordert, wird eine solch große Menge Uran allerdings nie eingesetzt. Anders ist das für das kurzlebige Isotop Americium-241. Auf Grund seiner kurzen Halbwertszeit von 433 Jahren und der damit verbundenen höheren Aktivität dürfen maximal 1,4 Milligramm dieses Isotopes für XAS-Messungen eingesetzt werden. Diese geringe Menge stellt höchste Anforderungen an die Qualität des Synchrotronstrahls und die zur Spektrenaufnahme verwendeten Detektoren.



Abb. 11
Blick auf den radiochemischen Messplatz am Strahlrohr ROBL. In der Handschuhbox werden die Proben manipuliert und mit dem Synchrotronstrahl gemessen. Im Hintergrund befinden sich zwei Absolutfilter des Ventilationsystems.
Foto: U. Strauch

Literaturverzeichnis:

- [1] G. Lange, P. Mühlstedt, G. Freyhoff, B. Schröder, *Erzmetall* 44 (1991) 162-171
- [2] W. Böder, W. Schuppan, *Schriftenreihe „Lagerstättenforschung in Deutschland“* der Gesellschaft Deutscher Metallhütten- und Bergleute 64 (1991) 203-221
- [3] K. Haider, *forum mikrobiologie* 11 (1988) 477-483

Vom Züchten und Zähmen

Wie man mit Ionenstrahlen Nanostrukturen die Grenzen weist

K.-H. Heinig, B. Schmidt, M. Strobel und T. Müller

Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

Kratzfeste Kunststoffe, Wasser abweisende Oberflächen, immer leistungsfähigere, kleinere und kostengünstigere Chips, und noch viel mehr – alles das kann die Nanotechnologie. Mit Hilfe von Nanostrukturen ist es möglich, Materialien ganz neue Eigenschaften aufzuzwingen, indem man zum Beispiel in ein bestimmtes Material andere Stoffe einbringt. Das können Schichten, Drähte oder kleinste Partikel (Cluster) sein. Wenn die Abmessungen der Strukturen nur noch wenige Nanometer (millionstel Millimeter) betragen, weichen deren Eigenschaften stark von unseren Erfahrungen ab.

Drei physikalische Ursachen sind für diese besonderen Eigenschaften verantwortlich: Zum einen befinden sich in nanostrukturierten Materialien sehr viele Atome an der Oberfläche. Der Anteil kann durchaus fünfzig Prozent erreichen. Die Oberflächenenergie ist im Vergleich zur Gesamtenergie der Materialien dann besonders hoch; dieser Umstand hat Einfluss auf die thermodynamischen Eigenschaften wie zum Beispiel die Schmelztemperatur. Aber auch mechanische und chemische Eigenschaften können sich ändern.

Zweitens sind in nanostrukturierten Festkörpern die Elektronen räumlich „eingesperrt“; dabei werden die Energieniveaus der Elektronen angehoben (Heisenbergsche Unschärferelation) und die Zone verbotener Elektronenzustände in Halbleiterkristalliten verbreitert sich. Wenn das nanostrukturierte Material Licht aussendet, kann man diesen Effekt, der „Quantenkonfinement“ genannt wird, auch sehen: Das emittierte Licht verschiebt sich zu kürzeren Wellenlängen.

Drittens merkt man bei der Aufladung von Nanoteilchen deutlich, dass sich elektrische Ladungen nicht beliebig teilen lassen. Die kleinste Einheit ist die Elementarladung: Die Ladung eines Nanoclusters wächst bei ansteigender Spannung in diskreten Stufen. Jede zusätzliche Elementarladung erzeugt in Nanoteilchen eine deutliche Erhöhung des elektrischen Potentials. Bleibt das äußere Feld konstant, können keine weiteren Ladungen auf das Teilchen gelangen (Coulomb-Blockade-Effekt).

Diese Eigenschaften eröffnen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für Nanostrukturen in der Wissenschaft, der Technik oder der Medizin. So werden heute in Labors neuartige

nichtflüchtige Nanocluster-Halbleiterspeicher entwickelt. Diese neue Generation von so genannten nvRAMs werden irgendwann die heute noch sehr teuren Speicher für Digitalkameras und Mobiltelefone ersetzen. Wenn dann auch noch die für Computer üblichen, flüchtigen Halbleiterspeicher (DRAM) durch nichtflüchtige Nanoclusterspeicher ersetzt werden, wird auch das zeitraubende Laden des Betriebssystems bei jedem Neustart des Computers entfallen. Denn die im Moment verwendeten DRAMs haben lediglich ein Gedächtnis von wenigen Sekunden. Die neuen nvRAMs vergessen erst nach Jahren.

Heute kann man Millionen von Transistoren auf einem Daumennagel großen Stück Silizium zu einem mikroelektronischen Schaltkreis integrieren. Das gleiche möchte man mit optischen Bauelementen erreichen. Denn die optische Datenübertragung ist schneller und deutlich weniger anfällig für Störungen als die elektronische Datenübertragung. Ohne Hilfe der Nanotechnologie könnten die Strukturen aber nicht weiter verkleinert werden. Hier helfen Nanocluster weiter: Zum Beispiel mit Gold-Nanocluster-Ketten könnten optische Bauelemente zu optischen Schaltkreisen integriert werden. Die Cluster führen das Licht durch die Festkörperoberfläche. Entscheidend für die bisher nicht erreichte Miniaturisierung optischer Bauelemente ist, dass das Licht entlang dieser Cluster-Ketten mit geringen Verlusten um Ecken geleitet werden kann, deren Radius viel kleiner, als die Lichtwellenlänge ist.

Wichtigstes Werkzeug für all diese Anwendungen ist der Ionenstrahl. Man kann dabei nicht nur Ionen auf Oberflächen aufbringen, sondern sie auch ins Material eindringen lassen. Zudem lassen sich Ionen von praktisch jedem beliebigen chemischen Element einsetzen, und der Strahl lässt sich hervorragend kontrollieren.

Im Forschungszentrum Rossendorf befasst sich unsere Gruppe seit mehreren Jahren mit der Synthese von Nanostrukturen. Dabei wenden wir ein Verfahren an, das sich in der Mikroelektronik unter der Bezeichnung „Ionenimplantation“ als dominierende Methode zur Platzierung von Fremdatomen in Bauelementen durchgesetzt hat.

Ionenstrahlsynthese von Nanostrukturen

Bei der Ionenstrahlsynthese von Nanostrukturen werden beschleunigte Ionen in eine Festkörperoberfläche eingeschossen (Abb. 1). Hier kollidieren sie mit den Atomen und werden abgebremst. Abhängig von der Energie der beschleunigten Ionen ist in einer bestimmten Schicht – der so genannten projizierten Reichweite – die Konzentration der Fremdatome besonders hoch. Hier können die deponierten Atome schnell die Löslichkeitsgrenze des Festkörpers überschreiten, sodass in diesem Bereich zuerst eine übersättigte feste Lösung entsteht. Bei gut beweglichen Fremdatomen, wie zum Beispiel bei Goldatomen in Siliziumdioxid, kommt es schon während der Ionenimplantation zu einer Phasenseparation. Das heißt, zu einem Abbau der Übersättigung: Es bilden sich Keime von implantierten Ionen, die zu wachsen beginnen (Abb.1). Sind die Fremdatome weniger beweglich, beginnen Keimbildung und Keimwachstum erst dann, wenn man das Material tempert, also bei höheren Temperaturen nachbehandelt. Das Keimwachstum wird üblicherweise auch als Ostwald-Reifung bezeichnet. Abhängig davon, wie viele Ionen man implantiert hat, können unterschiedliche Strukturen entstehen. Zunächst bilden sich lediglich Ausscheidungen (Nanocluster), die sich dann berühren und miteinander verschmelzen (Koaleszenz). Man kann die Ionendosis so hoch wählen, dass alle Nanocluster miteinander verschmelzen und sich unter Einfluss der Grenzflächenspannung eine glatte, vergrabene Schicht bildet (zum Beispiel SIMOX-Strukturen, die nach Sauerstoff-Ionenimplantation eine im Silizium vergrabene Siliziumdioxid-Schicht haben).

Es gibt aber auch verschiedene wichtige Nebenwirkungen bei Ionenbestrahlung von Festkörpern: So trägt der Ionenstrahl zum einen Oberflächenatome ab, der Vorgang heißt Ionenerosion; zusätzlich beanspruchen die eingebrachten Ionen aber auch einen gewissen Raum im Festkörper. Daraus resultiert das so genannte Swelling. Je nachdem in welchem Verhältnis Ionenerosion und Swelling zueinander stehen, hebt sich die Festkörperoberfläche möglicherweise an oder sie senkt sich ab (Abb. 1).

Zwei Wirkungen der Ionenstrahlen

Bei der Ionenstrahlsynthese können zwei Wirkungen des Ionenstrahls ausgenutzt werden. Bisher waren wir lediglich davon ausgegan-

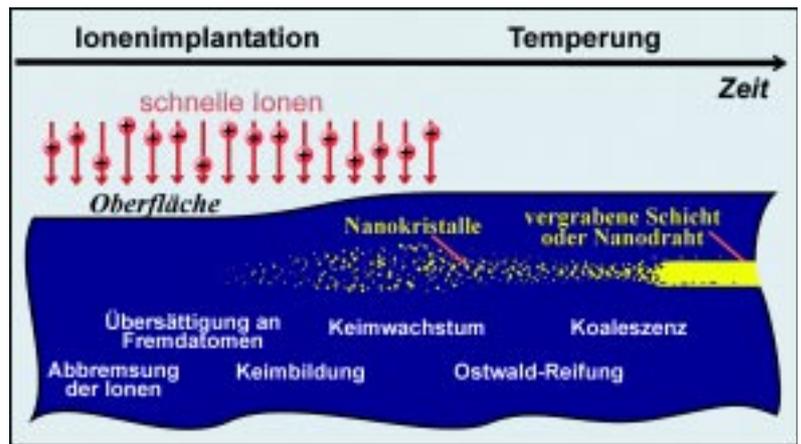


Abb. 1 Schema des Zeitablaufes der Ionenstrahlsynthese von Nanostrukturen. In einem ersten Schritt, der Ionenimplantation, werden Fremdatome in hoher Konzentration in den Festkörper eingebracht. In einem zweiten Schritt, der Temperung, scheiden sie sich aus. Betrachtet man die Zeitabfolge der physikalischen Prozesse genauer, so treffen schnelle Ionen auf den Festkörper, werden in der oberflächennahen Schicht abgebremst und führen als Fremdatome zu einer übersättigten Festkörperlösung. Durch Keimbildung und Keimwachstum baut sich die Übersättigung ab. Auch nach Abbau der Übersättigung befindet sich das physikalische System wegen seiner hohen Grenzflächenenergie noch weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht. Durch Ostwald-Reifung reduziert sich die Grenzflächenenergie, wobei die Nanokristalle weiter wachsen. Bei hoher Dichte der Nanokristalle können durch Koaleszenz dünne vergrabene Schichten und Nanodrähte synthetisiert werden. Abhängig von den konkreten Bedingungen kann sich die Festkörperoberfläche durch die eingebrachten Fremdatome anheben (wie in der Abbildung) oder durch Ionenerosion absenken.

gen, dass der Ionenstrahl ein geeignetes Werkzeug ist, beliebige Atome in einen beliebigen Festkörper einzubringen (Abb. 2, linke Spalte).



Abb. 2 Ionenstrahlen sind einzigartig mit ihren Möglichkeiten, dem Materialwissenschaftler für die Züchtung und Zählung von Nanostrukturen Prozesswege weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht zu eröffnen. Linke Spalte: Durch Ionenimplantation lässt sich praktisch jedes Element des Periodensystems in hoher Konzentration in Festkörperoberflächen einbringen, wodurch extreme thermodynamische Nichtgleichgewichtszustände entstehen können. Bei der kontrollierten Relaxation dieser Zustände ins Gleichgewicht können Nanostrukturen mit den gewünschten Eigenschaften hergestellt werden. Rechte Spalte: Durch Ionenbestrahlung kann man Festkörper auf Grund der stetigen Erzeugung von Strahlenschäden und der von selbst einsetzenden Schadensausheilung in einen stationären Zustand weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht bringen. In diesem Zustand können dissipative Strukturen entstehen, und die Evolution von Nanostrukturen kann völlig anders als im Quasigleichgewicht ablaufen (z. B. inverse Ostwald-Reifung, siehe Text), d. h. Eigenschaften von Nanokristallen, wie deren Größenverteilung, lassen sich durch Ionenbestrahlung kontrolliert verändern (zählen).

Die Ionenimplantation kann hier Zustände weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht erzeugen, nämlich übersättigte Festkörperlösungen und feindisperse Ausscheidungen. Bei der Relaxation dieser Zustände in Richtung Gleichgewicht entstehen Nanostrukturen; Nanocluster können sich dabei durch Selbstorganisation räumlich ordnen (siehe auch Abb. 4, unten).

Es gibt aber noch ein zweites Wirkungsprinzip der Ionenstrahlen (Abb. 2, rechte Spalte). Physikalisch handelt es sich hier um ein „getriebenes System“. Denn durch die Ionenbestrahlung erzeugt man im Festkörper ständig Strahlenschäden. Dieser reagiert darauf mit Schadensausheilung. In diesem Fall erlaubt es der stationäre Nichtgleichgewichtszustand unter Ionenbestrahlung (Konkurrenz zwischen Defekterzeugung und -ausheilung), die Eigenschaften von Nanostrukturen gezielt zu verändern, das heißt zu zähmen. Das betrifft insbesondere die Größenverteilung (siehe unten), aber auch die räumliche Selbstorganisation von Nanoclustern an Grenzflächen.

Ionenstrahl nur als Fremdatomquelle?

Wir haben in Zusammenarbeit mit dem Oak Ridge National Laboratory Vergleiche von Computersimulationen (Gitter-Monte-Carlo-Simulationen) mit systematischen Experimenten durchgeführt (Abb. 3). Bei den Simulationen hatten wir die Annahme gemacht, dass ein Ionenstrahl lediglich als Fremdatomenquelle

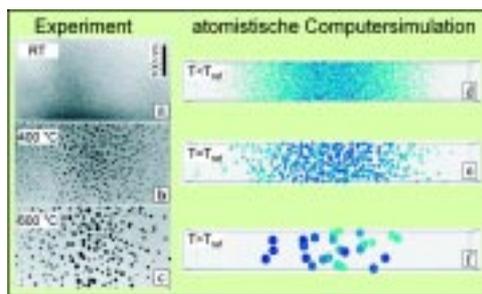


Abb. 3

Die Bildung von Gold-Nanokristallen während der Implantation von 2,75 MeV Au⁺-Ionen in Quarzglas wurde in Zusammenarbeit des FZ Rossendorf (Computersimulation) mit dem Oak Ridge National Laboratory (Experiment) untersucht. Die Elektronenmikroskopieaufnahmen (Abb. 3a-c) zeigen Tiefenverteilungen der Nanokristalle (die Quarzoberfläche befindet sich jeweils links) nach $1,5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ implantierten Goldatomen. Die Temperaturabhängigkeit der Nanokristallgröße konnte durch kinetische Gitter-Monte-Carlo-Rechnungen (Abb. 3d-f, ca. 10^7 Gitterplätze und 10^5 Atome) quantitativ verstanden werden, ohne dass bei der Modellbildung die Verlagerungen von Atomen des Quarzglas und der Goldkristalle durch Ionenstöße berücksichtigt werden mussten. Allerdings zeigte eine später durchgeführte genauere Analyse der Experimente, dass Ionenstoßprozesse die Nanokristallentwicklung stark beeinflussen können.

wirkt. Im Experiment haben wir dann die Größe von Gold-Nanoclustern mit Hilfe der Stromdichte der Goldionen und der Implantationstemperatur gesteuert.

Der Vergleich der Simulationen mit dem Experiment zeigte zwar eine qualitativ gute Übereinstimmung; allerdings haben wir auch signifikante Differenzen gefunden. Diese ließen sich beseitigen, wenn wir in den Simulationen berücksichtigt hatten, dass der Ionenstrahl nicht nur eine Fremdatomquelle ist, sondern auch Stoßkaskaden auslöst. Denn jedes Fremdatom, das in den Festkörper eindringt, kann Atome aus dem Kristallverband herausstoßen und auch diese können wiederum andere Atome von ihren Plätzen verdrängen. Dieses so genannte Ionenstrahlmischen hat großen Einfluss auf Größe und Struktur der Nanocluster, die sich dabei bilden.

Selbstorganisation bei der Ostwald-Reifung

In dem Beispiel der Gold-Implantation in Siliziumdioxid, beginnen sich die Nanocluster bei bestimmter Prozessführung schon während der Implantation zu bilden (Abb. 1).

Anders ist es bei der Implantation von Sauerstoff in Silizium. Hier sind die Sauerstoffatome zunächst im Silizium gelöst. Erst bei der Temperung bilden sich anfänglich etwa gleich große Siliziumdioxid-Nanocluster (Abb. 4a).

Computersimulationen zeigen in Übereinstimmung mit experimentellen Untersuchungen, dass sich im weiteren Verlauf der Temperung die Nanoteilchen in Abhängigkeit vom Abstand zur Siliziumoberfläche verändern. Sie werden kleiner, größer oder verschwinden ganz.

Von den zunächst gebildeten Clustern „verdampfen“ zuerst die oberflächennahen. Um die Siliziumdioxid-Nanocluster herum ist die Konzentration an gelösten Sauerstoffatomen höher als an der oxidierten Siliziumoberfläche, sodass ein Diffusionsstrom in Richtung Oberfläche einsetzt. Die oberflächennahen Cluster werden dabei kleiner und lösen sich eventuell auch auf (Abb. 4b).

Doch im Bereich der sich auflösenden Cluster wird die Konzentration an Fremdatomen so groß, dass neben der Oberfläche auch tiefer gelegene, größere Nanocluster davon profitieren und wachsen können. Haben diese wachsenden Nanocluster eine kritische Größe erreicht, werden sie stabiler, sie lösen sich nicht mehr auf und gewinnen über den Diffusionsstrom Material von noch tiefer gelegenen Clustern, die vom Auflösungsprozess nicht profitieren können (Abb. 4c). Der Prozess setzt sich fort, sodass dabei mehrere Nanoclusterschichten entstehen können (Abb. 4d).

Selbstorganisation in strukturierten Oberflächen

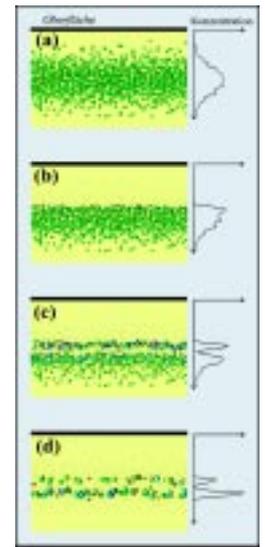
Im vorigen Beispiel haben sich Nanocluster spontan in separate Lagen geordnet. Allerdings sind derartige Selbstorganisationsprozesse schwer zu kontrollieren. Es gibt immer zufällige Fluktuationen, die eine solche Ordnung stören. Dagegen lassen sich Fluktuationen weitgehend unterdrücken, wenn sich der Selbstorganisationsprozess an vorgegebene Oberflächenstrukturen anpassen muss.

So kann man eine (001)-Siliziumkristalloberfläche durch eine Maske abdecken und eine Ätzflüssigkeit nur durch einen, in $\langle 110 \rangle$ -Richtung orientierten Spalt auf den Kristall einwirken lassen. Verwendet man eine anisotrope Ätze, eine Ätze also, die nur bestimmte Kristallrichtungen angreift, so kann man damit durch (111)-Kristallflächen begrenzte v-förmige Gräben erzeugen (Abb. 5a). Lässt man nun eine dünne Siliziumdioxid-Schicht wachsen und implantiert in die v-Gräben Fremdatome, so ist in den Seitenwänden der Gräben auf Grund der Neigung die Flächendichte der eingebrachten Fremdatome geringer als außerhalb. Deshalb ist auch am Boden der Gräben die Fremdatomkonzentration höher als in den Seitenwänden. Zusätzlich wird bei Niederenergie-Ionenimplantation durch Ionenerosion Material von den Seitenwänden abgetragen und auf die gegenüberliegende Wand deponiert. Der Prozess führt zu einer Anreicherung der implantierten Atome in der Grabenspitze. In unserem Experiment haben wir erwartet, dass sich die erhöhte Fremdatomkonzentration in der Grabenspitze durch die oben beschriebene Ostwald-Reifung und Koaleszenz zu einem Draht organisieren kann (Abb. 5b). Elektronenmikroskopische Untersuchungen bestätigen die Voraussagen (Abb. 5c). Es ist ein Germaniumdraht von etwa 30 Nanometern (millionstel Millimeter) Durchmesser in der v-Grabenspitze entstanden. Auch die Computersimulation zeigt: Aus einer radial verteilten, etwa 30-prozentigen Fremdatomkonzentration bildet sich ein Nanodraht.

Doch bei sehr langer Temperung bleibt der Draht so nicht erhalten. Schon vor über 100 Jahren fand Lord Rayleigh, dass zylindrische Körper, also auch Drähte, instabil sind. Es entstehen Verdickungen und Einschnürungen, und durch diese Rayleigh-Instabilität zerfallen Drähte in Tröpfchen. Der Zerfallsprozess wird durch die Grenzflächenenergie getrieben: Bei Nanodrähten ist das Verhältnis von Grenzflächenenergie zu Volumenenergie so hoch, dass letztere auch durch Volumen- und/oder

Abb. 4

Bei der Temperung ionenimplantierter Schichten kann es zur Selbstorganisation der Nanocluster kommen. Die hier dargestellte Computersimulation der Ostwald-Reifung zeigt die zeitliche Entwicklung der Nanocluster ((a)-(d)). Aus einem gaußförmigen Tiefenprofil etwa gleich großer Nanocluster (a) entstehen zwei deutlich voneinander getrennte Nanoclusterlagen (d).



Grenzflächendiffusion in endlicher Zeit zerfallen können.

Glaubt man den Ergebnissen linearer Stabilitätsanalysen, zerfallen Drähte so, dass sich eine Kette äquidistanter, gleich großer Nanocluster bilden sollte. Derartige Nanoclusterketten sind für nanooptische Anwendungen außerordentlich interessant. Wissenschaftler im Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung und dem California Institute of Technology forschen daher an der Herstellung und der Anwendung von Gold-Nanoclusterketten in Quarzscheiben und Siliziumdioxid-Schichten.

Dabei haben wir Computersimulationen zur Rayleigh-Instabilität durchgeführt (Abb. 6): Ein unendlich langer Draht setzt sich in der atomistischen Simulation aus periodisch wie-

Abb. 5

Vorstrukturierte Siliziumoberflächen verbessern die Kontrolle der Selbstorganisation von Nanostrukturen nach Niederenergie-Ionenimplantation. In der schematischen Darstellung (a) wird eine (001)Si-Oberfläche gezeigt, in welche mit Hilfe einer Maske und anisotropem Ätzen ein v-Graben hergestellt wurde. Nach Entfernen der Maske wurde die Si-Oberfläche oxidiert. Bei einer nachfolgenden Ionenimplantation ist die Konzentration der deponierten Atome am Grabenboden erhöht weil durch Ionenzerstäuben und Wiederablagerung Material der implantierten Oberflächenschicht zum Grabenboden transportiert wird. Bei einer nachfolgenden Temperbehandlung war, wie im Schema (b) gezeigt, durch Ostwald-Reifung und Koaleszenz die Selbstorganisation eines Nanodrahtes zu erwarten. Das Querschnitts-Transmissionselektronenmikroskopiebild (c) eines v-Grabens zeigt nach Ge⁺-Implantation und Ausheilung den erwarteten Nanodraht am Grabenboden. Zusätzlich wird in (c) das Ergebnis einer 3D kinetischen Monte-Carlo-Simulation gezeigt. Die Simulationen verbessern das Grundlagenverständnis der Syntheseprozesse.

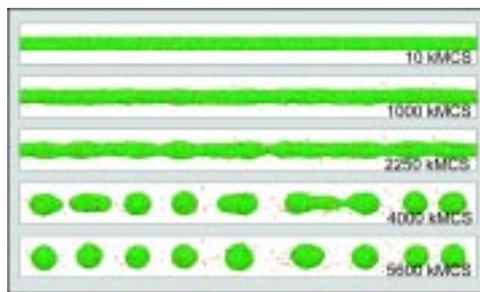
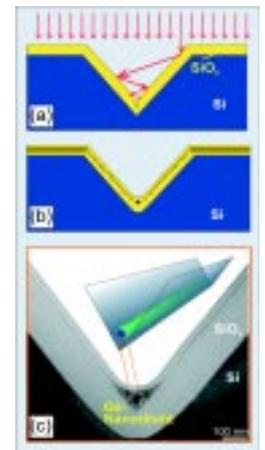


Abb. 6

Nanodrähte, die zum Beispiel mit der in Abb. 5 beschriebenen Ionenstrahlsynthese hergestellt werden, sind thermodynamisch nicht stabil und können bei längerer Temperung wegen der so genannten Rayleigh- oder „Pearling“-Instabilität in Nanocluster zerfallen. Gezeigt sind die Ergebnisse einer kinetischen Monte-Carlo-Simulation mit etwa 400 000 Atomen, die anfangs einen 8,6 Nanometer, unendlich langen Draht bilden. In der Simulation dominiert Grenzflächendiffusion. Nach 2 250 kMCS = 2 250 000 Monte-Carlo-Schritten haben sich peristaltische Dickenschwankungen gebildet, die nach weiteren 1000 kMCS zum vollständigen Zerfall des Drahtes führen. Durch diesen Prozess entstehende Nanoclusterketten, -winkel et cetera. Diese sind interessant für Anwendungen in der Photonik (siehe Text).

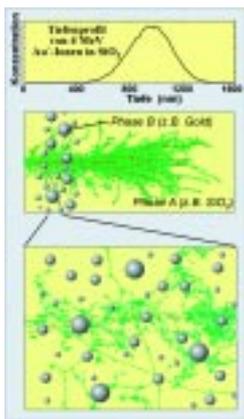


Abb. 7

TRIM-Rechnungen für das Ionenstrahlmischen von Nanokristallen der Phase B (hier Gold), die in der Phase A (hier Quarz) eingebettet sind. Die Goldionen kommen weit hinter den Nanokristallen zur Ruhe (oberes Diagramm). Jedes primäre Ion (rote Spuren in mittlerer Abbildung) erzeugt durch Stöße mit den Festkörperatomen einen Schauer von Rückstoßatomen (grüne Spuren), die auf Grund von Mehrfachstreuung nahezu isotrop in alle Richtungen fliegen (unteres Bild). Diese schnellen Rückstoßatome stoßen Atome aus den Nanokristallen in die Festkörpermatrix. Durch das Ionenstrahlmischen unterscheidet sich die Evolution von Nanokristallen unter Ionenbestrahlung grundsätzlich von der im Quasigleichgewicht.

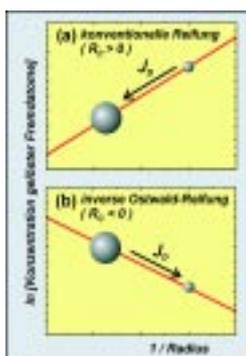


Abb. 8

Abhängigkeit der im Festkörper gelösten Konzentration an Nanokristallatomen vom Radius bei konventioneller Temperbehandlung (a) und unter Ionenbestrahlung (b). Bei hinreichend intensiver Ionenbestrahlung oder niedriger Bestrahlungstemperatur wird die Kapillaritätslänge R_c negativ. Das führt im Ensemble vieler Nanocluster zu einem Diffusionsstrom von großen zu kleinen Clustern, das heißt zur inversen Ostwald-Reifung.

derkehrenden, etwa 300 Nanometer langen Stücken zusammen, die je 400 000 Atome enthalten. Der Draht ist Anfangs etwa neun Nanometer dick. In einem sehr lange dauernden Prozess beginnt er sich zunächst in seiner Dicke zu verändern; er wird unregelmäßig und es entstehen Einschnürungen. Danach setzt ein sehr schneller Zerfallsprozess ein, und es entstehen Nanocluster. Es ist erstaunlich, dass selbst aus dünnsten Drähten Nanocluster mit großer Regelmäßigkeit, also mit gleichem Radius und Abstand entstehen. Und wir erwarten, dass diese Regelmäßigkeit zunimmt, je dicker der Draht ist.

Chaos und Ordnung unter Ionenbeschuss

Wie bereits erwähnt, lösen primäre Ionen im Festkörper eine Stoßkaskade aus. Ein schweres primäres Ion, wie zum Beispiel Gold, kann je nach Implantationsenergie mehrere Tausend Festkörperatome aus ihrer Gleichgewichtslage versetzen (Ionenstrahlmischen). Diese Atome sind sofort bestrebt, auf thermodynamisch günstige Positionen zurückzukehren (Relaxation). Daraus ergibt sich schon während der Bestrahlung ein Wettbewerb zwischen Ionenstrahlmischen und Relaxation. In einem solchen getriebenen System, fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht, kann man Nanostrukturen zähmen, das heißt mit Eigenschaften versehen, die mit einer Prozessführung nahe am Gleichgewicht nicht erreichbar wären.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, diesen Umstand auszunutzen. Zum Beispiel lässt sich damit eine monodisperse Nanoclustergrößenverteilung synthetisieren: Die „inverse Ostwald-Reifung“ unter Ionenbestrahlung haben wir kürzlich im FZ Rossendorf entdeckt.

Die Standard-Ionenstrahlmischung führt zu einer breiten Größenverteilung. Nun sind aber die interessanten Effekte, die Nanocluster bewirken können, stark größenabhängig: Die Wellenlänge zum Beispiel, bei der ein Nanocluster leuchtet, oder die Spannung, bei der eine Elementarladung in einen Cluster gelangen kann, beide Phänomene sind sehr stark von der Größe und der Regelmäßigkeit der Nanoteilchen abhängig. – Eine Methode zur Erzeugung monodisperser Verteilungen, das heißt die Zähmung der Größenverteilung, ist somit für viele Anwendungen schlichtweg eine Voraussetzung.

Ein weiteres Beispiel bezieht sich auf die Kontrolle der räumlichen Lage von Nanokristallen. Auch hier ist im FZ Rossendorf eine entschei-

dende Entdeckung gelungen: Durch Ionenbestrahlung können Nanokristalle in einem kontrollierbaren Abstand zu einer Grenzfläche angeordnet werden. Diese Entdeckung ist für die Realisierung neuartiger, nichtflüchtiger Speicherelemente sehr wichtig, die jetzt das FZ Rossendorf im Rahmen eines Europaprojektes mit den Industriepartnern STMicroelectronics und ZMD Dresden sowie mit internationalen Forschungseinrichtungen entwickelt.

Inverse Ostwald-Reifung

Wir haben theoretisch untersucht, was mit Nanokristallen unter Ionenbestrahlung geschieht (TRIM-Rechnungen; Abb. 7). Dabei haben wir angenommen, dass sich Nanokristalle mit einer breiten Größenverteilung unter der Oberfläche befinden, und wir mit schweren Ionen durch die Clusterschicht hindurch schießen.

Schon für wenige primäre Ionen ergibt sich dabei eine hohe Dichte an Rückstoßatomen, Atome also, die ihren angestammten Platz verlassen müssen. Die Simulation der Bestrahlung einer Schicht aus Nanoclustern zeigt weiterhin, dass die Rückstoßatome wegen Mehrfachstreuung näherungsweise gleichmäßig in alle Richtungen fliegen. Dabei stoßen sie nun ihrerseits Atome aus den Nanoteilchen heraus. Dieses Ionenstrahlmischen ist eine wichtige Voraussetzung für die Diffusion der Clusteratome im umgebenden Festkörper. Ist während der Ionenbestrahlung die Proben-temperatur hoch (zum Beispiel über 600 Grad Celsius für Gold in Siliziumdioxid) dominiert das thermische Verdampfen der Cluster, das heißt das Ionenstrahlmischen ist vernachlässigbar: Kleine Nanocluster haben eine höhere Löslichkeit als große (Abb. 8a). Damit diffundiert Clustermaterial von kleinen zu großen Clustern – und die Kleineren verdampfen (Abb. 9, linke Spalte). Für große Ensembles führt der Wettbewerb zwischen den Nanokristallen zur Ostwald-Reifung, in deren Ergebnis sich eine typische, breite Größenverteilung einstellt (Lifshitz-Slyosov-Wagner Verteilung). Anders stellen sich die Verhältnisse bei einer hinreichend intensiven Ionenbestrahlung während der Temperung bei Temperaturen unter 600 Grad Celsius dar. Jetzt gibt es praktisch kein thermisches Verdampfen der Cluster mehr, und die Atome können nur noch durch den Ionenstrahl aus dem Cluster herausgestoßen werden. Dabei ist das Ionenstrahlmischen für große Cluster etwas intensiver, weshalb nun Clustermaterial von großen Clustern zu kleineren diffundieren kann (Abb. 8b). Das Computereperiment bestätigt die

theoretische Vorhersage (rechte Spalte in Abb. 9). Die großen Cluster lösen sich so lange zu Gunsten der kleinen auf, bis alle Cluster gleich groß sind. Damit findet man für große Ensemble unter optimierter Ionenbestrahlung eine monodisperse Verteilung, wie sie für viele Anwendungen erforderlich ist. Auch den experimentellen Beweis für diese Entdeckung haben wir kürzlich am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung erbracht.

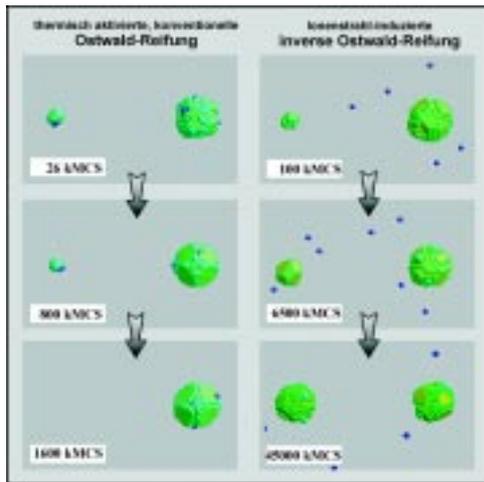


Abb. 9
Kinetische Monte-Carlo-Simulationen zur Reifung von zwei Nanokristallen in einem abgeschlossenen Volumen. Die Simulationen der linken und rechten Spalte starten mit der gleichen Anfangskonfiguration und laufen unter identischen thermischen Bedingungen ab. In der rechten Spalte wurden zusätzlich durch Ionenbestrahlung hervorgerufene Atomverlagerungen berücksichtigt. Während bei der rein thermischen Prozessführung (links) große Nanokristalle auf Kosten der kleinen wachsen, sind unter Ionenbestrahlung (rechts) kleine Nanokristalle die stabileren. Für große Ensemble resultiert daraus eine breite Nanokristallgrößenverteilung für den linken Fall und eine monodisperse Verteilung unter Ionenbestrahlung.

Nanokristall- δ -Schichten

Das oben beschriebene Ionenstrahlmischen und die inverse Ostwald-Reifung gelten nicht nur für Nanokristalle, sondern auch für den Grenzfall ebener Grenzflächen. Ein außerordentlich interessanter Selbstorganisationseffekt an Grenzflächen resultiert aus der zusätzlich gefundenen Tatsache, dass unter Ionenbestrahlung kleine Cluster nicht nur stabiler sein können als große, sondern dass kleine sogar wachsen können während große sich durch Verdampfung verkleinern.

Wir haben in eine Siliziumdioxid-Schicht, die auf Silizium aufgebracht war, Germanium-Ionen implantiert und anschließend getempert (Abb. 10a). Wenige Nanometer über der Silizium/Siliziumdioxid-Grenzfläche ist danach eine Schicht aus Germanium-Nanokristallen sichtbar. Dieses Ergebnis ist auf den ersten

Blick überraschend, wenn man sich das Bild der Germanium-Verteilung für die Implantationsbedingungen anschaut (Abb. 10b): Die Germanium-Ionen kommen überwiegend in der Mitte der Siliziumdioxid-Schicht zur Ruhe, kaum ein Ion erreicht die Siliziumdioxid/Silizium-Grenzfläche.

Wieso findet man keine Germanium-Ausscheidungen im Zentrum der Siliziumdioxid-Schicht, sondern nur an der Grenzfläche? Eine Teilerantwort auf die Frage findet man, wenn man auch die Trajektorien der Sauerstoff- und Siliziumrückstoßatome berechnet (rot in Abb. 10c). Ein Vergleich der Experimente mit TRIM-Rechnungen zeigte, dass immer dann, wenn wir die Clusterschicht direkt über der Grenzfläche beobachten konnten, jedes Grenzflächenatom bei der Ionenimplantation einige wenige Male seinen Platz wechselte.

Diese Erkenntnis haben wir in kinetischen Gitter-Monte-Carlo-Simulationen berücksichtigt (Abb. 11a). Dabei zeigte sich, dass sich während der Ionenimplantation eine dünne Schicht von Silizium-Nanoclustern über der Silizium/Siliziumdioxid-Grenzfläche bildet (Abb. 11a). Ein zweiter Effekt, nämlich die Zerstörung der Siliziumdioxid-Struktur durch den Ionenstrahl, trägt zusätzlich zur Anreicherung von Silizium im Oxid an der Grenzfläche bei. Während der nachfolgenden Temperung wirken die kleinsten Silizium-Cluster an der Grenzfläche für die feste, übersättigte Lösung an implantiertem Germanium als Keime. Nur Keime mit einem Mindestabstand von der Grenzfläche können im Prozess der Ostwald-Reifung überleben, sodass eine Schicht aus Nanoclustern entsteht (Abb. 11b).

Nanocluster- δ -Schichten (Abb. 12a) sind für die Mikroelektronikindustrie von größtem Interesse, da sie alle Voraussetzungen erfüllen,

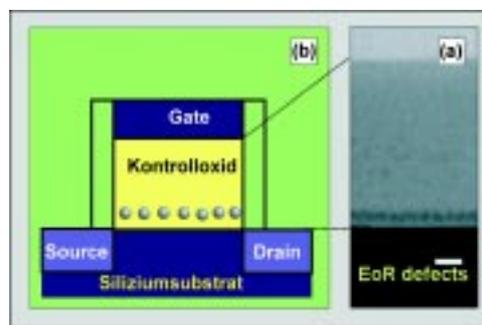


Abb. 12
Die selbstorganisierte Nanocluster- δ -Schicht an der SiO_2/Si -Grenzfläche (a) erfüllt die Anforderungen, wie sie an einen nichtflüchtigen Nanocluster-MOS-Speichertransistor (b) zu stellen sind. Die in der TEM-Aufnahme (a) sichtbaren und in (b) schematisch dargestellten Nanocluster befinden sich wenige Nanometer von der SiO_2/Si -Grenzfläche entfernt, sodass sie durch direktes Tunneln be- und entladen werden können.

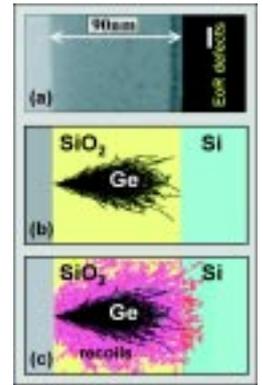


Abb. 10
Die Querschnitts-Elektronenmikroskopieaufnahme (a) zeigt eine Ge-implantierte SiO_2 -Schicht auf (001)Si nach Temperung. Für die gewählte Ionenenergie sind in (b) die berechneten Ge-Trajektorien gezeichnet die zeigen, dass nur ein minimaler Teil der Ge-Dosis die SiO_2/Si -Grenzfläche erreicht. Unerwartet findet man jedoch im Bereich der stärksten Ge-Deponierung (Oxidmitte) keine Ge-Ausscheidungen, wogegen wenige Nanometer vor der Grenzfläche eine Nanocluster- δ -Schicht gefunden wird (a). Die Selbstorganisation der δ -Schicht kann man verstehen, wenn man die Wirkung der Lawine an Sauerstoff- und Silizium-Rückstoßatomen (rot in (c)) auf die Grenzfläche untersucht.

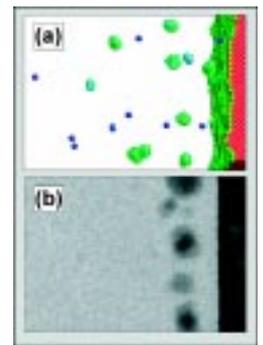
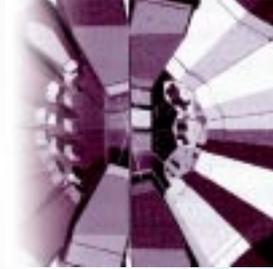
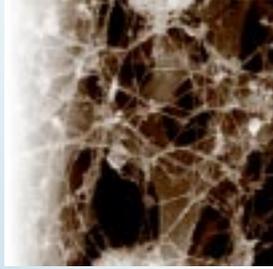
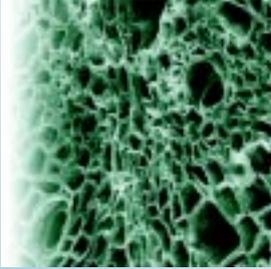


Abb. 11
(a) Kinetische 3D Gitter-Monte-Carlo-Simulation der Mischung von Si-Substratatomen ins SiO_2 durch die Stoßkaskade bei der Ionenimplantation. Wegen der negativen Kapillaritätslänge ist die Grenzfläche instabil, wogegen während der Bestrahlung die winzigen Cluster relativ stabil sind. Bei der nachfolgenden Temperung dienen die Si-Cluster als Keime für die Heteronukleation von Ge, sodass sich eine Nanocluster- δ -Schicht, wie in der TEM-Aufnahme (b) gezeigt, bilden kann.

die für bestimmte Nanocluster-Speichertransistoren (MOS) (Abb. 12b) gefordert werden: So befinden sich die Nanocluster in einem Abstand zum Siliziumsubstrat, der für das direkte Tunneln von Elektronen geeignet ist; sie besitzen eine fast einheitliche Größe und sind an der Grenzfläche in hinreichend großer Flächendichte vorhanden. Sowohl die Synthese als auch die Eigenschaften von Nanocluster-MOS-Speichertransistoren werden gegenwärtig im Rahmen eines Verbundprojektes mit mehreren europäischen Ländern untersucht.

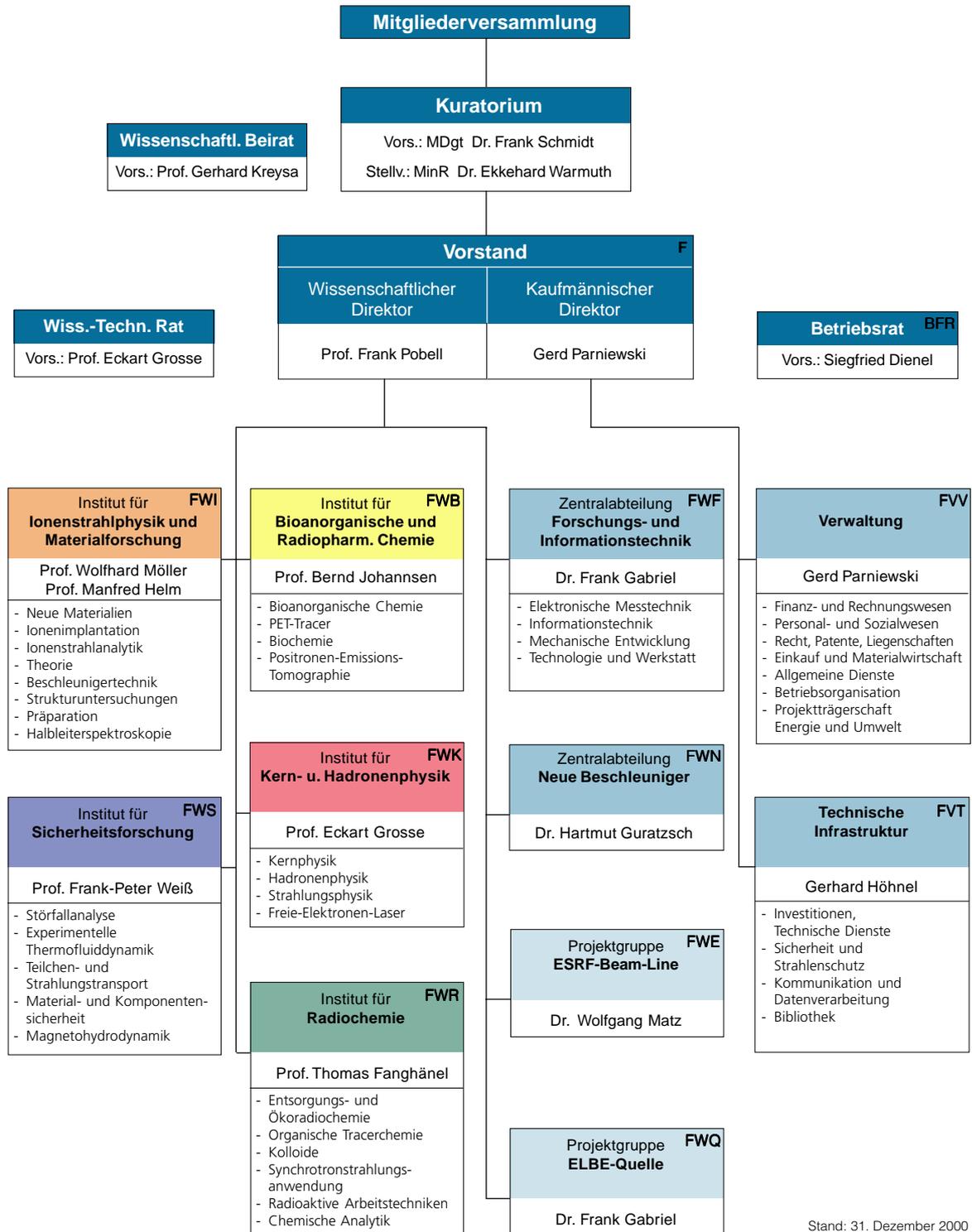
So ist der Ionenstrahl keineswegs nur eine Fremdatomquelle, sondern ein Werkzeug zum Formen ganz bestimmter, definierter

Strukturen. Er kann damit für zukünftige Nanotechnologien einen ähnlich hohen Stellenwert erlangen wie er ihn gegenwärtig bei der Dotierung von Halbleitern in der Mikroelektronik besitzt. Ein großer Vorteil ist die gute Kontrollierbarkeit des Ionenstrahls. Voraussetzung für seine Anwendung in Nanotechnologien sind die vielfältigen Selbstorganisationsprozesse, die bei der Ionenstrahlbearbeitung beobachtet werden. Diese können wir aber nur auf der Basis eines guten physikalischen Verständnisses beherrschen und optimieren. Neben vielversprechenden anwendungsnahen Entwicklungen mit Industriepartnern sind daher parallel vertiefende Grundlagenuntersuchungen erforderlich.



DATEN UND FAKTEN

Organigramm



Organe und Gremien

Das Forschungszentrum Rossendorf e.V. (FZR) wurde am 6. 12. 1991 als gemeinnütziger Verein gegründet. Es wird als Einrichtung der „Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz“ zu je 50 % von der Bundesrepublik Deutschland und den Ländern getragen.

Mitgliederversammlung

Die Mitgliederversammlung besteht aus juristischen und natürlichen Personen. Sie hat die nach Vereinsrecht üblichen Kompetenzen. Beschlüsse über Satzungsänderungen oder Auflösung des Vereins bedürfen der Zustimmung des Landes.

Kuratorium

Das Kuratorium ist das umfassende Aufsichtsorgan. Es entscheidet in den grundsätzlichen Angelegenheiten des Vereins und bestimmt die Richtlinien seiner Aufgabenstellung. Das Kuratorium überwacht die Einhaltung der satzungsgemäßen Aufgaben und kontrolliert insoweit die Tätigkeit des Vorstands. Im Kuratorium verfügen das Land und der Bund jeweils über drei Stimmen; weiterhin gehören ihm ein von der Mitgliederversammlung gewähltes Mitglied des Vereins sowie ein vom Vorstand vorgeschlagener und von der Mitgliederversammlung zu wählender Sachverständiger an. Den Vorsitz führt ein Vertreter des Landes, stellvertretender Vorsitzender ist ein Vertreter des Bundes.

Der Vorstand des Vereins und der Vorsitzende des Wissenschaftlichen Beirats nehmen mit beratender Stimme und der Vorsitzende des Wissenschaftlich-Technischen Rates als weiterer Gast an den Sitzungen des Kuratoriums teil.

Das Kuratorium besteht am Ende des Berichtszeitraums aus folgenden Mitgliedern:

MDgt Dr. Frank Schmidt (Vorsitzender)	Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
MinR Dr. Ekkehard Warmuth (Stellv. Vorsitzender)	Bundesministerium für Bildung und Forschung
MR Dr. Reinhard Zimmermann	Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
ROR Stefan Rix	Sächsisches Staatsministerium der Finanzen
Dr. Frank Gabriel	Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Prof. Dr. Peter Fulde	Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme

Vorstand

Der Vorstand des FZR setzt sich wie folgt zusammen:

Prof. Dr. Frank Pobell	Wissenschaftlicher Direktor (Sprecher des Vereins) Kordinierung, langfristige Aufgabenplanung, Erfolgskontrolle, Außenbeziehungen, Institute, wissenschaftlich-technische Organisationseinheiten
Gerd Parniewski	Kaufmännischer Direktor Kaufmännische Angelegenheiten, Rechts-, Personal- und Sozialwesen, Controlling, technische Verwaltung/Infrastruktur, Liegenschaften

Wissenschaftlicher Beirat

Der Wissenschaftliche Beirat berät das Kuratorium und den Vorstand in allen wissenschaftlichen, technischen und organisatorischen Fragen von Gewicht. Er erarbeitet Vorschläge und Empfehlungen zu den vom Forschungszentrum zu bearbeitenden Forschungsfeldern und zu dessen Arbeitsplanung. Er bewertet periodisch Forschungsleistungen und Arbeitspläne.

Dem Wissenschaftlichen Beirat gehören folgende Mitglieder an:

Prof. Gerhard Kreysa (Vorsitzender)	DECHEMA Frankfurt
Prof. Dirk Schwalm (stellv. Vorsitzender)	Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
Prof. Hartmut Backe	Institut für Kernphysik, Universität Mainz
Prof. Ulrich M. Gösele	Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle
Prof. Axel Kleemann	
Prof. Jens Volker Kratz	Institut für Kernchemie, Universität Mainz
Prof. Wolfgang Kröger	PSI Villigen
Prof. Achim Mehlhorn	Technische Universität Dresden
Prof. Vadim Ivanovich Nefedov	Institut für Allgemeine und Anorganische Chemie, Moskau
Prof. August Schubiger	PSI Villigen

Wissenschaftlicher Beirat des PET-Zentrums Rossendorf

Im Oktober 1997 wurde der Wissenschaftliche Beirat des PET-Zentrums Rossendorf gegründet. Er berät die Kooperationspartner FZR und TU Dresden in allen wissenschaftlichen, technischen und organisatorischen Fragen der Arbeit des PET-Zentrums. Ihm gehören an:

Prof. Albert Gjedde	PET-Center des Universitätskrankenhauses Århus
Prof. August Schubiger	PSI Villigen
Prof. Willem Vaalburg	PET-Center der Universität Groningen

Wissenschaftlich-Technischer Rat

Durch den Wissenschaftlich-Technischen Rat stellt der Vorstand eine angemessene Beteiligung der wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter an der Erarbeitung der wissenschaftlichen und technischen Programme sicher.

Dem Wissenschaftlich-Technischen Rat gehören die Direktoren der wissenschaftlichen Institute, Leiter zentraler eigenständiger wissenschaftlich-technischer Abteilungen und gewählte Vertreter der wissenschaftlich-technischen Mitarbeiter des Forschungszentrums an.

Mitglieder des Wissenschaftlich-Technischen Rates:

Prof. Eckart Grosse (Vorsitzender)	Dr. Ruprecht Fülle
Prof. Gert Bernhard (stellv. Vorsitzender)	Dr. Frank Gabriel
Prof. Thomas Fanghänel	Dr. Hartmut Guratzsch
Prof. Manfred Helm	Dr. Wolfgang Enghardt
Prof. Bernd Johannsen	Dr. Gunter Gerbeth
Prof. Wolfhard Möller	Dr. Hans-Jürgen Pietzsch
Prof. Frank-Peter Weiß	Dr. Bernd Schmidt

Der Vorstand nimmt an den Sitzungen des Wissenschaftlich-Technischen Rates mit beratender Stimme und der Vorsitzende des Betriebsrates als weiterer Gast teil.

Betriebsrat

Der Betriebsrat des Forschungszentrums Rossendorf setzt sich wie folgt zusammen:

Siegfried Dienel (Vorsitzender)	Christian Damm	Steffen Schaller
Jörg Voigtländer (stellv. Vorsitzender)	Bernd Hartmann	Christel Schneiderit
Monika Bulenda	Martina Jähnichen	Dr. Rudi Wünsch
Dr. Harald Curian	Sabine Pfortner	

Überblick 1999/2000

Name:	FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF e.V.	
Träger:	Freistaat Sachsen, Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst	
Finanzierung:	Grundfinanzierung: 50 % Länder, 50 % Bundesrepublik Deutschland	
Planstellen:	427,5; davon 131 Wissenschaftlerstellen (Ist 31. 12. 1999)	/ 419,5; davon 131 Wissenschaftlerstellen (Ist 31. 12. 2000)
Drittmittelstellen:	119,69 Personenjahre (Ist 31. 12. 1999)	/ 99,46 Personenjahre (Ist 31. 12. 2000)
Doktoranden:	43 (Ist 31. 12. 1999)	/ 34 (Ist 31. 12. 2000)
Grundfinanzierung:	86.309,8 TDM	/ 86.529,5 TDM
Sondermittel:	2.777,4 TDM	/ 1.223,4 TDM
Drittmittel:	13.679,6 TDM	/ 15.229,8 TDM
Organe:	Mitgliederversammlung Kuratorium Vorstand Wissenschaftlicher Beirat	
Wissenschaftliche Institute:	Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie Institut für Radiochemie Institut für Sicherheitsforschung Institut für Kern- und Hadronenphysik	
Wissenschaftliche Infrastruktur:	Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik Zentralabteilung Neue Beschleuniger	
Technische Infrastruktur:	Investitionen, Technische Dienste Sicherheit und Strahlenschutz Kommunikation und Datenverarbeitung Bibliothek	

Übersicht über die Forschungsschwerpunkte und -vorhaben 1999/2000

Materialforschung

- Dünne Schichten FWI
- Plasma-Immersions- und Niederenergie-Implantation FWI
- Hochenergie-Ionenstrahlanalytik FWI
- Werkstoffe für Medizin und Biotechnologie FWI
- Feinfokussierter Ionenstrahl FWI
- Nanostrukturen FWI
- Halbleitermaterialien FWI
- Halbleiterspektroskopie FWI
- Material- und Komponentensicherheit FWS
- Teilchen- und Strahlungstransport (Neutronenbelastung) FWS

Biomedizin-Chemie, Umwelt

- Radiotracerdesign und Radiopharmazie FWB
- Untersuchungen zu Neurorezeptoren und Hirnfunktionen FWB
- Untersuchungen zur Tumordiagnostik und Tumorthrapiekontrolle FWB
- Bioaktive Substanzen FWB
- Untersuchungen zu Herz und Gefäßen FWB
- Biomedizinische Untersuchungen mit physikalischen Methoden FWK
- Aquatische Chemie der Actiniden/Radionuklide FWR
- Wechselwirkung von Actiniden/Radionukliden mit Mineral- und Gesteinsoberflächen und Kolloiden FWR
- Wechselwirkung von Actiniden/Radionukliden mit biologischen Systemen FWR
- Modellierung des Radionuklidtransports FWR
- Entwicklung und Anpassung spektroskopischer Methoden FWR
- Teilchen- und Strahlungstransport (Radionuklidtransport) FWS

Kern-, Hadronen- und Strahlungsphysik

- Strahlungsquelle ELBE FWK
- Forschung mit kohärenter Infrarotstrahlung FWK
- Nichtkonventionelle Röntgenquellen FWK
- Biomedizinische Untersuchungen mit physikalischen Methoden FWK
- Kernphysik mit Bremsstrahlung FWK
- Untersuchungen zur Struktur mittelschwerer Kerne FWK
- Elektromagnetische Signale von Hadronensystemen und das HADES-Projekt FWK
- Strangeness in Hadronenreaktionen FWK

Sicherheitsforschung

- Modelle für die Störfallanalyse FWS
- Thermofluiddynamik FWS
- Magnetohydrodynamik (MHD) elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten FWS
- Material- und Komponentensicherheit FWS
- Sicherheit und Effektivität chemischer Prozesse FWS
- Teilchen- und Strahlungstransport FWS

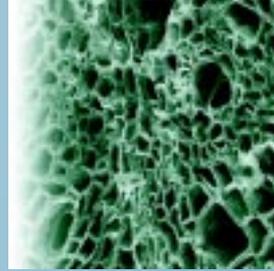
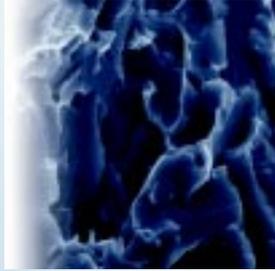
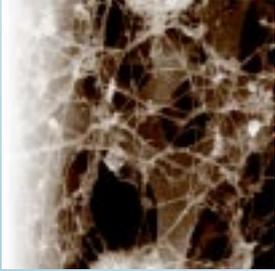
Projekte

- ESRF-Beamline
- ELBE-Strahlungsquelle

Übersicht über die zentrumsübergreifende Zusammenarbeit 1999/2000

Im Berichtszeitraum ist die zentrumsübergreifende Zusammenarbeit weiter intensiviert worden. Dazu hat zum einen beigetragen, dass die wissenschaftlich-technische und methodische Ausstattung der Institute und Zentralabteilungen des Zentrums immer attraktiver für die Durchführung gemeinsamer Forschungsarbeiten und -vorhaben geworden ist. Zum anderen führen zentrumsübergreifende Veranstaltungen zunehmend zum Erkennen von gemeinsamen Interessen und Kooperationsmöglichkeiten. Eine Intensivierung der Zusammenarbeit erfolgte auf allen Schwerpunkt-Arbeitsgebieten des FZR. Verstärkt wurden insbesondere die gemeinsamen Bemühungen zur wissenschaftlichen Vorbereitung und zum Aufbau der ELBE-Strahlungsquelle.

Forschungsschwerpunkt	Gegenstand der Zusammenarbeit	beteiligt sind:
Materialforschung	Untersuchungen mit Strahlung <ul style="list-style-type: none"> ■ Rossendorfer Beamline ROBL an der ESRF in Grenoble ■ Röntgendiffraktometrie und -reflektometrie ■ Spektroskopie und Materialmodifikation mittels Infrarotstrahlung 	FWI, FWF FWI, FWS FWI, FWK
	Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen an modifizierten Materialien und Werkstoffen	FWS, FWI
Biomedizin-Chemie, Umwelt	Positronen-Emissions-Tomographie <ul style="list-style-type: none"> ■ Technologische Entwicklung im PET-Zentrum ■ In-situ-PET-Monitoring für die Schwerionen-Tumorthherapie ■ PET-Verfahren zur Untersuchung fluidmechanischer Transportvorgänge in Mehrphasensystemen 	FWB, FWF FWK, FWB FWS, FWK FWB, FWF
	Radionuklide in Bio- und Geosphäre <ul style="list-style-type: none"> ■ Chemie des Technetiums und der Actinide ■ Molekülstrukturanalyse radioaktiver Verbindungen ■ Untersuchungen zum Radionuklidtransport ■ Analysen von Actinidverbindungen und deren Sorbaten an Oberflächen ■ Wechselwirkung von Mikroorganismen mit Radionukliden 	FWB, FWR FWB, FWR FWR, FWS FWR, FWI FWR, FWS
Kern- und Strahlungsphysik	Strahlungsquelle ELBE <ul style="list-style-type: none"> ■ Fertigstellung ■ Planung des wissenschaftlichen Programms (IR-, Röntgen- und Bremsstrahlung, Neutronen) ■ Vorbereitung von Experimenten (IR-, Röntgen- und Bremsstrahlung, Neutronen) 	FWF, FWN, FWK, FWS FWK, FWI, FWR, FWS FWK, FWI, FWR, FWS FWB, FWF



ÜBERBLICK

Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

Zielstellung – ein Überblick

Das Institut betreibt anwendungsorientierte Materialforschung auf den Gebieten der Modifizierung von Oberflächen und der Oberflächenanalytik mittels Ionenstrahlen sowie seit 2000 auf dem Gebiet der Spektroskopie und Materialuntersuchung an Halbleitern. Den Empfehlungen des Deutschen Wissenschaftsrats folgend, hat sich das Institut zu einem überregionalen und internationalen Ionenstrahlzentrum entwickelt, welches neben den eigenen Forschungsarbeiten Universitäten, anderen Forschungsinstituten und der Industrie Dienstleistungen bzw. Technologietransfer hinsichtlich Ionenstrahltechniken anbietet.

Für diese Ziele ist ein breites Spektrum von Ionenanlagen verfügbar, die Ionen mit Energien von etwa 10 eV (Plasmabehandlung) bis zu einigen 10 MeV (elektrostatische Beschleuniger) bereitstellen. Für die Diagnostik von Ionenbehandelten Oberflächen sind Standard-Analysetechniken wie Elektronenmikroskopie, Röntgenbeugung, Auger- und Photoelektronenspektroskopie sowie eine Reihe chemischer, optischer, elektrischer und mechanischer Geräte vorhanden. Die Probenpräparation ist für eine große Zahl unterschiedlicher Materialien ausgelegt und schließt Standardtechniken der Silizium-Planartechnologie ein.

Mit der Einsetzung eines zweiten Direktors und der Gründung einer neuen Abteilung „Halbleiterspektroskopie“ wurde im Jahre 2000 eine neue Arbeitsrichtung aufgenommen, die sich mit der Untersuchung elektronischer und optischer Eigenschaften von Halbleitern und Halbleiterquantenstrukturen beschäftigt, besonders in Hinblick auf deren optoelektronische Anwendungen. Ein spezieller Schwerpunkt liegt dabei in der Untersuchung der Dynamik von Ladungsträgern und Gitterschwingungen, insbesondere unter Verwendung der Infrarotstrahlung der Freie-Elektronen-Laser am Linearbeschleuniger ELBE.

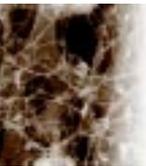
Wichtigste Ergebnisse

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Institutes orientieren sich an acht zentralen Themen aus den Bereichen Ionenstrahlanwendungen und Halbleiterstudien: (1) Dünne Schichten, (2) Plasma-Immersion- und Niederenergie-Implantation, (3) MeV-Ionenstrahlanalytik, (4) Werkstoffe für Medizin und Biotechnologie, (5) Feinfokussierter Ionenstrahl, (6) Nanostrukturen, (7) Halbleiter-Materialien und (8) Halbleiterspektroskopie, wobei (5)-(7) die Brücke zwischen beiden Bereichen darstellen. Aus der großen Zahl neuer und wichtiger Ergebnisse der Jahre 1999/2000 innerhalb der einzelnen Forschungsvor-

haben, die weiter unten detaillierter dargestellt werden, sind einige internationale Spitzenleistungen hervorzuheben. Durch simultane Mittelenergie-Ionenimplantation gelang es erstmals in einem kontinuierlichen Prozess bei niedriger Temperatur die die Schichtdicke begrenzende hohe innere Spannung in aufwachsenden Schichten aus kubischem Bornitrid zu relaxieren. Erstmals wurde in einem Modell beschrieben und nachgewiesen, dass die erreichbare Dicke der ionennitrierten Oberflächenschicht in Metallen durch die Ionenzerstäubung begrenzt ist. Die blaue Elektrolumineszenz aus Nanocluster-Strukturen in Siliziumdioxid erreicht eine bisher in Silizium-basierten Emitttern einmalige Leistungseffizienz von 0,5 %. In Kooperation mit der Mikroelektronik-Industrie wurde erstmalig ein nichtflüchtiger 256-kByte-Speicher (SRAM) mit einer Speicherzelle auf der Basis nanoclusterhaltiger SiO₂-Schichten hergestellt. Durch Kohlenstoffimplantation gelang es erstmals, vergrabene Diamant-Schichten in Siliziumkarbid zu erzeugen. In oxidierten V-Gräben an Silizium-Oberflächen wurden, erstmals in reiner Silizium-Prozesstechnik, Germanium-Nanodrähte erzeugt. In vielbeachteten theoretischen Arbeiten zur Ionenstrahlsynthese wurde ein Regime des durch Ionenmischen induzierten „Inversen Ostwald-Reifens“ beschrieben und durch kinetische Monte-Carlo-Simulation sowie Experimente bestätigt.

Intensive Kontakte zu deutschen und ausländischen Partnern tragen wesentlich zu der hohen Zahl von wissenschaftlichen Publikationen des Institutes bei. Ebenso resultierten daraus zahlreiche Einladungen zu Laborbesuchen und zu Vorträgen auf den wichtigsten internationalen Konferenzen der einzelnen Fachgebiete. Ein Mitarbeiter des Institutes wirkte als Symposiums-Leiter auf Tagungen der Materials Research Society sowohl in den USA als auch in Europa.

Im Berichtszeitraum wurde eine Reihe neuer Projekte über den DAAD sowie von der DFG, dem SMWK, der EU und der AiF eingeworben. In einigen dieser Projekte spielt die Kooperation mit der Industrie eine wesentliche Rolle. Die Förderung des Institutes als „Large Scale Facility“ unter dem Namen „Center for the Application of Ion Beams in Materials Research (AIM)“ wurde auf das 5. Rahmenprogramm der EU ausgedehnt. Besonders erwähnenswert ist, dass auch die „Synchrotron Radiation Beamline for Radiochemistry and Materials Research (ROBL)“ bei der ESRF in Grenoble, die gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie betrieben wird, nunmehr ebenfalls als europäische Large Scale Facility gefördert wird. Damit wird Wissenschaftlern aus den Ländern der EU und ihren assoziierten und Bewerber-Staaten ermöglicht, die Rossendorfer Einrichtungen kostenfrei zu nutzen.



An beiden Einrichtungen war das entsprechende Kontingent mit insgesamt 40 Nutzergruppen im Berichtszeitraum ausgebucht. Schließlich wird das Institut seit Ende 2000 als „Marie-Curie-Training-Site“ der EU mit dem Thema „Development of Functional Layers Using Ion Beam Techniques“ gefördert. Mit dieser Unterstützung können ausländische Doktoranden einen Teil ihrer Arbeiten in Rossendorf durchführen.

Gegenstand weiterer Kooperationen mit auswärtigen Partnern ist die breite Anwendung von Ionenstrahltechniken in Wissenschaft und Industrie. Die Ionenstrahlanalytik hat ein weites Spektrum von Materialien zum Gegenstand und ist in Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Tribologie, Korrosionsbeständigkeit, Elektronik und Mikrosystemtechnik, Biomedizin, Informationstechnik, Energietechnik, Geologie, Anthropologie und Extraterrestrik einbezogen. Vom Ionenimplantations-Service des Instituts, einschließlich des fokussierten Ionenstrahles und der Plasma-Immersion-Implantation, profitieren etwa 50 Partner aus Forschung und Industrie.

Das Institut richtete Ende Juli 1999 in Dresden die 14. Internationale Konferenz „Ion Beam Analysis“, die als bedeutendste Konferenz im Fachgebiet angesehen wird, gemeinsam mit der 6. Europäischen Konferenz „Accelerators in Applied Research and Technology“ mit zusammen etwa 400 Teilnehmern aus. Gemeinsam mit dem Hahn-Meitner-Institut Berlin wurde zum dritten Male eine Sommerschule „Nukleare Sonden und Ionenstrahlen“ in Bad Blankenburg (Thüringen) mit 40 Studenten und 13 Dozenten abgehalten. Kleinere internationale Treffen gab es im Rahmen von europäischen Projekten.

Der wissenschaftliche Erfolg des Instituts gründet sich wesentlich auf das Engagement seiner jungen Forscher. Dies wird insbesondere durch Preise dokumentiert, mit denen Arbeiten des Institutes ausgezeichnet wurden, darunter der Prof.-Dr.-Jürgen-Geiger-Preis 2000 der DPG, der erste Preis der Erich-Glowatzky-Stiftung, ein zweiter Preis in einem landesweiten Businessplan-Wettbewerb, der Forschungspreis des FZR 2000 sowie mehrere Doktoranden- und Best-Poster-Auszeichnungen im FZR und auf internationalen Konferenzen. Im Berichtszeitraum wurden zwei Diplomarbeiten und fünf Doktorarbeiten abgeschlossen.

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Die Rossendorfer Beamline (ROBL) an der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble wird vom Institut gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie betrieben.

Im Zuge der Arbeiten zum Aufbau der Freie-Elektronen-Laser an ELBE und der entsprechenden optischen Labors hat sich eine enge Zusammenarbeit der Abteilung Halbleiterspektroskopie mit den entsprechenden Gruppen am Institut für Kern- und Hadronenphysik entwickelt.

Mit dem Institut für Bioorganische und Radio-pharmazeutische Chemie wurden gemeinsame Untersuchungen zur Beschichtbarkeit von metallischen Stents mit radioaktiven Rheniumverbindungen für die Restenoseprophylaxe durchgeführt. Das Ziel dieser Arbeiten war die Ausarbeitung von einfachen Markierungsverfahren, die unmittelbar vor der intrakoronaren Implantation der Stents angewandt werden können. Zusammen mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik wurden Untersuchungen zum möglichen Ausheilen durch FEL-Infrarotstrahlung (FELIX-Nieuwegein, Niederlande) an Al- bzw. N-implantiertem 6H-SiC vorgenommen. Gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie werden Gesteinsproben aus Uranerzbergbaugebieten mittels der protoneninduzierten Röntgenemission (PIXE) analysiert. Weitere thematische Verbindungen existieren zum Institut für Sicherheitsforschung zum Versprödungsverhalten neutronenbestrahlter Modell-Legierungen durch Positronen-Annihilations-Spektroskopie, zum mechanischen Verschleiß von Oberflächen und zur Verbesserung des Kavitationsverhaltens von Edelstahl durch Ionenbehandlung.

Die Nachbarinstitute im FZR nutzen die im Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung vorhandenen präparativen und diagnostischen Einrichtungen, darunter insbesondere die metallographische Präparation, die Hochenergie-Ionenstrahlanalytik, die Transmissions- und Rasterelektronenmikroskopie und die Diagnostik mit Röntgenstrahlen.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

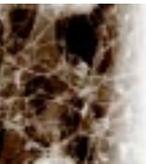
Alle genannten Forschungsthemen profitieren von Kooperationen mit anderen Instituten, von denen hier nur die wichtigsten genannt werden können. Die Arbeiten zu dünnen Schichten erfahren durch eine Kooperation mit der Universität Aarhus/Dänemark am Materialforschungsmessplatz von ROBL eine wesentliche Bereicherung. Neue Materialien für die Dentologie werden in Zusammenarbeit mit dem Klinikum der TU Dresden entwickelt. Die Lumineszenzuntersuchungen an Si- und Ge-reichen SiO₂-Schichten erfolgen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Photophysik der TU Dresden. Eine neue Kollaboration wurde zu Fragen der zeitaufgelösten Lumineszenzmessung mit

der Universität Catania/Italien begonnen. In Zusammenarbeit mit der Fernuniversität Hagen wurde auf der Grundlage eines im FZR patentierten Verfahrens erstmalig ein monolithisch integrierter Optokoppler in reiner Si-Prozesstechnologie hergestellt und erfolgreich erprobt. Weitere Untersuchungen zu Grundlagen und neuen Anwendungen von Nanostrukturen werden in Zusammenarbeit mit CNRS/CSNSM Orsay/Frankreich und mit dem Californian Institute of Technology/USA durchgeführt. Die Arbeiten zum Defect Engineering stützen sich wesentlich auf SIMS-Messungen am Moskauer Zentrum für Materialanalyse und an der TU Wien. Gastwissenschaftler vom KFKI Budapest und von der Universität Minsk unterstützen die Computersimulationen zur Ionenimplantation und ionenstrahlinduzierten Defektbildung in SiC. Neu sind Kollaborationen mit dem Royal Institute of Technology, Stockholm zu Fragen der Ladungsträgerprofile SiC sowie mit der Universität Linköping zu sog. „black-dot“-Defekten in ionenimplantiertem SiC. Kooperationspartner bei der theoretischen Modellierung von Prozessen in der Siliziumtechnologie ist die ETH Zürich. Die Aktivitäten zu den Anwendungsmöglichkeiten des Ionenmikrostrahls basieren auf Kooperationen mit der FhG-EADQ/Dresden, der TU Chemnitz und mit Instituten der BAS Sofia. Von wesentlicher Bedeutung ist die Kooperation mit der Universität Athen auf dem Gebiet der Flüssigmetall-Ionenquellen.

Forschungsvorhaben

- Dünne Schichten
- Plasma-Immersions- und Niederenergie-Implantation
- Hochenergie-Ionenstrahlanalytik
- Werkstoffe für Medizin und Biotechnologie
- Feinfokussierter Ionenstrahl
- Nanostrukturen
- Halbleitermaterialien
- Halbleiterspektroskopie

Im Berichtszeitraum wurden Kooperationen mit der und Serviceleistungen für die Industrie wesentlich ausgebaut. Eine besondere Rolle spielen hier gemeinsame Arbeiten mit den Dresdner Unternehmen der Mikroelektronik (AMD, Infineon, ZMD). Erwähnenswert sind nationale und internationale Direkt- und Verbundprojekte zur Prozesssimulation in der Mikroelektronik, zur Dotierung von SiC, zur Entwicklung neuer nicht-flüchtiger Speicher, von Elektronendetektoren und von Hochtemperatur-Sensoren, zur Verbesserung von Diffusionsbarrieren in höchstintegrierten mikroelektronischen Strukturen, zur Oberflächenbehandlung mechanischer Werkzeuge und zur Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit von Hochtemperatur-Werkstoffen. Die wichtigsten Serviceleistungen für die Industrie gab es im Rahmen der Hochenergie-Ionenstrahlanalytik, zur Haftverbesserung von keramischen Verblendungen auf metallischem Zahnersatz, für die Härtung von Stanz- und Gravierwerkzeugen und für die Verbesserung der Eigenschaften von elektronischen Hochleistungs-Bauelementen.



Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999/2000

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		75/74,5				Wissenschaftler			32/32		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	4/5	2/2,6	Doktoranden	8/7	1,7/3,8	Gastwissenschaftler	22/41	2/3,4	Hilfskräfte	9/18	0,9/3,1
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	19/22	6,8/12,7	Technisches Personal	6/8	2,4/3,2	Gastwissenschaftler	19/15	1,4/2,5	Doktoranden	9/8	2/2,5
Stipendiaten	1/2	0,3/0,5	Student. Hilfskräfte	-/1	-/0,1						
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		1529,2/2425,6				drittmittelfinanziert			152,2/405,3		
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken						Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			71/135		
Artikel (referiert)		47/106				Diplomarbeiten			-/2		
Artikel (nicht referiert)						Doktorarbeiten			2/2		
Artikel im Eigenverlag		4/7				Patentanmeldungen			3/5		
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings/Workshops		4/-									

Direktoren:

Prof. Dr. Wolfhard Möller
(geschäftsführend)

Prof. Dr. Manfred Helm

Tel.: +49 351 260-2245

E-Mail: w.moeller@fz-rossendorf.de

Tel.: +49 351 260-2260

E-Mail: m.helm@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter:

Dr. Johannes von Borany

Dr. Manfred Friedrich

Dr. Rainer Grötzschel

Dr. Wolfgang Matz

Dr. Matthias Posselt

Dr. Edgar Richter

Dr. Bernd Schmidt

Dr. Wolfgang Skorupa

Industriekooperation

Beschleunigertechnik

Ionenstrahlanalytik

Strukturuntersuchungen

Theorie

Ionenimplantation

Präparation

Neue Materialien

Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie

Zielstellung – ein Überblick

Die Aufgaben des Instituts liegen auf dem Gebiet der Lebenswissenschaften. Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung sind auf die Nutzung von Strahlung in Form radioaktiver Arzneimittel gerichtet, mit denen sich biochemische Zusammenhänge und regionale Stoffwechselprozesse durch bildgebende Verfahren darstellen und damit für die nuklearmedizinische Diagnostik nutzen lassen. Zunehmend wenden sich die Untersuchungen auch Fragen der Radionuklidtherapie zu. In Übereinstimmung mit den Empfehlungen des Wissenschaftsrats haben sich im Institut zwei Schwerpunkte herausgebildet:

Die eine Richtung befasst sich mit Untersuchungen zu Radiopharmaka für die Positronen-Emissions-Tomographie (PET). In dem gemeinsam mit der Medizinischen Fakultät der TU Dresden betriebenen PET-Zentrum werden Forschungsarbeiten zur Entwicklung neuer Fluor-18- und Kohlenstoff-11-markierter Verbindungen sowie zur Charakterisierung ihres biologischen Verhaltens bis zur Anwendung am Patienten durchgeführt. Gegenwärtig entwickelt sich mit der erstmaligen Erforschung der Verteilung in vivo bioaktiver Substanzen unter Nutzung der Positronenstrahlung eine neue Richtung, die für weitere Bereiche der Lebenswissenschaften Bedeutung gewinnen wird.

Neben der PET als etabliertem Verfahren, das Nutzern im FZR und darüber hinaus zur Verfügung steht, sollen künftig die Möglichkeiten der Strahlungsquelle ELBE zur Lösung von Fragen der Radio-tracerforschung ausgelotet werden.

In engem Zusammenhang mit dem Gebiet der PET-Radiopharmaka steht die zweite, an bioanorganischen Konzepten angelehnte Arbeitsrichtung der Metallopharmaka. Angesichts des Bedarfs an Radiotherapeutika und der damit einhergehenden Forderung, die betreffende Vorlauftforschung zu verstärken, verlagern sich die bislang auf Technetium-99m konzentrierten Arbeiten auf therapeutisch relevante Metallnuklide.

Standen in den vergangenen Jahren durch Neurotransmitter vermittelte Prozesse im Gehirn im Mittelpunkt, so werden sich die Forschungsarbeiten verstärkt dem Feld der Tumordiagnostik und Tumortherapiekontrolle, aber auch der Radionuklidtherapie widmen.

Wichtigste Ergebnisse

Bei den intensiven Untersuchungen zur Entwicklung von Technetiumtracern für Neurorezeptoren konnten jetzt Derivate erhalten werden, die einen neuen Chelatbildner enthalten und damit in vivo sehr stabil sind und sehr gute Bindungswerte zum Serotoninrezeptor aufweisen.

Für die „no-carrier-added“-Präparation von Technetium-Gemischtligandkomplexen konnten Verfahren entwickelt werden, die Markierungsprodukte in hoher Ausbeute liefern.

Radioaktive Stents werden als wichtiges therapeutisches Instrument bei Herzarterienverschluss angesehen: Das Metallgerüst des Stents sorgt für die stabile Formhaltung der Arterie, die aufgebrauchte β -Radioaktivität verhindert die Neubildung von Ablagerungen und damit ein erneutes Zusetzen des inneren Volumens. In einem neuen modifizierten Verfahren konnte eine definiert-homogene Beladung der Stentoberfläche erreicht werden, die die geforderte optimale Dosisverteilung in der Stentumgebung gewährleistet und unerwünschte Nebeneffekte ausschließt. Diese Stents sind nun in der tierexperimentellen Erprobung. Die Arbeiten laufen im Rahmen einer vertraglich vereinbarten Zusammenarbeit mit der Schering AG.

Eine neue Richtung befasst sich mit rezeptorbindenden Peptiden für die Tumordiagnostik und Tumorthherapie. Im Zusammenhang mit Arbeiten zu ^{18}F -markiertem Neotensin und weiteren, stabilisierten Derivaten dieses Peptids wurden enzymatische Abbaumechanismen der ^{18}F -markierten Peptide vollständig aufgeklärt.

Zum vorgesehenen Monitoring der Expression von Thymidinkinase HSV-1-TK nach Gentherapie konnten nach erstmalig erfolgtem Vergleich bekannter Tracer eine Reihe neuer acyclischer Guanin- und Uracilderivate sowie neue Uridinderivate synthetisiert werden. Die Arbeiten erfolgen in Zusammenarbeit mit der TU München und der TU Dresden.

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Bei den Forschungsvorhaben sind folgende thematische und methodische Verzahnungen im FZR hervorzuheben:

- Strukturaufklärung von radiopharmazeutisch und bioanorganisch relevanten Koordinationsverbindungen mit Hilfe der Synchrotronstrahlung an dem Rossendorfer Strahlrohr ROBL (Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiochemie).



- Untersuchungen zur Prozessführung eines chemischen Verfahrens (Nitroaromatenreduktion) laufen im Institut für Sicherheitsforschung. Diese Untersuchungen wurden von unserem Institut hinsichtlich Produktidentifizierung und -analytik unterstützt.
- Am Institut für Sicherheitsforschung sind Untersuchungen zur Fluidodynamik und zum Stofftransport in Zweiphasenströmungen mittels der PET vorgesehen. Für diesen speziellen Einsatz ist die Konzipierung oberflächenaktiver Radiotracer vorgenommen worden.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Inland

Kooperationen auf verschiedenen Gebieten wie Synthese, Strukturanalytik, Molecular modelling, Gentherapie u.a. gibt es mit Universitäten (Dresden, München, Bonn, Heidelberg, Marburg, Potsdam), anderen Institutionen (Bundesanstalt für Materialforschung, BAM, Berlin) und der Industrie (Schering AG, BASF Ludwigshafen, Mallinckrodt Medical).

Ausland

Für die Zusammenarbeit mit ausländischen Partnern ergibt sich ein analoges Bild. Kooperationen bestehen u.a. mit Universitäten (Karolinska Institut, Stockholm; Zürich; Ramat-Gan, Israel; Ferrara) und Forschungsinstituten („Demokritos“, Athen; Paul-Scherrer-Institut, Villigen; Institut für Organische Synthese, Riga; Instituto Tecnológico e Nuclear, ITN, Lissabon). Die Zusammenarbeit mit osteuropäischen Ländern konnte erweitert werden und umfasst jetzt Partner in Bulgarien, Lettland, Polen

Forschungsvorhaben

- Radiotracerdesign und Radiopharmazie
- Untersuchungen zu Neurorezeptoren und Hirnfunktionen
- Untersuchungen zur Tumordiagnostik und Tumorthepiekontrolle
- Bioaktive Substanzen
- Untersuchungen zu Herz und Gefäßen

und Ungarn. Die Kooperation im europäischen Rahmen findet ihren Ausdruck unter anderem in der Mitarbeit im EU-Programm COST B12 „Radiotracers for in vivo assessment of biological function“. In drei der fünf Arbeitsgruppen sind Wissenschaftler des Instituts vertreten.

Besonders hervorzuheben ist die Zusammenarbeit mit folgenden Partnern:

TU Dresden

Hier bestehen Kooperationen auf den Ebenen Chemie und Medizin. Die Zusammenarbeit auf chemischem Sektor bezieht sich auf Fragen der Organischen Synthese von Tracervorstufen sowie auf bioanorganische und biochemische Fragestellungen. Dazu gehört auch das Vorhaben „Bioaktive Substanzen“.

Auf dem Gebiet der Medizin ist das gemeinsam betriebene PET-Zentrum der wesentliche Faktor der Kooperation. Darüber hinaus besteht eine Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Gentherapie und zur Entwicklung von Technetiumfettsäuren im Rahmen eines gemeinsamen DFG-Projekts.

Schering AG

Hier gibt es eine langjährige Zusammenarbeit auf dem Technetium- und Rheniumgebiet. Zusätzlich wurde mit der Entwicklung eines [¹⁸F] Radiotracers zur Rezeptordarstellung begonnen.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Die hocheffektive Kooperation auf dem Sektor der Molekülstrukturuntersuchungen ist durch 23 Publikationen ausgewiesen.

Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999/2000

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		38,5/38,5				Wissenschaftler			15/15		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	3/3	1,3/3	Doktoranden	5/5	1,3/2,4	Gastwissenschaftler	4/3	0,1/0,6	Hilfskräfte	3/7	0,2/1,3
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	7/9	2,7/6,6	Technisches Personal	3/5	0,6/2,1	Gastwissenschaftler	4/8	0,5/1	Doktoranden	4/4	0,8/2
Stipendiaten	-1	-0,2									
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		347,6/544,4				drittmittelfinanziert			131,9/153		
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		3/3				Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			21/42		
Artikel (referiert)		15/18				Diplomarbeiten			1/-		
Artikel (nicht referiert)		1/16				Doktorarbeiten			1/1		
Artikel im Eigenverlag						Patentanmeldungen			3/1		
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		4/2									

Direktor:

Prof. Dr. Bernd Johannsen

Tel.: +49 351 260-3170

E-Mail: b.johannsen@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter:

Dr. Hartmut Spies

Dr. Jörg Steinbach

Dr. Peter Brust

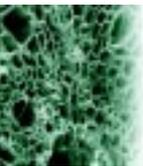
NN

Bioanorganische Chemie

PET-Tracer

Biochemie

Positronen-Emissions-Tomographie



Institut für Radiochemie

Zielstellung – ein Überblick

Das Institut für Radiochemie führt anwendungsorientierte Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Radiochemie und Radioökologie durch. Ziel ist es, die Wechselwirkungen und die Mobilität von Radionukliden in der Geo- und Biosphäre zu beschreiben und zu prognostizieren. Aufgrund ihrer hohen Radiotoxizität und der langen Halbwertszeiten sind dabei die Actiniden von besonderer Bedeutung.

Der Transport der Radionuklide wurde bisher nur makroskopisch beobachtet und phänomenologisch beschrieben. Für eine wissenschaftlich fundierte Prognose der Mobilität von Radionukliden/Actiniden ist es erforderlich, die ablaufenden Vorgänge in Einzelprozesse zu zerlegen und diese auf molekularer Ebene aufzuklären. Unter Verwendung von reaktiven Transportmodellen wird es möglich, aus der mikroskopischen Information makroskopische Voraussagen abzuleiten. Die dazu benötigten Datenbanken und Modellierungssoftware müssen erweitert und qualitativ verbessert werden.

Die Forschung umfasst mittelfristig insbesondere die Beschreibung der Wechselwirkungsmechanismen von Radionukliden/Actiniden in natürlichen aquatischen und biologischen Systemen. Es werden unter anderem die Wechselwirkungen an der Phasengrenzfläche zwischen wässriger Phase und Gesteinen, Mineralen, Böden und Pflanzen, die Bildung, Stabilität und Mobilität von radioaktivitätstragenden Kolloiden, der Einfluss von Mikroorganismen auf die vorgenannten Prozesse sowie die Ursachen für die Mobilisierung oder Retardierung der Radionuklide untersucht.

Die Forschungsergebnisse sind wesentlich für die Entwicklung geeigneter Sanierungstechnologien für kontaminierte Flächen, die zum Beispiel als Altlasten des Uranerzbergbaus in Sachsen und Thüringen, als weitflächige Kontaminationen in den Nachfolgestaaten der früheren Sowjetunion und den USA, resultierend aus der Kernwaffenentwicklung und -produktion, und als kontaminierte Gebiete durch Nuklearunfälle vorliegen. Eine umfassende Kenntnis der Radionuklidmigration ist unerlässlich für die Abschätzung der radioökologischen Konsequenzen für Mensch und Umwelt bei der Auswahl, Durchführung und nach der Beendigung von Sanierungsmaßnahmen. Die Forschungsergebnisse sind gleichfalls von grundlegender Bedeutung für die Beurteilung der Langzeitsicherheit von nuklearen Endlagern. Durch die Entwicklung und die Anpassung nanoskopisch-analytischer Methoden werden experimentelle Bedingungen geschaffen, Wechselwirkungsmechanismen und Konstitution

von Radionukliden/Actiniden auf molekularem Niveau zu untersuchen.

Wichtigste Ergebnisse

Im Annual Report des Instituts [FZR-285 (2000)] und in den entsprechenden Zeitschriftenpublikationen sind die wissenschaftlichen Ergebnisse des Instituts detailliert dargestellt.

Mit Plutonium wurde ein weiteres Transuranelement am radiochemischen Messplatz des Strahlrohres ROBL untersucht. Bindungsabstände und Koordinationszahlen von Pu(III)- und Pu(VI)-Hydraten wurden mittels EXAFS-Spektroskopie bestimmt.

Röntgenabsorptionsspektroskopische Untersuchungen an Np(IV)-, Np(V)- und Th(IV)-Humaten und -Fulvaten ergaben, dass in Humat- und Fulvat-Komplexen Np(IV) und Th(IV) von 11 Sauerstoffatomen mit einem Bindungsabstand von $2.36 \pm 0.02 \text{ \AA}$ bzw. $2.44 \pm 0.02 \text{ \AA}$ umgeben sind. Np(V)-Humate zeigen eine davon abweichende Struktur. Die äquatorialen Np-O-Bindungsabstände weisen auf eine monodentate Anbindung der Carboxylgruppen an das NpO_2^+ -Ion hin.

Ein spezieller, auf der Faktorenanalyse beruhender mathematischer Algorithmus wurde entwickelt, der es erstmalig ermöglicht, EXAFS-Spektren von Mischungen quantitativ auszuwerten und die Anzahl, die relative Konzentration und die EXAFS-Strukturparameter der einzelnen Komponenten zu bestimmen.

Es konnte gezeigt werden, dass sich die bakterielle Diversität in Boden- und Wasserproben aus der urankontaminierten „Haberland-Halde“ Johanngeorgenstadt, aus den „Mill-Tailings“ Gittersee/Coschütz, Schlema/Alberoda und Shiprock, New Mexico stark unterscheidet. Die Gegenwart von drei ökologisch unterschiedlichen *Acidithiobacillus ferrooxidans*-Gruppen, die je drei für die einzelne Gruppe spezifische 16S-rDNA-Signaturen enthalten, wurde jedoch in den Bodenproben aller Uranabfallhalden nachgewiesen. Die Urantoleranz sowie die Uranbindungskapazität der Repräsentanten dieser drei Gruppen sind unterschiedlich. Mittels EXAFS-Spektroskopie konnte gezeigt werden, dass es sich bei der Uranbindung im Fall von *Acidithiobacillus ferrooxidans* um einen Komplex mit organischem Phosphat handelt.

Untersuchungen an Flutungswässern von Urangruben zeigten, dass während der Flutung eines Bergwerks komplexe kolloidchemische Vorgänge ablaufen. In Abhängigkeit vom pH-Wert treten

wichtige radiotoxische Schadstoffe (Uran_(nat), ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po) kolloidgetragen auf.

Die Entwicklungsarbeiten zur Fluoreszenzspektroskopie von organischen Schwermetall-Komplexen mit ultrakurzen Pulsen konnten abgeschlossen werden. Das System wurde durch Untersuchung der Komplexbildung von Uran(VI) mit unterschiedlich substituierten Salicylsäuren validiert und steht nun als weltweit einziges Messsystem dieser Art für weitere Forschungen zur Verfügung.

Ein erster funktionsfähiger Prototyp einer mineral-spezifischen thermodynamischen Sorptionsdatenbank wurde entwickelt. Neben Datensätzen zu Oberflächenkomplexierungsmodellen (Mineraleigenschaften, Bindungsstellendichten, Protolysekonstanten und Oberflächenkomplexbildungskonstanten sowie elektrostatischen Parametern, Speziesnachweisen, bibliographischen Angaben) ist Hintergrundwissen zu Modellen, Theorien, Experimenten und Software integriert. Die Datenbank ist in dieser Form weltweit einmalig.

Die Methode der Direktmessung alpha-aktiver Nuklide in Bauschutt, beruhend auf rein mechanischer Probenaufbereitung, Spektrometrie und Spektrenauswertung, ist zur Anwendungsreife entwickelt worden. Diese Methode ist für den Einsatz beim Rückbau der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) für die Direktmessung alpha-aktiver Nuklide im Bauschutt von Experten empfohlen worden.

Das Institut organisierte im Berichtszeitraum zwei äußerst erfolgreiche Konferenzen. Die „Euroconference and NEA Workshop on Speciation, Techniques and Facilities for Radioactive Materials at Synchrotron Light Sources“ (Actinide-XAS-2000, September 2000, Grenoble, Frankreich, 71 Teilnehmer aus 14 Ländern) und die „Euroconference on Bacterial-Metal/Radionuclide Interaction: Basic Research and Bioremediation“ (BMRI-2, August/September 2000, Rossendorf, 91 Teilnehmer aus 14 Ländern).

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Der Betrieb und die wissenschaftlichen Experimente am Strahlrohr ROBL erfolgen in enger Kooperation mit der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik und dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung. Das entwickelte und installierte EXAFS-Datenerfassungsprogramm (XATROS) erlaubt eine wesentlich nutzerfreundlichere und sichere Steuerung der Probenpositionierer und der Spektrenaufnahme am radiochemischen Messplatz. Gemeinsam wurde auch eine Konzeption für die

schnelle Spektrenaufnahme (Quick-EXAFS) erarbeitet und getestet. In Kooperation mit der Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Spektrenaufnahme optimiert, und es erfolgten gemeinsame Entwicklungsarbeiten zu dem Tichonov'schen Regularisierungsverfahren.

EXAFS-Untersuchungen zur Stabilität von Tc(I)-Thioethertricarbonylkomplexen in wässriger Lösung und ihre Reaktivität mit Histidin und einfachen Peptiden standen im Mittelpunkt der Zusammenarbeit mit dem Institut für Bioanorganische und Radio-pharmazeutische Chemie auf strukturanalytischem Gebiet.

Der Aufbau des Infrarot-Messplatzes am Freie-Elektronen-Laser erfolgt in Zusammenarbeit mit den Instituten für Kern- und Hadronenphysik sowie für Ionenstrahlphysik und Materialforschung. Im Mittelpunkt standen Untersuchungen zur Entwicklung eines IR-Detektors auf photothermischer Grundlage. Am Experiment CLIO der Universität Paris wurden dazu gemeinsam erste IR-Messungen an Calcit und Huminsäuren mit dem Mirage-Detektor durchgeführt.

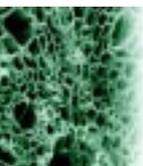
Mit dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung besteht eine stabile Zusammenarbeit bei der chemisch-physikalischen Charakterisierung von Gesteins- und Mineraloberflächen, von synthetisierten neuen Uranverbindungen und der mikroskopischen Visualisierung von Kolloidpartikeln.

Die Forschungsarbeiten in Kooperation mit dem Institut für Sicherheitsforschung konzentrieren sich auf die Beschreibung des Transportes von Schwermetallen (Actiniden) in der ungesättigten Zone. Die Modellierung dieses Transports wird begleitet von Säulenexperimenten.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Innerhalb von geförderten wissenschaftlichen Projekten wird mit einer großen Anzahl von nationalen und internationalen Partnern kooperiert. So wird in den zwei EU-Projekten BORIS (Building Confidence in Deep Disposal: The Borhole Injection Site Krasnoyarsk-26 and Tomsk-7) und ACTAF (Aquatic Chemistry and Thermodynamics of Actinides and Fission Products Relevant to Nuclear Waste Disposal) mit 15 Partnern aus acht europäischen Ländern einschließlich Russland kooperiert.

Die Wechselwirkung von niederwertigen Actiniden und Schwermetallen mit Huminsäuren ist das Thema einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit



dem Forschungszentrum Karlsruhe, den Universitäten Mainz und Saarbrücken und dem Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung Leipzig.

Die Zahl der Partner sowohl bei der Durchführung von röntgenabsorptionsspektroskopischen Messungen an Actiniden als auch bei der Entwicklung und Installation fortgeschrittener Auswerteprogramme dafür, hat sich beträchtlich erweitert. Beispielhaft sollen das Paul Scherrer Institut, Schweiz, das Institut für Metallphysik der Russischen Akademie der Wissenschaften, Ekatarinenburg, Russland und die Universität Tokio, Japan genannt werden.

Die Prozesse der Uranyl-sorption an Tonmineralen wie Montmorillonit sind bislang weitgehend ungeklärt. Zur Aufklärung der Raumorientierung der Uranyleinheit bezüglich des Substrats wurden polarisationsabhängige EXAFS-Messungen durchgeführt. Die Proben wurden nach in einem vom Paul Scherrer Institut und der Universität Grenoble entwickelten Sedimentations-Verfahren texturiert und an ROBL vermessen.

Die mikrobiologischen Arbeiten zur Ermittlung der bakteriellen Diversität in den Halden und Tailings des Uranerzbergbaues erfolgen in enger wissenschaftlicher Kooperation mit Wissenschaftlern des Lehrstuhls für Geomikrobiologie der Universität Sofia, Bulgarien. Mit dem Institut für Molekulare Biologie, Bulgarische Akademie der Wissenschaft, Sofia, erfolgt eine Zusammenarbeit zu Untersuchungen der Klone und ihrer Einordnung in die 16S- und 16S-IGS-rDNA-Bibliotheken.

Forschungsvorhaben

- Aquatische Chemie der Actiniden/Radionuklide
- Wechselwirkung von Actiniden/Radionukliden mit Mineral- und Gesteinsoberflächen und Kolloiden
- Wechselwirkung von Actiniden/Radionukliden mit biologischen Systemen
- Modellierung des Radionuklidtransports
- Entwicklung und Anpassung spektroskopischer Methoden

Die Herstellung von Biokeramiken auf der Basis bakterieller Membranproteine für schwermetallbindende Filter zur Behandlung von industriellen und radioaktiv kontaminierten Wässern ist das Thema einer anwendungsorientierten Projektarbeit mit dem Institut für Werkstoffwissenschaften der TU Dresden und der Firma Feinchemie GmbH Sebnitz.

Auf den Gebieten der Gesteinscharakterisierung und der Sorption von Actiniden an Gesteins- und Mineraloberflächen wurde intensiv mit der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, dem Institut für Anorganische und Analytische Chemie der Universität Frankfurt/M., dem Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe, dem Institut für Mineralogie der Universität Münster, dem Institut für Angewandte Physik der TU Dresden und der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH, Braunschweig zusammengearbeitet.

Die Abtrennung von Uran aus Sicker- und Grundwässern mit uranophilen Calixerenen ist die Thematik der Projektzusammenarbeit mit dem Deutschen Textilzentrum Nord-West e.V. in Krefeld.

Eine Kooperation zu Fragen der Kolloidchemie von Bergwerkswässern wurde im Berichtszeitraum mit der Wismut GmbH aufgebaut.

Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999/2000

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		38,5/37				Wissenschaftler			16/15		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	3/4	1,3/2,6	Doktoranden	2/7	0,3/1,8	Gastwissenschaftler	7/17	0,4/3,5	Hilfskräfte	5/11	0,3/0,8
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	14/19	5,1/10,9	Technisches Personal	9/8	1,7/3,7	Gastwissenschaftler	5/3	1,7/0,3	Doktoranden	4/1	0,9/0,3
Postdoc	1/-	0,1/-	Stipendiaten	-/1	-/0,2						
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		330,9/1700,1				drittmittelfinanziert			56,8/172,7		
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		6/12				Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			31/78		
Artikel (referiert)		22/20				Diplomarbeiten					
Artikel (nicht referiert)						Doktorarbeiten					
Artikel im Eigenverlag						Patentanmeldungen			-/1		
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		1/6									

Direktor:

Prof. Dr. Gert Bernhard Tel.: +49 351 260-3280
 bis 31. 1. 2000 (kommissarisch) E-Mail: g.bernhard@fz-rossendorf.de
 Prof. Dr. Thomas Fanghänel Tel.: +49 351 260-3210
 ab 1. 2. 2000 E-Mail: th.fanghaenel@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter:

Prof. Dr. Gert Bernhard Entsorgungs-und Ökoradiochemie
 Dr. Karl-Heinz Heise Organische Tracerchemie
 Dr. Tobias Reich Synchrotronstrahlungsanwendungen
 Dr. Peter Merker Kolloide
 Dr. Karl Krogner Analytik

Gruppenleiterin:

Heidemarie Friedrich Radioaktive Arbeitstechniken



Institut für Kern- und Hadronenphysik

Zielstellung – ein Überblick

Im Institut für Kern- und Hadronenphysik werden zu ungefähr gleichen Anteilen hadronen- und kernphysikalische sowie Forschungsprojekte im Bereich der Lebenswissenschaften, speziell im Zusammenhang mit der Strahlungsquelle ELBE, durchgeführt. Letztere konzentrieren sich auf die Anwendung kern- und strahlungsphysikalischer Methoden sowie Infrarot-spektroskopischer Verfahren auf biologische und medizinische Probleme. Die Sekundärstrahlung im IR-Bereich aus dem Freie-Elektronen Laser und im Röntgenbereich eröffnet neue Forschungsmöglichkeiten in Physik, Chemie und besonders auf biologischem und medizinischem Gebiet. Im Hinblick darauf waren die Arbeiten des Instituts vor allem geprägt durch die intensive Mitarbeit am Aufbau der Strahlungserzeugungs-Anordnungen bei ELBE, die Vorbereitung der Installation der Experimentiereinrichtungen sowie den Aufbau von IR-Labormessplätzen und eines Zelllabors in der ELBE-Halle nahe am künftigen Bestrahlungsplatz.

Wichtigste Ergebnisse

Lebenswissenschaften

Die Sekundärstrahlung von ELBE eröffnet neue Untersuchungsmöglichkeiten auf zellulärem und subzellulärem Niveau, welche die Basis bilden für neue Ansätze bei der biomedizinischen Anwendung physikalischer Methoden, insbesondere auf dem gesundheitspolitisch bedeutsamen Gebiet der Onkologie. Als besonders interessantes Beispiel einer nichtkonventionellen Photonenquelle für biologische Anwendungen ist die Röntgenstrahlungs-Erzeugung durch Elektronen-Channeling in Diamantkristallen zu nennen, für welche die technische Konzeption fertiggestellt wurde. Sie soll für Zellbestrahlungen zur energiedifferentiellen Bestimmung der relativen biologischen Wirksamkeit (RBW) diagnostisch relevanter Röntgenstrahlung eingesetzt werden. Für diese radiobiologischen Experimente werden im Institut die Experiment- und Analyse-Techniken beherrscht, wie die Bestimmung der RBW der Strahlung einer 25-kV-Weichstrahlröhre gezeigt hat. Die Arbeiten zu den physikalischen Grundlagen der Strahlungserzeugung durch Elektronen-Channeling, speziell zur Erhöhung der Strahlungsausbeute durch Ultraschallanregung des kristallinen Radiators führten zur Beschreibung dieses Phänomens als parametrische Resonanz, was eine Realisierung durch Ultraschallanregungen im technisch noch gut handhabbaren Frequenzbereich unterhalb von 10 GHz als möglich erscheinen lässt. Die im Institut entwickelte PET-Kontrolle von Tumorbehandlungen mit Kohlenstoffstrahlen wird

mittlerweile als klinische Routinemethode an der experimentellen Schwerionen-Therapieanlage bei der GSI Darmstadt eingesetzt. Bis zum Ende des Jahres 2000 wurden mehr als 2600 Behandlungsfractionen bei 78 Patienten mit PET überwacht. Dabei wurde zuverlässig gezeigt, dass die durch PET-Ergebnisse initiierten Veränderungen der Bestrahlungsplanungs-Datenbasis zu einer korrekten Teilchenreichweite in situ führen, wodurch die behandelnden Radioonkologen die Sicherheit für die Planung und Durchführung der Kohlenstoff-Therapie in zunehmend schwierigeren Situationen gewannen.

Das Institut plant am Infrarot-Strahl des ELBE-FEL Experimente, die vorrangig die besonderen Eigenschaften dieses IR-Strahls ausnutzen, aber auch solche, die im Zusammenhang stehen mit der biomedizinischen Forschung am quasi-monochromatischen Röntgenstrahl, insbesondere den oben genannten Arbeiten zu strahlungsbedingten Zellschädigungen. Als besondere methodische Entwicklungen im FEL-Bereich sind einerseits die technisch nahezu perfekte Justierung der FEL-Undulatoren über zwei unabhängige Magnetfeldmessmethoden und andererseits die untereinander konsistente Beschreibung der FEL-Eigenschaften durch unterschiedliche numerische Verfahren zu nennen.

Kern- und hadronenphysikalische Projekte

Das Institut beschäftigt sich seit langem erfolgreich mit experimenteller und theoretischer Kernphysik und plant interessante und neuartige Experimente an ELBE. Für einige der Untersuchungen, insbesondere aus der Hadronenphysik, sind auch Experimente an auswärtigen Beschleunigern geplant. Für die Vorbereitung der Experimente mit Bremsstrahlung an ELBE wurde ein spezielles Monte-Carlo-Simulationsprogramm entwickelt, das die dreidimensionale Propagation von Teilchen und Photonen durch die Experimentaufbauten und die Wechselwirkung mit Strukturmaterialien und Detektoren vorherzusagen erlaubt. Das Programm war eine der entscheidenden Grundlagen bei der Auslegung der Komponenten der Bremsstrahlungsanlage, wobei besonderer Wert auf die Untergrundunterdrückung gelegt wurde. Der Radiator wurde mit dem Ziel optimiert, eine hohe Ausbeute an polarisierten Photonen zu erhalten und den ausgelenkten Elektronenstrahl möglichst vollständig in den Elektronenstrahlfänger zu führen.

Von der Rossendorfer Kernstrukturtheorie wurde vorhergesagt, dass die Rotation von Atomkernen unter bestimmten Umständen zur Ausbildung einer Händigkeit oder Chiralität der Kernbewegung führt. Nach bisherigem Verständnis gab es Chiralität nur

bei Molekülen und Elementarteilchen. Wie mit Hilfe des Rossendorfer Tilted-Axis-Cranking-Modells berechnet wurde, liegt Chiralität in Kernen dann vor, wenn typische Linien im emittierten Gammaskpektrum rotierender Kerne doppelt auftreten, da sie von links- oder rechtshändigen Kernen herrühren können. Diese vorhergesagte Verdopplung der Linien wurde jetzt von einer amerikanischen Gruppe tatsächlich bei der Untersuchung von Nukliden mit der Neutronenzahl $N=75$ beobachtet, die entsprechend der Vorhersagen dieses Verhalten zeigen sollten. Über die Entdeckung der Chiralität in Atomkernen wurde im Internet (<http://focus.aps.org>), in Science (Vol. 291 Heft 5506) und in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung (14. 2. 2001) unter Nennung des FZ Rossendorf ausführlich berichtet.

Im Herbst 2000 wurde die im FZR konstruierte und gebaute erste Drahtkammer der dritten Ebene im HADES-Detektor installiert und erfolgreich unter Strahlbedingungen getestet. Für die Simulation von Schwerionenexperimenten, die demnächst mit HADES durchgeführt werden, konnte von der Theoriegruppe die Anwendbarkeit des thermischen Modells überprüft werden, indem bei der Analyse von am CERN in verschiedenen Experimenten genommenen Dileptonen-Spektren die Daten mit einem einheitlichen Satz von physikalischen Größen erklärt wurden. Verschiedene elementare Hadronenkanäle, für die erst seit kurzem experimentelle Daten vorliegen, wurden in Ein-Bosonen-Austauschmodellen im Detail studiert und damit die Kenntnis der Elementarreaktionen verbessert, die eine wichtige Voraussetzung für die Interpretation der HADES-Messungen ist.

Im Rahmen des „Jahres der Physik“ und der damit beabsichtigten Stärkung des Kontakts zur Öffentlichkeit wurde bei der „Reise zum Urknall“, einer Veranstaltung des BMBF in Berlin, eine Apparatur zur Messung der natürlichen Radioaktivität aufgebaut und betreut, die vom Publikum mit großer Resonanz aufgenommen wurde.

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Eine sehr enge Zusammenarbeit besteht mit der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik und der Arbeitsgruppe ELBE-Strahlführung und -diagnose. In gemeinsamen Arbeitstreffen wurden die für den FEL-Betrieb optimalen ELBE-Parameter diskutiert, insbesondere bzgl. Elektronenstrahl-Erzeugung, -diagnose und -transport. Außerdem gibt es einen regen Austausch über Aspekte der FEL-Strahlung, wobei die theoretischen Arbeiten in der Abteilung FEL von besonderer Bedeutung sind. Gemeinsam mit der Zentralabteilung

Neue Beschleuniger wurden mit dem Strahlenschutz zusammenhängende Probleme bearbeitet sowie ein Konzept für eine lasergetriebene Elektronenkanone, die eine besonders geringe Emittanz haben soll, erstellt. Die Kooperation mit den anderen FZR-Instituten hat in letzter Zeit stark zugenommen, da dort zunehmend Interesse an der Nutzung von ELBE-Strahlung entsteht und gemeinsame Konzeptstudien anlaufen.

Das betrifft insbesondere die Kooperation mit dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung und dem Institut für Radiochemie beim Einsatz der FEL-Infrarotstrahlung in der Halbleiterforschung bzw. bei der Aufklärung von chemischen Bindungsstrukturen. Mit dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung hat darüber hinaus eine Zusammenarbeit zu speziellen Problemen der Röntgenoptik begonnen, wobei die gemeinsamen Experimente dazu an der Rossendorfer ESRF-Beam-Line durchgeführt werden. Mit dem Institut für Sicherheitsforschung werden gemeinsame Experimente zur Nutzung der an ELBE erzeugten schnellen Neutronen vorbereitet, durch die Beiträge zur Ergänzung der kernphysikalischen Grundlagen der Energietechnik geliefert werden sollen.

Eine thematische Verbindung mit dem Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie gibt es bei den Arbeiten zur Positronen-Emissions-Tomographie und dabei speziell bei den Vorbereitungen für die Beschaffung eines Kleintier-scanners.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Die geplanten zellbiologischen Experimente mit quasi-monochromatischer Röntgenstrahlung an ELBE sind fest eingebunden in das regionale Forschungsprojekt „Korrelation physikalischer Parameter mit der zellulären Wirkung von niederenergetischen Photonen und geladenen Teilchen“, das von den Instituten für Zoologie und Strahlenschutzphysik sowie von der Klinik für Strahlentherapie und Radioonkologie des Universitätsklinikums Carl Gustav Carus der TU Dresden und der Abteilung Strahlungsphysik des Instituts für Kern- und Hadronenphysik getragen wird. Neben der wissenschaftlichen und methodischen Koordinierung des Projektes sollen durch die gemeinsame Organisation von Workshops zu ausgewählten Problemen des Gebietes Beiträge zur Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses aber auch der in den sächsischen radioonkologischen und nuklearmedizinischen Einrichtungen arbeitenden Mediziner, Biologen und Medizinphysiker geleistet werden. Die erste derartige Veranstaltung zum Thema „Dosimetrie von Teilchenstrahlung und weicher



Röntgenstrahlung“ wurde im Institut organisiert. Sie wurde wegen der Bedeutung der Thematik auch für den praktischen Strahlenschutz und die Risikoabschätzung durch das Institut für Strahlenschutz der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik und der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie unterstützt.

Gemeinsam mit der Universität Bremen und der TU Berlin wurde unter Nutzung der dort entwickelten Simulationscodes zur Photonenausbreitung in kristalliner Materie ein Röntgenreflektor auf der Basis von hoch orientiertem pyrolytischem Graphit entworfen, der die an ELBE erzeugte Channelingstrahlung auf das Zelltarget fokussiert und ferner durch seine Monochromatisierungseigenschaften den Bremsstrahlungsuntergrund reduziert. Zur Thematik Intensitätsverstärkung von Channelingstrahlung durch Ultraschallanregung des Kristallradiators wird eng mit der auf diesem Gebiet führenden Theoriegruppe vom Institut für Angewandte Probleme der Physik (IAPP) der Armenischen Akademie der Wissenschaften in Yerevan zusammen gearbeitet. Da neben der in den Nachfolgestaaten der Sowjetunion traditionell leistungsfähigen theoretischen Physik dort auch erhebliche experimentelle Erfahrungen auf strahlungsphysikalischem Gebiet vorliegen, die jedoch wegen des gegenwärtig schlechten materiellen Umfeldes vor Ort nicht umgesetzt werden können, sollen künftig auch Yerevaner Experimentalphysiker in Studien am ELBE-Strahl einbezogen werden. Vorschläge für strahlungsphysikalische Experimente an ELBE wurden ferner eingebracht von dem Polytechnikum Kharkov (Ukraine), der Universität Hiroshima (Japan), der Universität Hyderabad (Indien), dem IPN Lyon (Frankreich) und der Universität Tomsk (Russland). Zusammenarbeit auf strahlungsphysikalischem Gebiet wird mit der Universität Mainz und der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble gepflegt.

Durch die beim Aufbau der Strahlungsquelle ELBE und bei der Vorbereitung zellbiologischer Experimente erworbene Kompetenz auf dem Gebiet von Strahlungstransportrechnungen wurde eine Kooperation mit einem Industriepartner, der Gamma-Service Produktbestrahlung Leipzig, bei der Entwicklung eines Verfahrens zur Produktbestrahlung möglich. Dabei wurden die von einem industriellen Elektronenbeschleuniger (Elektronenenergiewerte: 4,0 und 9,8 MeV, Strahlstrom 10 mA) in Form von Elektronen- oder Bremsstrahlung im Bestrahlungsgut - z. B. Kunststoffrohre (Polymervernetzung) oder medizinische Einwegartikel (Sterilisierung) - deponierte Dosisleistung berechnet. Es wurden ferner Basisdaten für die Gestaltung der Abschirmung der Bestrahlungsanlage bereitgestellt und für das Radiatortarget zur Erzeugung von Bremsstrahlung

bzgl. Strahlungsausbeute, Konversionseffektivität und Aktivierung berechnet.

Die Zusammenarbeit mit der Radiologischen Universitätsklinik Heidelberg, dem Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) Heidelberg und der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) Darmstadt ergibt sich aus dem gemeinsamen Betreiben der klinischen Schwerionen-Tumorthherapie, aber auch aus der Weiterentwicklung der Rossendorfer PET-Methode des Therapiemonitorings für Vielfelderbestrahlungen an rotierenden Strahlführungen für die in der Projektierung befindliche klinische Schwerionentherapie-Anlage in Heidelberg und in der Ausdehnung des Einsatzes der Methode auf andere Strahlarten (Protonen). Bei der Ausarbeitung einer Methode der Streukorrektur für PET-Daten wird mit dem Institut für Strahlenschutzphysik der TU Dresden zusammengearbeitet.

Im FEL-Bereich ist die Zusammenarbeit mit dem DESY-HASYLAB hervorzuheben. Sie bezog sich vor allem auf Fragen der Elektronenstrahldiagnostik und auf die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften spezieller Undulatorkonfigurationen. In beiden Fällen konnte ein gewisser Ausgleich geleistet werden für die gute Unterstützung des ELBE-Projekts durch DESY, indem das Institut mit eigenständigen Neuentwicklungen Lösungen erarbeitete, die auch für die Tesla Test Facility von Interesse sind.

Hinsichtlich der Konzipierung der Bremsstrahlungsanlage an ELBE und der Planung des Experimentaufbaus für die Kernresonanzfluoreszenz profitierte die Gruppe von den wertvollen Erfahrungen am S-DALINAC der TU Darmstadt, am DYNAMITRON der TU Stuttgart und an der Quelle für polarisierte Photonen in Gent. Gemeinsame Experimente, an denen auch die Gruppe der Universität zu Köln teilnahm, waren sehr hilfreich bei dem Entwurf eines eigenen Experimentierprogramms für ELBE. Unter Rossendorfer Federführung wurden erfolgreiche Experimente in Zusammenarbeit mit den deutschen Partnergruppen der EUROBALL-Kollaboration (Universitäten zu Köln, Göttingen, Bonn) und den italienischen Partnergruppen in Legnaro am EUROBALL- und am GASP-Spektrometer durchgeführt. In gemeinsamen Experimenten mit der ISOL-Gruppe der GSI Darmstadt am UNILAC wurde der Rossendorfer CLUSTER-Detektor eingesetzt. Mit der geplanten Überführung von EUROBALL-Detektoren zur GSI Darmstadt wird sich der Kontakt der Rossendorfer Kernphysik zur GSI verstärken, da ein gemeinsames Interesse an der Untersuchung astrophysikalisch relevanter Kerne besteht. Die Zusammenarbeit mit der Universität Sofia und dem INRE Sofia in gemeinsamen Forschungsprojekten bringt einen deutlichen Gewinn an Effektivität für die Forschungsarbeit. Gemeinsame Aktivitäten bestehen auf dem Gebiet der

Kernstrukturtheorie mit der Universität Sofia, der University of Tennessee (USA) und der Notre Dame University (USA). Die Komplettierung des HADES-Detektors und die Vorbereitung von Experimenten erfolgt an dem Schwerionensynchrotron SIS an der GSI Darmstadt im Rahmen einer großen Kollaboration, in der u. a. Gruppen der Universitäten Frankfurt, Giessen, München, Krakow und Praha mitarbeiten. Die im FZR gebauten Drahtkammerzähler werden weiterhin im internen Strahl des Cooler Synchrotrons COSY in Jülich eingesetzt; dieses Projekt wird

ebenfalls in einer Kollaboration mit starker internationaler Beteiligung durchgeführt. Die Zusammenarbeit mit der GSI, der Universität Frankfurt und Erlangen, den Technischen Universitäten Darmstadt und Dresden sowie mit dem FZ Jülich wurde mit dem Ziel der abschließenden Datenanalyse von früher begonnenen Experimenten am SIS und am COSY weitergeführt. Die Theoriegruppe profitiert von der Zusammenarbeit mit der McGill University in Montreal, SUBATECH in Nantes, dem KFKI Budapest, dem ITP Kiev und dem JINR in Dubna.

Forschungsvorhaben

- Strahlungsquelle ELBE
- Forschung mit kohärenter Infrarotstrahlung
- Nichtkonventionelle Röntgenquellen
- Biomedizinische Untersuchungen mit physikalischen Methoden
- Kernphysik mit Bremsstrahlung
- Untersuchungen zur Struktur mittelschwerer Kerne
- Elektromagnetische Signale von Hadronensystemen und das HADES-Projekt
- Strangeness in Hadronenreaktionen

Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999/2000

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		44/44				Wissenschaftler			19/19		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	7/5	3,3/3,5	Doktoranden	5/7	1/2,5	Gastwissenschaftler	19/27	1,1/2,6	Hilfskräfte	1/3	0,1/0,1
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	6/7	3/3,9	Doktoranden	5/5	2/2,2	Gastwissenschaftler	8/7	1,2/1,4	Stipendiaten	1/3	0,3/0,8
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		579,9/2425,6				drittmittelfinanziert			891,2/405,3		

Direktor:

Prof. Dr. Eckart Grosse

Tel.: +49 351 260-2424

E-Mail: e.grosse@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter:

Prof. Dr. Eckart Grosse

Freie Elektronen Laser

Prof. Dr. Burkhard Kämpfer

Hadronenphysik

Dr. Friedrich Döna

Kernphysik

Dr. Harald Prade

Strahlungsphysik (bis 31. 1. 2000)

Dr. Wolfgang Enghardt

Strahlungsphysik (ab 1. 2. 2000)



Institut für Sicherheitsforschung

Zielstellung – ein Überblick

Das Institut zielt mit seiner Tätigkeit darauf ab, Risiken und Gefahren aus industriellen und technischen Aktivitäten für Menschen und Umwelt zu bewerten und Möglichkeiten aufzuzeigen, um Risiken zu mindern und Gefahren auszuschließen. Im Sinne dieser Zielstellung arbeitet das Institut auch an Problemstellungen zur effizienten und umweltschonenden Prozessführung.

Seit 1992 ist das Spektrum der Arbeiten, ausgehend von den Forschungen zu den russischen Druckwasserreaktoren, auf die Sicherheit westlicher Reaktoren und die chemische Verfahrenstechnik ausgeweitet worden. Das Institut verfolgt einen generisch-methodischen Ansatz, d. h., die Arbeiten sind weniger auf die Analyse einzelner Anlagen gerichtet als vielmehr auf die Entwicklung möglichst allgemein nutzbarer mathematisch-physikalischer Modelle zur Prozessoptimierung und Störfallanalyse sowie von Verfahren zur Anlagen- und Prozessüberwachung. Diese thematische Ausrichtung ist durch den Bericht des Wissenschaftsrates nach der Evaluierung im Jahre 2000 als richtig bestätigt worden.

Zur Analyse der thermofluidodynamischen Prozessphänomene in verfahrenstechnischen und kerntechnischen Anlagen werden physikalische Modelle und Computercodes für Mehrphasen- und Mehrkomponentenströmungen sowie für die orts- und zeitabhängige Leistungsfreisetzung entwickelt. Bei verfahrenstechnischen Anwendungen ist die genaue Kenntnis der thermokinetischen Daten und der Prozessverläufe eine wichtige Voraussetzung für die effiziente und umweltschonende Prozessführung und für die Störfallprävention. Deshalb wird die Kinetik exothermer chemischer Reaktionen bei normalem Verlauf und bei Runaway experimentell und theoretisch untersucht.

Die Magnetohydrodynamik (MHD) als spezielle Ausprägung der Thermohydraulikforschung des Instituts behandelt das Verhalten elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten unter dem Einfluss externer elektromagnetischer Felder. Sie eröffnet eine Vielzahl technologischer und sicherheitsrelevanter Anwendungen, z. B. bei der Züchtung von Halbleiter-Einkristallen, beim Schiffbau, der Metallurgie und der Elektrochemie. Diese Anwendungen sind, wie auch bisher bereits erfolgreich praktiziert, aus der Forschung zu grundlegenden MHD-Effekten heraus zu erschließen.

Als Grundlage der theoretischen Arbeiten zur Thermofluidodynamik sind vertiefende experimentelle Untersuchungen unumgänglich. Deshalb hat

das Institut mit dem Aufbau einer größeren Versuchsanlage für räumliche und transiente Strömungen (TOPFLOW) begonnen und entwickelt schnelle tomographische Messverfahren. TOPFLOW ist derzeit das wichtigste Einzelprojekt des Instituts.

Die Arbeiten zur Material- und Komponentensicherheit sind auf die Bewertung von Alterungsvorgängen in Konstruktionswerkstoffen durch Neutronen- und Gammastrahlen ausgerichtet. Neue Methoden und Programme für die Berechnung des Teilchen- und Strahlungstransportes werden entwickelt, um die Strahlenbelastung von Komponenten zu bestimmen. Die Degradation der mechanischen Eigenschaften wird mit bruchmechanischen Methoden untersucht. Für die Aufklärung der mikrostrukturellen Schädigungsmechanismen werden hochauflösende Strukturanalysemethoden, vornehmlich Kleinwinkelstreuanalysen, genutzt. Das Institut entwickelt sich auf dem Gebiet der Material Sicherheit zu einem Zentrum für die Untersuchung bestrahlten Materials.

Ausgehend von den Störfalllasten (Drücke, Temperaturen) und den bruchmechanischen Eigenschaften der sicherheitsrelevanten Komponenten wird die Integrität von Anlagen über strukturmechanische Berechnungen bewertet. Zu diesem Zweck werden Modelle entwickelt, welche die mechanischen und thermischen Wechselwirkungen zwischen den Fluiden und den Komponenten berücksichtigen.

Da technische Aktivitäten und insbesondere Störfälle zur Emission von Schadstoffen bzw. Radioaktivität führen können, werden Modelle zur Beschreibung des Transportes dieser Schadstoffe in der Geosphäre benötigt. Dabei konzentriert sich das Institut auf die Modellierung der physikalischen und chemischen Vorgänge beim Transport von Radionukliden in mit Wasser unvollständig gesättigten Bodenzonen. Die theoretischen Modelle werden an Laborexperimenten validiert.

Wichtigste Ergebnisse

Das Institut kann für den Berichtszeitraum wiederum eine sehr positive Drittmittelbilanz vorlegen. 35,5 % (5,1 Mio. DM) des gesamten Institutsbudgets stammen aus der Forschungsförderung und aus Forschungsaufträgen. Dabei sind 14,5 % Fördermittel des Bundes, des Freistaates Sachsen und der EU. 13,5 % (2 Mio. DM) der Mittel kommen von der DFG und 7,5 % aus Forschungsaufträgen. Absolut konnte der Stand der Drittmittel gehalten werden, der prozentuale Rückgang ist auf die erhöhten Investitionen für den Aufbau von TOPFLOW zurückzuführen.

Im Berichtszeitraum hat das Institut wiederum Meetings und Workshops mit internationaler Beteiligung veranstaltet. Zu nennen sind zwei Workshops zu neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Zweiphasenmesstechnik, ein Workshop zu Measuring Techniques for Liquid Metal Flows und ein sehr gut besuchtes internationales Meeting über die Wechselwirkung von Thermohydraulik und Neutronenkinetik bei reaktordynamischen Berechnungen.

Der Aufbau der Thermohydraulikversuchsanlage TOPFLOW konnte ganz wesentlich vorangetrieben werden. Die Planungsarbeiten wurden abgeschlossen. Durch die Übernahme wichtiger Komponenten des NOKO-Versuchsstandes aus Jülich konnten die Gesamtkosten auf 9-10 Mio. DM reduziert werden. Mit dem Umbau und der Sanierung des Gebäudes ist bereits begonnen worden. TOPFLOW ist eine unikale Versuchsanlage für die Untersuchung von Zweiphasenströmungen und wird die wichtige Rolle des Instituts auf dem Gebiet der Thermohydraulikforschung in Deutschland wesentlich stärken.

Am Versuchsstand ROCOM wurden umfassende Experimente zur Untersuchung der Kühlmittelvermischung bei Deborierungs- und Kaltwassertransienten in Druckwasserreaktoren durchgeführt. Durch den Einsatz neuartiger Messtechnik wurden die Vermischungsvorgänge mit zuvor nicht erreichter räumlicher und zeitlicher Auflösung erfasst. Auf dieser Grundlage wurden CFD-Berechnungsmodelle validiert und neue semi-empirische Berechnungsverfahren entwickelt, die wesentlich kürzere Rechenzeiten ohne Verlust an Genauigkeit ermöglichen.

Innerhalb von nur 18 Monaten wurde gemeinsam mit der TU Dresden und mit Finanzierung des SMWK ein weltweit neuartiges Verfahren zur Visualisierung von periodisch veränderlichen Gasgehaltsverteilungen von der grundlegenden Idee bis zur Erprobung des fertigen Messsystems entwickelt. Es handelt sich um einen Gamma-Tomographen, der die Gasgehaltsverteilung im Laufrad einer Axialpumpe bei Kavitation oder der Förderung zweiphasiger Medien mit einer räumlichen Auflösung von ca. 5 mm misst. Die zeitaufgelöste Messung erfolgt durch eine drehwinkelsynchrone Erfassung der empfangenen Strahlungsintensitäten. Das Messsystem kann vielfältig für die Auslegung und Optimierung von Prozessen und Komponenten (Pumpen, Verdichter, begaste Rührkesselreaktoren) in der Verfahrensindustrie eingesetzt werden. Weltweit große Beachtung fanden die Ergebnisse zur zeitlich und räumlich hochaufgelösten Messung der Zweiphasenströmung in einer vertikalen Rohrleitung. Es ist erstmals gelungen, radiale Gas-

gehaltsprofile nach den verschiedenen Blasengrößen aufzulösen und die Evolution dieser Profile und der Blasengrößenverteilungen entlang des Strömungsweges zu charakterisieren. Damit sind Aussagen über die auf die Blasen wirkenden Strömungskräfte und neue theoretische Ansätze zur Beschreibung von Zweiphasenströmungen möglich.

Die Entwicklung eines Ultraschall (US)-Verfahrens zur Messung des Rissfortschrittes an bruchmechanischen Kleinproben (Charpy-Geometrie) wurde abgeschlossen. Mit diesem Verfahren kann die Rissausbreitung während einer zunehmenden 3-Punkt-Biegebelastung verfolgt und daraus die Risswiderstandskurve berechnet werden. Für derartig kleine Probenabmessungen ist ein US-Verfahren bisher noch nicht beschrieben worden. Es hat gegenüber etablierten Methoden eine ganze Reihe von Vorteilen. Insbesondere kann über einen theoretisch ermittelten Zusammenhang zwischen der Schalllaufzeit und dem Rissfortschritt unter Berücksichtigung der Probenbiegung eine höhere Genauigkeit erreicht werden.

Das Verhalten der unteren Kalotte eines Reaktor-druckbehälters bei einem schweren Störfall mit Schmelzeverlagerung in das untere Plenum wird in einem 1:10-Modellversuch im Rahmen eines EU-Projekts am Königlichen Institut für Technologie Stockholm untersucht. Mit einem im Institut entwickelten Berechnungsverfahren wurde der Versuch mit dem Ziel vorausberechnet, Zeitpunkt und Art des Versagens zu ermitteln. Temperaturverlauf, Versagensgeometrie und Versagenszeit wurden in sehr guter Übereinstimmung zum Experiment berechnet. Kernstück des Berechnungsverfahrens ist ein Kriechmodell, das mehrachsige Spannungen berücksichtigt. Metallografische Analysen von Druckbehälterproben aus dem Versagensbereich bestätigen die im Modell ermittelten Schädigungsverläufe.

Im November 1999 wurde gemeinsam mit dem Institut für Physik der Universität Riga weltweit erstmalig der Nachweis der Magnetfeldselbsterregung in einer Flüssigmetallströmung erbracht. Mit der zweiten Messkampagne im Jahre 2000 konnten diese Ergebnisse mehrfach reproduziert und weiter untersucht werden. Damit ist ein wesentlicher Schritt zur Erklärung der Entstehung des Erdmagnetfelds getan worden. Die Messungen lassen eindeutig den Schluss zu, dass das Magnetfeld die Strömung nicht nur global bremst, sondern auch deren Struktur ändert. Die Resultate der neueren Messungen wurden zur Veröffentlichung bei Phys. Rev. Letters angenommen. In künftigen Experimenten ist das nichtlineare Wechselspiel von



Strömung und Magnetfeld vertieft zu untersuchen. Die Rigaer Versuchsanlage bietet hierfür weltweit einzigartige Möglichkeiten.

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Das Institut für Sicherheitsforschung orientiert bei den Forschungsarbeiten auf die Vernetzung mit den Instituten des Zentrums. Dies gilt in besonderer Weise für die Modellierung des Radionuklidtransportes in ungesättigten Bodenzonen gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie. Die beiden Institute vereinen an dieser Stelle ihre Kompetenz zur Speziationsanalytik einerseits und zur mathematischen Modellierung physiko-chemischer Prozesse andererseits. Dieses gemeinsame Vorhaben soll weiter verstärkt werden.

Mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik wird an einem Projekt zur Erzeugung und Nutzung schneller Neutronen an ELBE gearbeitet. In einem ersten Schritt sind das Produktionstarget und die Abschirmung für die Flugzeitstrecke auszulegen. Gemeinsam mit der TU Dresden wurde ein DFG-Projekt zu diesem Thema eingeworben.

Darüber hinaus nutzt das Institut konsequent die wissenschaftliche Infrastruktur und die Verfahren anderer Institute für neue Ansätze bei seiner Forschung. Als Beispiele sind die Anwendung von PET-Methoden in der Strömungsmesstechnik (Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie), die Strukturanalyse von geschädigten Werkstoffen (Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung) und die Nutzung fortgeschrittener chemischer Analyseverfahren (Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie) für die Reaktionsaufklärung bei verfahrenstechnischen Prozessen zu nennen.

Forschungsvorhaben

- Modelle für die Störfallanalyse
- Thermofluiddynamik
- Magnetohydrodynamik (MHD) elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten
- Material- und Komponentensicherheit
- Sicherheit und Effektivität chemischer Prozesse
- Teilchen- und Strahlungstransport

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Die wissenschaftliche Kooperation mit internationalen und nationalen Forschungseinrichtungen und der Industrie erfolgt vorrangig über gemeinsame Projekte bzw. direkte Forschungsaufträge. Die Untersuchungen zum Erddynamo erfolgten gemeinsam mit dem Institut für Physik der Universität Riga. Außerdem ist das Institut derzeit an 6 internationalen Projekten des 5. Forschungsrahmenprogrammes der EU beteiligt. Vier dieser Projekte betreffen Fragen der Reaktorsicherheit und der Transmutation von langlebigen Radionukliden, eines die Entwicklung von Messtechnik für Flüssigmetalle. Partner in diesen Vorhaben sind hochrangige Institutionen und Firmen aus ganz Europa (z. B. Siemens KWU, EDF, Iberdrola Spanien, Tractebel Belgien, VTT Finnland, ENEA Bologna, CEA Cadarache, CIEMAT Madrid, Universität Delft, FZ Karlsruhe, FZ Jülich, Kurchatov Institut Moskau, KFKI Budapest, NRI Rez).

Im Jahr 2000 ist der nationale Kompetenzverbund Kerntechnik auf Anregung des BMWi gegründet worden, dem die Forschungszentren Karlsruhe, Jülich und Rossendorf und die GRS jeweils mit den Hochschulen in ihrem Umfeld angehören. Dieser Kompetenzverbund koordiniert die Forschungsaktivitäten zur Reaktorsicherheit und Entsorgung. Das FZR (Institut für Sicherheitsforschung und Institut für Radiochemie) hat sich in diesem Rahmen zu wesentlichen Beiträgen zur Reaktorsicherheits- und Entsorgungsforschung in Deutschland verpflichtet. Auf dem Gebiet der MHD leitfähiger Fluide wurde gemeinsam mit der TU Dresden, der TU BA Freiberg und dem IFW Dresden ein Vorschlag für einen Sonderforschungsbereich inhaltlich konzipiert, der im Frühjahr 2001 bei der DFG eingereicht wird.

Die Arbeiten zur Sicherheit und Effektivität chemischer Prozesse werden z. T. gemeinsam mit FhG UMSICHT im Auftrag des BMBF und der Industrie (Degussa-Hüls AG, Arzneimittelwerk Dresden GmbH, Krupp Uhde und der Fa. Reichold Chemie, Österreich) durchgeführt.

Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999/2000

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		50/50				Wissenschaftler			16/16		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	5/4	1,8/3,3	Doktoranden	3/4	0,4/1,5	Gastwissenschaftler	11/11	0,6/0,9	Hilfskräfte	7/8	0,6/1,1
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	33/44	14,3/30,6	Technisches Personal	12/9	4,9/6	Stipendiaten	2/4	0,8/0,7	Doktoranden	7/1	1,3/0,7
Gastwissenschaftler	25/31	2,9/2,4	Student. Hilfskräfte	-/3	-/0,1	Postdoc	2/-	0,6/-			
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		1388,7/2569,4				drittmittelfinanziert			69,7/118,5		
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		55/58				Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			65/80		
Artikel (referiert)		27/27				Diplomarbeiten					
Artikel (nicht referiert)		-/2				Doktorarbeiten			2/1		
Artikel im Eigenverlag		14/16				Patentanmeldungen			4/5		
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		7/3									

Direktor:

Prof. Dr. Frank-Peter Weiß

Tel.: +49 351 260-3480

E-Mail: f.p.weiss@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter:

Dr. Horst-Michael Prasser

Experimentelle Thermofluidynamik

Dr. Jürgen Böhmert

Material- und Komponentensicherheit

Dr. Klaus Noack

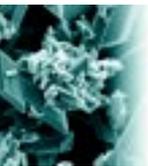
Teilchen- und Strahlungstransport

Dr. Gunter Gerbeth

Magneto-Hydrodynamik

Dr. Ulrich Rohde

Störfallanalyse



Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik

Zielstellung – ein Überblick

Die ingenieurtechnische Unterstützung der Forschungsvorhaben im FZR bei der Schaffung spezieller Experimentausrüstungen ist die Aufgabe der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik. Die Bearbeitung dieser Aufgabe erfolgt in drei Entwicklungsabteilungen mit umfangreichen Erfahrungen auf folgenden Gebieten:

- Messtechnik (sensornahe Hardware, Messmethodik)
- Informationstechnik (Instrumentierungssysteme, Rechentechnik, Softwareentwicklung)
- Mechanische Entwicklung (Konstruktion, Projektierung)

Daneben gibt es eine Gruppe für mechanische Technologie mit einer leistungsstarken Versuchswerkstatt, die über ein breites Spektrum verschiedenster Sondertechnologien verfügt, um den spezifischen Anforderungen seitens der wissenschaftlichen Experimente zu entsprechen.

Schwerpunkte bildeten wiederum Arbeiten zur Rossendorfer Beamline ROBL, für das Materialprüflabor, Entwicklungsarbeiten für den Tandembeschleuniger und für das ELBE-Projekt. An diesen Projekten sind jeweils mehrere Institute bzw. Zentralabteilungen des Forschungszentrums beteiligt.

Bedingt durch das ingenieurtechnische Profil der Zentralabteilung und ihre engen Kontakte zur Industrie fungiert sie in vielen Fällen als Bindeglied zur Überführung von originären Lösungen aus der Forschungstechnik in die Industrie (Geräte, Methoden, Technologien).

Wichtigste Ergebnisse

Strahlungsquelle ELBE

Ergebnisdarstellung siehe Projektgruppe ELBE-Quelle.

ROBL

Es wurden für den Materialforschungs (MRH)-Messplatz eine automatische Totzeitkorrektur und eine Filtersteuerung entwickelt und eingeführt (damit wird produktives Arbeiten ermöglicht).

Zu QEXAFS-Messungen wurden Voruntersuchungen und Messungen in Grenoble mit einem Spezialmessprogramm zur Vorbereitung einer Lösungskonzeption durchgeführt.

Das Steuer- und Spektrenaufnahmeprogramm *xatros* wurde vervollkommenet.

Es erfolgten Installation und Testmessungen mit dem D-Mostab-Modul zur Strahlstabilisierung für die Materialforschung sowie Messungen der

Strahlintensität mit Ratemetern und die Bedienung mit Spezialsoftware. Das Bedienprogramm konnte in modifizierter Form an die belgisch/holländische Beamline übergeben werden. In der MRH wurde das Strahlprofil vermessen.

Die Untersuchungen der Schwingungen in der Optik (Aufnahme der Spektren an den Hauptkomponenten in Zusammenarbeit mit ESRF) und der Störung von Messsignalen wurden fortgesetzt. Die Online-Dokumentation (Programm: *showdoc*) wurde verbessert, die gesamte Software-Dokumentation erstellt und die Hardware-Dokumentationen aufbereitet.

Es wurde eine Sputterkammer für Experimente der Materialforschung konstruiert.

Radionuklidlabor für Werkstoffuntersuchungen

Die Steuerung für die Drahterodiermaschine mit Simatic S7 wurde entwickelt. Nach Erprobung in der Werkstatt von FWF wurde die gesamte Anlage im August 2000 an das Radionuklidlabor überführt. Zum 31. 12. 2000 wurde das kleine Pendel-schlagwerk mit Steuerung übergeben.

Ausbau Ionenstrahltechnik

Die Konstruktionsarbeiten an der 2. Ausbaustufe der Strahlführung wurden abgeschlossen. Das Steuerungssystem für die vorgesehene Kopplung Tandem-Implanter wurde ergänzt. Das Steuerungsprogramm wurde erweitert und vervollständigt.

Dresdener Hochfeldlabor

Am 16. November 1999 wurde im IFW Dresden der gepulste Hochfeld-Versuchsstand mit der im FZR entwickelten und gebauten Stromversorgung offiziell eingeweiht. Seitdem wird dort erfolgreich mit hohen Feldern experimentiert. Der bisher größte Puls von 52 Tesla für ca. 10 ms wurde im Mai 2000 erreicht.

PET- Zentrum

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde die Steuerungstechnik mit SIMATIC S7 und WinCC für die Fluor-Dopa-Syntheseanlage entwickelt und zum 31. 12. 2000 an das PET-Zentrum übergeben.

Experiment ANKE im FZ Jülich

Im Berichtszeitraum wurden dem FZ Jülich insgesamt 180 der in der Abteilung entwickelten Leiterkarten-readout-Module nach Prüfung zur Verfügung gestellt.

Werkstattarbeiten

Institut für Sicherheitsforschung

- Herstellung von verschiedenen Ausführungen des Gittersensors für Strömungsmessungen, einschließlich Mitarbeit bei der Erstellung der Messmodelle für Hannovermesse und EXPO

- Herstellung von Sonden
- Unterstützung bei verschiedenen Arbeiten für das Werkstoffprüflabor, z. B. Erodiermaschine für radioaktive Proben
- Auslieferung des Kerbschlagprobenversuchsstandes nach Funktionserprobung
- Anfertigung von 9 Stück Probenkarussell
- Anfertigung einer Spaneinrichtung für Schweißproben Werkstoffprüflabor

Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

- Herstellung von Komponenten für die Strahlkopplung
- Fertigung weiterer Diagnosekammern und Rohrstücke für 2. Strahlabschnitt
- Fertigung weiterer Gestelle
- Anfertigung von mechanischen Baugruppen wie z. B. TEM-Präparation, Adapter für Orsay Quelle, Messblenden, Titanfräserhalter

- Herstellung einer Spezial-Rohrabstützung
- Herstellung einer Target-Schwenk- und Dreheinrichtung
- Einzelteillfertigung für Probenpräparation am Elektronenmikroskop
- Fertigung von Teilen für Röntgenuntersuchungen an Probenadaptern

Strahlrohr ROBL

- Anfertigung von mechanischen Baugruppen, z. B. Schienensystem für Goniometer

Dresdner Hochfeldlabor

- Anfertigung aller mechanischen Bauteile für die Pilotanlage

Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999/2000

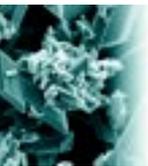
Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		50,5/50				Wissenschaftler			11/11		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	-/1	-/1	Doktoranden	1/-	0,3/-	Gastwissenschaftler	-/2		Hilfskräfte	-/3	-/1
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		234,6/264,1				drittmittelfinanziert			-/55,9		

Zentralabteilungsleiter:

Dr. Frank Gabriel

Tel.: +49 351 260-3109

E-Mail: f.gabriel@fz-rossendorf.de



Zentralabteilung Neue Beschleuniger

Überblick und Zielstellung

Die Zentralabteilung Neue Beschleuniger nahm intensiv am Aufbau der Strahlungsquelle ELBE teil und hat das Zyklotron U-120 bis zu seiner Stilllegung Ende 1999 betrieben. Ende 2000 wurde die Zentralabteilung aufgelöst und die Mitarbeiter in die neu gegründete Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE übernommen.

Die Arbeitsgebiete der Zentralabteilung im ELBE-Projekt waren Hochfrequenztechnik, Entwicklung einer supraleitenden Photo-HF-Elektronenquelle (DFG-Projekt) und Strahlenschutz. Inzwischen wird von Mitarbeitern der Zentralabteilung die Gebäudetechnik betreut und der Betrieb der Helium-Verflüssigungsanlage durchgeführt.

Wichtigste Ergebnisse

HF-Technik für die Strahlungsquelle ELBE

- Die Leistungsverstärkerschränke für die Buncherkavitäten des Injektors und für die beiden supraleitenden Kavitäten des ersten Kryomoduls wurden montiert, angeschlossen und getestet.
- Die Hohlleiter, Richtkoppler und Dreistab-Tuner wurden bis 10 kW HF-Leistung erprobt.
- Während der Montagephase wurden die Frequenzen der supraleitenden Kavitäten kontrolliert sowie die Sperrkreise für die Higher-Order-Mode-Filter abgeglichen.
- Zur Überwachung von Mikrowellenlecks im Hohlleitersystem wurde ein Kontrollempfänger entwickelt und aufgebaut.
- Für die supraleitende Photo-HF-Elektronenquelle erfolgten vor und nach der Reinraumbehandlung der Kavität (im DESY) am hiesigen Koppler-Teststand HF-Konditionierungsarbeiten und Leistungstests.

Strahlenschutz für die Strahlungsquelle ELBE

Der Sicherheitsbericht zur Strahlungsquelle ELBE wurde für den Probetrieb bis zur Beschleunigung von Elektronen auf 20 MeV erweitert und bei der zuständigen Behörde mit den Anträgen auf Betriebsgenehmigung in den aufeinander folgenden Stufen „Injektor bis 250 keV“ und „Beschleuniger bis 20 MeV und Betrieb einer Versuchsanlage zur Optimierung einer supraleitenden Photo-HF-Elektronenquelle als Injektor für die Strahlungsquelle ELBE im Strahlraum 111b des ELBE-Gebäudes“ eingereicht. Das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie erteilte die entsprechenden Genehmigungen zum Probetrieb am 19. 1. 2000 und 24. 11. 2000.

Supraleitende Photo-HF-Elektronenquelle

- Mit numerischen Simulationen für 1/2- und 3-1/2-zellige Resonatoren wurde gezeigt, dass bei geeigneter Resonatorgeometrie in einer supraleitenden Elektronenquelle eine fokussierende Wirkung durch das Hochfrequenzfeld erreicht werden kann wie in einer normalleitenden Quelle durch das magnetische Feld (NIM [A452](#) (2000) 34 - 43).
- In einem DESY-Kryostaten wurde ein weiterer Test des Quellenresonators durchgeführt. Zum Einsatz kam eine Kathode mit aufgedampfter Molybdän- und Tellurschicht. Bei einer Güte von $Q = 5 \cdot 10^8$ wurde eine optimistisch stimmende Peak-Feldstärke von 30 MV/m erreicht (NIM [A445](#) (2000) 408 - 412).
- Der Innenaufbau des Stanford-Kryostaten zur Aufnahme der supraleitenden 1/2-zelligen Beschleunigungsstruktur wurde konstruiert, gefertigt und einschließlich Messtechnik (Füllstandsanzeige, Temperaturmessung) und HF-Koppler in Betrieb genommen und getestet.
- Die Laserentwicklung wurde weitgehend abgeschlossen, sodass eine „Vorabvariante“ des Lasers ab Februar 2001 zur Verfügung stehen wird.

Zyklotron U-120

Bis zum Jahresende 1999 wurden mit dem Zyklotron die traditionellen Arbeiten für interne und externe Nutzer durchgeführt: Produktion kurzlebiger Radionuklide, Dünnschichtaktivierungen an Maschinenteilen und Erzeugung von Neutronen. Per 31. 12. 1999 wurde der Zyklotronbetrieb eingestellt. Im Jahre 2000 erfolgte der Abbau nicht-radioaktiver Anlagenteile (Stromversorgungen). Nach einer ca. einjährigen Abklingzeit wird 2001 das Ausmessen und Klassifizieren des durch Aktivierung entstandenen radioaktiven Materials durchgeführt, um dann die weitere Strategie des Abbaus festlegen zu können.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

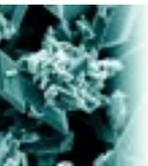
Die im Rahmen des ELBE-Projektes durchzuführenden Arbeiten laufen unter ständiger Zusammenarbeit mit den Instituten TU Dresden, DESY Hamburg, TU Darmstadt, Max-Born-Institut Berlin, Stanford FEL Center und Budker-Institut Novosibirsk. Inhalt der Zusammenarbeit sind der wissenschaftliche Informationsaustausch und die gemeinsame Bearbeitung von Teilaufgaben.

Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999/2000

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt			11/10			Wissenschaftler			4/3		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc			Doktoranden			Gastwissenschaftler		-/1	Hilfskräfte		3/3 0,1/0,2
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler		1/2	0,5/0,6		Gastwissenschaftler		3/5 0,6/1	Technisches Personal		-/1 -/0,5	
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert			118,3/90,2			drittmittelfinanziert			-/107,1		
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken						Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			3/-		
Artikel (referiert)			-/2			Doktorarbeiten					

Zentralabteilungsleiter:
Dr. Hartmut Guratzsch

Tel.: +49 351 260-3283
E-Mail: h.guratzsch@fz-rossendorf.de



Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung

Zielstellung – ein Überblick

Die Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung ist als Teil der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur für Planung, Koordinierung und Betrieb der Informatik-Infrastruktur im Forschungszentrum Rossendorf zuständig. Sie ist Kompetenz- und Dienstleistungszentrum für Datenkommunikation und Datenverarbeitung. Zu ihren Aufgaben gehören der Betrieb der Zentralen Server, der Benutzerservice auf den Gebieten Numerik, Programmierung und Visualisierung sowie die institutsübergreifende Gestaltung und Betreuung der PC-Infrastruktur. Hinzu kommen Planung, Ausbau und Betreuung des lokalen Datennetzes und seines Zugangs zum Wissenschaftsnetz (WIN). Mitarbeiter der Abteilung sind in Projekte der Institute und Zentralabteilungen integriert.

Wichtigste Ergebnisse

Im Herbst 1999 wurde als zentraler Compute-Server ein Parallelrechner HP V2250 mit 16 Prozessoren installiert. Die bereits vorhandene HP V2250 wurde von 8 auf 16 Prozessoren erweitert. So standen Ende 1999 an den Zentralen Servern insgesamt 8 GFlops (Linpack 100) Compute-Kapazität zur zentrumsweiten Nutzung für serielles und paralleles Rechnen zur Verfügung.

Ausgebaut und erneuert wurden auch die zentralen Archiv- und Backupdienste an den Zentralen Servern durch Installation eines Archivrechners HP K570 mit einem Tape-Roboter. Er verfügt über ein Volumen von 17,4 TByte und 6 DLT-7000-Laufwerke. Die Archivsoftware UniTree wurde in der (modernsten) Version 2.3 installiert. Der Backup-Dienst wurde zu ADSM (Vers. 3.1.2.5) migriert, das auf einer IBM/RS6000 F50 läuft. Für die zentrumsweite Datensicherung steht ein Tape-Roboter IBM 3584 zur Verfügung. Er besitzt ein maximales Speichervolumen von gegenwärtig 28 TByte, basierend auf der modernen LTO-Technologie. Zurzeit sind zentrumsweit 51 Clients in das Backup integriert.

Des Weiteren leistete die Abteilung an den Zentralen Servern infrastrukturelle Dienste. Hierzu zählte die Bereitstellung von Datenbanksystemen (Oracle 8), Informationsdiensten (WWW, NetNews), E-Mail- und Ftp-Services, Bootservices für X-Terminals, ferner von Druck- und Scandiensten.

Im Juni 2000 waren an den Zentralen Servern mehr als 800 Nutzer eingetragen. Standortweit verwendeten 550 PC Speicherplatz an den Zentralen Servern als Netzlaufwerke.

Der intensiv genutzte Druckdienst (über das Netz) erhielt mit der Installation eines Steuerrechners (Fiery V55) und eines Druckers / Kopierers (CLC 1150) eine neue leistungsfähigere Basis. Allein im Jahre 2000 wurden ca. 700 Poster und 120 000 Farbdrucke auf Papier und Folien hergestellt.

Die Gruppe Datennetze erweiterte das lokale Netz am Forschungsstandort bei Gebäudesanierungen (Geb. 5b, 6, 92, 93, 94 und 97) sowie auf Anforderungen der Nutzer. Mit dem Ausbau ging die Umstellung von shared zu switched Netzabschnitten (Geb. 1, 4, 4a, 5, 6, 13) einher. 10 Switche sind im LAN des FSR im Einsatz.

Die Umstellung von Subnetz- auf VLAN-Strukturen wurde fortgesetzt. Zurzeit existieren 10 VLAN-Strukturen. Die Gruppe bereitet Entscheidungen für künftige Netztechnologien vor.

Im August 2000 erfolgte die Einbindung der Rossendorfer TK-Anlage in den InfoHighway Sachsen.

Spürbare Fortschritte erreichte die Gruppe Benutzerservice bei der Betreuung der PC im FZR: Gemeinsam mit den Nutzern wurde ein Standard-PC definiert und zur Beschaffung durchgesetzt. Zur rationalen Organisation der PC-Technik entwickelte der Benutzerservice Werkzeuge für die Software-, Hardware- und Nutzerverwaltung. Der Benutzerservice veranstaltete Seminare, um die Nutzer für die IT-Sicherheit zu sensibilisieren. Er richtete einen Hilfsdienst bei Virenbefall und Verletzung der IT-Sicherheit ein. Als Antivirus-Software wurde das auf Windows-PC und auf Unix-Rechnern lauffähige Produkt Sophos eingeführt.

Für das FZR beschaffte der Benutzerservice im Jahre 2000 insgesamt 445 Software-Produkte im Werte von ca. 600 TDM.

Der Benutzerservice arbeitete an Projekten der Institute und Zentralabteilungen mit, beispielsweise an

- Abschirmungsrechnungen zum Projekt ELBE (Zentralabteilung Neue Beschleuniger)
- EGS4-Transportrechnungen (Institut für Kern- und Hadronenphysik) sowie
- an Mathematica- und Fortran-Programmen zur Berechnung des Nuklidtransports (Institut für Sicherheitsforschung).

Der Benutzerservice wurde zur Weiterentwicklung der Messdatenanalyse an ROBL hinzugezogen. Er erarbeitete für das Institut für Radiochemie ein Programm zur Verknüpfung von EXAFS-Spektren. Die Erschließung von Regularisierungsmethoden für die EXAFS-Analyse wurde begonnen.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Die Abteilung kooperiert mit der TU Dresden, Fakultäten Mathematik und Naturwissenschaften (Physik, wissenschaftliches Rechnen) sowie Informatik (Datennetze). Gemäß Protokoll der Zusammenarbeit mit dem VIK Dubna wirkten Wissenschaftler dieses Instituts an Projekten der Abteilung mit.

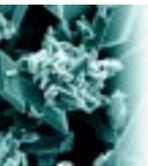
Mitarbeiter der Abteilung waren in folgenden Gremien tätig: DFN-Verein, EDV-Arbeitskreis der WGL, KODA der HGF, DIGI, NAG-User-Association Oxford/Großbritannien.

Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999/2000

Mitarbeiter [Planstellen]										
Gesamt		14/14				Wissenschaftler			5/5	
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]										
Gastwissenschaftler	3/3	0,3/0,2	Hilfskräfte		1/-	0,1/-				
Geräteinvestitionen [TDM]										
grundfinanziert		925,2/1139,6				drittmittelfinanziert				

Abteilungsleiter:
Dr. Ruprecht Fülle

Tel.: +49 351 260-3246
E-Mail: r.fuelle@fz-rossendorf.de



Projektgruppe ESRF-Beam-Line

Zielstellung – ein Überblick

Die Projektgruppe betreibt an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle (ESRF) in Grenoble ein eigenes Strahlrohr am Ablenkmagneten BM20 (ROBL-CRG). Die beiden alternativen Messplätze für

- radiochemische Untersuchungen mit Röntgenabsorptionsspektroskopie (RCH) und
- materialwissenschaftliche Untersuchungen mit Diffraktion und Reflektometrie (MRH)

werden vom FZR, Kooperationspartnern und externen Wissenschaftlergruppen genutzt.

Wichtigste Ergebnisse

Im Berichtszeitraum arbeitete ROBL zuverlässig im Dauerbetrieb ohne anlagentechnisch bedingte Messzeitausfälle. Alle geplanten 52 Experimente konnten realisiert werden. Die technischen Systeme der Steuerung und Überwachung von Beamline-Optik und Messeinrichtungen wurden weiter vervollkommen und optimiert, und zwar auf Basis gewonnener eigener Betriebserfahrung als auch der Kommentare externer Nutzer. Im Vordergrund standen Nutzerfreundlichkeit von Bedienoberflächen und Sicherheit gegen Fehlbedienung. Dazu gehört als umfangreichster Teil ein neues Steuer- und Spektrenaufnahmeprogramm (XATROS) für die Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAFS) bei RCH.

Die Experimentausrüstungen wurden ergänzt. Der He-Kryostat bei RCH wurde erfolgreich in Betrieb genommen, und es konnten damit Uran-EXAFS-Daten sowohl in Transmission als auch in Fluoreszenz mit hoher radialer Auflösung gewonnen werden. Bei MRH wurden der 2-dimensionale CCD-Detektor in Betrieb genommen und ein Sekundärmonochromator aufgebaut, der extrem hochauflösende Strukturuntersuchungen an Einkristallen ermöglicht.

Seit März 2000 wird ROBL als europäische Großanlage von der EU im Rahmen des Programms „Access to research infrastructures“ gefördert. Damit können ca. 15 % der Strahlzeit an europäische Gruppen über EU-Finanzierung vergeben werden. Die Auswahl der Anträge nimmt ein international besetztes Gremium vor. Etwa 30 % der gesamten Strahlzeit wird an Nutzer abgegeben, die von der ESRF ausgewählt und finanziert werden. Über diese beiden Wege wurden im Berichtszeitraum 19 Experimente an ROBL durchgeführt.

Thematisch sind die FZR-eigenen Experimente in die Forschungsprogramme der Institute für Radiochemie sowie Ionenstrahlphysik und Materialfor-

schung integriert. Die Zahl der bei ROBL mit XAFS untersuchten Transuranelemente wurde um das Plutonium erweitert. Die Strukturparameter von Pu(III)- und Pu(VI)-Hydraten wurden bestimmt und die Untersuchung von Pu-Humaten begonnen. Eine an das Goniometer in MRH angepasste Sputterkammer wurde in Kooperation mit der Universität Aarhus aufgebaut. Damit lässt sich das Wachstum von dünnen Schichten (auch aus mehreren Komponenten) in situ verfolgen.

Als Untersuchungsschwerpunkte seien genannt:

- Korrelation von Spannungsfeldern und Kristallisation bei der Ionenstrahlsynthese von SiC
- In-situ-Untersuchung der Phasenbildung von stickstoffimplantierten TiAlV-Legierungen bei hohen Temperaturen
- Studium der Struktur und Grenzflächenmorphologie in GMR-Multischichten mit Reflektometrie
- Erforschung des Wachstums magnetrongesputterter TiN-Filme in situ
- EXAFS-Studien zur Wechselwirkung von Uran mit Mikroorganismen und Pflanzen
- Strukturuntersuchungen von Hydraten des Urans, Neptuniums und Plutoniums und zur Komplexbildung von Huminsäuren mit Aktiniden mittels EXAFS
- Strukturaufklärung von Uranylarsenaten durch Kombination von EXAFS und Röntgendiffraktion
- Polarisationsabhängige EXAFS-Messungen zur Sorption von Uran an Mineraloberflächen
- Aufklärung der Struktur von für die Radiopharmazie relevanten Tc-Komplexen

Der „2nd Euroconference and NEA Workshop on Speciation, Techniques, and Facilities for Radioactive Materials at Synchrotron Light Sources“ vom 10.–12. September 2000 wurde in Grenoble äußerst erfolgreich durchgeführt (71 Teilnehmer aus mehr als zehn Ländern).

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Hauptpartner der Zusammenarbeit hinsichtlich Verbesserung der Ausrüstung von ROBL war im Berichtszeitraum die ESRF. Wissenschaftlich wurden in Zusammenarbeit mit 12 Gruppen von Instituten und Universitäten bei MRH und mit 12 Gruppen bei RCH Experimente an ROBL durchgeführt. Es waren dies: TU Dresden, TU Freiberg, FSU Jena, IFW Dresden, AMD Dresden, LMU München, Universität Saarbrücken, HMI Berlin, TU Chemnitz, FZ Karlsruhe, PSI Villigen/Schweiz, ITME Warschau/Polen, Universität Aarhus/Dänemark, KTH Stockholm/Schweden, Universität Manchester/Großbritannien, CEA Cadarache/Frankreich, CEA Grenoble/Frankreich,

SUBATECH Nantes/Frankreich, Universität Paris-Sud/
 Frankreich, CNRS Gradignan/Frankreich, Russische
 AdW Jekaterinburg/Russland.

Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999 / 2000

Die Projektgruppe setzt sich aus Mitarbeitern des Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung, des Instituts für Radiochemie und der Zentralabteilung für Forschungs- und Informationstechnik zusammen. Die Mitarbeiter sind in der Regel nur zu einem Teil ihrer Arbeitszeit in der Projektgruppe tätig. Wissenschaftliche Veröffentlichungen entstanden FZR-intern als auch bei Federführung externer Gruppen, sodass es eine gewisse Überschneidung mit der Statistik der o. g. Institute gibt.

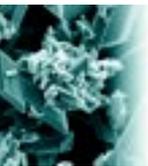
Geräteinvestitionen [TDM]			
grundfinanziert	36,1/86,7	drittmittelfinanziert	
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]			
Publikationen	5/11	Vorträge / Konferenzbeiträge / Poster	19/29
Seminare / Kolloquien	7/9	Reports	-/1
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]			
Meetings / Workshops	-/2		

Leiter:

Dr. Wolfgang Matz

Tel.: +49 351 260-3122

E-Mail: w.matz@fz-rossendorf.de



Projektgruppe ELBE-Quelle/Arbeitsgruppe Strahlführung und Strahldiagnose

Zielstellung – ein Überblick

Die Projektgruppe verfolgt das Ziel, am Forschungsstandort Rossendorf einen supraleitenden 40-MeV-Elektronenbeschleuniger mit hoher Brillanz und niedriger Emittanz (ELBE) für den Infrarotbereich aufzubauen. Für die Nutzung der FEL-Strahlung wird eine sogenannte User Facility eingerichtet, sodass auch externen Wissenschaftlern die Möglichkeit geboten wird, diese einzigartige Strahlungsquelle für Forschungszwecke zu nutzen. Des Weiteren wird der Elektronenstrahl für strahlungs- und kernphysikalische Untersuchungen verwendet werden; die Erzeugung von Neutronen für Materialuntersuchungen wird gemeinsam mit der TU Dresden vorbereitet. Unter Federführung des FZR wurde zusammen mit potenziellen externen Nutzern ein Proposal zum Aufbau einer intensiven Positronen-Quelle an ELBE erarbeitet.

Wichtigste Ergebnisse

Injektor

- Auswertung der Messdaten der Injektorerprobungsphase (März - Juni 2000)
- Abschluss der Optimierung des Injektors
- Ermittlung der wichtigsten Betriebsparameter für den Injektor (Emittanz als Funktion der Bunchladung, Bunchlänge an Injektorausgang als Funktion der Buncherparameter)

Ergebnisse:

Für alle vorgesehenen Betriebsmodi wurden die angestrebten Strahlparameter erreicht.

- Feinreinigung und endgültiger Aufbau des Injektors mit den Änderungen, die sich aus der Optimierung ergaben
- Aufbau einer zweiten Gun, Umbau und Erprobung des Gunversuchsstandes
- Kontrollmessungen zu den Simulationsrechnungen zur transversalen Emittanz der thermionischen Gun am Gunversuchsstand

Teilergebnisse:

Die ersten Untersuchungen bestätigen die o. g. Rechnungen, wodurch sich die Eigenschaften der thermionischen Gun gut erklären lassen.

Kryostat-Modul

- Endmontage und Dichtheitsprüfung des Kryostat-Moduls
- Test und Messungen der Abschirmwirkung des Magnetischen Schilds
- Funktions- und Dichtheitstest des Thermischen Schilds incl. Magnetischem Schild mit flüssigem Stickstoff

- HF-Messungen bei verschiedenen Temperaturen und Druckverhältnissen; Einstellen der HF-Hauptkoppler
- Optimierung der HV-Pumpstände für das Isoliervakuum
- Vorbereitung des Einbaus des Kryostaten in die Beschleunigeranlage

Strahltransport

- Abschluss der Rechnungen zum Strahltransport zwischen Linac 1 und 2 unter Berücksichtigung möglicher weiterer Ausbaustufen (Beamseparator)
- Design und Bestellung der dafür notwendigen Strahlführungselemente
- Reinigung der Vakuumkomponenten und Aufbau der Beamline der Ausbaustufe 1 einschl. Diagnostik
- Entwicklung und Konstruktion eines Shutters für Beamline-Wanddurchbrüche
- Entwurfsarbeiten am 50-kW-Beamdump
- Fertigung 5-kW- und 20-kW-Beamdump
- abschließende Rechnungen zur Strahlführung an der FEL-, der Kernphysik- und der Strahlungsphysik-Beamline
- Erarbeitung der Konzeption der Neutronenphysik-Beamline

Strahldiagnose

- Entwurf, Aufbau und Erprobung von positionsempfindlichen Online-Strahldetektoren (Striplinemonitore)
- Optimierungsarbeiten an diversen Diagnostikkomponenten
- Erarbeitung von Datennahme- und Auswertesoftware für Striplinemonitore
- Erarbeitung eines Softwarepakets zur Routineanwendung für Strahlprofil- und Emittanzmessungen

Hochfrequenzsystem

- Entwicklung einer Frequenzquelle mit verringertem Phasenrauschen
- Weitere Erprobung des Zusammenspiels zwischen Leistungsstufen und Steuerelektronik vor Ort

Steuerungs- und Leitsystem

- Aufbau und abschnittsweise Erprobung der Steuerungs-Elektronik
- Projektierung und Erprobung der Software für die Simatic-Steuerung sowie für die Bedienerführung (WinCC)

Far-IR-FEL

- Simulationsrechnungen zur Modentransformation und -ausbreitung zwischen Waveguide-Ausgang

- und Cavity-Spiegeln zur Dimensionierung der Spiegel
- Simulationsrechnungen zur erreichbaren Verstärkung und Strahlungsintensität bei Einsatz eines Waveguides in Abhängigkeit von den Verlusten und der Größe des Auskoppelloches
- Design-Entwurf der optischen Cavity mit konstruktiver Grobplanung
- Konstruktiver Entwurf des Waveguides mit erforderlichen Flanschstützen für die Strahldiagnose
- Bestellung der Zulieferteile für den Waveguide
- Konstruktiver Entwurf der Halterung und Lagestabilisierung der Cavityspiegel in den Spiegelkammern
- Überprüfung, Reinigung und Justage der mechanischen Antriebskomponenten des ENEA-Undulators

Werkstattarbeiten

- Aufbau und Herstellung folgender Einzelbaugruppen des Injektors und der Beamline
- Änderungen versch. Bauteile der Injektoranordnung zur Optimierung des Strahls
 - Fertigstellung aller Vakuumpumpstände
 - Auskleidung des Injektorraumes im ELBE-Gebäude mit Al-Blech
 - Herstellung und Montage der Beamline Raum 111a einschließlich Gestelle und Strahlrohrabstützungen
 - Anfertigung eines 2. Versuchsstands
 - Fertigung von 10 Stück View-Screen und Kamerahalterungen

Herstellung von weiteren Teilen für das ELBE - Projekt

- Komplettierung HD-Reiniger für Reinraum
- Fertigung eines 20-kW- und eines 50-kW-Beamdumps aus Kupfer
- Herstellung von Bauteilen für die Kühlwasserversorgung des Beschleunigers
- Beginn der Erdungsinstallation für die Beschleunigeranlage
- Herstellung der Abdeckungen für Fußbodendurchbrüche Raum 111a/106 sowie der Hohlleiter
- Anfertigung von Messmarken

Anfertigung von Teilen für den Kryostaten

- 4 Stück Tuner 2000
- 4 Antriebseinheiten für Tuner
- Magnetisches Schild
- Strahlrohr Zwischenstücke
- 4 Strahlrohr Anschlussstücke, bestehend aus Übergangsstück, Koppelstück und Eingangsstück
- Zuggurt mit Endpfosten für Cavity
- Cavity-Hubwagen, Cavity Montage- und Einschubgestell
- Rohrleitungen für Stickstoffversorgung

Supraleitende HF-Photoelektronenquelle

- Herstellung unterschiedlicher Einzelteile

Statistischer Überblick 2. Halbjahr 1999/2000

Die Projektgruppe setzt sich überwiegend aus Mitarbeitern der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik, des Instituts für Kern- und Hadronenphysik sowie der Zentralabteilung Neue Beschleuniger zusammen. Die Mitarbeiter sind in der Regel nur zu einem Teil ihrer Arbeitszeit für die Projektgruppe tätig.

Geräteinvestitionen [TDM]			
grundfinanziert	2757,8/2533,3	drittmittelfinanziert	

Leiter der Projektgruppe:

Dr. Frank Gabriel

Tel.: +49 351 260-3109

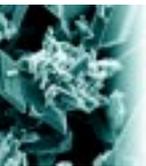
E-Mail: f.gabriel@fz-rossendorf.de

Leiter der Arbeitsgruppe:

Dr. Peter Michel

Tel.: +49 351 260-3259

E-Mail: p.michel@fz-rossendorf.de



Administrative und technische Infrastruktur

Die administrative und technische Infrastruktur des Forschungszentrums Rossendorf umfasst die Bereiche Finanz- und Rechnungswesen, Personal- und Sozialwesen, Recht, Patente, Liegenschaften, Einkauf und Materialwirtschaft, Allgemeine Dienste, Betriebsorganisation, die Projektträgerschaft Energie und Umwelt sowie die Technische Infrastruktur. Durch die kontinuierliche administrative, juristische und technische Begleitung der wissenschaftlichen Projekte sichern diese Abteilungen die Rahmenbedingungen für den Erfolg des Forschungszentrums Rossendorf.

Zum 31.12.1999 bzw. 31.12.2000 beschäftigte das FZR je 425 Personen auf grundfinanzierten Planstellen. Daneben wurden 43/34 Doktoranden und 21/19 Postdoktoranden aus Annex-, HSP III- und Drittmitteln beschäftigt. Es bestanden Arbeitsverträge mit weiteren 121/109 Mitarbeitern in Drittmittelprojekten. 25/28 Azubis in 9/11 Ausbildungsberufen befanden sich in der aus Annex-Mitteln finanzierten Ausbildung. Weitere 3/4 Azubis wurden über von Dritten bereitgestellte Mittel ausgebildet. Im Berichtszeitraum haben 11 Mitarbeiter promoviert, 7 Azubis beendeten vorzeitig ihre Ausbildung mit guten und sehr guten Ergebnissen.

Das FZR verfügte 1999 über ein Finanzvolumen von insgesamt 103,78 Mio. DM. Neben den Mitteln aus der Grundfinanzierung (86,31 Mio. DM), die jeweils zur Hälfte durch den Bund und die Länder, vor allem dem Freistaat Sachsen, bereitgestellt werden, konnten 13,68 Mio. DM aus zusätzlichen Förderprojekten und Drittmittelverträgen nationaler und internationaler Einrichtungen sowie der Industrie eingeworben werden. 2,77 Mio. DM wurden aus Sondermitteln und 0,76 Mio. DM aus eigenen Einnahmen bestritten. Mittel in Höhe von 259 TDM standen als Rücklage für FuE-Zwecke aus dem Vorjahr zur Verfügung. Für das Jahr 2000 betrug das Finanzvolumen insgesamt 104,16 Mio. DM, wobei die Zuwendung aus der Grundfinanzierung bei 86,53 Mio. DM und die eigenen Einnahmen bei 0,96 Mio. DM lagen. Die Förderprojekte und Aufträge trugen mit 15,23 Mio. DM und die Sonderprogramme mit 1,22 Mio. DM zum Haushalt bei. Die Rücklagen aus dem Jahr 1999 betragen 211 TDM.

Der nach wie vor hohe Investitionsanteil (32 bzw. 29 % in den Jahren 1999/2000) an den Ausgaben belegt die kontinuierliche Entwicklung des FZR. Neben der Sanierung und Modernisierung der Gebäude und der technischen Infrastruktur, die weiterhin eine wichtige Rolle spielen, waren der Aufbau der Strahlungsquelle ELBE mit den ersten Experimentiereinrichtungen, die Fertigstellung des kompletten, modernsten Anforderungen genügenden Kontroll-

bereichs für biomedizinische Arbeiten im Gebäude 92 und der Beginn der Errichtung des Thermohydraulikversuchsstands TOPFLOW die wichtigsten Investitionsvorhaben.

Der schnelleren und kostengünstigeren Kommunikation dient der Beitritt des FZR zum InfoHighway des Freistaats Sachsen zusammen mit der Modernisierung der eigenen Telefonanlage. Im Bereich der Information und Kommunikation wurde im Herbst 1999 ein Parallelrechner HP V2250 mit 16 Prozessoren als zentraler Compute-Server installiert. Die vorhandene HP V2250 wurde von 8 auf 16 Prozessoren erweitert. So stehen an den Zentralen Servern insgesamt 8 GFlops Compute-Kapazität zur zentrumsweiten Nutzung zur Verfügung. Ausgebaut und erneuert wurden die Archiv- und Backupdienste an den Zentralen Servern durch Installation eines Archivrechners HP K570 mit einem Tape-Roboter (Volumen von 17,4 TByte und 6 DLT-7000-Laufwerke). Für die zentrumsweite Datensicherung steht ein Tape-Roboter IBM 3584 zur Verfügung. Er besitzt ein maximales Speichervolumen von gegenwärtig 28 TByte, basierend auf der modernen LTO-Technologie.

Im Berichtszeitraum sind 14 Arbeitnehmererfindungsmeldungen eingegangen, 17 Anmeldungen beim Deutschen Patent- und Markenamt sowie fünf Anmeldungen beim Europäischen Patentamt vorgenommen worden. Gegenüber dem FZR sind 12 Schutzrechtserteilungen durch Patentämter ausgesprochen worden. Zur besseren Vermarktung der Erfindungen und Schutzrechte hat das FZR mit der Gesellschaft für Wissens- und Technologietransfer der TU Dresden mbH eine Rahmenvereinbarung geschlossen, die inzwischen durch Einzelvereinbarungen zu ausgewählten Schutzrechten mit Leben erfüllt wird.

Die feste Einbindung des FZR in nationale und internationale Wissenschaftskooperationen wird nicht nur an den beiden vom FZR betriebenen und von der Europäischen Union geförderten „Large Scale Facilities“ (Ionenstrahlenanwendungen „AIM“ und Rossendorfer Synchrotron-Beamline „ROBL“ an der ESRF Grenoble) sowie den zahlreichen Projekten, zu denen Rossendorfer Forscher wissenschaftliche und technische Beiträge leisten, deutlich, sondern auch an der hohen Zahl von 308 Gastwissenschaftlern aus 27 Ländern, die am Forschungszentrum wissenschaftliche Arbeiten durchführten. Zusätzliche Mittel für die Finanzierung eigener Arbeiten und Kooperationen mit ausländischen Partnern entsprangen zu einem erheblichen Teil auch internationalen Förderprogrammen, wie z. B. Programmen der Europäischen Union (1999: 2,39 Mio. DM, 2000: 2,43 Mio. DM).