



FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF

Jahresbericht 1996

Herausgeber: Vorstand

Redaktion: Dr. H. Grünberg, Dr. W. Wendler



EINLEITUNG

Abb. S. 3

In Rossendorf gebauter Detektor für das TOF-Spektrometer (TOF = Time OF Flight) am COSY-Teilchenbeschleuniger im Forschungszentrum Jülich

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	7
Ereignisse 1996	11
Ergebnisse der Forschungsarbeit	15
Plasma-Immersionen-Ionenimplantation - Zu neuen Werkstoffeigenschaften mit energiereichen Ionenstrahlen -	17
Über das Verhalten des Radiums im Flutungsprozeß des Uranbergwerks Königstein	21
Positronen-Emissions-Tomographie für die Qualitätssicherung bei der Schwerionen-Tumorthherapie	29
Kernspaltung in drei große Fragmente - neue Ergebnisse vom Rossendorfer FOBOS-Detektor im VIK Dubna	36
Modellbasierte Schwingungsüberwachung von Leichtwasserreaktoren	43
Inspektionmolch für Pipelines	51
Das Forschungszentrum Rossendorf - Daten und Fakten 1996	59
Organigramm	60
Organe und Gremien	61
Überblick 1996	63
Übersicht über die Forschungsschwerpunkte und -vorhaben 1996	64
Übersicht über die zentrumsübergreifende Zusammenarbeit	65
Übersicht über die Institute und die wissenschaftlich-technische Infrastruktur	67
 Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung	69
 Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie	73
 Institut für Radiochemie	77
 Institut für Kern- und Hadronenphysik	81
 Institut für Sicherheitsforschung	85
 Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik	89
 Zentralabteilung Analytik	91
 Zentralabteilung Neue Beschleuniger	92
 Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung	93
 Projektgruppe ESRF-Beam-Line	94
 Projektgruppe ELBE-Quelle	95
 Administrative und Technische Infrastruktur	97

VORWORT

Das Forschungszentrum Rossendorf (FZR) wurde Ende 1991 gegründet und nahm am 1. Januar 1992 seine Arbeit auf.

Als Einrichtung der Wissenschaftsgemeinschaft Blaue Liste (WBL) wird es zu gleichen Teilen vom Freistaat Sachsen und der Bundesrepublik Deutschland finanziert. Seine Aufgabe ist die anwendungsorientierte Grundlagenforschung auf Gebieten von Naturwissenschaft und Technik. Dabei spielt die Zusammenarbeit mit Universitäten und der Industrie eine besondere Rolle. Das FZR verfügt z. Z. über 436 Planstellen. Aus Annex-Mitteln konnten darüber hinaus 48 Stellen für Nachwuchswissenschaftler und 24 für Auszubildende finanziert sowie 220 Gastwissenschaftlern aus 24 Ländern Aufenthalte mit unterschiedlicher Verweildauer ermöglicht werden. Das FZR wirbt jährlich Drittmittel für gut 100 weitere Stellen ein.

Die wissenschaftliche Arbeit des FZR wird in folgenden Instituten durchgeführt:

- Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung
- Institut für Bioorganische und Radio-pharmazeutische Chemie
- Institut für Radiochemie
- Institut für Kern- und Hadronenphysik
- Institut für Sicherheitsforschung.

Als wissenschaftlich-technische Infrastruktur stehen die Zentralabteilungen

- Forschungs- und Informationstechnik
 - Neue Beschleuniger
 - Analytik
- zur Verfügung.

Darüber hinaus existiert eine leistungsfähige technische und administrative Infrastruktur, die auch die Abteilungen Bibliothek sowie Kommunikation und Datenverarbeitung umfaßt.

Die Profilierung und Entwicklung des Forschungszentrums orientiert sich an den Herausforderungen, die Wissenschaft und Gesellschaft an eine große Forschungseinrichtung stellen. Gegenwärtig stehen hierbei in Rossendorf spezielle Probleme der Medizin, der Ökologie, der Materialforschung und der Sicherheit des Menschen in seiner technischen

Umwelt im Vordergrund. Daneben gibt es, aus der Rossendorfer Tradition gewachsen, weiterhin ein Engagement auf dem Gebiet der Kernphysik.

Moderne Forschungen über Radiotracer für die medizinische Tomographie und in der Radioökologie bestimmen das Profilgebiet **Biomedizin-Chemie, Umwelt**. Dabei wird die auf die Aufklärung biochemischer Vorgänge gerichtete PET-Forschung mit Forschungen zur Single-Photon-Emissions-Computer-Tomographie (SPECT) mit dem Ziel zusammengeführt, biochemische Tracerkonzepte von PET möglichst auf Technetiumverbindungen zu übertragen. Somit werden die beiden Seiten der medizinischen Diagnostik mit radioaktiven Tracern zusammen betrachtet und einer breiten klinischen Nutzung zugänglich gemacht („von PET zu SPECT“). Diese Synthese ist innovativ und charakteristisch für das FZR; sie verspricht neue Ansätze für die medizinische Diagnostik. Die Forschungsarbeiten werden in Kooperation mit dem Universitätsklinikum der Technischen Universität Dresden durchgeführt. Aktuelle Anwendungsfelder sind die Nuklearpharmazie und die Hirnforschung.

Die radioökologischen Arbeiten des FZR stützen sich auf langjährige Erfahrungen in der Radiochemie. Die Untersuchung des Verhaltens von Radioaktivität tragenden Molekülen in ökologischen Systemen ist das Aufgabenfeld dieser Arbeitsrichtung. Hierzu bedient man sich moderner strahlungsphysikalischer, element- und strukturanalytischer Techniken, wie z. B. der Laserspektroskopie und der Synchrotronstrahlung, die für die Messung radioaktiver Proben ausgelegt sind. Diese Forschungen liefern zum einen Beiträge zum Grundlagenverständnis und sind zum anderen von großer und bleibender Bedeutung für die Entwicklung effektiver Sanierungsstrategien für radioaktiv belastete Gebiete. Für die in Sachsen und Thüringen anstehenden Sanierungsarbeiten des Uranbergbaus sind sie von hoher Aktualität.

Bei der **Materialforschung** stehen Arbeiten mit Ionenstrahlen für die Modifikation und Analyse von Festkörperoberflächen sowie Forschungen zur Material Sicherheit im Vordergrund. Das Ionenstrahlzentrum des FZR ver-

fügt über eine umfangreiche Ausrüstung für ionenphysikalische Untersuchungen. Für die Ionen- und plasmagestützte Schichtabscheidung werden Ionenenergien von wenigen 10 eV bis in den 10 MeV-Bereich eingesetzt. Daneben wird zunehmend die Synchrotronstrahlung an den Beschleunigern in Grenoble und Hamburg zu Materialuntersuchungen eingesetzt. Da auch modernste Methoden und Verfahren der Analysen- und Präparationstechnik zur Verfügung stehen, wird das Forschungszentrum mehr und mehr zu einem führenden Ionenstrahlzentrum. Das FZR ist Mitglied des Materialforschungsverbundes Dresden.

Die **Sicherheit** und Zuverlässigkeit technischer Anlagen ist entscheidend für die Nutzbarkeit innovativer Technologien und bestimmt darüber hinaus die Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber diesen Technologien. Das Forschungszentrum betreibt aus diesem Grund Sicherheitsforschung zur Bewertung der Risiken technischer Anlagen und zur Erhöhung ihrer Betriebssicherheit. Ausgehend von Sicherheitsanalysen zu den russischen Druckwasserreaktoren ist der Schwerpunkt des Themenspektrums auf westliche Leichtwasserreaktoren und nichtnukleare Anlagen verschoben worden. Mit den Untersuchungen zur Materialalterung und -schädigung wird das Rossendorfer Engagement in der Materialforschung ergänzt. Hierbei spielen Arbeiten zur Beurteilung des Zustands neutronenversprödeter Konstruktionsmaterialien eine besondere Rolle. Für die Präparation und Prüfung aktivierter Stähle sind Radionuklidlabors aufgebaut worden.

Moderne **Kernphysik** beinhaltet die Untersuchung von Kernmaterie unter extremen Bedingungen und schließt mehr und mehr die Physik der Hadronen im Kern ein. Die experimentellen Forschungen des FZR zu diesem Arbeitsgebiet werden an externen Beschleunigern z. B. der GSI Darmstadt und des FZ Jülich sowie in Dubna (Rußland) und bei der TH Darmstadt durchgeführt. Für die technische Realisierung der experimentellen Arbeiten steht ein in den letzten Jahren aufgebautes Detektorlabor zur Verfügung. Kernphysikalisches Experimentieren in Rossendorf wird in Zukunft durch den Aufbau des ELBE-Elektronenbeschleunigers ermöglicht werden.

Die Arbeiten des FZR führen zunehmend zu einer Vernetzung der Institute und Abteilungen. Derzeit konzentrieren sich dabei die instituts- und disziplinübergreifenden Aufgaben auf:

- Konstruktion, Aufbau und Überlegungen zur Nutzung der Strahlungsquelle ELBE
- die Nutzung der Synchrotronstrahlung, vor allem für die Radiochemie und die Materialforschung
- den Einsatz der Positronen-Emissions-Tomographie für die Medizin und in der Strömungsmechanik
- den Einsatz radioaktiver Tracer und den Transport von Radionukliden in Bio- und Ökosystemen.

Die durch die Interdisziplinarität geprägten Forschungsarbeiten des Zentrums werden in Kooperation mit wissenschaftlichen Einrichtungen der Region sowie mit vielen deutschen und europäischen Forschungseinrichtungen durchgeführt. Das Forschungszentrum unterhält dabei gute Beziehungen zu den umliegenden Hochschulen, insbesondere zur Technischen Universität Dresden. Die wissenschaftlichen Direktoren des Zentrums sind Professoren an der TU Dresden.

Die wissenschaftlich-technischen Vorhaben des FZR werden zweimal im Jahr von einem externen Wissenschaftlichen Beirat bewertet.

Das wichtigste Ereignis des Jahres 1996 für das FZR war die Entscheidung des Kuratoriums zum Bau der „Strahlungsquelle ELBE“. Nachdem im September 1995 zunächst nur die Planung für einen Elektronenbeschleuniger für 20 MeV und 1 mA bei geringer Emittanz und hoher Brillanz des Elektronenstrahls für kernphysikalische Experimente und zur Entwicklung neuer Methoden der Erzeugung von Röntgenstrahlung genehmigt worden war, wurde im September 1996 dem Bau der Strahlungsquelle ELBE einschließlich einer Erweiterung der Nutzungsmöglichkeiten und eines neuen Finanzierungsplans zugestimmt. Die erweiterte Nutzung des Beschleunigers sieht einen Freie-Elektronen-Laser für das ferne Infrarot sowie die Erzeugung eines intensiven Positronenstrahls und von Neutronen für die Festkörperphysik und Materialforschung vor. Der Freie-Elektronen-Laser für das ferne Infrarot wird dabei auch externen Nutzern aus Deutschland und Europa zur Verfügung stehen.

Insgesamt betrachtet das FZR den Bau der Strahlungsquelle ELBE mit ihren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten als sein bedeutendstes Vorhaben für die kommenden Jahre. Diese Strahlungsquelle erscheint entscheidend für die weitere Profilierung des FZR. Im FZR werden die Arbeiten vorrangig in den Zentralabteilungen Forschungs- und Informationstechnik sowie Neue Beschleuniger und im Institut für Kern- und Hadronenphysik durchgeführt. Sie werden begleitet durch Workshops und Seminare zum Bau und zur Nutzung der Strahlungsquelle. Die Arbeiten werden in Kooperation vor allem mit der Stanford Universität, DESY Hamburg und der TH Darmstadt durchgeführt.

Auch bei den weiteren größeren Projekten des FZR konnten bedeutende Fortschritte erzielt werden. So sind die Arbeiten am Strahlrohr ROBL am europäischen Synchrotron ESRF in Grenoble so weit fortgeschritten, daß Ende Januar 1997 der Test auf Strahlungsdichtigkeit durchgeführt werden konnte. Die Inbetriebnahme des Strahlrohrs, insbesondere für die Untersuchung radioaktiver Proben und für die Materialforschung, wird wie geplant Anfang 1998 stattfinden. Aus dem FZR sind derzeit zwei Wissenschaftler und ein Techniker permanent in Grenoble.

Für das PET-Zentrum wurde im September die Genehmigung für das PET-Zyklotron erteilt. Die Genehmigung für die Inbetriebnahme des Medizingebäudes mit der Ganzkörper-PET-Kamera folgte im März 1997. Das Zentrum wird am 15. Oktober 1997 offiziell eingeweiht. Die gemeinsame Berufung eines C-Professors an die TU Dresden und zum Abteilungsleiter Medizin im Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie und am PET-Zentrum kann 1997 erfolgen.

In 1996 konnte auch das neue Gebäude für die Radiochemie fertiggestellt werden. Außerdem wurden im FZR Laboranlagen in Betrieb genommen, die erstmals am Standort molekularbiologische und genetische Untersuchungen ermöglichen.

Das Institut für Kern- und Hadronenphysik wird sich neben seinen traditionellen Arbeiten zur Kernphysik und Hadronenphysik in Zukunft verstärkt auf die neuen Aufgaben im Zusammenhang mit der ELBE-Strahlungsquelle einstellen. Im Institut für Sicherheitsforschung

wurde eine Abteilung Magnetohydrodynamik gegründet. Diese Gründung trägt der starken Ausweitung dieser Arbeiten Rechnung, die im wesentlichen durch Projektmittel, und dabei insbesondere durch ein Innovationskolleg der DFG, finanziert werden. Insgesamt fand in diesem Institut eine weitere Konzentration der Arbeitsgebiete und eine engere Verflechtung mit den Arbeiten der anderen Institute statt. Im Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung nehmen die Arbeiten zur Halbleiterphysik aufgrund hochinteressanter Ergebnisse und zunehmender Kontakte mit der Industrie einen immer breiteren Raum ein. Über diese Arbeiten finden 1997 Diskussionen im Wissenschaftlichen Beirat und im Kuratorium statt. Der weitere Ausbau des Ionenstrahlzentrums konnte durch den bereits im Rohbau erstellten Anbau für die Ionenstrahltechnik vorangetrieben werden.

Das FZR hatte auch 1996 viele Besucher aus Wissenschaft und Politik. Aus dem politischen Bereich waren dabei die Besuche von Herrn Dr. Schaumann (Staatssekretär im BMBF) und Herrn Friedrich (Abteilungsleiter im BMBF) sowie der Arbeitsgruppe Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie der CDU/CSU-Bundestagsfraktion gemeinsam mit Herrn Staatsminister Prof. Meyer von besonderer Bedeutung.

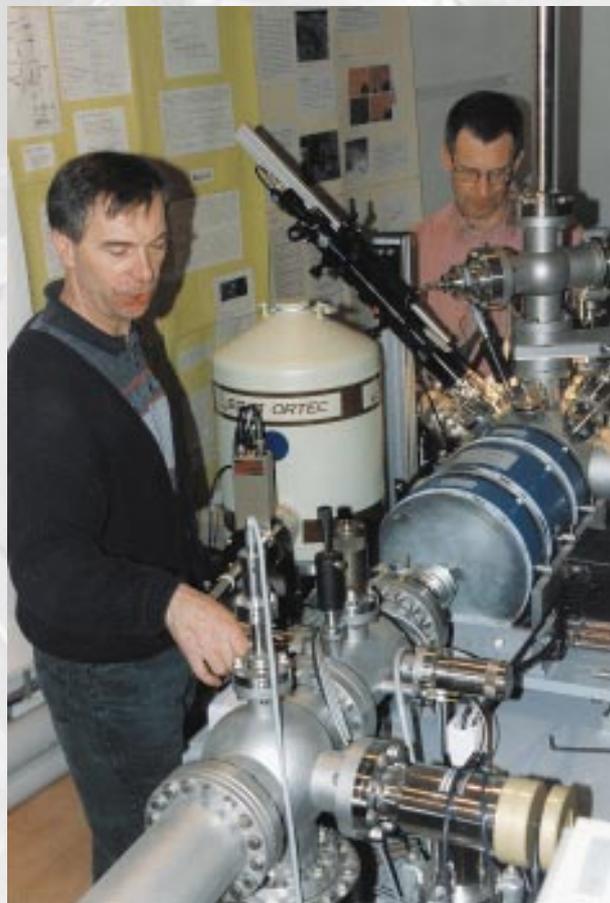
Als weiteres wichtiges Ereignis des Jahres 1996 ist die Berufung der Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats für die nächste 3-Jahres-Periode zu nennen. Neben der Wiederberufung von fünf Mitgliedern des bisherigen Beirats wurden fünf neue Mitglieder berufen, wobei insbesondere auf eine internationale Präsenz, eine Verstärkung der Kontakte zur Industrie und zur TU Dresden gelegt wurde. Der scheidende Wissenschaftliche Beirat hatte dem FZR für die Jahre 1993 bis 1996 eine sehr positive Entwicklung bescheinigt.

Zum 1. März 1996 trat der Gründungsdirektor und erste Wissenschaftlicher Direktor des FZR, Herr Prof. Dr. Dr. h. c. Wolf Häfele, nach 5jähriger engagierter und erfolgreicher Tätigkeit in den Ruhestand. Seine außerordentlichen Verdienste um das Forschungszentrum wurden in einer eindrucksvollen Veranstaltung am 3. April 1996 durch Vertreter aus Politik, Wissenschaft und Industrie gewürdigt. Weiterhin sind im Personalbereich die Berufungen von Herrn Prof. Pobell zum Nachfolger von Prof. Häfele als

Wissenschaftlicher Direktor ab 1. März 1996, die Wiederbestellung von Herrn Parniewski zum 1. April 1997 als Kaufmännischer Direktor und die Berufung von Herrn Prof. Grosse zum Direktor des Instituts für Kern- und Hadronenphysik ab 1. Juni 1996 zu nennen. Die beiden zuletzt genannten Wissenschaftler wurden auch zu Professoren an der TU Dresden berufen.

Im Jahr 1996 konnten 10 Doktoranden ihre Arbeiten im FZR mit der Promotion abschließen, zu weiteren 47 Promotionen laufen derzeit die Arbeiten.

F. Pobell, G. Parniewski



EREIGNISSE 1996

Abb. S. 11
Arbeiten an der Ionenmikrostrahlanlage

Führungswechsel im Forschungszentrum

Seit 1. März 1996 ist Prof. Pobell neuer Wissenschaftlicher Direktor des Forschungszentrums Rossendorf. Er löste Prof. Häfele ab, der das FZR gründete, fünf Jahre als Wissenschaftlicher Direktor leitete und in den Ruhestand wechselte.



Neuer und alter Wissenschaftlicher Direktor
links Prof. Pobell, rechts Prof. Häfele

Strahlungsquelle ELBE genehmigt

Am 25. September 1996 genehmigte das Kuratorium des Forschungszentrums den Bau des supraleitenden 20 MeV Elektronenbeschleunigers mit einem Freie-Elektronen-Laser. Das FZR betrachtet den Bau der Strahlungsquelle ELBE mit ihren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten auch für externe Nutzer als sein bedeutendstes Vorhaben der kommenden Jahre.

PET-Zentrum fertiggestellt

In Zusammenarbeit mit der TU Dresden wurde das modernste Positronen-Emissions-Tomographie-Zentrum (PET) der neuen Bundesländer fertiggestellt. Das PET-Zyklotron zur Herstellung der notwendigen kurzlebigen Nuklide erhielt die Betriebsgenehmigung.



Patientenliege mit PET-Kamera zur
Beobachtung von Stoffwechselvorgängen,
z. B. um den Erfolg von Tumor-Therapien
einzuschätzen

Neue Laboranlagen

Das neue Gebäude für die Radiochemie und die Laboranlagen für das sächsische Verbundprojekt für mikrobiologische Untersuchungen zum besseren Verständnis der bakteriellen Sorption von Uran wurden fertiggestellt.

Tagungen und Workshops

Viele Treffen von Wissenschaftlern mit z. T. internationaler Beteiligung fanden 1996 im und in der Nähe des Forschungszentrums Rossendorf statt:

Traditionelles Frühjahrstreffen der Rossendorfer Kernphysik in Holzgau vom 18.3. bis 21.3.1996; Klausurtagung des Instituts für Ionenstrahlphysik u. Materialforschung im Kloster St. Marienthal (30.5. - 1.6.); Internationale Tagung des von der Kommission der EU geförderten Projekts „Zerstörungsfreie Ionenstrahlanalyse für Kunst und Archäologie“ (3.6. - 5.6.); Einweihung des Positronenlabors im FZR am 4.9.; ELBE '96 - Workshop zur Strahlungsquelle ELBE (5.9. - 6.9.); Dritter Internationaler Workshop „Plasma-Immersion-Implantation“ (15.9. - 18.9.); Erster Internationaler Workshop CYCLONE 18/9 (10.11. - 11.11.); Arbeitstreffen des Innovationskollegs Magnetofluidynamik (24.10.); DECHEMA / GVC-Arbeitsausschuß (15.10. - 16.10.); Koordinationsmeeting der Internationalen Atomenergie-Behörde (IAEA) (4.11. - 7.11.); Workshop zur Messung geringster Radioaktivität (7.11. - 8.11.)

Dritter internationaler Workshop
„Plasma-Immersion-Implantation“



Besucher im Forschungszentrum



Viele Gymnasien waren zu Besuch:
Romain-Rolland-Gymnasium Dresden; St.-Benno-Gymnasium Dresden; Vitzthum-Gymnasium Dresden; Landau-Gymnasium Weißwasser; Schiller-Gymnasium Bautzen; Gymnasium Nossen; Albert-Schweitzer-Gymnasium Kamenz; Sportgymnasium Leipzig; Götzinger-Gymnasium Neustadt; Gymnasium Dresden-Plauen; Gymnasium Dresden-Cotta; Gymnasium Dresden-Blasewitz; Gymnasium Hoyerswerda; Gymnasium Bischofswerda; Gymnasium Ahlen;

Die Schüler des Vitzthum-Gymnasiums Dresden
in der Zentralabteilung Neue Beschleuniger

Neben den 200 Gästen, die am Tag der Offenen Tür das Forschungszentrum besuchten, konnten wir auch viele Gäste aus Politik und Wirtschaft bei uns begrüßen.



ERGEBNISSE DER FORSCHUNGSARBEIT

Abb. S. 15
Probenpräparation zur Untersuchung der Schwermetallsorbition an Geomaterialien

PLASMA-IMMERSIONS-IONENIMPLANTATION

-ZU NEUEN WERKSTOFFEIGENSCHAFTEN MIT ENERGIEREICHEN IONENSTRAHLEN-

W. Möller, S. Mändl, R. Günzel, E. Richter, J. Brutscher

Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

Die Implantation energetischer Ionen ist ein sehr effizientes Werkzeug zur definierten Modifizierung der Oberflächen unterschiedlichster Werkstoffe. Das konnte in einer Vielzahl von Untersuchungen der letzten Jahrzehnte überzeugend aufgezeigt werden. Speziell für elektronische Anwendungen, wie z. B. die Dotierung von Halbleitern oder die Minimierung der Lebensdauer von Ladungsträgern in der Leistungselektronik, gibt es heute zur Ionenimplantation keine Alternative. Die moderne Mikroelektronik wäre ohne sie nicht denkbar.

Die Ionenimplantation bildet wesentliche Prozessschritte bei der Bauelementefertigung und hat sich dort als Schlüsseltechnologie fest etabliert.

Für die Modifizierung der mechanischen, optischen oder chemischen Eigenschaften wird die Ionenimplantation dagegen kaum angewendet. Obwohl sie gegenüber anderen Verfahren der Oberflächentechnik charakteristische Vorteile bietet, - man ist prinzipiell in der Lage, nahezu alle Elemente des Periodensystems unter definierten, gut reproduzierbaren Bedingungen zu implantieren - ist ihre industrielle Nutzung nur auf wenige Einzelbeispiele in der Medizintechnik (z. B. Hüft- und Kniegelenkimplantate) beschränkt geblieben. Gründe dafür sind neben der geringen Dicke der modifizierten Schichten ($< 1 \mu\text{m}$) vor allem die hohen Anlagenkosten und die verfahrensbedingt eindimensionale Bearbeitungsrichtung durch den Ionenstrahl. Für eine homogene Implantation nicht ebener Werkstücke sind ein Strahlrastersystem und eine oftmals aufwendige und kostenintensive Werkstückmanipulation vor dem Ionenstrahl notwendig.

Um die Wettbewerbschancen zu verbessern, wurde als kostengünstige Alternative zur konventionellen Ionenimplantation (Beamline-Implantation) die Plasma-Immersion-Implantation (PII) entwickelt. Bei der Plasma-Immersion-Implantation wird das zu implantierende Werkstück in ein Plasma eingetaucht. Durch das Anlegen einer negativen Hoch-

spannung an das Werkstück werden positiv geladene Ionen aus der Randschicht des Plasmas extrahiert, allseitig auf das Werkstück hin beschleunigt und dadurch in die gesamte Oberfläche gleichzeitig implantiert (siehe Abbildung 1).

Ein Strahlraster oder aufwendige Werkstückmanipulation kann damit entfallen. Die erforderlichen Anlagenkosten und die Kosten für die Prozeßführung sinken deutlich.

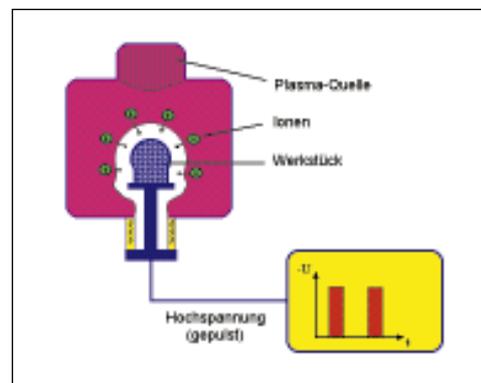


Abb. 1
Prinzip der Plasma-Immersion-Ionenimplantation (PII). Gezeigt wird die mit Plasma gefüllte Behandlungskammer mit dem Werkstück und der Plasmaquelle, sowie die Hochspannungseinheit zur Erzeugung der negativen Hochspannungspulse. Während der Pulse breitet sich die Randschicht vom Werkstück in das Plasma hinein aus und beschleunigt die Ionen aus dem Plasma auf das Werkstück.

Die Stromdichte der implantierten Ionen ist von den Plasmaparametern und der gewählten Implantationsspannung abhängig; sie liegt während der Implantation in der Größenordnung von 1 bis 10 mA/cm^2 . Bei einer angelegten Beschleunigungsspannung von 50 kV beträgt der Energieeintrag bis zu 500 W/cm^2 . Dieser extrem hohe Energieeintrag würde nach wenigen Sekunden zu einer zu starken Aufheizung des Werkstücks führen. Daher wird die negative Hochspannung nicht kontinuierlich, sondern gepulst an das Werkstück angelegt.

Ein weiterer Grund für die Pulsung der Hochspannung ergibt sich daraus, daß bei größeren Werkstücken der erforderliche Strom nur mit beträchtlichem technischen Aufwand über längere Zeit aufrechterhalten werden könnte. Die üblichen Pulsdauern bei der PII liegen zwischen 2 und $100 \mu\text{s}$, bei einer Wiederholfrequenz von wenigen Hz bis kHz.

Durch eine Variation dieser Parameter kann die Proben temperatur ohne eine externe zusätzliche Probenheizung von Raumtemperatur bis ungefähr 500 °C geregelt werden.

Für technische Anwendungen der PII existiert eine obere Grenze für die Implantationsspannung. Die Zahl der Sekundärelektronen, die pro auftreffendes Ion von einer Oberfläche emittiert werden, steigt mit der Spannung. So werden beispielsweise bei Implantationsspannungen von 40 kV pro auftreffendes Ion 5 – 10 Elektronen ausgelöst, wobei die Zahl der emittierten Sekundärelektronen mit der Oberflächenbeschaffenheit und Zusammensetzung variiert. Diese Sekundärelektronen erzeugen Röntgenstrahlung, wenn sie – ihrerseits in Gegenrichtung beschleunigt – auf die Kammerwand auftreffen. Für Spannungen unter 40 kV reichen die üblichen Wandstärken der stählernen Vakuumkammern von 3 bis 4 mm sowie der Einsatz von Bleiglasfenstern aus, um die Röntgenstrahlung unter den in Deutschland erlaubten Grenzwert von 7,5 µSv/h abzuschirmen. Bei höheren Spannungen ist allerdings eine zusätzliche Bleiabschirmung notwendig, wodurch sich die Anlagenkosten deutlich erhöhen.

Als Plasma kann jedes Niederdruckplasma verwendet werden. Die Implantation der Ionen aus dem Plasma erfolgt bei der PII nicht massen- und speziesslektiert. Man findet deshalb sämtliche positiv geladenen Ionen aus dem Plasma im Werkstück wieder. PII wurde sowohl mit Plasmaquellen, die mit gasförmigen Ausgangssubstanzen (Mikrowellen-, Glühkathodenanregung) als auch mit solchen, die mit festen Materialien (Verdampfer oder Vakuumlichtbogen) arbeiten, erfolgreich demonstriert.

Die Eindringtiefe der Ionen ist abhängig von der Energie, der Art der Ionen und der Zusammensetzung des Werkstücks. Typische Tiefen sind wenige Nanometer bei speziellen Halbleiteranwendungen und bis zu einigen 100 nm bei Implantationen für tribologische Anwendungen. Allerdings sind selbst diese Tiefen für die meisten kommerziell vorstellbaren Anwendungen deutlich zu gering. Für verschleißfeste Schichten liegen die seitens der Industrie geforderten Modifizierungstiefen bei mindestens 10 µm. Um diese Tiefen zu erreichen, sind zwei unterschiedliche Wege möglich. Einerseits können Beschichtung und Implantation kombiniert werden. Dazu bringt man in der Anlage entweder zusätzliche Beschichtungsquellen wie Verdampfer oder Magneton-

zerstäuber an, oder man scheidet in den Pausen zwischen den Hochspannungspulsen Atome und Ionen direkt aus dem Plasma ab. Dann werden während der Hochspannungspulse die Schichteigenschaften, wie Haftfestigkeit und Porosität, gezielt geändert. Die zweite Möglichkeit besteht in der Implantation bei erhöhter Temperatur, so daß durch Diffusion von der implantierten Oberfläche in das Volumen eine Modifizierungstiefe von mehreren Mikrometern erzielt wird.

Von der letzteren Möglichkeit machen wir bei der Behandlung austenitischer Edelstähle Gebrauch. Austenitische Edelstähle mit ihrer herausragenden Korrosionsfestigkeit werden in vielen Bereichen von der chemischen Industrie über die Nahrungsmittelindustrie bis hinein in die Medizintechnik verwendet. Die niedrige Härte in der Größenordnung von 200 – 300 kp/mm² und der hohe abrasive Verschleiß dieser Stähle begrenzen aber ihre Anwendbarkeit merklich. Entsprechend den guten Erfahrungen z. B. bei Werkzeugstählen versucht man, die Härte auch der Edelstähle durch Nitrieren einer Oberflächenschicht von einigen 10 µm Dicke zu verbessern. Allerdings ist die Nitrierung von austenitischem Edelstahl ohne Verlust der Korrosionsbeständigkeit bis heute nicht befriedigend gelöst. Die bekannten Nitrierverfahren wie Gas-Nitrieren, Plasma-Nitrieren, Puls-Plasma-Nitrieren u.a., arbeiten meist bei Temperaturen oberhalb 500 °C, um ausreichende Nitriertiefen in ökonomisch vertretbaren Zeiten zu erreichen. Nitriert man unter diesen Bedingungen Edelstahl, erreicht man zwar die erwünschte Randschichthärtung, der Edelstahl verliert jedoch infolge Chromnitridbildung seine typische Korrosionsbeständigkeit; er rostet. Um die Chromnitridbildung zu verhindern, muß man bei Temperaturen unter 400 °C nitrieren. Wegen der Barrierewirkung der natürlichen korrosionshemmenden Chromoxidschicht an der Oberfläche des Stahls, ist bei diesen Temperaturen die Eindiffusion des Stickstoff stark gehemmt. Man benötigt dann extrem lange Zeiten, um ausreichende Nitriertiefen zu realisieren. Eine mögliche Lösung des Problems ist die Implantation von Stickstoff hinter die Diffusionsbarriere an der Oberfläche bei Temperaturen unterhalb 400 °C, was - wie im folgenden gezeigt wird - mit Hilfe der Plasma-Immersion-Implantation realisiert werden kann.

Es wurden Implantationen von Stickstoff in X5CrNi18.10 (Werkstoff-Nr. 1.4301), X6CrNiMoTi17.12.2 (Werkstoff-Nr. 1.4571) und

X20Cr13 (Werkstoff-Nr. 1.4021) mit 40 kV Spannung bei 380 °C durchgeführt. Die Behandlungszeit lag im Bereich von 1 bis 4 Stunden. Man erzielt eine harte Oberflächenschicht, die mehrere μm in die Tiefe reicht (siehe Abbildung 2). Sie besteht - wie durch Röntgenbeugung mit streifenden Einfall nachgewiesen werden konnte - aus „erweitertem Austenit“ (engl. expanded austenite), auch „S-Phase“ genannt. „Erweiterter Austenit“ wird als eine metastabile Phase mit Stickstoffübersättigung interpretiert, die zu der beobachteten Härtung führt. Aufbau und Struktur der „S-Phase“ sind noch nicht vollständig verstanden und erfordern weitere Untersuchungen.

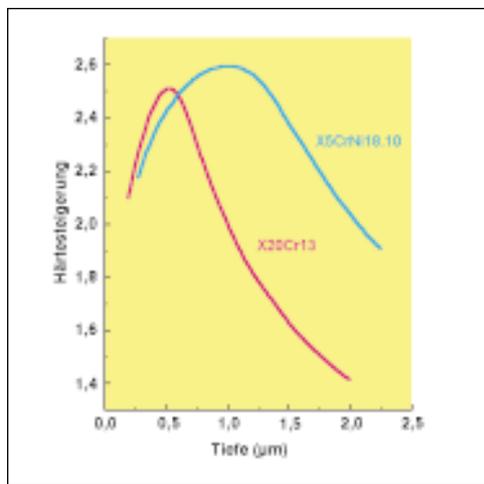


Abb. 2

Härtesteigerung für die Stähle X20Cr13 (Werkzeugstahl) und X5CrNi18.10 (Edelstahl) nach einer Stunde PII mit Stickstoff bei 380°C und einer Implantationsspannung von 40 kV im Vergleich zum jeweils unbehandelten Stahl. Die eingetragene Menge an Stickstoff beträgt ca. 2×10^{18} N/cm². Durch unterschiedliche Beweglichkeit des Stickstoffs in den beiden Stählen werden bei gleichen Behandlungsparametern unterschiedliche Modifizierungstiefen erreicht. In Wirklichkeit reicht die gehärtete Schicht wesentlich tiefer (siehe auch Abb. 3), da bei der Härtemessung der Meßfühler bei großen Lasten das ungehärtete weichere Material im Probeninneren spürt.

Abbildung 3 zeigt ein typisches, mit Glimmladungs-Spektroskopie (GDOS) aufgenommenes Konzentrationsprofil des Stickstoffs in die Tiefe. Wie vom Plasmanitrieren bekannt, bewegen sich auch bei der PII bestimmte Komponenten des Stahls (z. B. Kohlenstoff) vor der Diffusionsfront des Stickstoffs in die Tiefe. An Querschliffen des mittels PII nitrierten Randbereichs des Stahls 1.4571 läßt sich zeigen, daß die vorhandenen ferritischen Anteile des Stahls sich in der nitrierten Randschicht (S-Phase) auflösen. Modelluntersuchungen zum Ver-

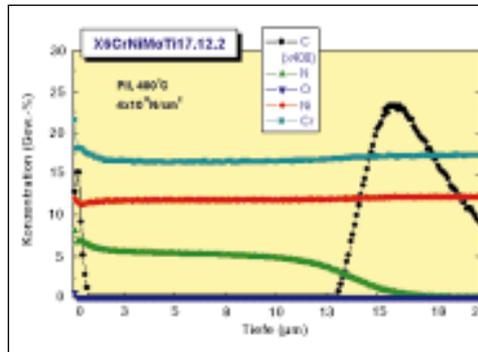


Abb. 3

Konzentrationsverteilung in der Tiefe (Tiefenprofil) der Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Nickel (Ni) und Chrom (Cr) beim Edelstahl 1.4571 nach PII-Behandlung mit Stickstoff bei 400°C. Die eingebrachte Menge (Dosis) an Stickstoff beträgt 4×10^{18} N-Atome/cm². Der Stahl enthält 0,06% Kohlenstoff, der vom eindiffundierenden Stickstoff vor sich her (meist entlang der Korngrenzen) ins Materialinnere geschoben wird und sich an der Grenze der Diffusionsfront anreichert.

schleißverhalten mittels des Stift-Scheibe-Tests ergeben eine signifikante Verbesserung der Verschleißresistenz um mehrere Größenordnungen (Abbildung 4). Korrosionstests in 0.1 mol. Schwefelsäure zeigten, daß sich die Korrosionsbeständigkeit der untersuchten Edelstähle durch die Nitrierung mit PII nur unwesentlich verändert. Neben Edelstählen wurden auch für Werkzeugstähle (z. B. X90CrMoV18) bei gleichen Prozeßparametern bei der PII-Behandlung Härtesteigerungen und Verbesserungen im Verschleißverhalten festgestellt.

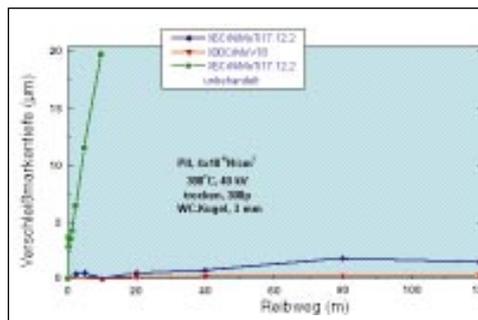


Abb. 4

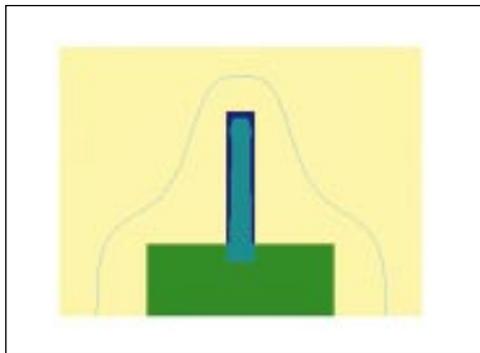
Verschleißverhalten eines Schnellarbeitsstahls (X90CrMoV18) und eines Edelstahls (X6CrNiMoTi17.12.2) nach PII-Behandlung mit Stickstoff bei 380°C. Gezeigt wird die Tiefe der Verschleißspur (Verschleißmarkentiefe) einer ohne Schmierstoff auf der Stahlprobe reibenden Hartmetallkugel (WC-Kugel) in Abhängigkeit von dem auf der Stahlprobe zurückgelegten Weg (Reibweg). Zum Vergleich ist die Tiefe der Reibspur des unbehandelten Edelstahls ebenfalls dargestellt.

Bei der Nitrierung von Werkzeugen, z. B. Bohren, ist der entscheidende Vorteil der PII gegenüber der Beschichtung (z. B. mit TiN) die Maßhaltigkeit, d. h. die Dimensionen sind nach dem Prozeß die gleichen wie vorher. Ein weiterer Punkt, auf den bei der Implantation in dreidimensionale Werkstücke besonders geachtet werden muß, ist die Homogenität der Implantation über die gesamte Oberfläche. Abhängig von den relativen Abmessungen und Formen von Werkstück, Halterung und Randschicht, kann es zu räumlichen Unterschieden in der implantierten Dosis kommen, wie in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Die Plasmarandschicht folgt der Oberflächenkontur, wobei scharfe Strukturen wie Ecken und Kanten, deren Krümmungsradius kleiner

als die Randschicht ist, abgerundet werden. Die Ionen, die senkrecht aus der Randschichtgrenze beschleunigt werden, werden entsprechend dem elektrischen Feldverlauf auf bestimmte Bereiche fokussiert, während in andere Gebiete weniger Ionen implantiert werden. Für die gezeigte Bohrer-geometrie ist die erzielte Verteilung mit einem Maximum an der stark belasteten Spitze und weniger auf den minderbeanspruchten Seitenflächen durchaus erwünscht und führt zu reduzierten Implantationszeiten. Die Härte für behandelte Edelstahlbohrer erreicht Werte, die sonst nur bei HSS-Bohrern erzielt werden.

Abb. 5

Schematische Darstellung der Implantation in Bohrer. Der Bohrer (hellblauer senkrechter Zylinder) und die Halterung (grün) befinden sich in einem Plasma. Die der Oberflächenkontur im Abstand von wenigen Zentimetern folgende Randschichtgrenze ist der Ursprung der Ionen, die auf das Werkstück beschleunigt werden. Die Dosisverteilung entlang der Bohroberfläche ist durch die unterschiedliche Dicke der dunkelblauen Zone symbolisiert.



Für die kommerzielle Anwendung der PII zur Nitrierung von Edelstahl strebt man die Verwendung niedrigerer Pulsspannungen im Bereich 5 bis 20 kV bei gleichzeitiger Erwärmung des Werkstücks auf Temperaturen $< 400^{\circ}\text{C}$ an, wodurch die Diffusion des implantierten Stickstoffs in die Tiefe des Werkstücks garantiert ist. Aufgrund der kleineren Ausdehnung der Plasmarandschicht wird außerdem die Behandlung kleinerer Strukturen ermöglicht. Neben den Edelstählen wurden Experimente zur Nitrierung von Titan- und Aluminium-Legierungen durchgeführt. Hier zeigte sich, daß der Stickstoff bei Temperaturen $< 400^{\circ}\text{C}$ nahezu nicht diffundiert und somit derzeit keine Nitriertiefen im μm -Bereich wie beim Edelstahl möglich sind. Untersucht wurden neben reinem Ti und Al auch die für medizinische Anwendungen (Hüft- und Kniegelenkimplantate) gebräuchliche Legierung Ti-6Al-4V und die technisch relevante Aluminiumlegierung AlSi12. Man beobachtet hier ähnlich geringe Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften wie bei einer Beamline-Implantation bei 40 keV Ionenenergie. Die Untersuchungen zur PII bei Leichtmetall-Legierungen werden künftig verstärkt fortgeführt.

Im Forschungszentrum Rossendorf wurde 1992 die erste deutsche Plasma-Immersion-Implantations-Anlage in Betrieb genommen. Die Anzahl der Anlagen und deren Ausstattung wurde kontinuierlich erweitert und dem verbesserten Kenntnisstand angepaßt. Abbildung 6 zeigt eine neue Anlage zur PII, mit der auch kleinere Werkzeuge und Bauteile bearbeitet werden können. Die derzeit laufenden Forschungsarbeiten umfassen unter anderem die Skalierung von Anlagen für industrielle Anwendungen der PII, Grundlagenuntersuchungen zum besseren Verständnis der Implantation komplexer dreidimensionaler Werkstücke, die Bearbeitung von Leichtmetallen und die Verknüpfung mit anderen Oberflächenbehandlungsverfahren zur Erzeugung definierter Randschichtstrukturen.



Abb. 6

Anlage zur Plasma-Immersion-Implantation im Forschungszentrum Rossendorf. Die gezeigte Kammer hat ein Volumen von ca. $0,2\text{ m}^3$. Oben auf der Kammer ist die Einrichtung zur Plasma-Erzeugung zu erkennen. Die Hochspannungspulseinheit befindet sich unterhalb der Vakuummkammer.

ÜBER DAS VERHALTEN DES RADIUMS IM FLUTUNGSPROZEß DES URANBERGWERKS KÖNIGSTEIN

Lutz Baraniak, Michael Thieme, Harald Funke, Gert Bernhard, Heino Nitsche
Forschungszentrum Rossendorf e.V., Institut für Radiochemie

Kerstin Nindel, Joachim Schreyer
Wismut GmbH, Chemnitz

In der Zeit des intensiven Uranerzbergbaus in der sächsisch-thüringischen Region, in der die DDR mit Kanada in der Urangewinnung den 3. Rang in der Welt einnahm, wurde auch die Lagerstätte Königstein ausgebeutet (Abbildung 1). In 25 Jahren (1967-91) wurden dort etwa 20 000 t Uran gewonnen, was einen Anteil von 8 % an der DDR-Gesamtförderung ausmachte. In der ersten Zeit wurde das Erz konventionell abgebaut und über Tage aufgearbeitet. Recht früh merkte man, daß die bergbauliche Effizienz ganz wesentlich gesteigert werden kann, wenn der Auslaugungsprozeß direkt vor Ort, also unter Tage, vorgenommen wird. Dazu wurden untertägige Gesteinsbereiche durch Auffahren von Strecken separiert und diese „Blöcke“ über Aufgabebohrungen mit schwefelsaurer Laugungslösung beaufschlagt (Abbildung 2). Diese Lösung durchströmte den erzhaltigen Sandstein und über Drainagebohrungen erfolgte die Wiederaufnahme und Kreislaufführung der mit Uran angereicherten Säure. In den Kreislauf war die übertägige Aufbereitung eingebunden, in der das Uran abgetrennt und die verbrauchte Säure ergänzt wurde. Die Laugungsdauer eines Blockes betrug 3 bis 5 Jahre. Auf diese Weise wurde, ohne das in der chemischen Industrie übliche Reaktionsgefäß, sozusagen „im Berg“, die Urangewinnung vorgenommen. Diese wirksame „In-situ-Laugung“ wurde im großen Stil betrieben. Als Folge dieser Verfahrensweise befinden sich heute fast 2 Mio. m³ schwefelsaure Laugungslösung in den Sandsteinporen. Aufgrund der Schwerlöslichkeit der höheren Erdalkalisulfate ist im Prozeß der Uranauflösung das im Uranerz anzutreffende Radium als Radium-Bariumsulfat in den Sedimentporen ausgeschieden worden und damit in der Grube verblieben.

Seit Beendigung der Förderung 1991 bemüht sich nun die WISMUT GmbH um eine umweltgerechte Sanierung der Bergbauanlage, die im wesentlichen in der gezielten Flutung der Grube bestehen wird. Eine solche Flutung ist dringend geboten, da (1) die energieaufwen-

dige Entwässerung und die damit verbundene Wasseraufbereitung sowie (2) die Bewetterung und der damit einhergehende Austrag der gasförmigen Radiumtochter Radon (215 TBq/a) und seiner Zerfallsprodukte abgestellt werden müssen. In diesem Flutungsprozeß, der mit etwa 15 Jahren anberaumt ist, wird dann zufließendes Grundwasser die Grube langsam füllen und mit der in den Sedimentporen befindlichen Laugungslösung in Kontakt kommen. Im Vermischungsprozeß wird diese Lösung stark verdünnt und die Abnahme der Sulfatkonzentration wird eine Radiummobilisierung zur Folge haben. Nach erfolgter Flutung und Anbindung des Grubenbereiches an die umliegenden Grundwasserleiter könnte es zur Abwanderung des Radiums in den sich wiedereinstellenden Grundwasserströmen kommen.



Abb. 1
Uranbergbaubetrieb Königstein mit Blick zu den Tafelbergen der Sächsischen Schweiz; Festung Königstein und Lilienstein
Foto: Rainer Bode, Bode Verlag GmbH, Haltern

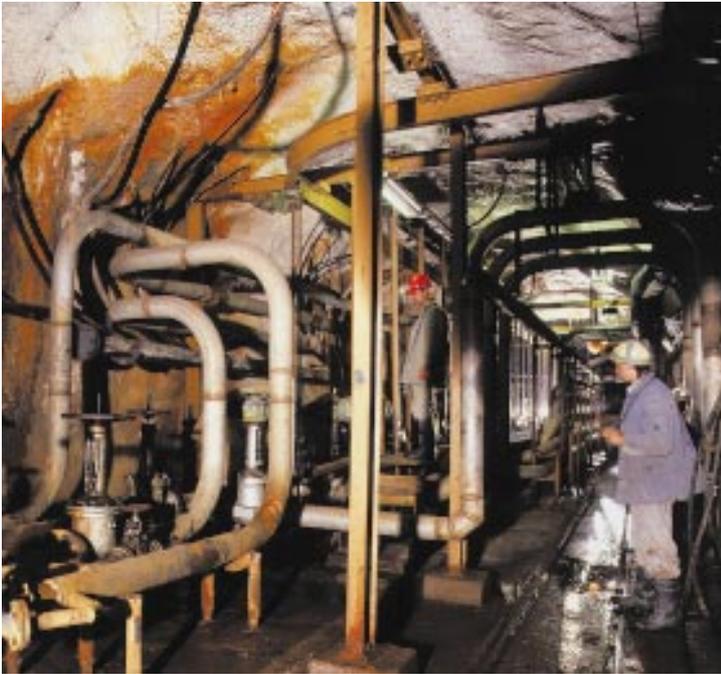


Abb. 2
 Untertägige Pumpstation zur Uranlaugung im vererzten Sandstein
 Foto: Rainer Bode, Bode Verlag GmbH, Haltern

Die Radiochemie als Chemie der radioaktiven Elemente orientiert sich heute im wesentlichen auf die Gebiete Markierung biochemisch relevanter Substanzen und Entwicklung von Radiopharmaka für diagnostische und therapeutische Zwecke an der Seite der Nuklearmedizin und auf das Umweltverhalten der Radionuklide im Rahmen der Sanierung nuklearer Altlasten und der Endlagerung von radioaktivem Abfall.

In Anbetracht der gewaltigen Mengen radioaktiven Abfalls, die ein halbes Jahrhundert ziviler und militärischer Einsatz der Kernenergie hinterlassen hat, ist der ökologische Bezug der Radiochemie von hoher Aktualität.

Er ist auf die Phänomene der Radioaktivitätsfreisetzung und -ausbreitung entlang der natürlichen Pfade gerichtet und beinhaltet den aquatischen Transport in den Oberflächengewässern und Grundwasserströmen, die aerosolgetragene atmosphärische Ausbreitung, die Migration im Boden und das Eindringen der Radionuklide in die Nahrungskette. Grundlegende Erkenntnisse über das Umweltverhalten der Radionuklide tragen in steigendem Maße zur verbesserten Gefährdungsanalyse kontaminierter Gebiete und zur Ableitung angemessener Sanierungsmaßnahmen bei.

Die Lagerstätte Königstein liegt im Elbsandsteingebirge etwa 30 km südöstlich der Landeshauptstadt Dresden in unmittelbarer Nachbarschaft zur gleichnamigen Festung, in der J. F. Böttger im Jahre 1708 das europäische Porzellan erfand. Die Anreicherung von Uran in den Sandsteinen begann vor 80-100 Mio. Jahren im ausgehenden Erdmittelalter während der Zeit der saxonischen Tektogenese. Diese bewirkte die Auffaltung des Erzgebirges und die Ausbildung des Lausitzer Massivs. Zwischen beiden senkte sich das Elbtal ab. Die Senke wurde mit 300 m mächtigen sandigen und tonigen Sedimentablagerungen eines kreidezeitlichen Meeres aufgefüllt. Die Landschaft des Nationalparks „Sächsische Schweiz“ wurde endgültig geprägt durch den Einschnitt der Elbe und die Zerklüftung des Sandsteins durch Schub- und Scherkräfte (Lausitzer Überschiebung) sowie die in mehreren Schüben in der Erdneuzeit erfolgten eiszeitlichen Ablagerungen. Geochemische Prozesse führten zum Herauslösen des Urans aus dem Markersbacher Granit und zu seiner Ablagerung in den unteren Sandsteinschichten. Im weiteren Verlauf erfolgte durch Oxidations- und Reduktionsprozesse eine Umlagerung des Urans. In der Oxidationszone entstand Limonit aus primär vorhandenem Markasit. Uran wurde aus dem 4- in den 6wertigen Zustand oxidiert, im Grundwasser gelöst und abtransportiert. Die Wiederausscheidung geschah unter reduzierenden Bedingungen in anaeroben Bereichen. Die Lagerstätte hat drei Erzhorizonte, in denen sich linsen- und flözartige Erzkörper von 0,5 bis 2,5 m Mächtigkeit und einem Urangehalt von 0,03 bis 0,08 %, in Einzelfällen bis zu 0,3 % befinden. Etwa ein Fünftel des Uranfeldes wurde ausgebeutet. Die Grube Königstein nimmt eine Fläche von ca. 6 km² ein, mit einer Ausdehnung von 4,5 x 1,5 km². Der gesamte aufgefahrene Hohlraum beträgt 9 Mio. m³, wovon derzeit noch etwa zwei Drittel offen sind und der Rest verfüllt wurde.

Hydrogeologische Situation

Das Uran befindet sich in Form von feindispersen Uraninit (UO₂) im cenomanen Sandstein, der die unterste 25 m mächtige Sedimentschicht auf dem paläozoischen Fundament in einer Tiefe von ca. 250 m bildet. Dieser Sandstein ist getrennt vom jüngeren limonithaltigen Labiatussandstein des unteren Turons durch eine 20 bis 30 m starke Schicht

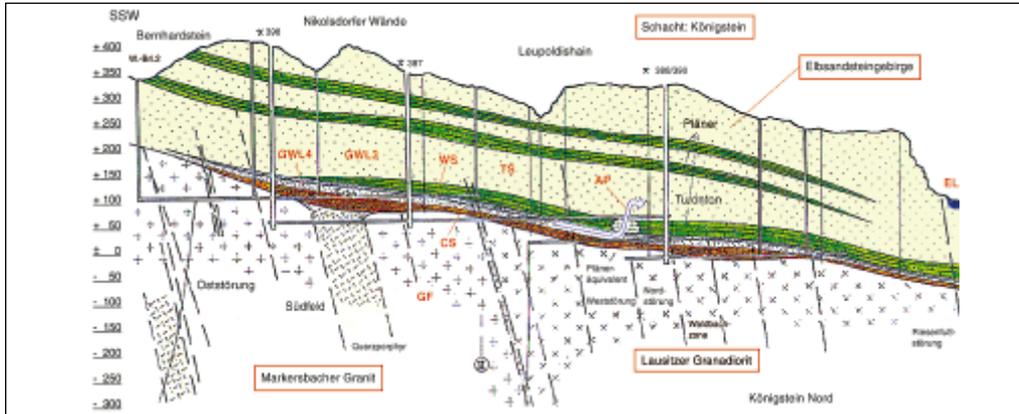


Abb. 3
 Querschnitt durch das Königsteiner Uranbergwerk (GF: granitisches Fundament, CS/TS: cenomaner/turoner Sandstein, WS: Wasserstauer, GWL3/GWL4: 3. bzw. 4. Grundwasserleiter, AP: Ausbreitungspfad, EL:Elbe)

von Tonstein und Pläner (sandiger Mergelstein). Diese nahezu wasserundurchlässige Schicht bildet den Wasserstauer zwischen dem unteren 4. Grundwasserleiter (GWL) und dem darüberliegenden 3. Grundwasserhorizont (Abbildung 3).

Im Bereich tektonischer Störzonen ist der Pläner durch natürliche Prozesse in das sogenannte Pläneräquivalent umgewandelt worden, das ein stärker permeables Sediment darstellt, bei dem die Kalkkomponente fehlt. In diesen Störzonen existieren hydraulische Verbindungen zwischen den beiden unteren Wasserleitern. Für die Aufnahme der Förderung mußte 1966 das abzubauenen Erzfeld „trockengelegt“ werden, d. h. der Grundwasserspiegel wurde im 4. GWL in der Grube vollständig abgesenkt. Dadurch entstand über ein Gebiet von knapp 200 km² ein hydrologischer Depressionstrichter, der bis heute durch Abpumpen des eindringenden Wassers aufrechterhalten wird. Erst nach der Flutung aller Hohlräume wird sich dieser Trichter auffüllen. Während der Auffüllung und nach Wiedereinstellung der alten Strömungsverhältnisse wird in den Störzonen ein Aufstieg von Wasser aus dem 4. in den 3. GWL erfolgen. Damit besteht die Gefahr einer Kontamination des 3. GWL, der in der Elbtalregion zur Trinkwassergewinnung genutzt wird. Durch die Verdünnung der im Laugungsfeld befindlichen sauren, sulfathaltigen Restlösungen mit dem zufließenden gering mineralisierten Grundwasser (Tab. 1) kann insbesondere das Radium mobilisiert werden, das in den Sandsteinporen als (Ba,Ra)SO₄ ausgeschieden wurde. Eine mögliche Ausbreitung des Radiums besteht entlang der beiden Wege: cenomaner Sandstein im Bereich der Grube → Störzonen im Grundwasserstauer → turoner Limonitsandstein (3. GWL) und cenomaner Sandstein im Grubenbereich → Abstrom in nördliche Richtung (Abbildung 3).

Das in der Natur vorkommende Radium - 1898 von M. Curie in der Joachimsthaler Uranpechblende (U₃O₈) entdeckt - ist ein Glied der natürlichen Uranzerfallsreihe (²³⁸U-Familie). Es zerfällt unter Aussendung von Alphastrahlung (4,78 MeV) mit einer Halbwertszeit von 1 600 Jahren in das Edelgas Radon (²²²Rn), das ebenfalls radioaktiv ist. Über eine Reihe von Nukliden des Poloniums und Bismuts endet der schrittweise Zerfall beim ²⁰⁶Pb. Radium hat aufgrund seiner kernphysikalischen und chemischen Eigenschaften eine hohe strahlenbiologische Wirksamkeit. Bei Inkorporation ist insbesondere das rote Knochenmark gefährdet. Das gasförmige Radon mit seinen Folgeprodukten belastet die Bronchien und die Lunge und trägt erheblich zur natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung bei. Im erzgebirgischen Altbergbau und in der Frühzeit des Uranbergbaus traten hohe Strahlenbelastungen dieser Art auf, die die „Schneeberger Krankheit“ (Lungenkarzinom) verursachten, deren Symptome bereits 1879 beschrieben wurden.

	FL/pH = 2,5	GW/pH = 6,1
Na	170	2,5
Ca	289	17,2
Mg	25,2	1,7
Al	72,3	0,02
Si	40,5	3,1
Fe	3,3	<0,1
Zn	49,3	0,03
Ba	<0,005	0,3
Th	0,4	<0,001
U	23,6	0,006
Sulfat	2 820	12,1
Chlorid	172	4,6
Carbonat	<2	94,8
Nitrat	7,5	4,2

Tab. 1
 Zusammensetzung der Flutungslösung (FL) und des Grundwassers (GW), Gehalt in ppm

Freisetzungsverhalten und Bindung des Radiums in den Sedimenten

Um die Radiumfreisetzung zu untersuchen und daraus Rückschlüsse auf die Radiumbindung in den Sedimenten zu ziehen, wurden sequenzielle Extraktionen in Form einer mehrstufigen Behandlungsfolge mit Reagenzien steigenden Freisetzungspotentials ausgeführt. Dabei zeigten sich im wesentlichen zwei Erscheinungsbilder:

(a) Die vererzten ungelagerten Originalgesteine (Wechsellagerung, Quadersandstein, Tonstein) einschließlich Pläner und Limonitsandstein sind durch eine dominierende Radiumfreisetzung mittels 1-molarer Ammoniumacetatlösung (pH 7,0) gekennzeichnet. Das heißt, es bestehen bei einem erheblichen Radiumanteil nur geringe Bindungskräfte, die eine Verdrängung des Ra^{2+} selbst durch einwertige Kationen in allerdings hoher Konzentration zulassen. Bei Vergleichen mit dem Extraktionsverhalten anderer Elemente läßt sich eine Parallelität mit der Extraktion von Ca^{2+} erkennen. Demnach handelt es sich bei dem die Ra-Freisetzung wesentlich bestimmenden Substrat um tonige Bestandteile, wie Kaolinit mit Ionenaustauschfunktion.

(b) Deutlich anderes Verhalten liegt in der Gruppe der schwefelsäuregelagerten Sedimentgesteine vor. Insbesondere in der Laugungslösung befindet sich sehr wenig Radium, während erhebliche Mengen unter Anwendung ammoniakalischer EDTA-Lösung bei erhöhter Temperatur (85 °C), freigesetzt werden. Demzufolge muß die Bindung des Radiums hier deutlich fester ausgeprägt sein. Aus dem teilweise identischen Verteilungsmustern von Radium und Barium läßt sich eine wesentliche Mitwirkung von Bariumsulfat bei der Bindung des Radiums ableiten.

In Anbetracht der erheblichen Radiummengen, die nach der Uranauslaugung in den Sedimenten verblieben sind und der Ungewißheit seiner Remobilisierung im Flutungsprozeß, haben wir versucht, das Radium samt seines einbettenden Substrats direkt zu bestimmen. Aufgrund der Aktivitätskonzentrationen von höchstens 50 kBq/kg (sub-ppb-Gehalte) war es bisher nicht möglich, Atome oder Ionen des Radiums in Geomaterialien direkt nachzuweisen. Ermutigt durch Untersuchungen von J. A. Berry et al. (1993) zur Verteilung von Uran und Plutonium in Gesteinen, wurde in Zusammenarbeit mit dem Fachbe-

reich Materialwissenschaft der TH-Darmstadt versucht, die empfindliche Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) für diesen Zweck einzusetzen.

Es galt dabei, Interferenzen von Molekülionen, wie $^{197}Au^{29}Si^+$ (225.9437 Da) aus der Goldbedampfung und $^{208}PbH_2^{16}O^+$ (225.9872 Da) mit ^{226}Ra (226.0254 Da) durch Auftrennung der Peaks an der Obergrenze der Auflösung des Gerätes auszuschalten.

Um das Radium auf einem Sandsteinanschliff nachzuweisen, wurde eine Fläche von 250 x 250 μm^2 gescannt, wobei dem Bariumsignal gefolgt wurde. Auf diese Weise konnte erstmalig das Radium als solches detektiert werden und seine Verteilung auf der Gesteinsprobe bestimmt werden (Abbildung 4). Es wurde der eindeutige Nachweis geführt, daß das Radium zusammen mit dem Barium im Sediment vorliegt. Es konnte aber auch die Leistungsfähigkeit der SIMS für die Bestimmung von Ultrapurenelementen in nichtmetallischen Substraten gezeigt werden.

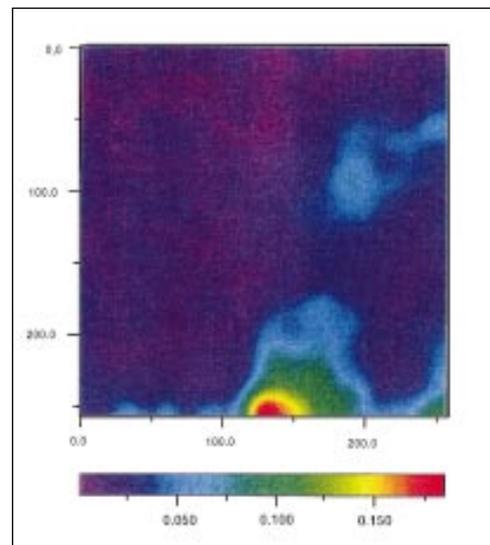


Abb. 4
Bestimmung der Radiumverteilung im gelaugten Sandstein mittels hochauflösender Sekundärionen-Massenspektroskopie
(Scanfläche: 250 x 250 μm , Ra-Gehalt: relative Einheiten)

Sorptionsverhalten des Radiums an den Sedimenten

Sorptionsuntersuchungen wurden an einer repräsentativen Zahl aller gruben- und umfeldtypischen Sedimente durchgeführt, insbesondere derer, die im Abstrombereich der Grube

liegen. Dabei wurde das Sorptionsverhalten sowohl in der sauren Laugungslösung als auch im neutralen Grundwasser untersucht. Hinzu kommt, daß in einer Reihe von Mischungen aus beiden Proben Grubenwasserzusammensetzungen simuliert wurden, die im Verlaufe des Flutungsprozesses auftreten werden. Insgesamt wurden in 20 Serien etwa 800 Proben in die Experimente einbezogen.

Die Verteilungsverhältnisse wurden unter Anwendung der „Batch“-Verfahrensweise bestimmt, die in der Verteilung des Radiums zwischen der festen Sedimentphase und der wäßrigen Flutungslösung unter Grubenbedingungen (14 °C, Luftzutritt) besteht.

Nach einer zweiwöchigen Voräquillrierung der „Batches“, bestehend aus 1 bis 10 g Sediment und 10 bis 50 ml Wasser wurden 40 bis 2 000 Bq ²²⁶Ra zugesetzt und die Proben weitere 8 Wochen geschüttelt. Schließlich wurde nach sorgfältiger Phasentrennung und Separierung des Radiums von seinen Tochterprodukten die ²²⁶Ra-Verteilungsverhältnisse (R_d -Werte) mittels Flüssigszintillationsmessung aus der Abnahme der Radiumaktivität in der flüssigen Phase bestimmt.

Das typische Verteilungsverhalten des Radiums an den Sedimenten ist in Abbildung 5 dargestellt. Im Falle der Sandsteine (Säulen A-C) wird aus der sauren Laugungslösung eine starke Radiumanbindung ($R_d > 10^3$) gefunden. Im Prozeß der Verdünnung der Laugungslösung sinken die R_d -Werte unter 10^2 , was bedeutet, daß die Radiumsorption vermindert wird. Da in den sulfathaltigen Flutungslösungen die Löslichkeitsprodukte des Barium- und Radi-

umsulfats überschritten sind, sollten direkte Abscheidungs Vorgänge für die Radiumanbindung hauptsächlich verantwortlich sein. Der von Reichel und Koß (1995) auf der Grundlage der Daten von Meier et al. (1992) für die Radiumsorption an Gorlebener sandigen Sedimenten diskutierte Mechanismus der Oberflächenkomplexierung kann unter den Königsteiner Bedingungen nur der die Abscheidung einleitende Schritt sein.

Die tonig-kalkigen Sedimente (Säulen D, E) sorbieren das Radium ähnlich stark wie der Sandstein. Die Verteilungsverhältnisse sind aber vom Verdünnungsprozeß unbeeinflußt, was am ausgeprägten Säureneutralisationsvermögen der Tone und in der generell andersgearteten Anbindung des Radiums liegt. Um eine Größenordnung höhere Verteilungsverhältnisse werden am Pläneräquivalent (Säule F) gefunden, das damit als wirksame Barriere für die Ausbreitung des Radiums entlang seines Pfades erkannt wurde.

Prognose der Entwicklung der Aktivitätskonzentration des Radiums im Flutungswasser

Eine Abschätzung der Entwicklung des Radiumgehaltes im Flutungswasser kann aus der Abhängigkeit der Radiumverteilungsverhältnisse von der Zusammensetzung des Flutungswassers vorgenommen werden. Eine mehrjährige Experimentalfutung im Maßstab 1:100 im untersten Grubenabschnitt durch das Sanierungsunternehmen ergab einen jährlichen Abfall der Sulfatkonzentration von 0,6 bis 0,7 g/l, d.h. in einem Zeitraum von knapp 5 Jahren wird der Sulfatgehalt des Flutungswassers das Niveau des Grundwassers (10 bis 20 mg/l) erreichen. In diesem Zeitraum wird das Radiumverteilungsverhältnis am Sandstein von $3,5 \cdot 10^3$ auf 70 absinken. Unter der Voraussetzung einer konstanten Quellstärke und einer guten Durchmischung müßte sich der Radiumgehalt im Flutungswasser in dem Maße erhöhen, wie der Desorptionsprozeß durch Verdünnung der Laugungslösung mit Grundwasser an Stärke gewinnt. Das bedeutet, daß die anfängliche Radiumaktivitätskonzentration von knapp 1 Bq/l auf 40 bis 50 Bq/l ansteigen müßte. Da hierzu nur weniger als 0,5 % des Radiums desorbiert werden muß, erfüllt der gelaugte Sandstein das Kriterium der Quellkonstanz.

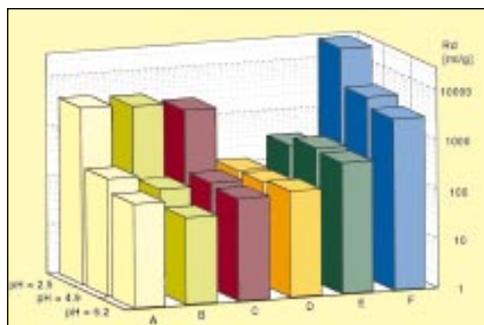


Abb. 5

Radiumsorption an den Königsteiner Sedimenten in Abhängigkeit von der Acidität des Flutungswassers (Cenomaner Sandstein: (A) ungelaut; (B) gelaugt; (C) turoner Sandstein; (D) Tonstein; (E) Pläner; (F) Pläneräquivalent (pH 2,5: Grubenwasser in der frühen Flutungsphase, pH 4,9: Grubenwasser im Flutungsendstadium, pH 6,2: zufließendes Grundwasser)

Wanderung des Radiums entlang des Ausbreitungspfades

Die Ausbreitungsabschätzung wurde auf der Basis einer eindimensionalen Transportrechnung für homogen-poröse Sedimente unter Verwendung der experimentell bestimmten R_d -Werte durchgeführt. Dabei wurde mit dem Ansatz von Hadermann (1980) gerechnet, der Retardation, Dispersion und radioaktiven Zerfall berücksichtigt. Für die Radiummigration aus dem 4. Grundwasserreservoir über die tektonischen Störzonen des Wasserstauers in den 3. Grundwasserleiter und die Ausbreitung im Limonitsandstein ergibt sich folgendes Bild:

Migration des Radiums durch den Grundwasserstauer und das Pläneräquivalent

Bis zum nahezu vollständigen Zerfall in 10 000 Jahren kommt das Radium ($\tau_{1/2} = 1\,600\text{ a}$) im Tonstein etwa 14 bis 15 m und im Pläner 7 bis 8 m voran (Fließgeschwindigkeit: 2 bis 5 m/a), d. h. eine intakte 30-m-Schicht Grundwasserstauer wird vom Radium nicht durchwandert, es bleibt schon im Tonstein stecken (Abbildung 6). In Anbetracht der großen Zeiträume, in denen der Transport über diese Distanzen erfolgt, spielt die Anfangsphase, in der sich die Grube auffüllt und die Strömungen sich einstellen, im Ausbreitungsgeschehen bezüglich des 3. Grundwasserleiters keine Rolle, d. h. das Radium dringt im Flutungszeitraum nur wenige Millimeter in den Tonstein ein. In den Bereichen mit Pläneräquivalent als Grundwasserstauer kommt das Radium trotz der hohen Verteilungsverhältnisse besser voran. Das ist auf die dort zu erwartenden höheren Fließgeschwindigkeiten zurückzuführen. Im Verlaufe von 2 500 bis 3 000 Jahren könnte eine 30 m-Schicht unter Abschwächung der Radiumkonzentration durchwandert werden und verbleibendes Radium könnte in den 3. Grundwasserleiter übertreten.

Ausbreitung des Radiums im dritten Grundwasserhorizont

Im Limonitsandstein kommt das Radium, das mit einer angenommenen Konzentration von 100 Bq/l eindringt, bei einer Fließgeschwindigkeit von 50 bis 60 m/a in 10 000 a nicht weiter als 1,5 km voran (Abbildung 7). Im untersten 4. Horizont wird es aufgrund der geringen Strömung nach Flutungsende zu keinem nennenswerten Radiumtransport kommen.

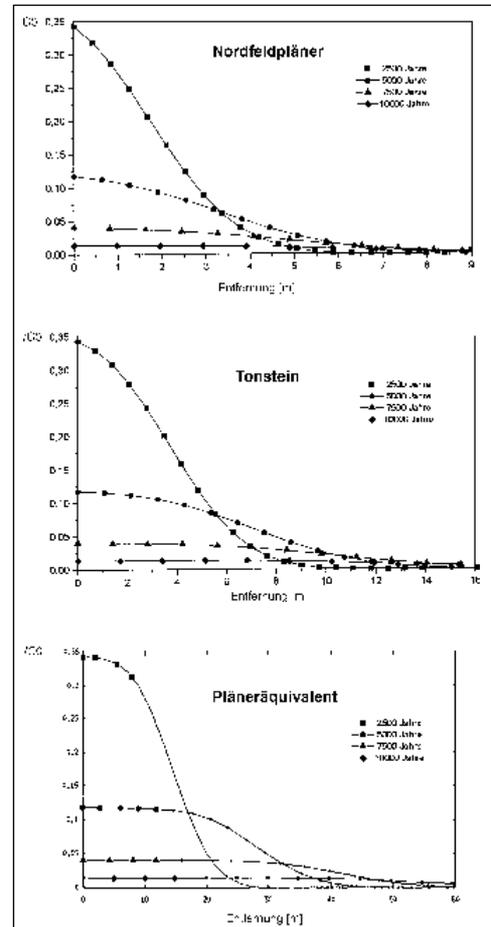


Abb. 6
Eindringen des Radiums in die Sedimente des Grundwasserstauers über einen Zeitraum von 10 000 Jahren (c/c_0 : Radiumkonzentration bezogen auf die Anfangskonzentration)
(a) Tonstein, (b) Pläner, (c) Pläneräquivalent

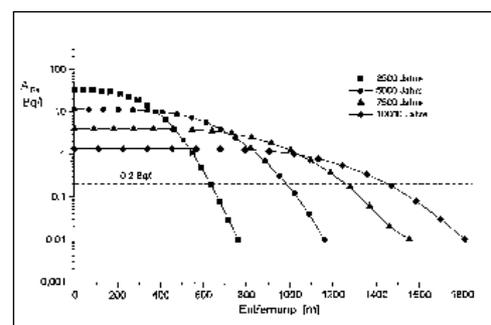


Abb. 7
Radiumausbreitung im 4. Grundwasserleiter im nördlichen Abstrombereich der Grube (stark konservative Abschätzung)
Startaktivitätskonzentration: $A_{Ra,0} = 100\text{ Bq/l}$;
natürlicher Grundpegel: $A_{Ra,nat.} = 0,2\text{ Bq/l}$

Diese Ausbreitungsabschätzung trägt stark konservative Züge, d. h. es ist viel Sicherheit eingebaut, dergestalt, daß (1) die niedrigsten R_d -Werte in die Rechnung eingingen, (2) der irreversibel an den Sedimenten gebundene Radiumanteil, der dem Migrationsprozeß entzogen wird, nicht berücksichtigt wurde und (3) nach etwa 2 500 Jahren nur 15% der ursprünglichen ^{226}Ra -Aktivitätskonzentration von 40 bis 50 Bq/l, d. h. Wasser mit 6 bis 8 Bq/l das Pläneräquivalent in den Störungszonen durchdringt und in den 3. Grundwasserleiter eindringt.

Gesamteinschätzung

Von dem großen Radiumpotential in den gelaugten und vererzten Sandsteinen wird auf Grund der hohen Radiumanbindung an das Geomaterial nur wenig Radium freigesetzt. Im Prozeß der Flutung wird es im Grubenbereich nur zu einem geringfügigen Anstieg der Aktivitätskonzentration (auf maximal 50 Bq/l) kommen. Quelle der Radiumfreisetzung ist in erster Linie der gelaugte Quadersandstein. Die tonig-kalkigen Sedimente, insbesondere der Pläner und das Pläneräquivalent haben ein hohes Radiumsorptionsvermögen und sind damit Barrieren, die im Ausbreitungsprozeß erst überwunden werden müssen. Infolge der starken Aufwärtsströmung im Pläneräquivalent könnte es in 2 500 bis 3 000 Jahren zum Radiumübertritt in den 3. Grundwasserleiter kommen. Eine stark konservative Abschätzung über einen Zeitraum von 10 000 Jahren ergibt eine maximale Transportdistanz von 1,5 km für den nördlichen Grubenabstrombereich. Eine Radiumkontamination des Grundwasserreservoirs im weiteren Umfeld ist nach dem vorliegenden Kenntnisstand völlig auszuschließen.

Literatur:

Berry, J.A., Bishop, H.E., Cowper, M.M., Fozard, P.A., McMillan, J.W., Mountfort, S.A. (1993)
„Measurement of the Sorption of Actinides on Minerals Using Microanalytical Techniques“, Analyst 118 (1993), 1241

Reichel, A., Koß, V. (1995)
„Modelling of Radium Sorption and Speciation in Natural Sediment-Groundwater Systems“; B. Merkel, S. Hurst, E.P. Löhnert, W. Struckmeier (Hg.) (1995) *Proc. Internat. Conf. and Workshop on Uranium-Mining and Hydrogeology*, Freiberg, Germany, Oct. 1995

Meier, H., Zimmerhackl, E., Zeidler, G., Menge, P., Albrecht, W. (1992)
„Experimental Investigation of Radionuclide Diffusion in Site-Specific Sediment/Groundwater Systems“, *Radiochim. Acta* 58/59 (1992), 341

Hadermann, J. (1980)
„Radionuclide Transport through Heterogeneous Media“, *Nuclear Technology* 47 (1980), 312

POSITRONEN-EMISSIONS-TOMOGRAPHIE FÜR DIE QUALITÄTSSICHERUNG BEI DER SCHWERIONEN-TUMORTHERAPIE

W. Enghardt, B.G. Hasch, R. Hinz, K. Lauckner, J. Pawelke und M. Sobiella

Institut für Kern- und Hadronenphysik

Bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt ist in den vergangenen Jahren eine experimentelle Anlage für die Krebstherapie mit Strahlen schwerer Ionen errichtet worden. Im Herbst 1997 sollen dort die ersten Tumorpatienten mit ^{12}C -Strahlen behandelt werden. Bei der Installation der Anlage und ihrem künftigen Betrieb kooperieren die Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt (GSI), das Deutsche Krebsforschungszentrum in Heidelberg (DKFZ), die Radiologischen Kliniken der Universitäten Heidelberg und Magdeburg sowie das Forschungszentrum Rossendorf. Der Rossendorfer Beitrag zur Therapieanlage besteht in der Entwicklung und Realisierung von Verfahren, welche die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) für die Kontrolle der Schwerionen-Tumorthherapie anwenden. Mit der Installation des in Rossendorf gebauten Positronen-Emissions-Tomographen am Therapieplatz in Darmstadt im Januar 1996 konnten die methodischen Vorarbeiten zum Einsatz von PET für die Tumorthherapie mit schweren Ionen beginnen.

Tumorthherapie mit Strahlen schwerer Ionen

Das Problem der Krebstherapie ist trotz beachtlicher Behandlungserfolge der modernen Medizin ungelöst. Auch wenn die Hoffnung besteht, in Zukunft Tumorerkrankungen durch Einsatz genetischer oder immunologischer Verfahren heilen zu können, wird die lokale physikalische Primärtherapie in Form der operativen Entfernung oder der Bestrahlung des Tumorgewebes einen wichtigen Stellenwert behalten.

In Deutschland erkranken jährlich etwa 400000 Menschen an Krebs. Zum Zeitpunkt der Diagnose wird bei etwa 60 % der Patienten ein lokal begrenzter Tumor festgestellt - ein Stadium, in dem die Erkrankung noch als heilbar angesehen wird. Zu erfolgreichen Krebsbehandlungen, d. h., wenn dem Abschluß der Therapie eine mindestens fünfjährige symptomfreie Zeitspanne folgt, trägt die

Strahlentherapie allein oder in Kombination mit der Chirurgie etwa zur Hälfte bei. Bei ca. 20 % potentiell heilbarer Patienten - pro Jahr sind dies in Deutschland mehr als 50 000 - versagen allerdings die lokalen Behandlungsmethoden; es kommt zu erneutem Tumorwachstum und oft zur Bildung von Metastasen. Eine Verbesserung der lokalen physikalischen Therapie ist also wünschenswert. Die chirurgischen Methoden sind nahezu bis an die Grenzen ihrer Möglichkeiten entwickelt. Bei der Strahlentherapie mit Photonen (Röntgen- oder Gammastrahlen) und Elektronen, wie sie heute im wesentlichen angewandt wird, aber auch bei der Neutronentherapie bestehen nur begrenzte Möglichkeiten der Konzentration der biologischen Strahlenwirkung auf das Tumorgebiet. In Abbildung 1 ist die Ursache hierfür illustriert: Die im Gewebe deponierte Dosis nimmt mit zunehmender Tiefe ab, das Dosismaximum liegt wenige Millimeter unter der Körperoberfläche. Es wird also eine erhebliche Dosis im gesunden Gewebe, welches in Strahlrichtung vor und hinter dem Tumor liegt, deponiert. Die dort erzeugten Nebenwirkungen limitieren, die im Tumor zu deponierende Dosis.

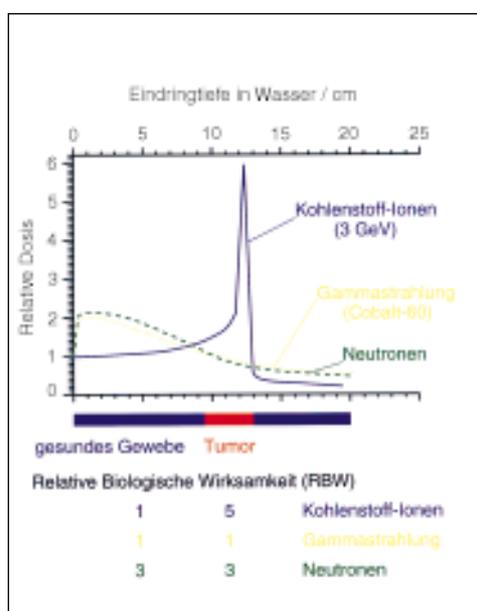


Abb. 1
Der physikalische und biologische Vorteil von Strahlen schwerer Ionen (hier Kohlenstoff) gegenüber Gammastrahlen und Neutronen. Während die im Gewebe (Wasser dient hier als Modells substanz) deponierte Dosis für Gammastrahlen und Neutronen mit der Eindringtiefe fällt, weist sie für schwere Ionen ein deutliches Maximum - den Bragg-Peak - auf, dessen Lage von der kinetischen Energie der Ionen abhängt. Nur im Bereich des Bragg-Peaks, d. h. im Tumor, ist die relative biologische Wirksamkeit der ^{12}C -Strahlen und damit die Schädigung des Gewebes deutlich erhöht, wie dem unteren Teil der Abbildung zu entnehmen ist.

Strahlen hochenergetischer schwerer Ionen vermögen nun diesen Nachteil auszugleichen. Für eine Anwendung in der Krebsbehandlung werden als potentielle Projektile „schwere Ionen“ mit einer Kernladungszahl von 6 bis 10, also die Elemente vom Kohlenstoff bis zum Neon im Periodensystem, in Betracht gezogen; Ionen mit höherer Kernladungszahl zeigen zunehmend für die Therapie unerwünschte Nebeneffekte. Wie Abbildung 1 zeigt, erzeugen schwere Ionen im Gewebe eine völlig andere Dosis-Tiefenverteilung als Photonen oder Neutronen: Nach Eintritt in die Materie ist die Energieabgabe relativ gering, sie nimmt mit wachsender Tiefe zu und erreicht kurz bevor das Ion zur Ruhe kommt ein ausgeprägtes Maximum, den sogenannten Bragg-Peak. Hinter diesem fällt die Dosis steil ab. Dieser physikalische Vorteil von Schwerionenstrahlen ist mit einem biologischen kombiniert: Der hohe Energieübertrag im Bereich des Bragg-Peaks führt dort zu einer räumlich begrenzten Erhöhung der relativen biologischen Wirksamkeit. Durch Wahl von geeigneten Strahlenergiewerten und magnetische Ablenkung des Schwerionenstrahls kann diese biologisch hochwirksame Strahlungskomponente auf das Tumervolumen fokussiert werden, so daß einer massiven Schädigung der Geschwulst eine weitgehende Schonung des umliegenden gesunden Gewebes gegenübersteht. Dieses Verfahren - genannt Rasterscanning - wurde von den Kollegen der GSI technisch realisiert. Die damit mögliche Präzisionstherapie ist zur Behandlung von Tumoren in unmittelbarer Nähe strahlensensitiver Organe indiziert. Sie erfordert jedoch die Einhaltung der Position des Zielvolumens im Körper des Patienten mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern während der gesamten Behandlung, die sich über ca. zwanzig Tage erstreckt, wobei an jedem Tag nur ein Teil der zur Vernichtung des Tumors erforderlichen Dosis appliziert wird. Deswegen sollte die Position des bestrahlten Feldes in-situ verifiziert werden, um gegebenenfalls nach jeder Bestrahlungsfraction korrigierend eingreifen zu können.

Positronen-Emissions-Tomographie und Schwerionentherapie

Eine Technik, welche diese Kontrollfunktion erfüllen kann, ist die Positronen-Emissions-Tomographie. PET ist bekannt als ein Verfahren der Nuklearmedizin, das die quantitative Erfassung von Stoffwechselvorgängen in-vivo erlaubt. Es hat seine Hauptanwendungen auf den Gebieten der neurologisch, kardiologisch und onkologisch orientierten Diagnostik und Forschung. Für eine PET-Untersuchung wird dem Patienten eine Substanz, die am Stoffwechsel des Körpers teilnimmt (z. B. Glucose) injiziert oder durch Inhalation verabreicht. Zuvor wurde diese Substanz mit einem positronenemittierenden Nuklid (z. B. ^{18}F , ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N) markiert. Ein β^+ -radioaktiver Kern wandelt sich unter Aussenden eines Positrons und eines Neutrinos in einen stabilen Kern um. Das Positron annihiliert nach kurzer Bremsstrecke (1 - 2 mm in wasseräquivalenten Körpergewebe) mit einem Elektron, wobei zwei Photonen der Energie 511 keV freiwerden, die kollinear auseinanderlaufen. Der koinzidente Nachweis dieser Gammaquanten mittels einer den Patienten ringförmig umschließenden Anordnung ortsempfindlicher Detektoren (Positronenkamera, Abbildung 2) liefert Daten, aus denen sich die räumliche Verteilung der radioaktiv markierten Substanz im Körper mit

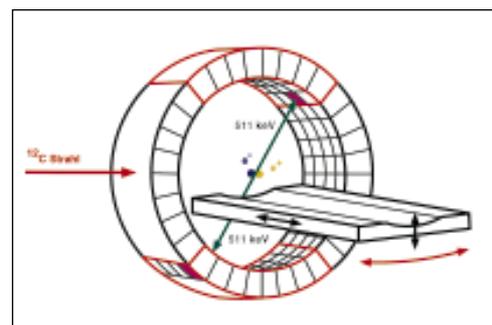


Abb. 2
Schematische Darstellung eines Positronen-Emissions-Tomographen. Die zwei bei der Annihilation eines Positrons und eines Elektrons entstehenden Photonen der Energie 511 keV (grün) laufen kollinear auseinander. Sie werden von ringförmig den Patienten umschließenden ortsempfindlichen Detektoren registriert. Damit ist die Lage der Geraden im Raum, auf der die Positronenannihilation stattgefunden hat, bekannt. Aus einer Vielzahl registrierter Ereignisse kann die Verteilung der positronenemittierenden Nuklide im Körper des Patienten rekonstruiert werden. Um die Strahlführung und die Flexibilität der Patientenlagerung (freie Beweglichkeit der Patientenliege, wie durch die Pfeile angedeutet) bei der Schwerionentherapie nicht zu behindern, wurde der Tomograph zur Kontrolle der Schwerionentherapie in Doppelkopf-Geometrie (rot) ausgelegt.

computertomographischen Rechenverfahren rekonstruieren läßt. So läßt sich z. B. die Anreicherung und der Abbau der Substanz durch den Stoffwechsel in bestimmten Körperregionen verfolgen. Im Gegensatz zur Röntgen-Computertomographie zeigt PET also nicht anatomische Strukturen, sondern es erlaubt, den Ort und den zeitlichen Verlauf von Stoffwechselprozessen zu bestimmen. Da viele Krankheiten ihre Ursache letztendlich in Stoffwechselstörungen haben, ist dem Mediziner mit PET ein Diagnoseinstrument völlig neuer Qualität verfügbar.

Im Unterschied zur Nuklearmedizin werden beim Einsatz von PET zur Kontrolle der Schwerionentherapie dem Patienten die positronenemittierenden Nuklide nicht appliziert. Sie entstehen vielmehr immer als Nebenprodukt der Therapiebestrahlung (Abbildung 3, 4) durch nukleare Wechselwirkung (vornehmlich Fragmentierung infolge peripherer Kern-Kern-

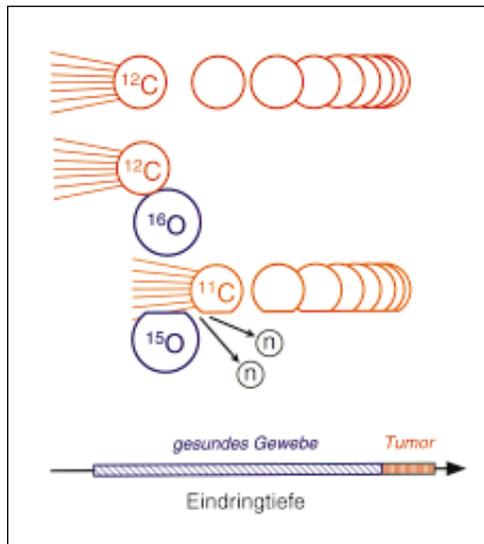


Abb. 3

Der Mechanismus der Erzeugung von Positronenemittern bei der Bestrahlung von Gewebe mit ^{12}C -Ionen. Der für die Therapie erwünschte Effekt ist in der oberen Zeile dargestellt: Durch Kollisionen mit Elektronen gibt das Ion seine Energie an das Gewebe ab und kommt im Bereich des Tumors zur Ruhe. Darunter: Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit kommt es zu einem Kern-Kern-Stoß (hier mit einem ^{16}O -Kern des Gewebes). Dabei verlieren die kollidierenden Kerne Nukleonen (hier jeweils ein Neutron). Dadurch können β^+ -Emitter entstehen, z. B.: $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C} + n$ und $^{16}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{O} + n$. Die Kernreaktion ändert die Geschwindigkeiten der Stoßpartner nur geringfügig. Der ^{15}O -Kern (das Targetfragment) verbleibt an seinem Ort, der ^{11}C -Kern (das Projektillfragment) hat fast die gleiche Reichweite, wie die primären ^{12}C -Ionen. Dies führt zur Erzeugung von Positronenemittern entlang der gesamten Bahn des Ionenstrahls im Gewebe (Targetfragmente), die Projektillfragmente häufen sich dagegen am Ende der Bahn an.

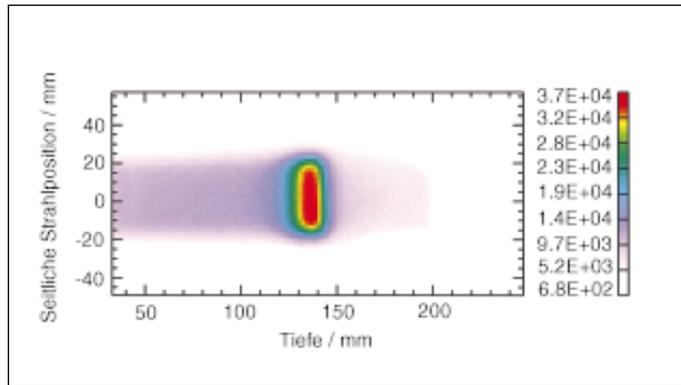
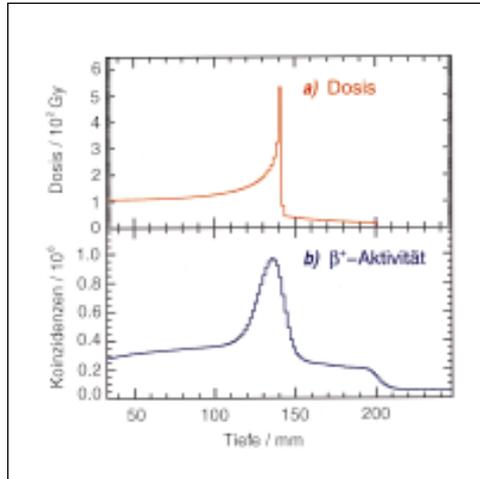


Abb. 4

Positronenemitterverteilung, die bei Bestrahlung eines Plexiglasblockes mit ^{12}C -Ionen der Energie 3.510 GeV entsteht. Der Strahl von 5 mm Durchmesser wurde bis zu ± 20 mm aus der Nulllage abgelenkt. Die Reichweite der Ionen beträgt 14 cm. Dort bildet sich ein deutliches Aktivitätsmaximum. Die Farbskala bezeichnet die Zahl der registrierten Annihilationsereignisse.

Stöße) zwischen einem Teil der Ionen des Therapiestrahles - den Projektilen - und den Atomkernen des Gewebes - dem Target. Bei einer Fragmentierungsreaktion werden im allgemeinen sowohl vom Target - als auch vom Projektilkern einige Nukleonen abgerissen - es findet eine Kernumwandlung statt, wodurch mit gewisser Wahrscheinlichkeit auch Positronenemitter entstehen (Abbildung 3). Eine besondere Eigenschaft von Fragmentierungsreaktionen besteht darin, daß sich die Geschwindigkeiten der Stoßpartner bei der Reaktion nur geringfügig ändern: das Projektillfragment hat etwa die gleiche Geschwindigkeit wie das Projektil, das Targetfragment bleibt in Ruhe. So entsteht eine charakteristische Tiefenverteilung der Positronenemitter (Abbildung 4). Sie ist gekennzeichnet durch eine Aktivierung des bestrahlten Objektes längs des Strahlweges durch Targetfragmente (^{15}O , ^{13}N , ^{11}C und ^{10}C für Körpergewebe) und einen ausgeprägten Peak, welcher in der Nähe des Dosismaximums liegt und von gestoppten β^+ -aktiven Projektillfragmenten (^{11}C und ^{10}C bei Bestrahlung mit ^{12}C) gebildet wird. Der somit hergestellte und in Abbildung 5 gezeigte Zusammenhang zwischen den Dosis- und den Positronenemitter-Verteilungen, dessen Gültigkeit von uns nicht nur für Kohlenstoffstrahlen, sondern auch für andere therapierelevante Projektile wie Sauerstoff und Neon gezeigt wurde, ist die Grundlage für das im folgenden beschriebene PET-Verfahren.

Abb. 5
 Der Zusammenhang zwischen den Tiefenverteilungen von Dosis nach Bestrahlungsplanung (a) und mit PET gemessener β^+ -Aktivität (b) für die Bestrahlung eines Plexiglasphantoms ($-\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2-$) mit ^{12}C -Ionen der Energie 3,510 GeV.



Der Positronen-Emissions-Tomograph

Unsere apparative Basis bildet ein spezieller Positronen-Emissions-Tomograph (Abbildung 6), der im Forschungszentrum Rossendorf entwickelt, aus kommerziell verfügbaren Komponenten der ECAT EXACT PET-Scanner der Fa. Siemens / CTI, Knoxville, Tenn. (USA) aufgebaut und im Januar 1996 in Darmstadt installiert wurde.

Positronen-Emissions-Tomographen, die von der Industrie für die Nuklearmedizin angeboten werden, sind für die Integration in eine Schwerionentherapieanlage nicht geeignet, wie Abbildung 2 veranschaulicht: Die den Patienten ringförmig umgebenden Detektoren

würden die Strahlführung und die für eine Präzisionstherapie erforderlichen aufwendigen Maßnahmen der Patientenlagerung in unvertretbarem Maße beeinträchtigen. Deshalb wurde nur ein Drittel des Ringes mit Detektoren belegt, wodurch ein Tomograph in Doppelkopfgeometrie entsteht. Die Detektorköpfe sind, wie aus Abbildung 6 ersichtlich, unterhalb und oberhalb der Patientencouch installiert. Der geforderte freie Raum für die Strahlführung und die Bewegung der Patientencouch ist so gegeben. Diese Flexibilität führt jedoch zu einem erheblichen Problem: die mit dieser Positronenkamera gemessenen Daten sind im Sinne der Theorie der tomographischen Rekonstruktion unvollständig. Eine realistische Rekonstruktion der Verteilung der Positronenemitter kann dadurch nicht mit der in der Radiologie und Nuklearmedizin fast ausschließlich verwendeten Methode der gefilterten Rückprojektion erreicht werden.

Es waren vielmehr rechenaufwendige iterative Rekonstruktionsalgorithmen der vorliegenden Detektorgeometrie anzupassen. Die Rekonstruktion erfolgt auf einem leistungsfähigen Computer (Silicon Graphics PowerChallenge) mit vier Parallelprozessoren und einer maximalen Rechengeschwindigkeit von ca. 1,2 Milliarden Gleitkommaoperationen pro Sekunde.

Die in Abbildung 6 gezeigten zwei Detektorköpfe bestehen jeweils aus 32 positionsempfindlichen Szintillationsdetektoren aus Bismutgermanat (BGO) mit einer Frontfläche von $54 \times 54 \text{ mm}^2$ und einer Dicke von 20 mm. Jeder dieser Detektoren ist in 8×8 Kristalle unterteilt, so daß eine intrinsische Detektorauflösung von 6,75 mm erreicht wird. Im Zentrum des Gesichtsfeldes der Positronenkamera wurde nach der tomographischen Rekonstruktion eine räumliche Auflösung von 4,7 mm gemessen. Die Nachweiseffektivität für Annihilationsstrahlung ist dort 2,8 %.

Wird auf jedem Detektorkopf gleichzeitig, d. h. innerhalb eines Zeitintervalls von 12 ns, genau ein Kristall von einem γ -Quant aus der Positronenannihilation getroffen, so wird das von der Detektorelektronik als echtes Annihilationsereignis anerkannt. Die Koordinaten der getroffenen Kristalle werden über ein 60 m langes Lichtleitkabel aus dem Bestrahlungsraum in den Therapie-Kontrollraum übertragen und dort gespeichert. Aus einer Vielzahl solcher Koordinatenpaare kann dann die Verteilung der Positronenemitter rekonstruiert werden (vgl. Abbildung 4).

Abb. 6
 Der medizinische Bestrahlungsplatz bei der GSI Darmstadt mit integrierter Positronenkamera. Der horizontale Therapiestrahler kommt von links hinten. Oberhalb und unterhalb der Patientennische sind die positionsempfindlichen Detektoren für die Annihilationsstrahlung montiert (Foto: A. Zschau, GSI Darmstadt).



Eine weitere technische Besonderheit dieses Tomographen besteht in der Steuerung des Meßvorganges durch den Betriebszustand des Teilchenbeschleunigers. Das Schwerionensynchrotron liefert einen gepulsten Strahl. Im Therapiebetrieb ist die Pulslänge 2,2 s, danach folgen 2,4 s Pause. Während der Strahlpulse ist die gemessene Annihilationsrate um ein mehrfaches höher als in den Pausen. Diese Erhöhung hat ihre Ursache in einer Vielzahl kernphysikalischer Prozesse, die ablaufen, wenn ein hochenergetischer Ionenstrahl in Materie gebremst wird. Leider tragen solche Annihilationsereignisse keine Information zur Dosisverteilung und müssen deshalb als Störsignal angesehen werden. Um dieses zu unterdrücken, kann während der Zeit des Teilchenpulses die Aufzeichnung der PET-Daten unterbrochen werden. Die während der Pausen zwischen den Synchrotronpulsen aufgezeichneten Annihilationsereignisse haben ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis, wie Abbildung 4 beweist. Ermöglicht wird diese Technik durch die relativ langen Halbwertszeiten der erzeugten β^+ -Emitter.

Bei Bestrahlung von Gewebe mit ^{12}C -Ionen sind dies ^{11}C ($T_{1/2} = 20,4 \text{ min}$), ^{15}O ($T_{1/2} = 2,0 \text{ min}$), ^{10}C ($T_{1/2} = 19,3 \text{ s}$) und ^{13}N ($T_{1/2} = 10,0 \text{ min}$), d. h., in den Pausen zwischen den Strahlpulsen und sogar bis zu ca. einer Stunde nach Beendigung der Bestrahlung sind die erzeugten Positronenemitter nachweisbar.

Methodische Experimente zur Vorbereitung der klinischen Anwendung

Die Installation des Tomographen am Therapieplatz bei der GSI Darmstadt weit vor Beginn der Patientenbestrahlungen erlaubten umfangreiche methodische Experimente. Dabei wurden Phantome aus Kunststoff, Wasser und gewebeäquivalentem Material im Zentrum des Gesichtsfeldes des Positronen-Emissions-Tomographen positioniert und mit ^{12}C -Ionen im Energiebereich zwischen 1 GeV und 4 GeV bestrahlt. Die Resultate in Kombination mit den bereits im FZR geleisteten Vorarbeiten erlaubten uns, zwei Methoden für den Einsatz von PET zur Kontrolle der Schwerionentherapie vorzuschlagen. Dies ist zum einen die retrospektive Dosislokalisation. Sollte dabei anhand der rekonstruierten Positronenemitterverteilung festgestellt werden, daß die Lage des bestrahlten Volumens im Körper von den Vorgaben des behandelnden Arztes abweicht,

so kann der Bestrahlungsplan vor der Applikation der nächsten Fraktion modifiziert werden. Zum anderen konnten wir zeigen, daß eine Verifikation des Bestrahlungsplanes vor der eigentlichen Therapie möglich ist. Dazu werden markante Punkte oder kritische Regionen (z. B. in unmittelbarer Nähe von Risikoorganen) mit einer niedrigen Dosis (ca. 10 % einer Therapiefraktion) bestrahlt. Anhand der sich einstellenden β^+ -Emitterverteilung kann nun wieder die Güte des Bestrahlungsplanes bewertet werden. Ersichtlich ist dies mit zusätzlichem Aufwand verbunden, der aber bei Bestrahlungen mit sehr hohen Präzisionsanforderungen gerechtfertigt sein kann.

Um nun diese PET-Verfahren für die klinische Praxis einsetzbar zu machen, haben wir gemeinsam mit dem Strahlentherapeuten Jürgen Debus von der Radiologischen Universitätsklinik Heidelberg, dem Medizinphysiker Oliver Jäkel vom DKFZ sowie mit Thomas Haberer und Michael Krämer von der GSI eine Prozedur entwickelt, die es erlaubt, die PET-Messungen, die Bestrahlungsplanung und die Steuerung des Beschleunigers zu integrieren. Sie besteht aus sechs Schritten:

- (1) Das Verfahren beginnt, wie in der modernen Radiotherapie üblich, mit einer dreidimensionalen Bestrahlungsplanung. Anhand von Röntgen-Computertomogrammen gibt der Arzt das zu bestrahlende Volumen vor. Daraus berechnen die Medizinphysiker einen Bestrahlungsplan in Form von räumlichen Dosisverteilungen.
- (2) Aus dem Bestrahlungsplan werden die Steuerdaten für den Beschleuniger und die Strahlführung abgeleitet. Sie enthalten Angaben zur Energie, Intensität und Positionierung des Schwerionenstrahles.
- (3) Mit diesen Daten wird die Bestrahlung ausgeführt. Während dieser und für einige Minuten nach Bestrahlungsende erfolgt die PET-Messung.
- (4) Auf der Basis der Röntgen-Computertomogramme der Tumorregion, dem Steuerdatensatz für den Beschleuniger und die Strahlführung und dem Protokoll des tatsächlichen Bestrahlungsablaufes wird mit einem von uns entwickelten Simulationsprogramm die zu erwartende Positronenemitterverteilung vorausberechnet.

Der Algorithmus modelliert alle physikalischen Prozesse, die für die Erzeugung und den Nachweis der Positronenemitter relevant sind - die Bremsung der Schwerionen und ihrer Fragmente, die Fragmentierungsreaktionen (Wirkungsquerschnitte, Kinematik), der Zerfall β^+ -radioaktiver Fragmente, der Transport der Positronen im Gewebe und ihre Annihilation sowie die Ausbreitung und der Nachweis der Annihilationsstrahlung sind darin berücksichtigt. Die erhaltenen Daten sind von der gleichen Struktur wie gemessene und können somit in gleicher Weise weiterbearbeitet werden.

- (5) Aus den gemessenen und den simulierten PET-Daten werden mit Hilfe eines iterativen Verfahrens (Maximum Likelihood Algorithmus) die Ist- bzw. die Sollverteilung der Positronenemitter berechnet.
- (6) Schließlich werden die rekonstruierten β^+ -Emitterverteilungen und die Dosisverteilungen mit Röntgencomputertomogrammen überlagert, um anhand ihrer Lage zu anatomischen Strukturen die Güte der Bestrahlung bewerten zu können.

Um diese Prozedur im Vorfeld der Therapie möglichst realitätsnah testen und vor allem auch das Zusammenwirken der Mitarbeiter verschiedener Einrichtungen trainieren zu kön-

nen, wurden zunächst Phantome bestrahlt. Die Abbildung 7 zeigt ein für die Bestrahlung vorbereitetes Kopfphantom, bei dem die anatomischen Strukturen eines menschlichen Kopfes aus gewebeäquivalentem Kunststoff nachgebildet sind. Für dieses Phantom wurde eine Hirnbestrahlung simuliert. Den Plan der Dosisverteilung zeigt Abbildung 8 (oben). Der rot unterlegte Bereich wurde mit einer Dosis von 2 Gy bestrahlt. Die Energie des ^{12}C -Strahles variierte zwischen 1,201 und 1,939 GeV. Darunter wird dagegen das Resultat der PET-Messung gezeigt: die rekonstruierte Positronenemitter-Verteilung wurde einem Röntgen-Computertomogramm überlagert.

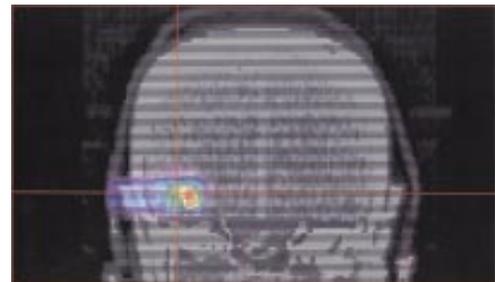
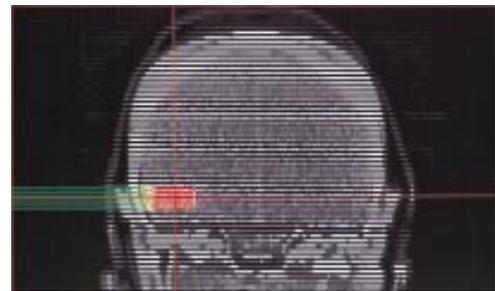


Abb. 7
Positionierung eines Kopfphantoms zur Bestrahlung dessen rechter Seite am Bestrahlungsplatz bei der GSI Darmstadt.



Abb. 8
Die Überlagerung von geplanter Dosisverteilung (oben) und gemessener β^+ -Aktivität (unten) mit einem Röntgen-Computertomogramm (Frontalschnitt) des Kopfphantoms, an dem eine Hirnbestrahlung simuliert wurde. Die Computertomogramme sind als schwarz-weiß Bilder, Dosis und β^+ -Aktivität in Falschfarbendarstellung (Regenbogen, Maximalwerte: rot) wiedergegeben.

Die bisherigen experimentellen Ergebnisse zeigen, daß unser Beitrag wesentlich zum Gelingen des Schwerionen-Tumorthherapie-Programms beitragen wird. Zur weiteren Verbesserung und Verfeinerung des Verfahrens und seiner Überführung in die klinische Praxis werden im Juni 1997 Tierexperimente mit Minischweinen durchgeführt, bei denen besondere Anforderungen an die Positionierung auftreten. Hierzu arbeiten wir mit Strahlentherapeuten von der Medizinischen Fakultät Carl Gustav Carus an der TU Dresden zusammen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß es uns im Jahre 1996 gelang, die technischen und physikalischen Voraussetzungen sowie die Softwarekomponenten für eine Anwendung von PET für die Qualitätssicherung der Schwerionentherapie bei der GSI bereitzustellen. Ihre Integration in das System der Bestrahlungsplanung und -steuerung ist weit fortgeschritten. Im Rahmen der demnächst beginnenden experimentellen Therapie sind die Methoden weiter zu optimieren und ihr Nutzen für die klinische Praxis im Detail zu bewerten.

In dieser zunächst auf fünf Jahre angelegten klinischen Phase des Darmstädter Schwerionen-Therapieprojektes sollen etwa 250 bis 350 Patienten behandelt werden. Danach ist zu entscheiden, ob eine Schwerionen-Therapieanlage in eine Klinik zu integrieren ist, um diesen vielversprechenden Ansatz in der physikalischen Therapie einem größeren Patientenkreis zugänglich zu machen.

KERNSPALTUNG IN DREI GROßE FRAGMENTE

NEUE ERGEBNISSE VOM ROSSENDORFER FOBOS–DETEKTOR IM VIK DUBNA

F. Döna, H.–G. Ortlepp, W. Wagner und C.–M. Herbach

Institut für Kern- und Hadronenphysik

Einleitung

Vor 12 Jahren entschloß sich die deutsche Forschergruppe im Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna (VIK - das sozialistische Gegenstück zum Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf), die große Detektoranlage FOBOS aufzubauen. Mit ihr lassen sich die komplizierten Vorgänge aufzeichnen, die beim Aufeinanderprallen von Atomkernen bei Stoßgeschwindigkeiten vor sich gehen, die so hoch sind, daß die im Kern gebundenen „Nukleonen“ dabei kräftig durcheinander gewirbelt werden. Die für die Experimente vorgesehene Energie von 10 bis 100 Mega-elektronenvolt (MeV) pro Nukleon, die Projektilgeschwindigkeiten von 15 bis 35 % der Lichtgeschwindigkeit entsprechen, war gerade die Energie der „schweren Ionen“, die das damals noch im Aufbau befindliche neue Zyklotron „U400M“ des VIK später liefern sollte. Die Initiatoren gaben der ehrgeizigen Unternehmung den Namen FOBOS, wissend, daß ihr Ziel ähnlich interessant - wohl aber auch ähnlich weit entfernt - wie der Marsmond PHOBOS war.

Atomkerne - mesoskopische Systeme mit stochastischer Dynamik

Was macht Kernstöße in diesem Energiegebiet so attraktiv, daß diese Gruppe die Herausforderung der unten näher beschriebenen experimentellen Schwierigkeiten aufnahm? Was ist heute überhaupt noch an der kernphysikalischen Grundlagenforschung so bedeutsam, daß dafür beträchtliche Forschungsmittel bereitgestellt werden? Das Besondere der Kerne ist nicht nur ihre Kleinheit und Dichte, sondern vor allem auch die Vielfalt der Bewegungsformen dieser kleinsten Materietropfchen, die ihrerseits aus miteinander stark wechselwirkenden Nukleonen zusammengesetzt sind. Die ungeheure Vielzahl der Möglichkeiten, wie Atomkerne auf äußere Anregungen reagieren können, zwingt uns dabei gelegentlich, dem Nukleonensystem Atomkern

scheinbar widersprechende Eigenschaften zuzuschreiben. Zum Beispiel kann die Bindungsenergie, die die Stabilität eines Kerns bestimmt, gut in einem Tröpfchenbild verstanden werden. Andererseits beweist gerade die auffallend höhere Stabilität von Kernen mit einer „magischen“ Anzahl von Nukleonen - also eine ganz bestimmte Tröpfchengröße - die Existenz quantenmechanischer Schalen-effekte, die ein klassisches Tröpfchen nicht zeigen würde.

Die Ambivalenz solcher Erscheinungsformen ist auch für andere zusammengesetzte Systeme des Mikrokosmos charakteristisch, die wegen der noch relativ kleinen Zahl elementarer Bestandteile mesoskopisch genannt werden. Solche Systeme reagieren bei gewissen Anregungen als Ganzes wie ein kontinuierliches Medium, zeigen aber gegenüber anderen Anregungsarten typische individuelle Quantensprünge. Zu diesen mesoskopischen Systemen gehören neben den Atomkernen auch die um sechs Zehnerpotenzen größeren Metallcluster, bei denen Elektronen - wenige bis zu einigen tausend - in einem von den Ionen erzeugten Potentialtopf gebunden sind. Interessanterweise lassen sich viele Eigenschaften dieser Cluster mit den gleichen Prinzipien verstehen, wie sie die Kernstruktur beherrschen. Ähnliche Querverbindungen existieren zu vielen anderen Gebieten der Physik. Erkenntnisse über die besonderen Eigenschaften mesoskopischer Systeme oder theoretische Methoden zu ihrer Beschreibung werden wegen ihres direkten Bezugs zur Miniaturisierung von Bauelementen in Elektronik, Optik, Bionik, etc. in Zukunft eine immer größere Rolle spielen. Die Entwicklung der Mikrotechnik ist inzwischen bei einer Längenskala angelangt, bei der quantenmechanische Effekte nicht mehr vernachlässigt werden können. Es ist kaum vorhersehbar und letztlich gleichgültig, auf welchem speziellen Sektor der Forschung neue Erkenntnisse gewonnen werden. Wichtig ist, daß die gewählten Zielstellungen den Aufbruch zu neuen Forschungshorizonten erfordern. Nur dann kann man erwarten, daß die

Grundlagenforschung den Erkenntnisstand wirksam voranbringt und neue Methoden entwickelt. Die Kernphysik sieht sich dabei als Vorreiter in der Schaffung von Vorbildern für das Verständnis komplexer Phänomene, insbesondere des Zusammenspiels von makroskopischen und quantenmechanischen Prozessen. Die Hauptthematik des FOBOS Projekts, die Untersuchung der Spaltung von schweren, heißen Kernen, ist ein typisches Beispiel für dieses Zusammenspiel.

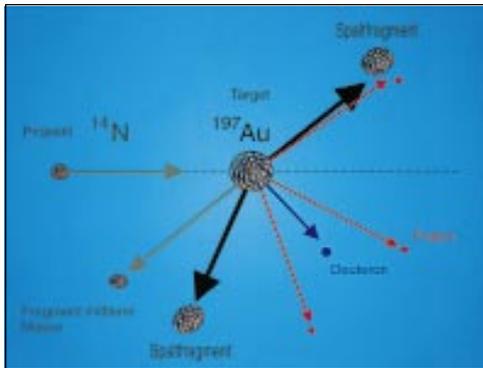


Abb. 1
Bildung und Zerfall eines Compoundsystems. Das Projektil ^{14}N wird auf den Targetkern ^{197}Au geschossen. Danach zerfällt das gebildete Verbundsystem in die exemplarisch gezeigten Bruchstücke verschiedener Ladung und Masse.

Abbildung 1 stellt stark vereinfacht die Vorgänge einer Kernreaktion dar, die zur Bildung eines heißen, schweren Verbundsystems („Compoundkern“) sowie zu seinem nachfolgenden Zerfall führen. Das Projektil, ein hochenergetisches Stickstoffion ^{14}N , trifft auf den Goldkern ^{197}Au („Target“) und bildet ein hochangeregtes „Compoundsystem“. Die vom Projektil eingebrachte Energie heizt dieses System so stark auf, daß es in verschiedene Bruchstücke (Fragmente) verschiedener Masse und Ladung zerfällt, die durch die Ladungsabstoßung (Coulombkraft) in alle Raumrichtungen auseinanderfliegen. Die größten Bruchstücke, die sind Spaltfragmente mit Massenzahlen in der Nähe der halben Targetmasse, tragen dabei den größten Teil der Anregungsenergie weg. Wie in Abbildung 1 skizziert, entstehen beim Zerplatzen des instabilen Compoundkerns auch Fragmente kleinerer Masse sowie einzelne Nukleonen. Jedes aus mehreren Nukleonen bestehende Fragment ist zunächst selbst noch heiß (angeregt) und kann sich im Flug durch weitere Fragmentierung oder Emission von Nu-

kleonen und Gammaquanten abkühlen. Im Verlauf des Zerfalls werden insbesondere auch eine größere Zahl von Neutronen abgedampft. Zur Untersuchung einer Kernreaktion wird ein ganzes System von Detektoren benötigt. Dabei stellt der in Abbildung 1 gezeigte kaskadenartige Prozess ein „Ereignis“ dar, das im Idealfall durch die Registrierung aller in einem solchen Detektorsystem ankommenden Zerfallsprodukte und emittierten Teilchen vollständig erfaßt wird. Damit man den Zerfallsprozeß quantitativ rekonstruieren kann, d. h. um zu sagen, was im Detail passiert ist, müssen nicht nur die Emissionswinkel der Fragmente, sondern auch ihre Massen und Ladungen als auch ihre Energien zugleich gemessen werden. Die Messung aller Winkel bedingt eine sphärische Detektoranordnung (eine möglichst den vollen Raumwinkel abdeckende „ 4π “-Geometrie) um das Target herum, wobei jeder Detektor die Auftreffposition der Fragmente registrieren muß. Die verschiedenen Winkelpositionen der einzelnen FOBOS-Detektoren sind in Abbildung 2 zu sehen, welche die Reaktionskammer von FOBOS in der Aufbauphase zeigt. Es sind hier erst zwei der konusförmigen Detektormodule befestigt. Die während der Experimente hoch-evakuierte Reaktionskammer hat die Form eines Fußballs mit 20 großen Sechseck- und 12 kleinen Fünfeckflächen. Die noch unbesetzten Detektorpositionen sind mit Blindflanschen verschlossen, um die Kammer evakuieren zu können. Abbildung 3 vermittelt einen Eindruck der betriebsfertigen FOBOS-Anlage mit ihren insgesamt 30 Modulen, die im weiteren genauer beschrieben werden. Zwei der insgesamt 12 Fünfeckflächen bleiben für den Ein- und Austritt des Ionenstrahles frei.



Abb. 2
Aufnahme von Montagearbeiten am FOBOS-Detektor. Erst zwei der insgesamt 30 konusförmigen Module sind in die zentrale Reaktionskammer eingesetzt. Foto: Yu. Tumanov, VIK

Zusätzlich zu den bereits genannten Anforderungen an ein Detektorsystem zur Registrierung solcher komplexen Spaltereignisse tritt noch der für die Kernphysik und Quantenphänomene typische statistische Aspekt: Die „Beobachtung“ eines *einzelnen* Ereignisses sagt fast nichts über den Vorgang im allgemeinen aus, da die Details der Einzelereignisse (z. B. die *einmal* gemessene Masse, Energie, elektrische Ladung, ... eines Spaltfragments) *zufällig* eintreten. Erst wenn man die Mittelwerte der registrierten Meßgrößen und ihrer Korrelationen über sehr viele gemessene Einzelereignisse bildet, können Rückschlüsse auf die „Regeln“ gezogen werden, die hinter den Einzelereignissen stecken. Das bedingt, daß der Detektor möglichst viele Ereignisse in möglichst kurzer Zeit registrieren muß. In den FOBOS-Experimenten wurden jeweils mehrere Millionen solcher komplizierten Spaltereignisse wie in Abbildung 1 aufgezeichnet, die im Detektorsystem mit einer Rate von mehreren hundert einzelnen Spaltereignissen pro Sekunde ankamen. Die Aufzeichnung dieser Daten ist ein in sich selbst komplexer Datenerfassungsprozeß: Die Information über die wichtigen Meßgrößen der Spaltereignisse (Abbildung 1) ist in den elektrischen Signalen (Impulsen) enthalten, die als Antwort auf den Durchgang der Zerfallsprodukte durch die jeweiligen FOBOS-Detektoren geliefert werden. Diese Signale werden als Zahlen verschlüsselt („digitalisiert“) auf Magnetbändern gespeichert. Das bei den FOBOS-Experimenten erhaltene Datenmaterial ist so umfangreich, daß es nur nach Abschluß der Messungen („off-line“) ausgewertet und analysiert werden kann. Die Daten werden, entsprechend der zu lösenden Fragestellung entschlüsselt und die erhaltenen Meßgrößen nach physikalischen Gesichtspunkten zusammengestellt. Die Analyse beinhaltet sowohl den qualitativen und quantitativen Vergleich mit dem bestehenden Kenntnisstand als auch die Konfrontation der experimentellen Daten mit theoretischen Voraussagen.

Dieses für die Grundlagenforschung typische Vorgehen wird weiter unten beschrieben.

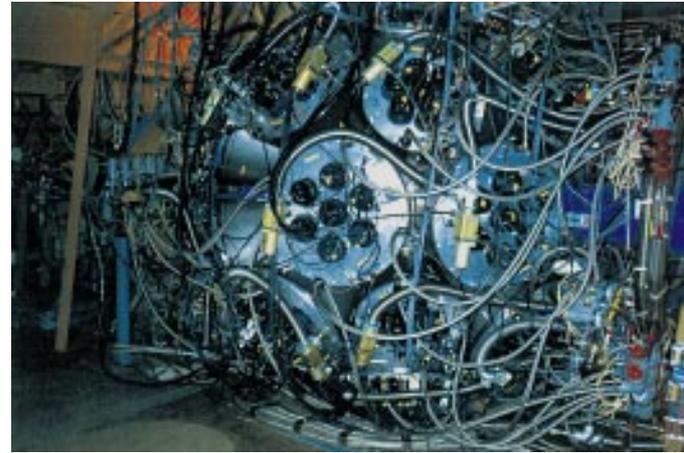


Abb. 3
Der betriebsfertige Detektor. Rund 800 Kabel verbinden die Zähler und Zusatzapparaturen mit der Versorgungs-, Steuer- und Datennahme-Elektronik. 120 Metallschläuche dienen der Evakuierung und Gasversorgung der einzelnen Zähler.

Die Spaltung heißer schwerer Kerne

Der Prozeß der Kernspaltung hat auch 50 Jahre nach seiner Entdeckung seine Faszination behalten. Die *spontane*, d. h. ohne äußere Einwirkung vor sich gehende Spaltung schwerer Kerne ist ein reines Quantenphänomen: Durch eine Formfluktuation, die klassisch aus energetischen Gründen nicht möglich ist, überwindet der Kern die ihn zusammenhaltende Oberflächenspannung. Die Ladungsabstoßung der sich ausbildenden Fragmente führt zum Zerreißen des Kernsystems.

Wie ändert sich dieser Spaltvorgang bei Energiezufuhr, in der in Abbildung 1 skizzierten Kernreaktion, die mit einer Aufheizung des Materietropfchens verbunden ist? Das ist eine der wichtigsten Fragestellungen, für deren Untersuchung der FOBOS-Detektor konzipiert wurde.

Die einen Spaltvorgang bestimmende Energetik resultiert hauptsächlich aus der Oberflächenspannung des Tröpfchens und der Coulombabstoßung der im Tröpfchen eingeschlossenen positiv geladenen Protonen. Bei der Kernreaktion wird das System stoßartig „aufgeheizt“ und der heiße Compoundkern ändert seine Form und Temperatur unter dem Einfluß innerer Reibung und unter Emission („Abdampfen“) leichter Teilchen. Die jeweilige Kerntemperatur beeinflusst die Art und Weise des Spaltvorgangs: Während sich bereits abgekühlte Compoundkerne bevorzugt *symmetrisch* in zwei etwa gleich große Fragmente spalten, wächst beim Zerfall heißer Com-

poundkerne die Wahrscheinlichkeit zur *asymmetrischen* Spaltung in verschieden große Bruchstücke. Insbesondere entstehen im Ergebnis des Spaltprozesses bei höherer Temperatur auch drei Fragmente. Die Beobachtung dieser seltenen Dreifachzerfälle war ein besonderes Ziel der FOBOS-Experimente.

Mit einer Reihe von theoretischen Annahmen können die Bewegungsgleichungen für solche Spaltvorgänge aufgestellt werden, mit denen man mittels der Monte-Carlo-Methode theoretische Trajektorien berechnet und somit Spaltereignisse auf dem Computer simulieren kann. Im Ergebnis liefert diese Theorie Voraussagen für die Fragment-Massen und -Energien, aus denen die im eigentlichen Experiment zu erwartenden Mittelwerte und Verteilungen abgeleitet werden. Im Vergleich Experiment-Theorie können wertvolle neue Einsichten in die Dynamik dieser stochastischen Prozesse gewonnen werden.

In den letzten zehn Jahren ist eine gute Übereinstimmung der experimentellen Daten mit der Theorie bei niedrigen Anregungsenergien erreicht worden. Allerdings ist der Spaltweg bei dieser Energie durch die symmetrische Spaltung in zwei gleiche Bruchstücke dominiert. Der FOBOS-Detektor erlaubt vor allem auch die Messung der anderen Zerfallswege, wie den der stark asymmetrischen Spaltung oder den Zerfall in drei Fragmente, die erst bei etwas höheren Anregungsenergien erreichbar sind. Die Experimente bei höheren Anregungsenergien sind ungleich schwieriger. Ein Problem ist zum Beispiel, daß das Projektil nicht immer mit dem Targetkern in einem Compoundkernsystem verschmilzt, sondern daß möglicherweise nur ein Teil des Projektils im Targetkern abgestoppt wird, der Rest aber weiterfliegt. Weitere Probleme sind „verlorene“ Masse durch emittierte Teilchen und deren Rückstoßeffekte. Diese und andere Probleme können die registrierten Daten verfälschen. Die FOBOS-Kollaboration hatte sich zum Ziel gesetzt, ein Vieldetektorsystem zu realisieren, bei dem die angedeuteten Verfälschungen minimiert werden. Dabei waren die zu untersuchenden Kernkollisionen entsprechend auszuwählen und darauf abgestimmte Detektions- und Auswertemethoden zu entwickeln.

Das Fragmentspektrometer FOBOS

Der FOBOS-Detektor (Abbildung 2 und 3) besteht aus einer Vielzahl einzelner Zähler von vier verschiedenen Typen, die gruppenweise in Module (Abbildung 3) zusammengefaßt sind, sowie den zugehörigen Versorgungs-, Überwachungs- und Datennahmesystemen. Der Strahl beschleunigter Projektilkerne durchdringt eine dünne Targetfolie, die sich auf einer speziellen Halterung befindet (Abbildung 4). Ein Bruchteil der Projektilkerne trifft auf Targetkerne und löst die gewünschte Kernreaktion aus.



Abb. 4

Blick in das Innere der Vakuumkammer. In der Mitte hängt das dünne Target an einer speziellen Halterung. Weiter sind die unter Gasdruck stehenden Frontteile der verschiedenen Detektormodule zu sehen.

Foto: Yu. Tumanov, VIK

Alle geladenen Produkte, die in den von Zählern überdeckten Raumwinkelbereich fliegen, können für jede erfaßte Reaktion simultan gemessen werden. Die insgesamt 30 Module auf den Facetten eines Isocahedrons (geometrische Figur aus 12 regelmäßigen Fünfecken und 20 regelmäßigen Sechsecken) überdecken 57 % des gesamten Raumwinkels um das Target (Abbildung 2, 3). Da es keinen universellen Zähler gibt, der alle vorkommenden Produkte über den gesamten Energiebereich messen kann, sind verschiedene Detektor-Typen hintereinander angeordnet, entsprechend der verschiedenen Durchdringungsfähigkeit der Teilchen. Jedes Modul besteht deshalb aus einem Lawinenzähler, einer Ionisationskammer und 7 Szintillationszählern.

Ein komplexes Fragment durchdringt nach einer Flugstrecke von 50 cm im Vakuum den Lawinenzähler und wird in der Ionisationskammer gestoppt. Es hinterläßt im Arbeitsgas des Lawinenzählers (Pentan mit einem Druck von 5 mbar) eine Elektronen-Ionenspur. Durch ein starkes elektrisches Feld werden die Elektronen beschleunigt und ionisieren weitere Gasmoleküle. Die so gebildete Ladungslawine wird von hochempfindlicher Elektronik erfaßt und aus deren Signalen können Auftreffort und -zeitpunkt bestimmt werden. Mit der bekannten Flugstrecke und räumlichen Lage des Zählers ergibt sich daraus der Geschwindigkeitsvektor des Fragments. Die Ionisationskammer mißt die Ladung und Dichte der beim Abstoppen des Fragments im Arbeitsgas (Argon-Methan-Gemisch mit einem Druck von etwa 350 mbar) freigesetzten Elektronenspur. Daraus werden die kinetische Energie und die Kernladungszahl des Fragments bestimmt. Aus Geschwindigkeit und kinetischer Energie ergibt sich schließlich die Fragmentmasse.

Leichte Teilchen werden erst hinter der Ionisationskammer in einem der 7 Cäsiumjodid-Szintillationskristalle gestoppt. Aus der Intensität und dem Zeitverlauf des von einem Sekundärelektronenvervielfacher erfaßten Lichtblitzes werden die Energie und die Teilchenart bestimmt.

Die von allen Detektoren gewonnenen Signale definieren die mehr als 900 Meßgrößen des FOBOS-Systems. Ein schneller elektronischer „Trigger“ entscheidet, ob ein Ereignis zu erfassen ist und welche Meßwerte tatsächlich registriert werden sollen. In einem Experiment werden im Mittel 50 Millionen Ereignisse auf Magnetbändern aufgezeichnet.

Während des Experiments kontrolliert ein komplexes Überwachungssystem, in das 8 gekoppelte Computer einbezogen sind, die ordnungsgemäße Funktion des gesamten Detektors. Über 100 Kontrollpunkte werden ununterbrochen beobachtet, damit das notwendige Vakuum in der Reaktionskammer sowie stabile Gasdrücke bei ständigem Gasaustausch garantiert sind. Dieser hohe Aufwand ist notwendig, um die Eichparameter der Zähler während einer mehrere Wochen dauernden Messung konstant zu halten - eine Grundvoraussetzung für die angestrebten präzisen Daten. Parallel zur Datensammlung werden laufend Serien von Kontrollspektren gemessen, um rechtzeitig eventuelle Abweichungen vom geplanten Meßablauf festzustellen.

Ein sehr interessantes Ergebnis - schwere Halsteilchen und Dreifachspaltung

Die FOBOS-Experimente begannen 1993/94 mit noch unvollständigem FOBOS-Detektor und eingeschränkten Möglichkeiten des U-400M-Beschleunigers zu Teilaspekten der Spaltdynamik heißer Kerne.

Im ersten Experiment wurde ein Thoriumtarget mit Lithiumkernen von 43 MeV pro Nukleon beschossen. Ein besonderer Vorteil des FOBOS-Detektors ist die Möglichkeit, die Fragmentmassen und die bei der Spaltung freigesetzte kinetische Energie unabhängig für verschiedene Anregungsenergien messen zu können. Das war entscheidend für die Beobachtung von Effekten, die in direktem Zusammenhang mit der Dynamik des Spaltprozesses stehen. So wurde bei der Analyse binärer Spaltereignisse festgestellt, daß sich die Massenverteilung der Fragmente entgegen bisherigen Vorstellungen von niedrigen bis hin zu mittleren Anregungsenergien praktisch nicht verbreitert. Dieser Effekt konnte als Folge der Abkühlung des spaltenden Kerns durch Nukleonenverdampfung interpretiert und durch mehrdimensionale stochastische Simulationsrechnungen quantitativ bestätigt werden. Die dafür erforderlichen, sehr aufwendigen Computerprogramme wurden in Zusammenarbeit mit einer Gruppe russischer Theoretiker aus Omsk entwickelt.

In einem weiteren Experiment wurde ein Goldtarget mit Stickstoffkernen von 34 MeV pro Nukleon beschossen. Aus den gemessenen Massen- und Energieverteilungen der Fragmente konnte eine neuartige halbempirische Systematik abgeleitet werden, die die freigesetzte kinetische Energie auch für stark asymmetrische Fragmentpaare richtig voraussagt. Bei den in diesem Experiment erreichten höheren Anregungsenergien wurde eine drastische Änderung der Fragmentmassenverteilung gefunden. Diese läßt sich nur verstehen, wenn die Abnahme der Oberflächenspannung der Kernmaterie mit steigender Temperatur berücksichtigt wird. Gegenwärtig werden Simulationsrechnungen unter der Annahme verschiedener Temperaturkoeffizienten der Oberflächenspannung durchgeführt, die nur für kalte Kernmaterie bekannt ist. Aus dem Vergleich mit den FOBOS-Daten soll ein experimenteller Wert für diesen wichtigen Parameter der Kernmaterie bestimmt werden.

In den 1993/94 durchgeführten Messungen wurden auch bereits Drei-Fragment-Ereignis-

se registriert und ausgewertet. Einschränkungen bei den Strahlparametern und bei der Nachweiseffektivität erlaubten aber nicht, die für eine detaillierte Analyse notwendige Ereigniszahl zu erreichen. 1995 wurde schließlich der komplette Aufbau von FOBOS abgeschlossen und der Beschleuniger mit einer neuen Ionenquelle des derzeit modernsten Typs („Elektron-Zyklotron-Resonanz“-Prinzip) ausgestattet. Danach konnten Anfang 1996 die ersten „Hoch-Statistik“-Messungen durchgeführt werden. Stickstoffkerne mit einer Energie von 53 MeV pro Nukleon wurden auf Gold- und Thoriumtargets geschossen.

Rund 20 Millionen Zwei- und 50 000 Drei-Fragment-Ereignisse wurden registriert. Ziel der gegenwärtig noch laufenden Auswertung ist es, aus der Kombination von Daten der schweren Fragmente und emittierten Protonen und α -Teilchen neue Aussagen über die Dynamik stark asymmetrischer Zweifachspaltung zu gewinnen und Querverbindungen zur Dreifachspaltung aufzudecken. Als besonders interessant erwiesen sich Ereignisse mit drei nahezu gleichschweren Fragmenten, die mit einer relativen Ausbeute von 10^{-4} pro Reaktion auftraten. Schon in den 60er Jahren wurden in Kernspuremulsionen einige wenige derartige Ereignisse gefunden und die Frage nach dem Mechanismus ihrer Entstehung aufgeworfen. Diehl und Greiner [1] analysierten 1973 im Rahmen des Tröpfchenmodells die Möglichkeit der gleichzeitigen Bildung von drei Fragmenten im Ergebnis eines einzigen Spaltakts als Alternative zum sequentiellen Verlauf der Zerfallsreaktion.

Die Frage, welcher der drei in Abbildung 5 gezeigten Mechanismen tatsächlich vorkommt, läßt sich prinzipiell nur durch sorgfältige Analyse experimenteller Geschwindigkeits- und Winkelkorrelationen entscheiden. Dabei ist besonders wichtig, daß präzise Geschwindigkeitsvektoren und unabhängig voneinander bestimmte Fragmentmassen aus dem Experiment bestimmt werden. Derartige Daten können mit dem FOBOS-Detektor mit besonders hoher Genauigkeit gemessen werden. Bei ihrer Interpretation wird durch den Vergleich mit Simulationsrechnungen versucht, die gemessenen Daten im Rahmen von Modellannahmen zu verstehen. Stimmen Simulation und Experiment nicht überein, muß das verwendete Modell als ungeeignet verworfen werden.

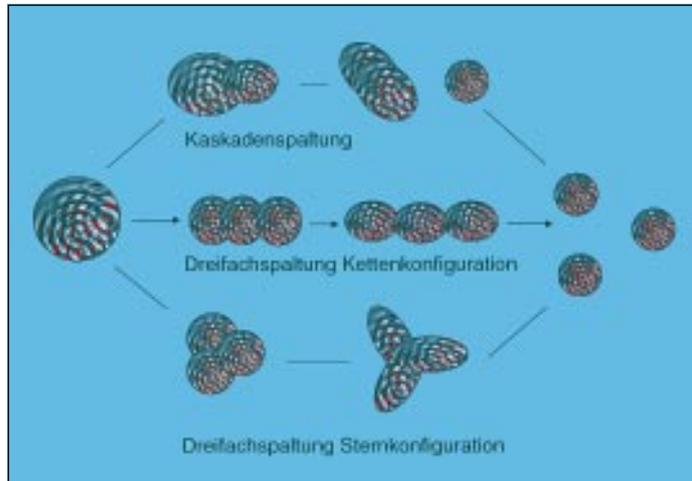


Abb. 5

Die drei Wege der Teilung eines schweren Kerns in drei Fragmente, die 1973 von Diehl und Greiner [1] im Rahmen des Tröpfchenmodells theoretisch analysiert wurden. Außer einer Kaskade zweier „normaler“ Spaltungen wurde „echte“, simultane Dreifachspaltung aus einer Kettenanordnung und einer Sternanordnung betrachtet und die zu überwindenden Potentialbarrieren berechnet. Für die Kettenanordnung wurde eine kleinere Barriere vorausgesagt.

Bei dem Versuch, den Ablauf der Fragmentierung in drei Teile zu verstehen, soll zuerst davon ausgegangen werden, daß alle Spaltungen nach dem Kaskadentyp verlaufen und die beiden aufeinanderfolgenden Zerfälle sich nicht gegenseitig beeinflussen. Nach dem ersten Schritt fliegen ein leichtes und ein primäres schweres Fragment mit der für asymmetrische Spaltung typischen Relativgeschwindigkeit von etwa 2,9 cm/ns auseinander ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$ Sekunden). Nach dem zweiten Schritt fliegen die beiden sekundären Fragmente nunmehr mit der kleineren für symmetrische Spaltung typischen Relativgeschwindigkeit von etwa 2,4 cm/ns auseinander. Die Flugrichtungen („Spaltachsen“) beider Schritte sind unabhängig voneinander. Aufgrund der Erhaltung der Massenmittelpunktsbewegung kann mit Hilfe der Massen und Geschwindigkeiten der beiden sekundären Fragmente durch Rückrechnung die Spaltachse und Relativgeschwindigkeit des ersten Schritts rekonstruiert werden. In der Häufigkeitsverteilung der Dreifachereignisse in Abhängigkeit vom Winkel zwischen den Spaltachsen sowie der rekonstruierten primären Relativgeschwindigkeit (Abbildung 6) fallen die meisten Ereignisse tatsächlich unabhängig vom Winkel in einen Bereich von 2,9 cm/ns und können somit der Kaskadenspaltung zugeschrieben werden.

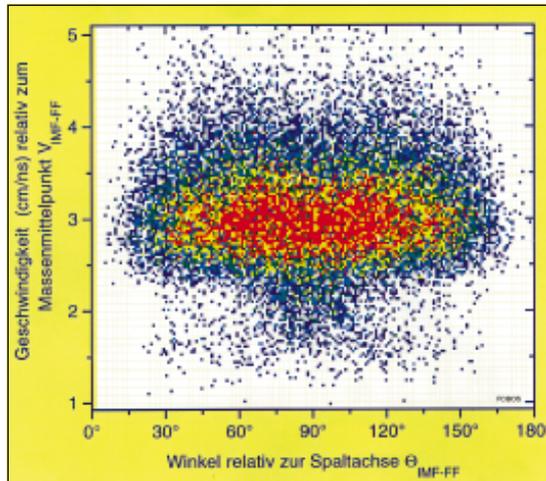


Abb. 6
Häufigkeitsverteilung von Dreifachspalttereignissen in Abhängigkeit von Winkel und Geschwindigkeit. Die Farbfolge blau - grün - gelb - rot symbolisiert ansteigende Häufigkeit.

Bei deutlich kleineren Geschwindigkeiten und Winkeln um 90° ist jedoch eine weitere Häufung von Ereignissen zu sehen. Eine solche Signatur ist von der niederenergetischen, ternären Spaltung bekannt. In diesem seltenen Prozeß wird kurz vor der Trennung der beiden Fragmente aus dem Hals zwischen diesen ein leichtes Teilchen emittiert. Die Summe der Abstoßungskräfte beider Fragmente zwingt das dritte Teilchen - sehr häufig ein α -Teilchen - auf eine Bahn senkrecht zur Spaltachse. Bei hohen Anregungsenergien wurde 1993 von einer amerikanischen Gruppe eine erhöhte Ausbeute schwerer Halsteilchen bis zu Sauerstoffkernen gefunden. In den FOBOS-Daten wurden sogar Ereignisse registriert, in denen alle drei Fragmente vergleichbare Massen, d. h. deutlich höhere Massen als Sauerstoffkerne, haben. Es wird zur Zeit untersucht, ob dieses Phänomen als eine echte Dreifachspaltung interpretiert werden kann, d. h. ob beim Spaltvorgang die drei Bruchstücke gleichzeitig oder zeitlich nacheinander entstehen.

FOBOS - eine internationale Forschungskooperation

Der FOBOS-Detektor wurde 1985 von Physikern und Ingenieuren aus dem ZfK Rossendorf und dem VIK Dubna konzipiert. Als Grundlage dienten methodische Entwicklungen von gasgefüllten Fragmentdetektoren und der zugehörigen Elektronik in Rossendorf sowie die Erfahrungen mit einem zweiarmigen Fragment-

spektrometer („DEMAS“) in Dubna. Die komplizierte mechanische Konstruktion der Reaktionskammer wurde im Entwicklungszentrum der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften, Sofia, realisiert. Nach der Einigung Deutschlands erfuhr das FOBOS-Projekt im Rahmen eines Programms zur Fortführung der Zusammenarbeit deutscher Institute mit dem VIK Dubna finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie. Dank dieser Unterstützung konnte das Projekt trotz wachsender finanzieller Probleme des VIK und Abwanderung hochqualifizierter Spezialisten mit geringem Zeitverzug realisiert werden. Dem FOBOS-Projekt kam auch die Ausstattung des neu gegründeten Forschungsstandorts Rossendorf mit modernsten technologischen Möglichkeiten zugute. Kritische Teile des Detektors wurden im neu entstandenen Detektorlabor unseres Instituts entwickelt und gefertigt. Wichtig war weiterhin eine Reihe von Gastaufenthalten russischer Kollegen in Rossendorf. Die Datenerfassungs-Software wurde von russischen Gastwissenschaftlern im Hahn-Meitner-Institut Berlin auf der Grundlage eines dort bereits vorhandenen Datenerfassungssystems entwickelt. Dort wurden auch Pilotexperimente mit Einzelzählern des FOBOS-Typs durchgeführt. Ein weiterer Kollaborationspartner ist das Institut für Kernforschung in Krakau, das die mechanische Konstruktion und Elektronik für das Vorwärtsmosaik aus Sandwich-Szintillationszählern sowie eine universelle Targetschleuse beitrug.

Die Experimente mit dem Fragmentspektrometer FOBOS haben ein reiches Datenmaterial geliefert, dessen gerade erst begonnene Auswertung noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird. Die ersten Ergebnisse haben bereits neue theoretische Ansätze stimuliert. Die Detektoranlage FOBOS wird ab Juli 1997 in alleiniger Verantwortung der russischen Kollegen im VIK Dubna weiterbetrieben und das deutsche Team wird Mitte 1997 nach Rossendorf zurückkehren. Das schließt natürlich nicht aus, daß weiterhin FZR-Wissenschaftler an FOBOS-Experimenten beteiligt sein werden, auch wenn zukünftig der Aufbau der Strahlungsquelle ELBE und die Nutzung dieses Elektronenbeschleunigers im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten des Instituts für Kern- und Hadronenphysik stehen werden.

Literatur:

H. Diehl and W. Greiner, Physics Letters **B 45** (1973) 35

MODELLBASIERTE SCHWINGUNGSÜBERWACHUNG VON LEICHTWASSERREAKTOREN

E. Altstadt, F.-P. Weiß

Institut für Sicherheitsforschung

Zusammenfassung

Die Einbauten der Druckbehälter von Leichtwasserreaktoren sind vor allem durch die Kräfte aus der Kühlmittelströmung erheblichen Schwingungsanregungen ausgesetzt. Diese dynamischen Belastungen und andere betriebliche Schädigungseinflüsse können zum Versagen von Einbauten im Reaktordruckbehälter führen. Gefährdet sind insbesondere Fixierungs- und Verspannungselemente der Einbauten untereinander. Derartige Schäden sind gerade auch für Druckwasserreaktoren des russischen WWER-Typs bekannt geworden. Aus diesem Grunde werden Reaktoren immer häufiger mit Schwingungsüberwachungssystemen zur Früherkennung von Einbautenschädigungen bei laufendem Reaktorbetrieb ausgestattet. Die Leistungsfähigkeit solcher Systeme hängt maßgeblich von der Qualität der theoretischen Modellierung des Schwingungsverhaltens ab. Ein derartiges Schwingungsmodell ist in den letzten Jahren für den kompletten Primärkreis von WWER-Reaktoren auf der Grundlage von Finite-Elemente-Methoden entwickelt worden. Das Modell erfaßt die mechanische Kopplung der Bauteile untereinander und die Kräfte Wechselwirkung der schwingenden Strukturen mit dem strömenden Kühlmittel. Die fluiddynamischen Anregungskräfte und die mechanischen Anregungen durch den Betrieb der Hauptkühlmittelpumpen wurden abgeschätzt. Das Schwingungsmodell wurde zudem mit Hilfe von Messungen an Kraftwerken justiert. Damit ist einerseits die Möglichkeit gegeben, für jede an der Außenwand des Reaktordruckbehälters gemessene Schwingung, gekennzeichnet durch Schwingungsfrequenz und Amplitude, die dabei auftretenden Bewegungen der Einbauten, insbesondere die Relativbewegungen untereinander, zu berechnen. Andererseits ist es möglich, Schäden an Bauteilen und die sich daraus ergebenden Veränderungen der Schwingungssignale zu simulieren. Diese Schadenssimulation ist die Grundlage für die Bestimmung physikalischer

Überwachungsgrenzwerte, für die Erstellung von Diagnosekatalogen und für die Festlegung optimaler Meßorte zur Anlagenüberwachung.

Motivation und Anliegen der Schwingungsmodellierung

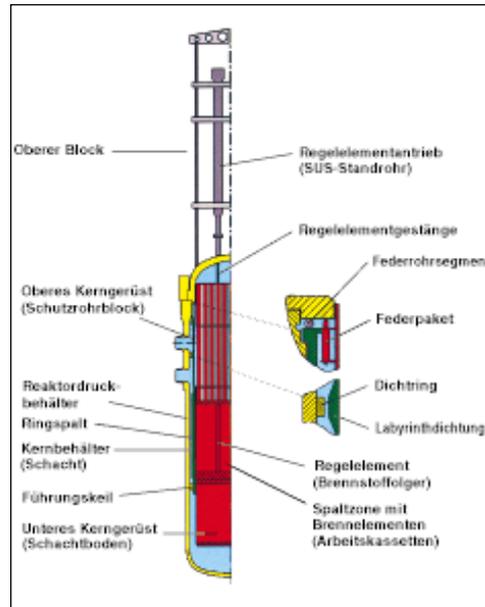
Die Betriebserfahrungen zu den Druckwasserreaktoren des russischen Typs WWER (Konstruktionsschema, siehe Abbildung 1) belegen, daß mehrfach strömungsinduzierte Schwingungen von Reaktordruckbehältereinbauten aufgetreten sind, die teilweise Schäden an den Einbauten bewirkt haben. Die an den Blöcken 1 bis 4 des KKW Greifswald beobachteten anomalen Schwingungsphänomene sind in diesem Sinne repräsentativ:

- strömungsinduzierte Schwingungen der Regelemente mit Anschlägen an die benachbarten Brennelemente, die z. T. zur Zerstörung der Brennelementmäntel und Brennstabhüllen geführt haben,
- Schwingungen des Kernbehälters mit allen seinen Einbauten relativ zum Druckbehälter mit Amplituden bis zu 5 mm. Hierbei kam es infolge einer begleitenden quasistatischen Drehung des Kernbehälters um die Vertikalachse zu einem Achsversatz von bis zu 23 mm gegenüber dem Druckbehälter und zu erheblichen Materialabtragungen am Kernbehälter-Flansch, den Federrohrsegmenten und den Führungskeilen (siehe Abbildung 2 und 3). Eine weitere Achsverdrehung hätte vermutlich die Beweglichkeit der Regelemente beeinträchtigt und letztlich die Zeit für die Reaktorschnellabschaltung verlängert.

Ähnliche Ereignisse sind vom KKW Kola (Rußland) und vom KKW Kosloduj (Bulgarien) bekannt geworden. Bei intakter mechanischer Fixierung liegen die Schwingungsamplituden von Druckbehälter und Einbauten im Bereich von einigen μm .

In Abbildung 1 ist der prinzipielle Aufbau des Reaktordruckbehälters mit seinen Einbauten dargestellt. Abbildung 2 zeigt die Schäden am Dichtring zwischen Kühlmittelein- und austritt infolge des Anstreichens des Kernbehälters und Abbildung 3 die Materialabtragungen an einem Führungskeil des Kernbehälters für denselben Fall anomal großer Kernbehälterbewegung am Block 2 des KKW Greifswald.

Abb. 1
Vertikalschnitt durch einen
Druckwasserreaktor vom
Typ WWER-440



Die Auswertung von Schwingungsmessungen zeigt, daß eine Früherkennung von anomalen Schwingungen und Schäden ohne theoretische Unterstützung nicht in jedem Falle möglich ist. Dieser Tatbestand ist darauf zurückzuführen, daß jedwede Meßtechnik für mechanische Größen lediglich auf der Außenwand des Primärkreises und nicht im Inneren des Druckbehälters installiert werden kann. Dennoch muß eine gute Diagnostik auch Aussagen über Relativbewegungen der Einbauten untereinander liefern.

Zu diesem Zwecke wird ein theoretisches Schwingungsmodell gebraucht, welches es erlaubt, aus den extern gemessenen Schwingwegen oder Beschleunigungen auf die Bewegungsformen und -amplituden der Einbauten zu schließen.

Die Modellierung hat insbesondere zu klären,

- welche Primärkreiscomponenten in diesem Modell erfaßt werden müssen und wie die Componenten miteinander zu koppeln sind, um alle vorliegenden Schwingungsmessungen schlüssig zu interpretieren,
- welche schwingungsmechanischen Auswirkungen mit dem Versagen ausgewählter Konstruktionscomponenten verbunden sind (Schadenssimulation),
- wie die Grenzwerte für Frequenzverschiebungen und Amplitudenveränderungen zu setzen sind, um Schäden früh und zweifellos frei detektieren zu können,
- und wo die optimalen Meßpositionen auf den Außenflächen des Primärkreises liegen, um Veränderungen des Schwingungsverhaltens infolge Componentendegradation empfindlich zu erfassen.

In Anbetracht der Kompliziertheit der Primärkreisstrukturen wurde für die schwingungsmechanische Modellierung auf die Methode der Finiten Elemente zurückgegriffen. Um den Einfluß des mitschwingenden Kühlmittels zu berücksichtigen, wurde ein Fluid-Struktur-Element entwickelt und in das Schwingungsmodell integriert. Es beschreibt die zusätzlichen Dämpfungs- und Trägheitskräfte, die durch die Kühlmittelverdrängung im Ringspalt (siehe Abbildung 1) entstehen, wenn Druck- und Kernbehälter sich relativ zueinander bewegen.

Abb. 2
Anstreifspuren am
Dichtring als Folge des
Anschlagens der
Labyrinthdichtung des
Kernbehälters

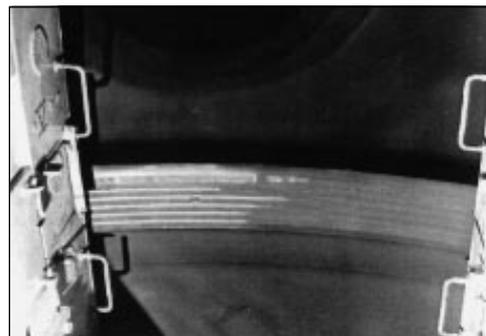
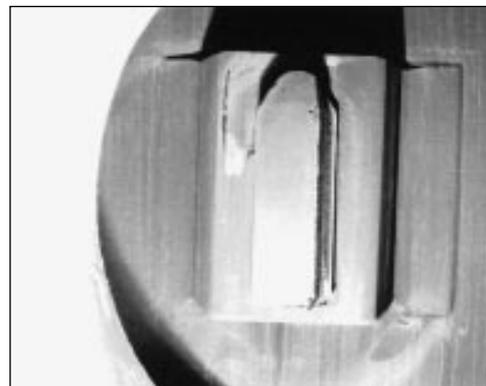


Abb. 3
Materialabtragung an einem
Führungskeil nach anomaler
Kernbehälterbewegung



Das nachfolgend dargestellte Schwingungsmodell für WWER-440 Reaktoren wurde im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projektes erarbeitet. Zur Justierung von Parametern wie Steifigkeiten und Trägheitsmomente wurden berechnete und gemessene Schwingungsfrequenzen und Bewegungsformen miteinander verglichen. Zu diesem Zweck wurden dedizierte Schwingungsmessungen an Originalanlagen durchgeführt. Insgesamt ist ein reiches experimentelles Datenmaterial berücksichtigt worden, so daß das nunmehr vorliegende Modell als verifiziert gelten kann.

Auf der Grundlage des justierten Berechnungsmodelles können Komponentenschäden simuliert und Empfindlichkeitsstudien betrieben werden. Dazu werden für Komponentenschäden typische Parameteränderungen im Modell vorgenommen und die sich daraus ergebenden Schwingungssignale berechnet.

Das vorliegende Schwingungsmodell kann auch genutzt werden, um die Belastungen der Primärkreis Komponenten bei Erdbeben und intern oder extern ausgelösten Explosionsdruckwellen abzuschätzen.

Modellierung des Primärkreislaufes mit der Finite-Elemente-Methode

Man unterscheidet zwischen globalen und lokalen Modellen. Globale Modelle umfassen z. B. eine komplette Kühlschleife oder sogar den gesamten Primärkreis. Sie beschreiben das gekoppelte Schwingungsverhalten der Bauteile, verzichten aber auf Details und stellen einzelne Bauteile oder Abschnitte von Bauteilen in der Regel als eindimensionale Elemente dar. Die eindimensionalen Elemente sind über sogenannte Knoten miteinander verbunden. Die Knoten befinden sich jeweils dort, wo sich die mechanischen Eigenschaften einer Komponente wie Steifigkeit, Wandstärken, Materialdichten gravierend ändern. Elementgruppen (Komponenten) können über Steifigkeitsmatrizen gekoppelt werden.

Lokale Modelle dagegen beschreiben einzelne Bauteile wie Führungkeile oder den Reaktordruckbehälter mit höherdimensionalen Schalen- und Volumenelementen wesentlich detaillierter. Sie werden gebraucht, um die Steifigkeit der Kopplung von Bauteilen im globalen Modell zu bestimmen und um die Beanspru-

chung besonders gefährdeter Komponenten zu ermitteln. Ergebnisse lokaler Berechnungen sind in den Abbildungen 4 und 5 für Spannungen im Führungskeil, der den Kernbehälter gegen den Reaktordruckbehälter fixiert, und für Schalenverformungen des Druckbehälters dargestellt.

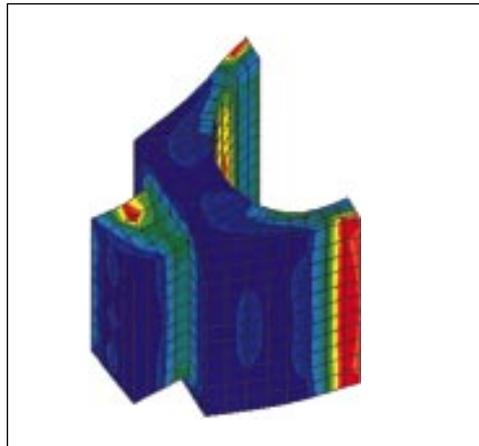


Abb. 4
Volumenmodell eines Führungskeils. Die Farbskala zeigt die Vergleichsspannung bei ausgeprägter Verschiebung der Zunge (maximale Werte rot).

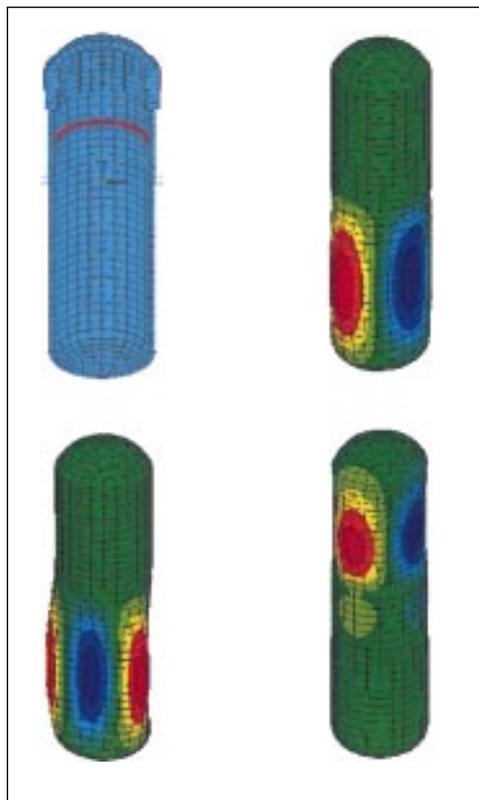


Abb. 5
Schalenmodell des Reaktordruckbehälters (links oben) und Schalen-schwingungsformen bei 34 Hz (rechts oben), 61 Hz (links unten) und 65 Hz (rechts unten).

Globale Schwingungsmodellierung

Das globale Modell des gesamten Primärkreislaufes (Abbildung 6) umfaßt den Druckbehälter mit Ein- und Aufbauten (rot) sowie die 6 Kühlschleifen mit Dampferzeugern (grün), Hauptumwälzpumpen (gelb), Hauptabsperrierschiebern (gelb) und Hauptumwälzleitungen (heißer Strang: violett, kalter Strang: blau).

Abb. 6
Finite-Elemente-Modell des gesamten Primärkreislaufes des WWER-440/W213

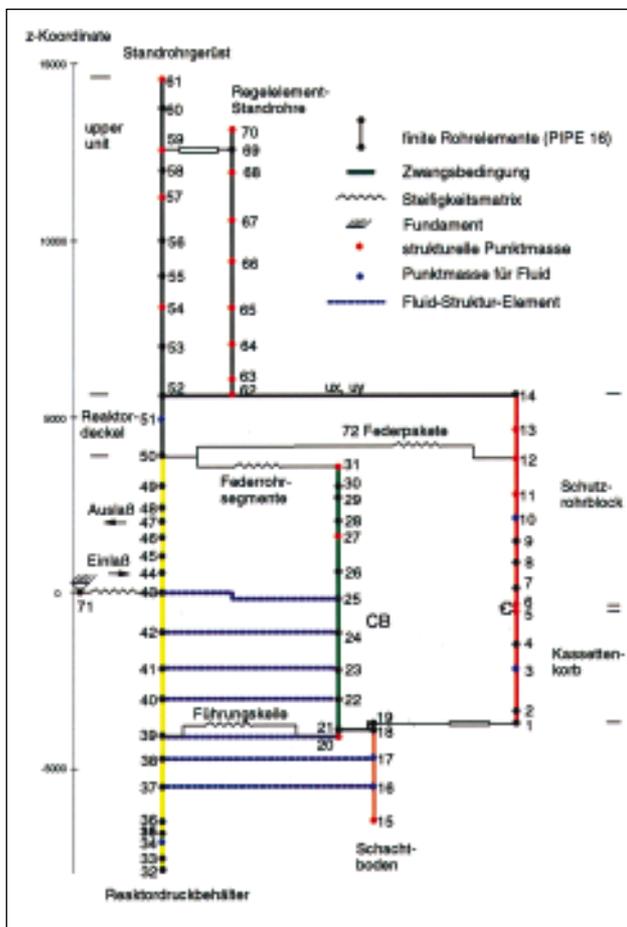
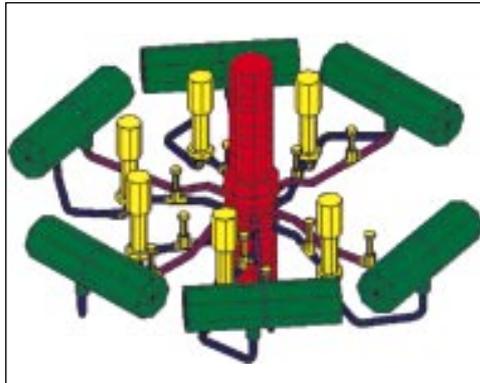


Abb. 7 Modell des Reaktordruckbehälters mit Einbauten und oberem Block

Abbildung 7 zeigt die Topologie des Druckbehälters mit Einbauten und oberem Block als finite Elemente. Die Zuordnung der einzelnen Komponenten zu den Baueinheiten ergibt sich aus Abbildung 1. Die Fluid-Struktur-Elemente befinden sich zwischen den Knoten des inneren und äußeren Behälters (Abbildung 7: blaue gestrichelte Linien). Die Verbindungen der Hauptkomponenten untereinander werden durch Steifigkeitsmatrizen dargestellt.

Das globale Modell charakterisiert das Schwingungsverhalten des Primärkreislaufes durch Eigenfrequenzen und die zugehörigen Schwingungsformen. Die Eigenfrequenzen sind diejenigen Frequenzen, mit denen sich das lineare mechanische System bewegt, wenn keine externe Anregung vorliegt. Zu jeder Eigenfrequenz gibt es eine Schwingungsform, die angibt, wie sich die einzelnen Punkte der Struktur relativ zueinander bewegen. Die Schwingungsform sagt nichts über absolute Amplituden aus. Abbildung 8 zeigt vier Schwingungsmoden des Druckbehälters mit Ein- und Aufbauten. Besondere Aufmerksamkeit verdienen die Schwingungsformen bei 13,8 Hz und 23,8 Hz, da sie mit einer Relativbewegung zwischen Druck- und Kernbehälter verbunden sind. Die Zuordnung zu den Einzelbauteilen geht aus Abbildung 7 hervor. Frequenzveränderungen und Amplitudenveränderungen von Relativbewegungen sind von besonderem diagnostischen Interesse, da sie auf Degradationen der Verbindungselemente schließen lassen.

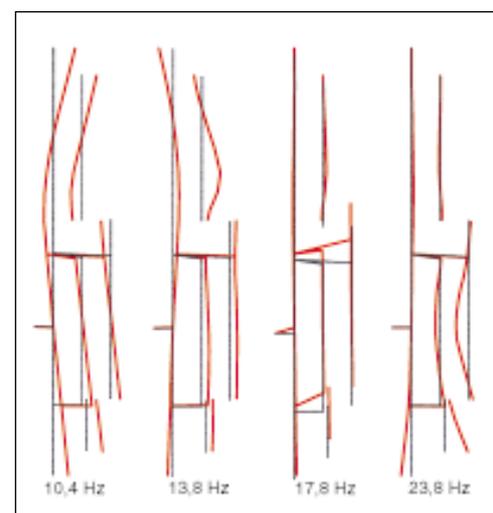


Abb. 8
Ausgewählte Schwingungsformen des Reaktordruckbehälters mit Einbauten. schwarze Linien: Ruhezustand, rote Linien: Auslenkung bei Maximalamplitude

Fluid-Struktur-Interaktion im Ringspalt

Das strömende Kühlmittel hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Schwingungen der Einbauten des Druckbehälters. Durch die relativ hohe Fluidgeschwindigkeit (ca. 6,8 m/s im Ringspalt) entstehen einerseits große Kräfte insbesondere im Ringspalt zwischen Kernbehälter und Reaktordruckbehälter. Andererseits wird durch die Bewegung der Strukturkomponenten eine Verdrängungsströmung im Fluid ausgelöst. Strukturbewegungen und Fluidströmung beeinflussen sich also gegenseitig.

Die gekoppelte Lösung der Fluidgleichungen (Kontinuitätsgleichung und Navier-Stokes-Gleichung) und der Bewegungsgleichung der Struktur gelingt mit einem räumlich 2-dimensionalen Näherungsansatz für die Fluidgleichungen, der auf den speziellen Fall zugeschnitten ist, daß ein inkompressibles Fluid durch einen engen Ringspalt strömt (Abbildung 9). Die Näherung liefert eine Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Ringspalt, die von der Bewegung der Zylinder abhängt. Die Integration der Druckverteilung über die Zylinderflächen liefert die Reaktionskräfte und Reaktionsmomente, die durch die Verdrängungsströmung hervorgerufen werden. Aus dem Zusammenhang zwischen diesen Reaktionskräften und den Zylinderbewegungen ergeben sich die Steifigkeitsmatrix, Dämpfungsmatrix und Massenmatrix des sogenannten Fluid-Struktur-Elementes.

Die Wirkung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung läßt sich besonders gut an den Schwingungsmoden erkennen, die Relativverschiebungen zwischen Druckgefäß und Kernbehälter erzeugen und damit zu Verdrängungsströmungen führen. Im Frequenzbereich bis 30 Hz sind dies die Moden bei 13,8 Hz und 23,8 Hz (vgl. Abbildung 8). Ohne Berücksichtigung der Wechselwirkung liefert die Rechnung anstelle der genannten Werte Frequenzen von 26,3 Hz bzw. 46,0 Hz, also fast doppelt so hoch. Dieser Effekt läßt sich anhand der Autosppektraldichten ausgewählter Schwingungssignale demonstrieren. Die Autosppektraldichte gibt an, wie sich die in einem Schwingungssignal enthaltene Leistung auf die verschiedenen Frequenzen verteilt. Abbildung 10 zeigt die Autosppektraldichten (APSD) von berechneten horizontalen Verschiebungssignalen am Boden des Druckbehälters mit und ohne Fluid-Struktur-Wechselwirkung.

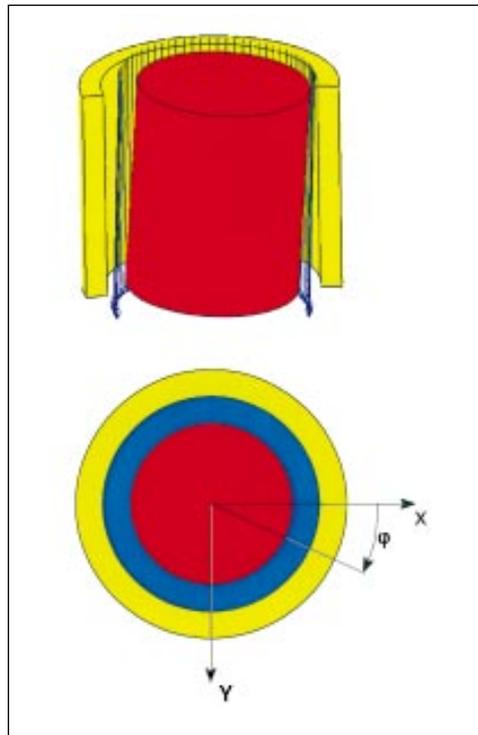


Abb. 9
Modell zur Erarbeitung des Fluid-Struktur-Elementes.
rot: Kernbehälter,
gelb: Reaktordruckbehälter,
blau: Ringspalt

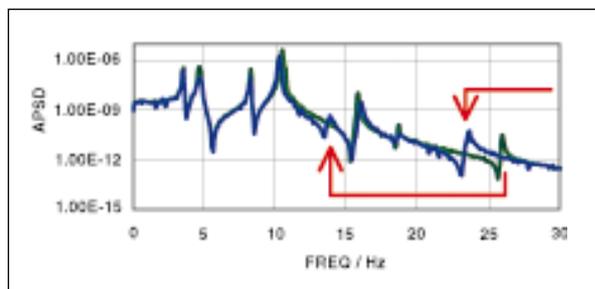


Abb. 10
Modenselektiver Einfluß der Fluid-Struktur-Wechselwirkung.
Spektrale Verschiebung des Reaktordruckbehälter-
Bodens mit (blau) und ohne (grün) Fluid-Struktur-Elemente

Schadensfrüherkennung

Mit Hilfe des globalen Schwingungsmodells ist man in der Lage, Weg-Zeit-Signale oder Beschleunigungs-Zeit-Signale an allen Positionen des Reaktors zu berechnen. Die Anregung für diese erzwungenen Schwingungen ergibt sich unter normalen Betriebsbedingungen aus:

- Druckschwankungen im Kühlmittel infolge großer Wirbel bzw. stehender akustischer Wellen im Primärkreis,
- Unwuchtkräften an den Hauptumwälzpumpen (Drehton 25 Hz, sowie Subharmonische 12,5 Hz und 8,33 Hz),

- Untergrundanregungen z. B. kleine Fundamentbewegungen, die durch benachbarte Reaktorblöcke, Turbinen und sonstige Aggregate hervorgerufen werden.

Die berechneten Zeitsignale werden spektral analysiert als seien es digitalisierte Meßwerte. Es ist beispielsweise auch möglich, Autosppektraldichten zu berechnen.

Mit dem justierten Modell kann zunächst das erzwungene normale Schwingungsverhalten für eine bestimmte Betriebstemperatur bei gegebener betrieblicher Anregung simuliert werden.

Die Schadenssimulation beinhaltet demgegenüber die Berechnung erzwungener Schwingungen mit solchen Parametern, die sich aus der Schädigung eines Bauteiles ergeben. An den Verbindungselementen der Hauptkomponenten wird die betreffende Steifigkeitsmatrix so modifiziert, daß diese Modifikation einer bestimmten Schädigung an einem vorgegebenen Ort entspricht. Die sich so ergebenden Spektren werden mit denjenigen verglichen, die für den intakten Zustand des Reaktors bestimmt wurden. Im folgenden werden zwei WWER-typische Schädigungen angesprochen: das Versagen von Federrohrsegmenten und der Bruch von Führungskeilen (vgl. Abbildung 1).

In Abbildung 11 sind die Autospektralleistungen für die Verschiebungen des Reaktor-druckbehälter-Bodens in horizontaler und vertikaler Richtung dargestellt für den Fall, daß eines von sechs Federrohrsegmenten versagt. Es sind jeweils die Kurven für den ungeschädigten Zustand (grün) und für den geschädigten Zustand (rot) aufgetragen. Die Schädigung eines Federrohrsegments äußert sich in einer Verschiebung des Maximums bei 17,8 Hz nach 17,1 Hz (zugehörige Schwingungsform siehe Abbildung 10). Die anderen Maxima bleiben annähernd unverändert. Die Frequenzverschiebung ist besonders deutlich in den reinen Vertikalbewegungen zu sehen, aber auch in den Horizontalschwingungen des Druckbehälters noch gut erkennbar.

Bei gleichzeitigem Versagen von zwei benachbarten Federrohrsegmenten (von insgesamt 6) sinkt die Eigenfrequenz der Mode auf 16,3 Hz ab. Entsprechend deutlicher werden die beschriebenen Effekte in den Autospektral-

leistungen der Schwingungssignale (Abbildung 12). Neben der Verschiebung des 17,8 Hz-Maximums sind in der Vertikalbewegung deutliche Amplitudenerhöhungen bei 13,8 Hz (Schwingungsform siehe Abbildung 8) und 12,5 Hz ($\frac{1}{2}$ Pumpendrehfrequenz) zu sehen.

Abbildung 13 zeigt die Autospektralleistungen der Bewegung des Reaktor-druckbehälters in beiden horizontalen Richtungen (x, y) für den Fall, daß ein Führungskeil bei 0° von insgesamt acht Führungskeilen gebrochen ist. Die 8 Führungskeile sind in einer Teilung von 45° am Reaktor-druckbehälter verschweißt. 0° entspricht der x-Richtung, 90° der y-Richtung. Es fällt auf, daß sich die Schädigung ausschließlich in der y-Richtung abbildet, während die x-Richtung nahezu keine Veränderung zeigt. Die physikalische Ursache dafür ist, daß ein Führungskeil als Tangentialfeder wirkt und somit der 0°-Führungskeil nur die y-Elemente der Steifigkeitsmatrix bestimmt. Am stärksten verschiebt sich das 13,8 Hz Maximum der Bewegung in y-Richtung. Aufgrund der engen Nachbarschaft zur 1/2-Subharmonischen der Pumpendrehfrequenz (12,5 Hz) verschmilzt es bei der hier vorliegenden Frequenzauflösung mit dem 12,5 Hz Maximum. Damit ist eine deutliche Amplitudenerhöhung verbunden.

Beim Bruch von zwei Führungskeilen zeigen die Spektren das in Abbildung 14 dargestellte Verhalten. Die Schädigung ist in beiden Richtungen gut erkennbar. Da die Führungskeile bei 0° und 45° insgesamt einen größeren Einfluß auf die y-Steifigkeit haben, ist die Veränderung in den y-Signalen deutlicher als in den x-Signalen. Besonders signifikant ist die Aufspaltung des 13,8 Hz Maximums in zwei bei 13,5 Hz und 12,9 Hz. Die Amplitude bei 13,5 Hz wird etwas kleiner, die bei 12,0 Hz deutlich größer als die Amplitude des ursprünglichen Maximums.

Schlußfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß sich die Moden und Autospektralleistungen erzwungener Schwingungen der Gesamtstruktur bei geschädigten Einzelkomponenten in aller Regel deutlich von jenen der intakten Struktur unterscheiden. Die Erkennbarkeit eines Schadens hängt grundsätzlich von der gewählten Meßposition ab. Ein Steifigkeits-

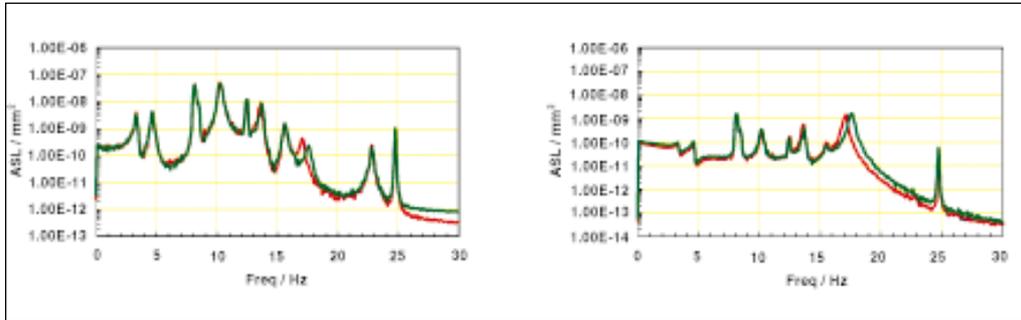


Abb. 11
Versagen eines Federrohrgliedes.
Autospektralleistungen der Horizontalbewegung (links) und der Vertikalbewegung (rechts) am Boden des Reaktor-druckbehälters. grüne Kurve: Normalzustand, rote Kurve: geschädigter Zustand

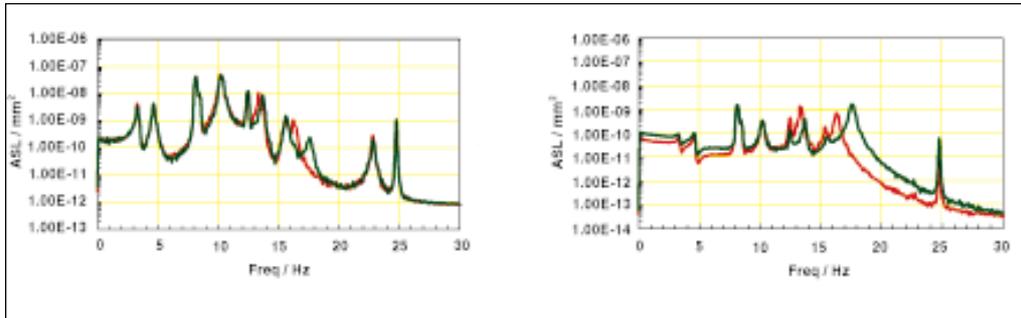


Abb. 12
Versagen von zwei Federrohrgliedern.
Autospektralleistungen der Horizontalbewegung (links) und der Vertikalbewegung (rechts) am Boden des Reaktor-druckbehälters. grüne Kurve: Normalzustand, rote Kurve: geschädigter Zustand

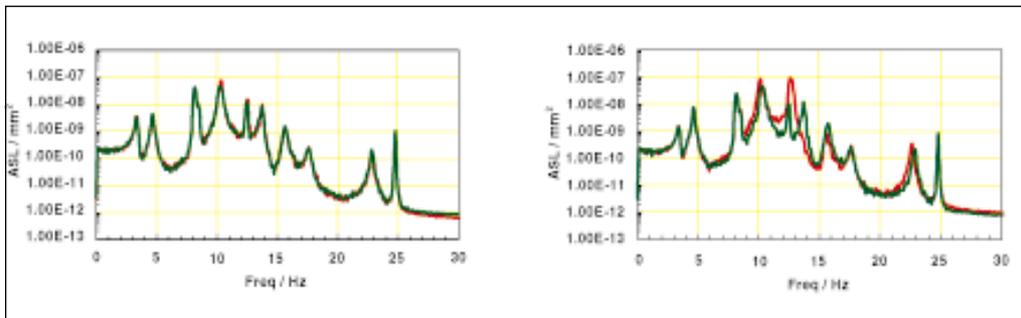


Abb. 13
Bruch eines Führungskeils.
Autospektralleistungen der Horizontalbewegungen in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) am Boden des Reaktor-druckbehälters. grüne Kurve: Normalzustand, rote Kurve: geschädigter Zustand

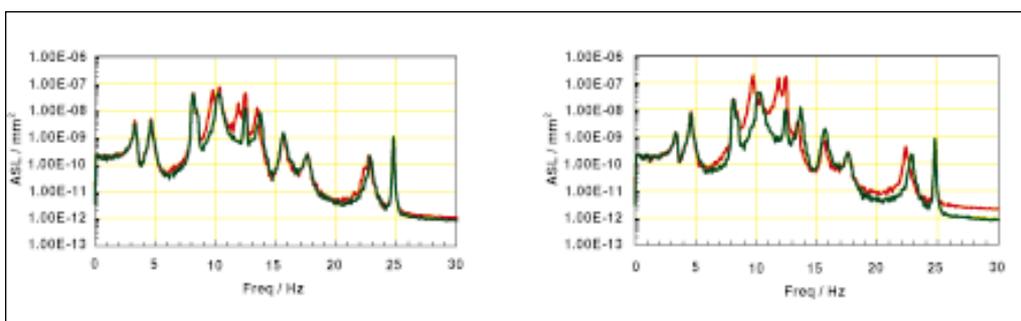


Abb. 14
Bruch von zwei Führungskeilen.
Autospektralleistungen der Horizontalbewegungen in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) am Boden des Reaktor-druckbehälters. grüne Kurve: Normalzustand, rote Kurve: geschädigter Zustand

verlust bedeutet nicht zwangsläufig auch eine Amplitudenerhöhung, u. U. können die Amplituden sogar absinken. Ein relativ eindeutiges Indiz für eine Schädigung ist die modenselektive Verschiebung von Resonanzen. Das Schadensbild bei Federrohrsegment-Versagen unterscheidet sich deutlich von dem des Führungskeilbruchs. Von den Veränderungen sind unterschiedliche Maxima in gut separierten Frequenzbereichen betroffen. Ein Führungskeilbruch beeinflusst die Reaktordruck-

behälterbewegung richtungsabhängig, so daß sogar eine Zuordnung der azimutalen Position des defekten Führungskeils möglich ist. Da die Federrohrsegmente vor allem die Vertikal-schwingungen bestimmen, gibt es hier eine solche Richtungsabhängigkeit nicht.

Alle untersuchten Schäden sind grundsätzlich auch in den Schwingungssignalen erkennbar, die an der Außenwand des Reaktordruckbehälters gemessen werden können.

INSPEKTIONSMOLCH FÜR PIPELINES

Andree Büchner, Harry Hauck, Hans Langenhagen, Jörg Voigtländer

Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik

Kurzfassung

Schäden an erdverlegten Rohrfernleitungen durch Ribbildung und Korrosion verursachen nicht nur hohe Kosten, sondern können auch eine Gefahr für die Umwelt bedeuten. Für den rechtzeitigen Nachweis von Rissen in Pipelines wurde in Zusammenarbeit mit der Pipetronix GmbH Karlsruhe ein Inspektionmolch entwickelt und als Prototyp aufgebaut. In der Zentralabteilung wurde dafür ein speziell angepaßtes Wirbelstrom-Prüfverfahren einschließlich Sensorik und Front-End-Elektronik entwickelt. Die Prüftechnik zeichnet sich durch hohe Nachweissicherheit auch kleiner Schädigungen bei gleichzeitig weitgehender Unempfindlichkeit gegenüber störenden Einflüssen aus.

Zur Auswertung wurden Algorithmen für die automatische Interpretation der Meßdaten sowie deren Visualisierung entwickelt und in einem anwendungsorientierten Programmsystem umgesetzt. Gleichzeitig erfolgte eine datenbankgesteuerte Verwaltung der großen Datenmengen sowie aller Zwischen- und Endergebnisse. Mittels vollautomatischer Detektion und Klassifikation relevanter Anzeigen konnte der Zeitbedarf für die Datenauswertung drastisch gesenkt und damit die Effektivität der Prüfung erhöht werden.

Der Inspektionmolch wurde im Mai 1995 nach eingehender Begutachtung durch den TÜV für Pipelineprüfungen zugelassen. Es wurden mehrere erfolgreiche Testläufe sowie erste Kundeneinsätze absolviert. Meßbeispiele aus den Testläufen illustrieren den Nachweis der Defekte.

Pipelineprüfung mit Inspektionmolchen

Erdverlegte Rohrfernleitungen (Pipelines) müssen in regelmäßigen Abständen daraufhin untersucht werden, ob deren Sicherheit noch gewährleistet ist. Besonders bei älteren Leitungen, die z. T. mehr als 35 Jahre im Erdboden liegen, können Schädigungen durch Korrosions- oder Ribbildung auftreten.

In Ermangelung einer besseren Methode wurden in den vergangenen Jahrzehnten ausschließlich Wasserdruckprüfungen durchgeführt. Diese Messungen zeigten, daß die Leitung im Moment der Prüfung keine Lecks hatte. Allerdings waren keine Aussagen darüber möglich, ob andere Schädigungen vorhanden sind, die schon bald zum Versagen der Leitung führen könnten. Zudem ist solch eine Druckprüfung ökonomisch aufwendig, weil über eine längere Zeit kein Produkt gefördert werden kann, und die Entsorgung der großen Mengen verunreinigten Wassers am Ende der Druckprobe problematisch ist.

Die Lösung dieses Problems ist mit Inspektionssystemen, den sog. Molchen möglich, die ähnlich einer Rohrpost mit dem Förderstrom durch die Leitung bewegt werden und dabei den Zustand der Rohrwand zerstörungsfrei prüfen.

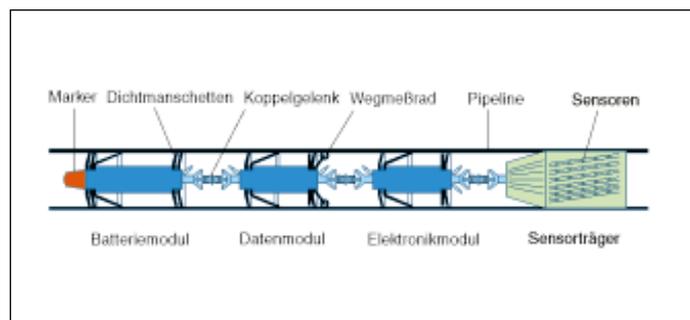


Abb. 1
Schematische Darstellung eines Inspektionmolches

Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines Molches. Er besteht aus mehreren druckdichten Einheiten, in denen die Meßelektronik, die Datenspeicherung und die Stromversorgung untergebracht sind. Der Sensorträger enthält eine Vielzahl von Sensoren, die am gesamten Umfang verteilt sind und die Rohrwand vollflächig abtasten. Wegmeßräder messen den zurückgelegten Weg und stellen so die Verbindung zwischen den Meßdaten und dem Aufnahmeort in der Pipeline her. An der Spitze des Molches befindet sich ein Markersender, der die

Verfolgung des Molches durch oberirdisch aufgestellte Empfänger ermöglicht.

Das Vorhandensein von Korrosionsschäden sowohl an der Innen- wie an der Außenseite der Pipeline läßt sich mit Molchen prüfen, die die Ultraschalltechnologie verwenden.

Mit Vermessungsmolchen lassen sich Querschnittsveränderungen wie Ovalitäten und Beulen bestimmen, die Ausgangspunkt für weitere Schädigungen sein können. Lediglich die Prüfung auf Risse und Anrisse in der Rohrwand war bislang mit Molchen nicht zufriedenstellend möglich.

Für Risse, die von der Innenseite der Rohrwand ausgehen, wurde ein Inspektionsmolch entwickelt und gebaut, der die Wirbelstrom-Prüftechnologie verwendet. Darauf wird weiter unten näher eingegangen.

Ein Inspektionsmolch hat eine Länge von etwa vier Metern. Er wird an eigens dafür vorgesehenen Schleusen, die sich meist im Bereich von Tanklagern befinden, in die Pipeline eingeschleust.

Da sich derartige Schleusen nur in großen Abständen entlang der Pipeline befinden, muß der Molch mehr als 100 km unterbrechungsfrei prüfen und aufzeichnen können. Die Auswertung der während des Laufes gewonnenen Daten geschieht dann nach Entnahme des Molches aus der Leitung.

Ausgewählte technische Daten

Größe:	16 bis 22 Zoll (Pipelinedurchmesser 40 bis 56 cm), 6 bis 60 Zoll (15 cm bis 1,5 m) möglich
Gesamtlänge:	ca. 4,5 m
Geschwindigkeit:	ideal 2 m/s (7,2 km/h), max. 5 m/s (18 km/h)
zulässiger Pipelinedruck:	max. 120 bar
Fördermedien:	Erdöl, andere Flüssigprodukte, Erdgas
Reichweite:	ca. 120 km
Betriebsdauer:	max. 72 Std.
Anzahl Sensoren:	128 bis 192 (max. 480)
Genauigkeit der Fehlerortung:	± 0,2 m

Prüfaufgabe und Prüfverfahren

Es bestand die Aufgabe, ein Wirbelstromprüfverfahren für den Einsatz in einem Inspektionsmolch für Pipelines zu entwickeln, das es gestattet, zur Rohrwand hin offene Risse und Anrisse sowie lokale Innenkorrosion (Lochfraß) zu detektieren und zu vermessen. Weiterhin sollen alle Schweißnähte mit ihrer Lage und Orientierung bestimmt werden sowie technologische Einbauten (Schieber, Abzweige etc.) erkennbar sein. Ablagerungen an der Rohrinnenwand wie Paraffin oder Rost, ebenso lokale Permeabilitäts- oder Leitfähigkeitsänderungen sollen das Meßergebnis nicht negativ beeinflussen.

Wirbelstromprüfverfahren wurden bislang vornehmlich für die Rißprüfung in der Flugzeugwartung und im Kraftwerksanlagenbau eingesetzt. Sie haben gegenüber den Ultraschallprüfverfahren den Vorteil, daß selbst kleinste Materialtrennungen erkennbar sind, während mit Ultraschall vorzugsweise volumenartige Fehler, z. B. korrosive Materialabtragungen nachgewiesen werden können. Zudem benötigt Wirbelstrom kein Koppelmedium wie Ultraschall, kann also sowohl in Flüssigprodukt- wie in Gasleitungen eingesetzt werden. Allerdings können mit Wirbelstrom nur innenliegende Fehler nachgewiesen werden, während mit Ultraschall innen- und außenliegende Fehler mit gleicher Empfindlichkeit prüfbar sind.

Das Wirbelstrom-Prüfverfahren ist ein elektromagnetisches Prüfverfahren. Das Prüfspulensystem (die Prüfsonde) besteht aus einer Er-



Abb. 2
Einschleusen des Molches in eine Pipeline
Foto: Dittes

reger- und einer Meßspule. Die Erregerspule wird mit einem elektrischen Wechselstrom beaufschlagt, der in der Umgebung der Spule ein magnetisches Feld erzeugt, das in die Rohrwand eingekoppelt wird. Dadurch werden in der Rohrwand Wirbelströme induziert, die nach dem Durchflutungsgesetz ein entgegengesetztes Magnetfeld hervorrufen. Die Meßspule befindet sich im Wirkungsbereich des resultierenden Feldes und erfaßt dessen zeitliche Änderung, die als Induktionsspannung an der Meßspule abgegriffen wird. Bewegt man die Prüfsonde über ungestörtes Material, erfährt die Meßspannung keine Veränderungen. Ein in der Rohrwand vorliegender Defekt stört die Wirbelstrombahnen und bewirkt so eine Veränderung der Meßspannung, die dann ausgewertet werden kann.

Die Besonderheit des speziell für die Pipelineprüfung entwickelten Wirbelstromverfahrens besteht darin, daß das elektromagnetische Wechselfeld durch eine Folge von Stromimpulsen erzeugt wird. Im Sinne eines hohen Informationsgehaltes des Prüfsignals ist es günstig, die Anregung der Prüfsonde breitbandig vorzunehmen. Dies gelingt hier mit der Verwendung von Impulsströmen, wobei der Frequenzinhalt durch Form und Dauer des anregenden Stromes gegeben ist, Abbildung 3.

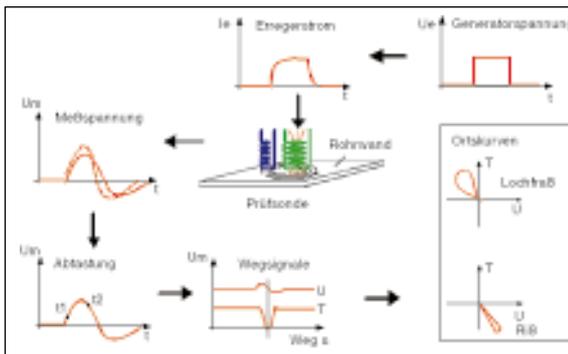


Abb. 3
Meßprinzip des Impulswirbelstrom-Prüfverfahrens

Die Auswertung der induzierten Meßspannung erfolgt durch Abtastung der Spannungsamplitude des empfangenen Signals zu zwei bestimmten Zeitpunkten (t_1 und t_2 in Abbildung 3), die in fester zeitlicher Beziehung zum Anregeimpuls stehen. Mit dieser Art der Signalabtastung wird eine Datenreduktion erreicht, da nicht das gesamte Meßsignal digitalisiert und gespeichert werden muß.

Die schaltungstechnische Realisierung des Prüfverfahrens zeigt Abbildung 4. Ein steuerbarer Impulsgenerator liefert eine Folge von unipolaren Rechteckimpulsen, die einem Leistungsverstärker zugeführt werden. Der Leistungsverstärker treibt Stromimpulse durch die Erregerspule des Prüfpulensystems. Erregerspule und Leistungsverstärker sind auf maximale Erregerdurchflutung bei minimaler Verlustleistung optimiert.

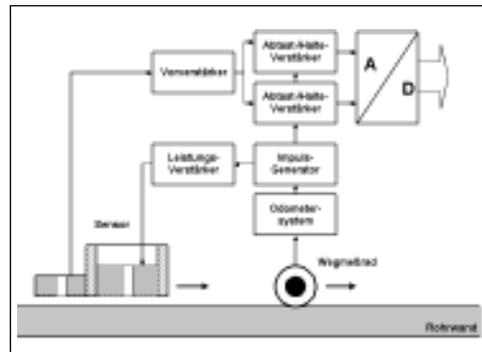


Abb. 4
Blockschaltbild der
Wirbelstromelektronik

Die in der Meßwicklung induzierte Spannung wird mittels zweier Abtast-Halteschaltungen zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 abgetastet und digitalisiert. Die Abtast-Halteschaltungen werden vom Impulsgenerator gesteuert, so daß, bezogen auf den Anregeimpuls, eine zeitstarre Abtastung gewährleistet ist. Der Impulsgenerator wird von einem Odometersystem getriggert, das einen wegäquidistanten Takt bereitstellt. Damit wird ein von der Bewegungsgeschwindigkeit unabhängiges Meßpunktraster erzeugt.

Interpretation der Meßsignale

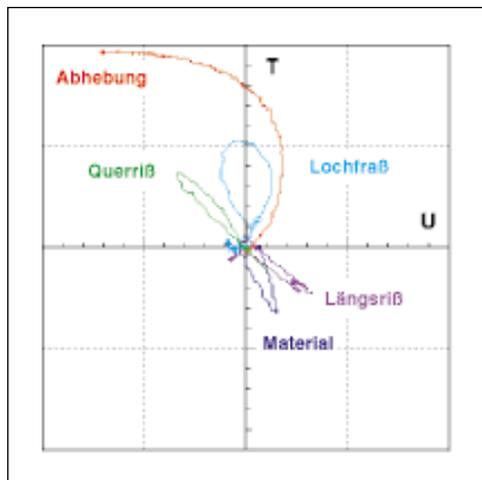
Abbildung 3 zeigt, wie durch Auftragen der abgetasteten Spannungen über dem zurückgelegten Weg die zur Weiterverarbeitung benötigten Meßsignale T und U gebildet werden (die Bezeichnung T-Signal bzw. U-Signal ist hier willkürlich gewählt worden). Das T-Signal entsteht durch die Abtastung zum Zeitpunkt t_1 : $T = U_{m1}(s)$ und das U-Signal durch die Abtastung zum Zeitpunkt t_2 : $U = U_{m2}(s)$.

T- und U-Signal zeigen gemeinsam die Wirbelstrom-Charakteristik eines Fehlers. In der Prüfpraxis ist es deshalb üblich, die Charakteristik einer Anzeige in Form der Ortskurve $T = f(U)$ darzustellen, wobei der zurückgelegte

te Weg s die Laufvariable entlang der Ortskurve bildet.

Bei der Pipelineprüfung mit Wirbelstrom treten unterschiedliche Effekte auf, die entweder als Nutz- oder als Störeffekte anzusehen sind. Das Prüfverfahren wurde durch umfangreiche Meßreihen so optimiert, daß sich Fehler ebenso wie Störer mit klar unterscheidenden Ortskurven abbilden (Abbildung 5). Durch Bewertung von Lage und Form der Ortskurven ist es möglich, die Trennung der Fehleranzeigen von Störeranzeigen vorzunehmen. Die Ortskurven bilden auch die Grundlage für eine automatische Fehlerklassifikation unter Anwendung eines Mustererkennungsverfahrens, das weiter unten dargestellt wird.

Abb. 5
Ortskurven typischer Fehler
und Störer



Nutzsignale sind:

- Rißanzeigen
- Korrosionsanzeigen (Lochfraß)

Störer sind:

- Abhebungen des Sensors
- Kippungen des Sensors
- Permeabilitäts- oder Leitfähigkeitsänderungen des Prüfmaterials

Für die Beurteilung des Auflösungsvermögens des Sensors ist die Kenntnis der räumlichen Ausdehnung des wirksamen Spulenfeldes notwendig. Eine optimale Nachweisempfindlichkeit wird erreicht, wenn von der Sonde im vorgegebenen Meßpunkttraster weitgehend alle Anteile eines Fehlers erfaßt werden, d. h. daß ein Fehler nicht zwischen den Meßpunkten hindurchrutschen kann. Abbildung 6 zeigt die örtliche Empfindlichkeitsverteilung des Sensors, die zur Beurteilung des Auflösungsvermögens herangezogen wird.

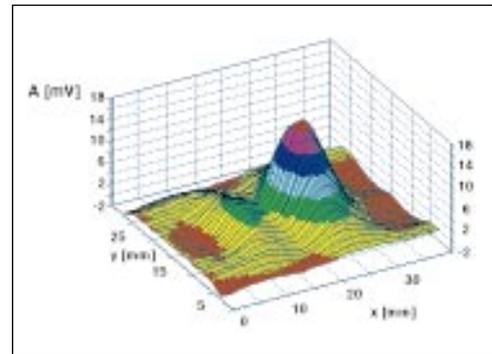


Abb. 6
örtliche Empfindlichkeitsverteilung des Sensors

Aus Abbildung 6 lassen sich die Halbwertsbreiten in Bewegungsrichtung (x-Richtung) und in Umfangsrichtung (y-Richtung) bestimmen. Eine vollflächige Abtastung der Rohrwand ist gewährleistet, wenn die Meßpunktabstände in Bewegungsrichtung kleiner als die Halbwertsbreite in x-Richtung sind und die Abstände benachbarter Sensoren kleiner als die Halbwertsbreite in y-Richtung gewählt werden. Die Größe der Halbwertsbreiten hängt von der Sensorgestaltung ab. Sie können sich, wie bei dem hier verwendeten Sensor, in x- und y-Richtung von einander unterscheiden, was auf den asymmetrischen Aufbau zurückzuführen ist.

Abhebungen des Sensors von der Rohrwand, die beispielsweise durch Ablagerungen von Paraffin o. ä. entstehen können, reduzieren die Nachweisempfindlichkeit. Abbildung 7 zeigt, wie sich die Signalamplitude eines Querrisses bei Sensorabhebung reduziert. Dieser Amplitudenabfall ist ein Maß für den Abfall des wirksamen magnetischen Wechselfeldes senkrecht zur Prüffläche.

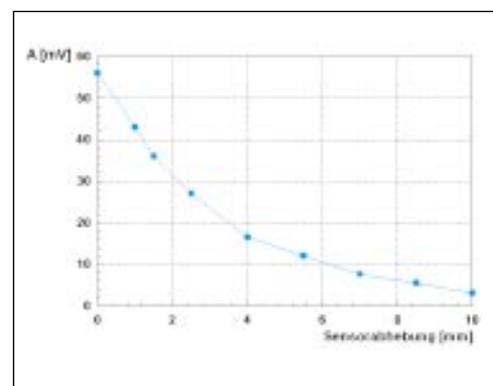


Abb. 7
Einfluß der Sensorabhebung auf die Signalamplitude
eines Fehlers

Es war ein Ziel der Optimierung des Wirbelstromsensors, auch bei Abhebungen von mehreren Millimetern noch ausreichende Signalamplituden gewinnen zu können. Zu diesem Zweck wurde das Erregersystem so optimiert, daß eine möglichst gute Fokussierung des Magnetfeldes in Richtung Rohrwand erzielt wird und so ein Maximum an Feldstärke in das Material eingekoppelt werden kann.

Eine hohe Feldstärke des eingekoppelten Magnetfeldes ist zudem günstig für die Fehlertiefenauflösung. Die Fehlertiefenauflösung gibt an, bis zu welcher Tiefe ein weitgehend linearer Zusammenhang zwischen der Amplitude des Meßsignals und der Tiefe eines Fehlers besteht, Abbildung 8. Dies ist vor allem wichtig für die Abschätzung von Rißtiefen.

Das Diagramm Abbildung 8 zeigt, daß für Riß-tiefen bis 5 mm ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Signalamplitude und Tiefe besteht. Selbst bei wesentlich größeren Tiefen (8 mm steht hier für einen nach der Gegenseite durchgehenden Riß), ist noch keine Begrenzung des Signals erkennbar.

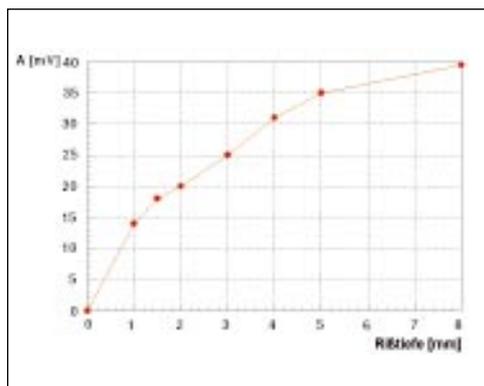


Abb. 8
Rißtiefenauflösung

Obwohl die Eindringtiefe des Wirbelstromfeldes in Stahl, bedingt durch den Stromverdrängungseffekt (Skinneffekt) nur etwa 0,5 mm beträgt, können große Tiefen aufgelöst werden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei ausreichend hoher Feldstärke des eingekoppelten Magnetfeldes die Wirbelströme den Defekt entlang der Flanken „umfließen“. Es ist somit möglich, bei den üblichen Rohrwandstärken eine Abschätzung auch größerer Rißtiefen vorzunehmen.

Datenauswertung

Um eine vollflächige Abtastung der Rohrinnenfläche zu gewährleisten, besitzt der Inspektionsmolch eine Vielzahl von Sensoren, die auf dem Sensorträger am gesamten Umfang verteilt sind und quasi gleichzeitig die gesamte Rohrwand abtasten. Das bedeutet, daß bei der Datenauswertung neben der Bewegungsrichtung auch die Umfangsrichtung zu betrachten ist und demzufolge eine zweidimensionale Auswertung erfolgen muß. Abbildung 9 zeigt beispielhaft einen 1,5 m langen Abschnitt aus einer spiralnahtgeschweißten Testleitung, in die ein Rohrsegment mit Kontrollfehlern eingebracht wurde.

Während eines Inspektionslaufes, der mehr als hundert Kilometer lang sein kann, fallen viele Gigabytes Meßdaten an. Sie werden im Massendatenspeicher des Molches als Rohdaten gespeichert, die nach dem Ausschleusen des Molches aus der Pipeline ausgelesen werden. Diese Daten bilden den Ausgangspunkt für jegliche weitere Auswertung, die somit vollständig off-line erfolgt.

Eine rein manuelle Datenauswertung und -interpretation würde einen extrem hohen Zeitaufwand erfordern. Abbildung 9 verschafft einen Eindruck, daß es sehr aufwendig wäre, jeden Quadratzentimeter Rohrwand visuell nach z. T. sehr kleinen Anzeigen abzusuchen. Das ist unwirtschaftlich. Aus diesem Grund werden automatische Auswerteverfahren ein-

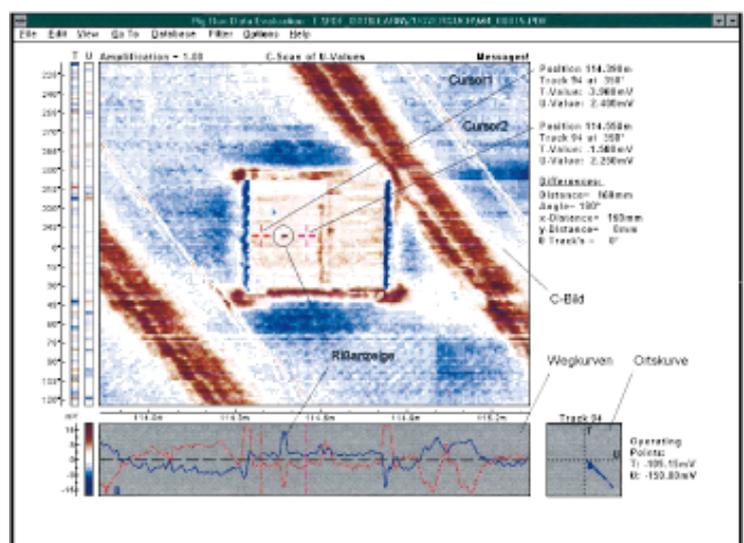


Abb. 9
Anzeige von Meßdaten aus einer Testleitung mit Kontrollfehlern.

gesetzt. Nur zu Kontrollzwecken und zur Klärung unklarer Befunde im Ergebnis der automatischen Klassifikation wird manuell ausgewertet. Zur Anzeige der Meßdaten werden fortgeschrittene Techniken der Visualisierung und der Signalverarbeitung angewendet. Abbildung 11 zeigt ein Beispiel dafür.

Automatische Datenauswertung

Die automatische Auswertung vollzieht sich in drei Stufen:

1. Vorverarbeitung
2. Erzeugung eines Rohrbuches
3. Detektion aller relevanten Ereignisse und Klassifikation derselben

Die gesamte Verarbeitung der Meßdaten wird mit Hilfe eines Datenbanksystems gesteuert. In dieser Datenbank sind alle Verarbeitungsschritte gespeichert sowie Zwischen- und Endergebnisse dokumentiert. Abbildung 10 zeigt das Schema der automatischen Datenauswertung, die auf vernetzten Hochleistungs-PC's abläuft.

Erster Schritt der automatischen Auswertung ist die Vorverarbeitung der Daten. Sie dient dazu, die Daten in eine für die weitere Verarbeitung geeignete Form zu bringen. Zuerst wird eine Rasterkonvertierung der Rohdaten in ein äquidistantes Raster durchgeführt. Des Weiteren erfolgt die Eliminierung der Sondenoffsets und eine Rauschminderung. Danach liegen die Daten als Verarbeitungsmeßdaten vor, die ein vollständiges Abbild eines Rohrabschnittes bestimmter Länge darstellen, Abbildung 9.

Das Rohrbuch dient der Kontrolle des Molchlaufes, der Orientierung in der Pipeline und der Bereitstellung von Informationen für die automatische Ereignisdetektion. Die Rohrbucherzeugung beinhaltet die automatische Bestimmung aller Schweißnähte (Montagerundnähte, Längs- bzw. Spiralnähte). Zu jeder Schweißnaht wird die Lage im Rohr ermittelt und gespeichert. Das Rohrbuch ist Basis für die automatische Ereignisdetektion, die abhängig vom jeweiligen Rohrtyp durchgeführt wird.

Die automatische Ereignisdetektion ermittelt alle Signale, die sich signifikant vom Untergrund abheben. Durch Verarbeitung der Signale sowohl in Längs- als auch in Umfangs-

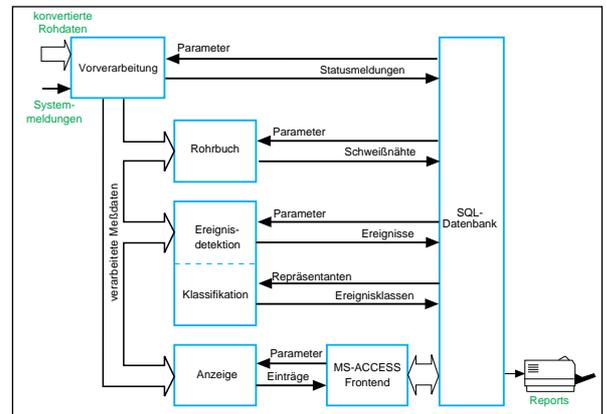


Abb. 10
Schema der Auswertung

richtung wird die Bestimmung der Defektausdehnung einschließlich der Kontur sowie die Lage im Rohr realisiert. Zusätzlich werden einige wichtige Signalparameter ermittelt und gespeichert. Die so detektierten Ereignisse werden anschließend klassifiziert. Als Mustererkennungsverfahren wird ein Nächster-Nachbar-Klassifikator eingesetzt. Er basiert auf einem Ähnlichkeitsvergleich des aktuellen Meßsignals mit zuvor angelegten Repräsentanten.

Manuelle Auswertung

Die manuelle Auswertung setzt die Visualisierung der Meßdaten voraus. Sie wird vorzugsweise zu Kontrollzwecken (Rohrbuch) und zur Klärung unklarer Befunde nach der automatischen Klassifikation eingesetzt. Dabei werden fortgeschrittene Techniken der Visualisierung und der Datenbearbeitung angewendet. Die Funktionen des Anzeigeprogramms lassen sich in folgende Bereiche untergliedern: Darstellen, Bewegen im Bild, Verarbeitungsfunktionen sowie Datenbankfunktionen.

Die wichtigsten Funktionen sind die Darstellungsfunktionen, mit deren Hilfe eine Abwicklung der Rohinnenfläche in Falschfarbentechnik (C-Scan) angezeigt werden kann, Abbildungen 9 und 11. Dabei stehen unterschiedliche Farb- und Grauwertpaletten zur Verfügung. Weiterhin können T- und U-Wegkurven ausgewählter Sensorspuren sowie die zugehörigen Ortskurven dargestellt werden. Umfangreiche Cursoranzeigen, Verstärken, Zoomen, Ausschnitte bilden etc. ermöglichen das Navigieren im Datenbestand.

Die Verarbeitungsfunktionen erlauben es dem Bediener, die Meßdaten einer weiteren Signalverarbeitung zu unterziehen. Dabei stehen angepaßte Digitalfilter wie Spikefilter, Smooth-Tiefpaß, x- und y-Hochpaß sowie 2D-Hochpässe mit unterschiedlicher Richtwirkung und Charakteristik zur Verfügung. Über das integrierte Interface des Anzeigeprogramms zur Datenbank können direkt Einträge vorgenommen werden bzw. vorhandene Einträge editiert werden.

Bei der halbautomatischen Auswertung werden die Meßdaten ebenfalls visualisiert, darüber hinaus wird jedoch eine On-Line Klassifikation mit einbezogen. Dadurch wird eine Klassifikation mit veränderten Einstellungen (Filtern) ermöglicht. Darüberhinaus ist die On-Line-Klassifikation für das Erzeugen von Lerndaten für den Klassifikator hilfreich.

Ergebnisse

Der Impulswirbelstrom-Prüfmoß erkennt folgende Fehler:

- beliebig orientierte Risse ab einer Länge von 40 mm und einer Tiefe von 2 mm
- lokale Korrosion (Lochfraß) ab einem Durchmesser von 10 mm und einer Tiefe von 2,5 mm

Die Schweißnahterkennung zur Erzeugung des Rohrbuches liefert:

- Montagerundnähte und Spiralnähte mit einer Sicherheit von 99,97 %
- Längsschweißnähte mit einer Sicherheit von 99,65 %

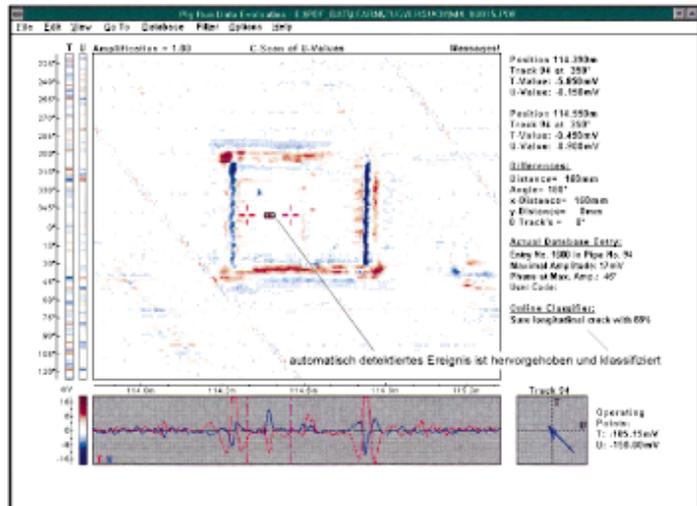


Abb. 11
Anzeige der weiterverarbeiteten, d. h. speziell gefilterten Meßdaten mit Hervorhebung eines automatisch detektierten und klassifizierten Defektes

Relevante Ereignisse mit einer Größe ab obiger Nachweisempfindlichkeit werden mit einer Sicherheit von ca. 98 % gefunden. Die Geschwindigkeit der automatischen Auswertung beträgt ca. 1m/s und ist damit etwa gleich schnell wie die Laufgeschwindigkeit des Molches in der Pipeline.

Die Klassifikationssicherheit an Kontrollfehlern unter Pipelinebedingungen ist besser als 85%. Über die Klassifikationssicherheit realer Defekte liegen noch keine statistisch gesicherten Ergebnisse vor. Bei Anwendung der automatischen Klassifikation *nur* zum Herausfiltern von Störanzeigen aus der Pipeline kann der Auswerteaufwand bereits auf unter 20% gegenüber einer manuellen Auswertung gesenkt werden.

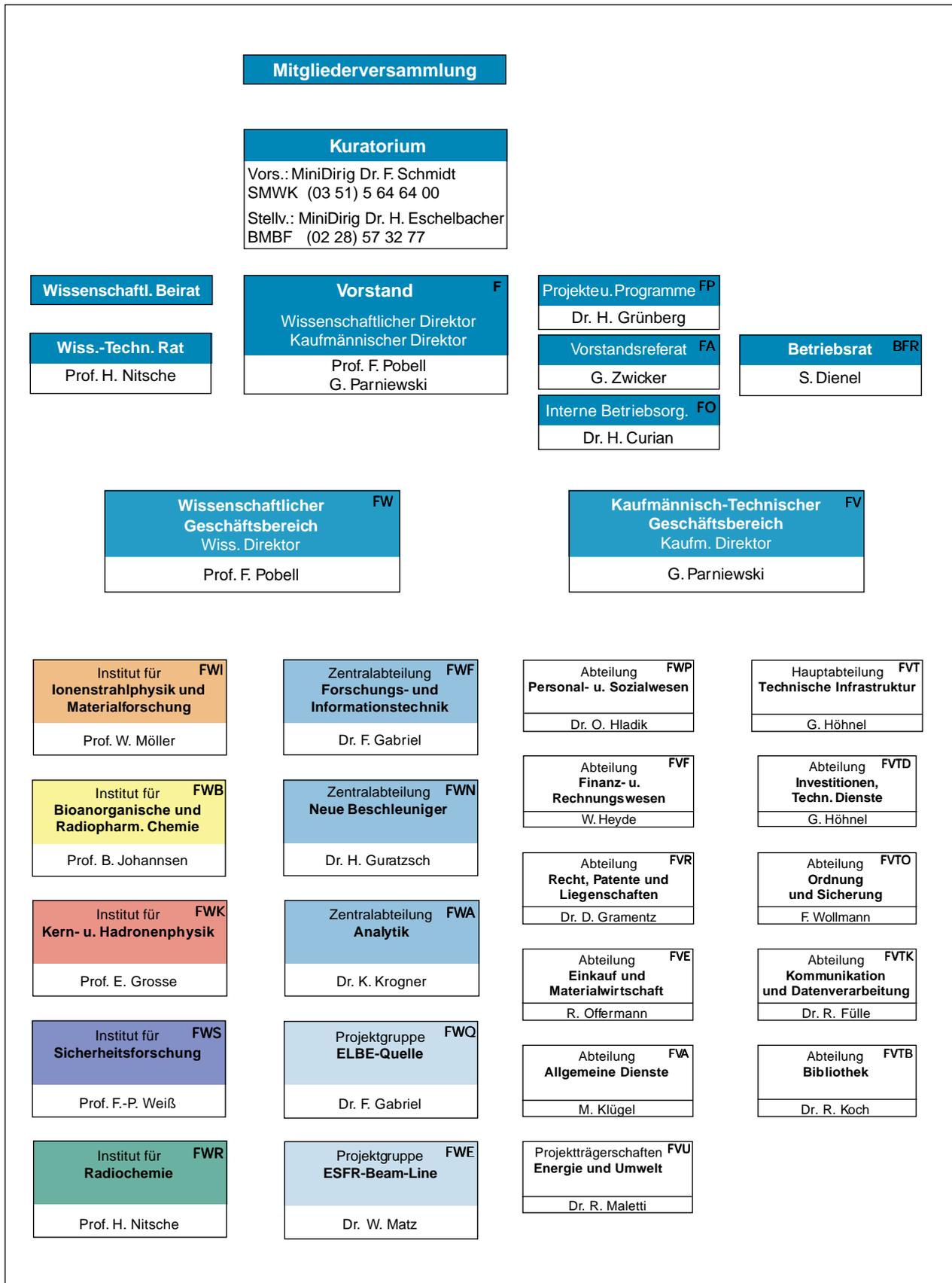
Abb. S. 59

Arbeiten am Modell eines russischen Druckwasserbehälters (WWER-440) für die Untersuchung unerwünschter Schwingungen von Reaktoreinbauten und für Experimente zur Vermischung des Kühlmittels



**DAS FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
DATEN UND FAKTEN 1996**

ORGANIGRAMM



ORGANE UND GREMIEN

Das Forschungszentrum Rossendorf e. V. (FZR) wurde am 06.12.1991 als gemeinnütziger Verein gegründet. Es wird als Einrichtung der „Wissenschaftsgemeinschaft Blaue Liste“ vom Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (Bund) und dem Staatsminister für Wissenschaft und Kunst des Freistaates Sachsen (Land) im Verhältnis 50 : 50 gefördert.

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 zudem 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. Dem Kuratorium gehören 3 Vertreter des Landes, 3 Vertreter des Bundes und ein von der Mitgliederversammlung gewähltes Mitglied des Vereins 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 an den Sitzungen des Kuratoriums mit beratender Stimme teil.

Das Kuratorium besteht aus folgenden Mitgliedern:

MinDirig Dr. Frank Schmidt (Vorsitzender)	Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
MinDirig Dr. Hans Eschelbacher (Stellv. Vorsitzender)	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
MinR Lothar Schulte	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
N.N.	Bundesministerium der Finanzen
RegDir Dr. Ronald Werner	Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
RR Stefan Rix	Sächsisches Staatsministerium der Finanzen
Dr. Gert Bernhard	Forschungszentrum Rossendorf e.V.

Vorstand

Der Vorstand des FZR setzt sich wie folgt zusammen:

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

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. Heino Nitsche (Vorsitzender)	
Dr. Harald Prade (stellv. Vorsitzender)	Prof. Bernd Johannsen
Dr. Ruprecht Fülle	Dr. Karl Krogner
Dr. Frank Gabriel	Dr. Peter Merker
Prof. Eckart Grosse	Prof. Wolfhard Möller
Dr. Hartmut Guratzsch	Dr. Jörg Steinbach
Dr. Hans-Ulrich Jäger	Prof. Frank-Peter Weiß

Mitglieder mit beratender Stimme:

Prof. Dr. Frank Pobell	Gerd Parniewski
------------------------	-----------------

Betriebsrat

Der Betriebsrat des Forschungszentrums Rossendorf setzt sich wie folgt zusammen:

Siegfried Dienel (Vorsitzender)	
Mathias Schramm (Stellv. Vorsitzender)	Bernd Hartmann
Dr. Harald Curian	Sabine Pfortner
Christian Damm	Steffen Schaller
Bernd Eisold	Christel Schneiderei

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 Beirat gehören folgende Mitglieder an:

Prof. Gerhard Kreysa (Vorsitzender)	DECHEMA Frankfurt
Prof. Bernd Stritzker (stellv. Vorsitzender)	Universität Augsburg
Prof. Günter Kessler	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Prof. Axel Kleemann	Asta Medica AG Frankfurt
Prof. Wolfgang Kröger	PSI Würenlingen
Prof. Achim Mehlhorn	Technische Universität Dresden
Prof. Vadim Ivanovich Nefedov	Institute of General and Inorganic Chemistry, Moskau
Dr. August Schubiger	PSI Würenlingen
Prof. Dirk Schwalm	Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
Prof. Hans Warlimont	Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ÜBERBLICK 1996

Name:	FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF e.V.
Träger:	Freistaat Sachsen, Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Finanzierung:	Grundfinanzierung: 50 % Freistaat Sachsen, 50 % Bundesrepublik Deutschland
Planstellen:	435,5; davon 133,5 Wissenschaftlerstellen
Drittmittelstellen: (Ist 1996)	110 Personenjahre
Doktoranden:	57 (davon 10 Abschlüsse 1996)
Jahresetat:	90,64 Mio. DM (einschl. Sonderprogramme)
Drittmittel:	10,90 Mio. DM
Organe:	Mitgliederversammlung Kuratorium Vorstand Wissenschaftlicher Beirat

Wissenschaftliche

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

Wissenschaftliche

Infrastruktur:	Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik Zentralabteilung Neue Beschleuniger Zentralabteilung Analytik
-----------------------	--

Technische

Infrastruktur:	Investitionen, Technische Dienste Ordnung und Sicherung Kommunikation und Datenverarbeitung Bibliothek Betriebliche Strahlenschutzüberwachung
-----------------------	---

ÜBERSICHT ÜBER DIE FORSCHUNGS- SCHWERPUNKTE UND -VORHABEN 1996

Materialforschung

- Hartstoffschichten FWI
- Phasen und Defekte FWI
- Nanocluster FWI
- Feinfokussierter Ionenstrahl FWI
- Plasma-Immersion-Implantation FWI
- Hochenergie-Ionenstrahlanalytik FWI
- Materialsicherheit (Versprödungsmechanismen) FWS
- Simulation von Teilchen- und Strahlungsfeldern (Neutronenbelastung) FWS

Biomedizin-Chemie, Umwelt

- Radiopharmazeutische Chemie kurzlebiger Positronenstrahler FWB
- Abschluß des Aufbaues des PET-Zentrums FWB
- Chemie von SPECT-Tracern und Modellverbindungen FWB
- Biochemische und biologische Beiträge zum Radiotracerdesign FWB
- Simulation von Teilchen- und Strahlungsfeldern (für PET-Schwerionentherapie) FWS
- Entwicklung und Bau von Detektoren (für PET-Schwerionentherapie) FWK
- Transportverhalten von Radionukliden in der Bio- und Geosphäre FWR
- Physikalisch-chemische Untersuchungen radioaktiver Kolloide und Aerosole FWR
- Wechselwirkung von Radionukliden mit anthropogenen und natürlichen Organika FWR
- Strukturaufklärung von Radionuklidverbindungen mittels Synchrotronstrahlung FWR
- Chemie der schwersten Elemente FWR

Grundlagenforschung zur Kern-, Hadronen- und Strahlungsphysik

- Experimentelle Kernspektroskopie FWK
- Hadronenphysik (Experimentelle Mittlere Energiephysik) FWK
- Schwerionenreaktionen FWK
- Strahlungsphysik FWK
- Entwicklung und Bau von Detektoren FWK

Sicherheitsforschung

- Experimentelle Untersuchungen sicherheitsrelevanter thermofluidynamischer Effekte in Zweiphasenströmungen FWS
- Thermohydraulik- und Neutronenkinetikcodes für die Störfallanalyse FWS
- Materialsicherheit FWS
- Simulation von Teilchen- und Strahlungsfeldern FWS
- Mechanische Integrität technischer Systeme und Prozeßüberwachung FWS
- Angewandte Entscheidungsanalyse und Risikobewertung FWS

Projekte

- ESRF-Beamline
- ELBE-Strahlungsquelle

ÜBERSICHT ÜBER DIE ZENTRUMSÜBERGREIFENDE ZUSAMMENARBEIT

Im Berichtsjahr ist die zentrumsübergreifende Zusammenarbeit intensiviert und erweitert worden. Dazu hat vor allem 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. Eine Intensivierung der Zusammenarbeit erfolgte auf allen bisherigen Arbeitsgebieten. Neu hinzugekommen sind die gemeinsamen Bemühungen zu wissenschaftlicher Vorbereitung und Aufbau der ELBE-Strahlungsquelle und Arbeiten zu Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen an modifizierten Materialien und Werkstoffen.

Forschungsschwerpunkt	Gegenstand der Zusammenarbeit	beteiligt sind:
Biomedizin-Chemie, Umwelt	Positronen-Emissions-Tomographie <ul style="list-style-type: none"> • In-situ-PET-Monitoring für die Schwerionen-Tumorthherapie, • Nichtinvasive Radionuklidmessung in arteriellem Blut mit PET-Tracern • PET-Verfahren zur Dichte- und Konzentrationsmessung in der Strömungsmechanik • Entwicklung eines PET-Scanners mit hohem räumlichen Auflösungsvermögen für Studien an kleinen Tiermodellen 	FWK FWB FWS FWN
	Radioaktive Tracer in Bio- und Ökosystemen <ul style="list-style-type: none"> • Chemie des Technetiums • Molekülstrukturanalyse radioaktiver Verbindungen • Untersuchungen zum Radionuklidtransport • Entwicklung, Herstellung und Anwendung von Zyklotron-Isotopen 	FWB FWR FWS FWA FWN
Materialforschung	Strukturuntersuchungen mit Photonen <ul style="list-style-type: none"> • Rossendorfer Beamline ROBL an der ESRF in Grenoble • Feinstrukturuntersuchungen am HASYLAB des DESY/Hamburg und an der ESRF/Grenoble • Röntgendiffraktometrie und -reflektometrie 	FWI FWR FWS FWK FWF FWN FWE
	Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen an modifizierten Materialien und Werkstoffen	FWS FWI
Grundlagenforschung zur Kern-, Hadronen- und Strahlungsphysik	ELBE-Strahlungsquelle <ul style="list-style-type: none"> • Planung, Design, Aufbau • Wissenschaftliches Programm 	FWK FWF FWN FWQ



ÜBERSICHT ÜBER DIE INSTITUTE UND DIE WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE INFRASTRUKTUR

Abb. S. 67
Syntheseapparatur für die Erzeugung von ^{11}C -Radiopharmaka im Entwicklungslabor des PET-Zentrums

INSTITUT FÜR IONENSTRAHLPHYSIK UND MATERIALFORSCHUNG

Überblick über die Zielstellung

Die zentralen Aufgaben des Institutes vereinen Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung auf den Gebieten der Modifizierung von Oberflächen und der Oberflächenanalytik mittels Ionenstrahlen. Den Empfehlungen des Deutschen Wissenschaftsrates folgend, entwickelt sich das Institut zu einem nationalen Ionenstrahlzentrum, welches neben den eigenen Forschungsergebnissen Universitäten, anderen Forschungsinstituten und der Industrie Technologietransfer und Dienstleistungen in Bezug auf 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 vorhanden, wie Elektronenmikroskopie, Röntgenbeugung, Auger- und Photoelektronenspektroskopie sowie eine Reihe chemischer, optischer, elektrischer und mechanischer Geräte. Die Probenpräparation ist für eine große Zahl unterschiedlicher Materialien ausgelegt und schließt Standard-techniken der Silizium-Planartechnologie ein.

Wichtigste Ergebnisse

Anfang 1996 wurden die wichtigsten Forschungsgebiete und die Organisation des Institutes neu definiert. Da 1995 Projektaktivitäten zu Sensoren, die keinen Bezug zu Ionenstrahltechniken haben, in Form einer kleinen Firma innerhalb des Rossendorfer Technologiezentrums ROTECH ausgegründet wurden, wurde die Sensorentwicklung nicht länger als eine Hauptaufgabe beibehalten. Stattdessen bilden durch Ionenimplantation erzeugte Nanocluster mit ihren Anwendungen in Optoelektronik, Mikroelektronik und Mechanik einen neuen Forschungsschwerpunkt. Die wesentlichen Forschungsaktivitäten des Institutes können nun in die zwei Bereiche Neue Materialien (Hartstoffschichten, Phasen und Defekte, Nanocluster) und Neue Verfahren

(Feinfokus-Ionenstrahl, Plasma-Immersions-Implantation, MeV-Ionenstrahlanalytik) gegliedert werden.

Ein weiteres Hauptziel der Reorganisation lag in der Intensivierung der Beziehungen zur Industrie. Zu diesem Zweck ist nun einer der führenden Wissenschaftler für die Koordinierung der industriellen Kontakte der einzelnen Abteilungen, für die Darstellung des Institutes auf Messen und durch Informationsmaterial sowie für das Anbahnen neuer Kontakte zu möglichen Partnern aus der Industrie verantwortlich. Technologietransfer ist ein zeitaufwendiger Prozeß, insbesondere in Zeiten knappen Geldes. Trotzdem erwarten wir, daß zumindest ein kleiner Anteil unserer gegenwärtig mehr als 70 Kontakte zu Klein- und mittelständischen Unternehmen, aber auch zu großen Firmen, zu langfristigen Aufgaben in Dienstleistungen mit Ionenstrahltechniken oder zu gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsprojekten führt, die die zur Zeit existierenden erfolgreichen, aber wenigen Aktivitäten auf diesem Gebiet ergänzen.

Die erfolgreiche Entwicklung der Forschungsaktivitäten des Institutes im Jahre 1996 wird durch eine deutlich steigende Zahl wissenschaftlicher Publikationen, insbesondere in renommierten internationalen Zeitschriften, belegt, aber auch durch fortgeführte oder neue Kooperationen in Form von Besuchen von Mitarbeitern in externen Instituten, durch nationale und internationale Gäste in Rossendorf sowie durch zahlreiche Einladungen von Wissenschaftlern des Instituts zu Konferenzen und Vorträgen. Vier Doktoranden promovierten mit beachtlichen Ergebnissen in der Bewertung ihrer Dissertation und in den Prüfungen.

Die Bedeutung des Institutes in der internationalen wissenschaftlichen Szene zeigte sich auch in einer Teilkonferenzleitung auf der weltgrößten materialwissenschaftlichen Konferenz, dem Herbsttreffen der U.S. Materials Research Society. Einige wissenschaftliche Veranstaltungen wurden vom Institut organisiert. Eine unerwartet große Zahl von ungefähr 100 Teilnehmern aus 20 Ländern traf sich in Rossendorf zum

Third International Workshop on Plasma Based Ion Implantation.

Eine Anzahl neuer Projekte wurde eingeworben, die mit Bundesmitteln, mit Mitteln des Landes Sachsen, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft oder direkt von der Industrie finanziert werden.

Die Installation wichtiger neuer Experimentieranlagen hat allmählich den Zustand einer mittelfristigen Sättigung erreicht. Trotzdem wurden auch 1996 einige neue Ausrüstungen in Betrieb genommen. Dazu gehört ein neues, unikales Experiment, welches durch die Kombination von Niederdruck-Plasma-Behandlung mit Ellipsometrie und Hochenergie-Ionenstrahlanalytik eine sehr leistungsfähige Anlage für In-situ-Untersuchungen darstellt. Weiterhin gehörten Entwicklung und Aufbau der Strahl-optik und des Dünnschicht-Diffraktometers an der Rossendorfer Beam Line (ROBL) an der ESRF in Grenoble zu den Hauptaufgaben des Institutes.

Viele Verbesserungen und Instandhaltungsarbeiten sind an älteren Ausrüstungen, insbesondere am 5 MV-Tandembeschleuniger, notwendig. Außerdem erfordern die Renovierung der Gebäude und Versorgungseinrichtungen die aktive Beteiligung von Mitarbeitern des Institutes und manchmal beträchtliche Geduld der Wissenschaftler. Wir sind allen Beteiligten dankbar, daß im Herbst 1996 mit dem Bau eines neuen Beschleunigergebäudes begonnen wurde, welches weitere Strahl- und Gerätekombinationen für die In-situ-Diagnostik erlauben wird. Schnelle Baufortschritte sind sichtbar.

Aus der großen Zahl neuer und wesentlicher Ergebnisse innerhalb der einzelnen Forschungsvorhaben (s.u.) sind die Arbeiten zu lumineszierenden Nanostrukturen durch Si- und Ge-Implantation in SiO_2 hervorzuheben: Experimentell zeigte die Photolumineszenz im blauen Frequenzbereich hervorragende Ausbeuten; gleichzeitig konnte ein neues theoretisches Verständnis der Bildung von Nanocluster-Bändern durch Selbstorganisation gewonnen werden. Von besonderer Bedeutung für die Anwendung sind Arbeiten zur Plasma-Immersion-Implantation: Ein einfaches Modell liefert eine ausreichend gute Beschreibung der lateralen Gleichförmigkeit der Bestrahlung auch bei zylindrisch geformten Gegenständen.

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Das Institut errichtet gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie die Rossendorfer Beamline (ROBL) an der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Strahlrohrstruktur mit den abgeschirmten Kabinen aufgebaut. Die Strahl-optik wurde konzipiert und bestellt. Für den Materialforschungsmeßplatz befinden sich das Sechskreis-Goniometer, ein Detektor sowie die Hochtemperatur-Probenkammer zum Test in Rossendorf.

Die diagnostische Ausrüstung des Institutes wurde auch von den Nachbarinstituten genutzt. Hervorzuheben sind Röntgendiffraktionsmessungen sowie Hochenergie-Beschleunigeranalysen (PIXE, ERDA) an Gesteinsproben und synthetischen Uranverbindungen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiochemie sowie Röntgenkleinwinkelstreuungsmessungen an Reaktordruckbehälter-Stählen mit dem Institut für Sicherheitsforschung.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Alle im folgenden dargestellten Forschungsthemen profitieren von der Zusammenarbeit mit anderen Instituten. Für die Entwicklung von Hartstoffschichten ist der wissenschaftliche Austausch mit dem Fh-Institut für Werkstoffphysik und Schichttechnologie Dresden, der TU Chemnitz-Zwickau, dem Institut für Oberflächenmodifizierung Leipzig sowie den Universitäten Poitiers und Tokio fördernd, die an gleichen oder ähnlichen Systemen mit anderen Methoden arbeiten.

Zum Thema Siliciumcarbid sind gemeinsame Arbeiten mit der Universität Barcelona zur Ionenstrahlsynthese und der TU Ilmenau zum System SiC-AlN wichtig. Für die Untersuchungen zur Lumineszenz von Halbleiter-Nanoclustern ist die Kooperation mit der TU Dresden unverzichtbar. Eine sehr attraktive Anwendung unserer Ionenfeinstrahlanlage wird durch die gemeinsamen Arbeiten mit dem Forschungszentrum Jülich zum Permeable-Base-Transistor erschlossen. Ein BMBF-Verbundprojekt konzentriert unsere Arbeiten zur Plasma-Immersion-Implantation mit denen der Universität Augsburg, der Robert Bosch GmbH und der MAT GmbH auf gemeinsame Ziele. Aus den vielfältigen Kooperationen zur Ionenstrahlanalytik sind die gemeinsamen Untersu-

chungen mit dem Institut für Plasmaphysik Garching an Materialien von Fusionsreaktoren und Analysen von Kunstgegenständen in Zusammenarbeit mit der Hochschule für Bildende Künste Dresden sowie mehreren europäischen Partnern im Rahmen eines COST Projektes hervorzuheben.

Der Vorbereitung industrieller Nutzungen unserer Ergebnisse dienen die bereits oben erwähnten Kooperationen mit der Robert Bosch

GmbH und der MAT GmbH sowie Arbeiten zur Implantation von Gelenkprothesen für die Fa. Aesculap und zur Dotierung von SiC für das Daimler Benz Forschungszentrum Frankfurt. Ergebnisse zur Computersimulation von Implantationsprozessen werden in Zusammenarbeit mit dem Fh-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme Dresden, der ETH Zürich und IBM East Fishkill, USA für industrielle Prozeßsimulatoren nutzbar gemacht.

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

- Hartstoffschichten
- Phasen und Defekte
- Nanocluster
- Feinfokussierter Ionenstrahl
- Plasma-Immersion-Implantation
- Hochenergie-Ionenstrahlanalytik

Statistischer Überblick

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		77			Wissenschaftler			32			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	5	3,8	Doktoranden	6	4,8	Gastwissenschaftler	27	2,8	Hilfskräfte	16	5,9
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	13	9,6	Technisches Personal	5	3,9	Stipendiaten	3	1	Doktoranden	12	8,5
Gastwissenschaftler	33	5									
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		1066,1			drittmittelfinanziert			296,1			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Publikationen		96			Konferenzbeiträge/Poster			123			
Seminare/Kolloquien		45			Reports			20			
Patentanmeldungen		2			Doktorarbeiten			4			
Diplomarbeiten		1									

Abteilungsleiter	:	Dr. J. von Borany	:	Industriekooperationen
	:	Dr. M. Friedrich	:	Beschleunigertechnik
	:	Dr. R. Grötzschel	:	Ionenstrahlanalytik
	:	Dr. W. Matz	:	Strukturuntersuchungen
	:	Dr. M. Posselt	:	Theorie
	:	Dr. E. Richter	:	Ionenimplantation
	:	Dr. B. Schmidt	:	Präparation
	:	Dr. W. Skorupa	:	Neue Materialien

Direktor : Prof. Dr. W. Möller
 Tel.: (03 51) 260-22 45
 e-mail: W.Moeller@fz-rossendorf.de

INSTITUT FÜR BIOANORGANISCHE UND RADIOPHARMAZEUTISCHE CHEMIE

Überblick über die Zielstellung

Das Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie befaßt sich mit Grundlagenforschung in bezug auf neue Radiotracer für die Medizin. Ausgehend von einem biochemischen Ansatz, d. h. der molekularen Basis physiologischer Vorgänge und deren Beeinträchtigungen bei krankhaften Prozessen, werden neue chemische Verbindungen und Markierungsmethoden erschlossen, die spezielle Chemie der Tracer erforscht und Zusammenhänge zwischen der Molekülstruktur und dem Verhalten im biologischen System abgeleitet. Derzeit steht das serotonerge System im Mittelpunkt, das in noch wenig geklärter Weise bei einer Reihe von Erkrankungen, die eine breitere Bevölkerungsschicht betreffen, beteiligt ist oder zu sein scheint. Speziell sind die Arbeiten auf Rezeptoren und Transporter von Neurotransmittern konzentriert. Die Markierungsnuklide für das Radiotracerdesign sind einerseits die Positronenstrahler Kohlenstoff-11 und Fluor-18 und andererseits das „Arbeitspferd“ der Nuklearmedizin, Technetium-99m.

Die Zielstellung des Instituts bedingt eine weitgespannte interdisziplinäre Zusammenarbeit, die von den chemischen und biologischen Mutterdisziplinen über die Radiochemie und Radiopharmakologie bis zur klinischen Anwendung in Form der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) reicht. Im PET-Zentrum Rossendorf sollen in Kooperation des Instituts mit dem Universitätsklinikum Carl Gustav Carus der TU Dresden wesentliche Beiträge zu Forschungsschwerpunkthemen des Universitätsklinikums erzielt werden.

Im Jahre 1996 stand die vollständige Inbetriebnahme des PET-Zentrums an. In der ersten Phase handelt es sich um Untersuchungen des Hirn-glucosestoffwechsels bei verschiedenen Krankheitsbildern unter Verwendung von [¹⁸F]FDG als Radiopharmakon. Der längerfristigen Thematik zu Neurotransmittern im Gehirn dienen koordinationschemische, radiochemische und biologische Beiträge. 1996 bestand dazu vor allem das Ziel, die erfolgreichen Vorarbeiten zu neuen Technetium-99m-

Verbindungen als Liganden für Neurotransmitterrezeptoren fortzuführen und den radiochemischen Vorlauf für weitergehende PET-Studien zu schaffen. Dies schließt auch grundlegende Arbeiten zu Markierungsverfahren ein.

Wichtigste Ergebnisse

Obwohl eine Reihe von Methoden und Strategien zur Markierung von organischen Molekülen mit Kohlenstoff-11 für die Positronen-Emissions-Tomographie seit langem als radiochemisches Handwerkszeug etabliert sind, erfordert die Ausweitung der PET weitere Fortschritte bei den Markierungsverfahren. Dies betrifft u. E. die Möglichkeit, C-11 in ungeträgerter Form in aromatische Ringsysteme einzuführen. Solche Ringsysteme sind schwer metabolisierbar und damit äußerst stabil. Nachdem zuvor die Tragfähigkeit unserer diesbezüglichen Markierungskonzepte anhand von zahlreichen Benzolderivaten belegt werden konnte, wurden in jüngster Zeit die Arbeiten auf Heteroaromaten ausgedehnt. Die Synthese von C-11 markiertem Pyridin und dessen Derivate, wie Nicotinsäureamid, wurde abgeschlossen.

Markierte Peptide bieten die Möglichkeit, als spezifische molekulare Sonden in der Nuklearmedizin zu fungieren. Deshalb wird die Entwicklung von solchen, insbesondere antigen- und rezeptorbindenden Sonden international intensiv betrieben. Dazu bedarf es ausgefeilter, das Bioverhalten nicht beeinträchtigender Markierungsverfahren. Im Falle einer Markierung mit Tc-99m besteht eine erfolgversprechende Variante in dem Einbau von Tc-bindenden Sequenzen in das Peptidmolekül. In Zusammenarbeit mit der Schering AG wurde nach diesem Konzept ein potentielles Diagnostikum zum Nachweis von atherosklerotischen Plaques entwickelt und dabei speziell die direkte Tc-Bindungsfähigkeit und die Art der Koordination des Metalls untersucht. Mit Hilfe röntgenabsorptionspektroskopischer Untersuchungen, gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie durchgeführt, konnte dabei erstmalig die Koordinationssphäre bei ei-

nem Tc-Peptid-Komplex (Direktmarkierung) aufgeklärt werden. Grundlegende Untersuchungen über das Zusammenwirken der verschiedenen Donoratome in Peptiden und der Bausteine bei der Koordinierung von Technetium und Rhenium komplettieren das wichtige Ergebnis.

Im vorangegangenen Jahr wurde über Technetiumverbindungen berichtet, denen die Fähigkeit zur spezifischen Bindung an bestimmte Serotoninrezeptoren des Gehirns verliehen werden konnte und die damit die Entwicklung von entsprechenden ^{99m}Tc -Radiopharmaka für neurologische Fragestellungen möglich erscheinen lassen. Die Verbindungen enthalten unter anderem einen protonierbaren Stickstoff im Molekül. Ein wesentliches Problem auf dem Entwicklungsweg ist die Existenz der Blut-Hirn-Schranke, die dem beabsichtigten Transport der körperfremden Technetiumverbindungen in das Gehirn entgegen steht. Dieses Problem erwies sich dadurch besonders gravierend, daß Rezeptorbindung und Transport in das Gehirn kontroverse Molekülanforderungen bedingen. Dabei spielt der Stickstoff eine besondere Rolle. Durch grundlegende Untersuchungen zu den Moleküleigenschaften einerseits und Transportvorgängen in der Ratte und in Modellen zur Blut-Hirn-Schranke andererseits konnte das Transportproblem ohne Verlust der Rezeptoraffinität gelöst werden. Der wesentliche Ansatzpunkt war die aufgefundene Linearität zwischen Hirnaufnahme und Basizitätserniedrigung des Stickstoffs infolge von Sauerstoffatomen in geeigneter Molekülposition.

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiochemie wurde die Röntgenabsorptionsspektroskopie auf radiopharmazeutische Fragestellungen angewandt. Gemeinsame Untersuchungen an den Synchrotroneinrichtungen in Stanford und Hamburg haben dabei mit anderen Methoden nicht erhältliche Einblicke in den Molekülaufbau von Rhenium- und Technetium-99-Verbindungen verschiedener Aminosäurederivate und Peptide erbracht. Für die Untersuchung fluidmechanischer Transportvorgänge im Institut für Sicherheitsforschung wurden Radiotracer bereitgestellt. Es wurden gemeinsame Forschungsprojekte unter Ausnutzung von mit Positronen emittie-

renden Radionukliden markierten Radiotracer konzipiert.

Unter Federführung von Mitarbeitern des Institutes für Kern- und Hadronenphysik ist die Entwicklung eines PET-Scanners für Kleintiere beabsichtigt. Erste gemeinsame Konzepte zur Realisierung eines solchen Projektes wurden erarbeitet.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Mit der Technischen Universität Dresden besteht eine vielfältige und sehr enge Zusammenarbeit. In dem gemeinsam mit dem Universitätsklinikum Carl Gustav Carus betriebenen PET-Zentrum Rossendorf werden radiochemische und medizinische Projekte bearbeitet. Chemische Arbeitsgruppen der TU Dresden sind wesentlich an der analytischen Charakterisierung von neuen Tracern beteiligt. Eine sehr effektive Zusammenarbeit besteht auch mit der Bundesanstalt für Materialforschung Berlin in bezug auf Kristallstrukturuntersuchungen an Technetium- und Rheniumverbindungen. Gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie des FZR wurden röntgenabsorptionsspektroskopische Untersuchungen an Koordinationsverbindungen am HASYLAB Hamburg und am Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL), USA, durchgeführt. Langjährige Kooperationen mit der Universität Padua, Italien, und dem Nationalen Forschungszentrum „Demokritos“ in Athen, Griechenland, dienen einer gemeinsamen Forschung zur Technetiumchemie, koordiniert auch über das COST-B3 Programm. Dies betrifft gleichermaßen die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Paul-Scherrer-Institut in Villingen, Schweiz. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit der Arabischen Republik Ägypten wurde mit der Bearbeitung von chemischen und radiopharmakologischen Aspekten der Technetiumforschung begonnen.

Auf dem Gebiet der PET-Tracer existieren Kooperationen mit dem Montreal Neurological Institute, Kanada, und dem PET-Zentrum in Turku, Finnland. In die Entwicklung neuer PET-Tracer ist die Kompetenz des Hans-Knöll-Instituts Jena auf dem Gebiet der Steroidforschung eingebunden.

Die biologische Forschung zu Radiotracer profitiert sehr von der Zusammenarbeit mit dem PET-Zentrum Aarhus, Dänemark, und der

University of Minnesota in Duluth, USA. Auf pathophysiologischem Gebiet wird erfolgreich mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena zusammengearbeitet.

Besonders hervorzuheben ist die intensive Zusammenarbeit mit der Pharmaindustrie, insbesondere der Schering AG und Mallinckrodt St. Louis, USA, bzw. Petten, Holland. Gemeinsame Forschungsprojekte betreffen neue Technetiumverbindungen für die nuklearmedizinische Diagnostik.

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

- Radiopharmazeutische Chemie kurzlebiger Positronenstrahler
- Abschluß des Aufbaues des PET-Zentrums
- Chemie von SPECT-Tracern und Modellverbindungen
- Biochemische und biologische Beiträge zum Radiotracerdesign

Statistischer Überblick

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		37			Wissenschaftler			15			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	5	3,6	Doktoranden	5	5	Gastwissenschaftler	5	0,6	Hilfskräfte	5	2,4
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	5	3,7	Technisches Personal	4	2,8	Stipendiaten	1	0,3	Doktoranden	3	2,8
Gastwissenschaftler	1	0,1									
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		1186,5			drittmittelfinanziert			15			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Publikationen		14			Vorträge			29			
Abstracts		17			Doktorarbeiten			3			

Abteilungsleiter : Dr. H. Spies : SPECT-Tracer
 : Dr. J. Steinbach : PET-Tracer
 : Dr. P. Brust : Biochemie

Direktor : Prof. Dr. B. Johannsen
 Tel.: (03 51) 260-31 70
 e-mail: B.Johannsen@fz-rossendorf.de

Überblick über die Zielstellung

Die sichere und dauerhafte Isolierung der anfallenden radioaktiven Abfall- und Folgeprodukte vom Lebensraum der Bevölkerung ist eine der großen wissenschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Deshalb ist die wissenschaftliche Zielstellung des Instituts für Radiochemie auf die Erforschung aller wesentlichen Aspekte des Radionuklidtransports in der Geo- und Biosphäre fokussiert.

Diese radioökologischen Forschungen dienen der Erarbeitung von wissenschaftlichen Grundlagen für Risikoeinschätzungen und sind auf die Beseitigung von Radionuklidkontaminationen gerichtet, die beim Abbau und der Gewinnung des Uranerzes, bei der Brennstoff- und Brennelementverarbeitung, während des Reaktorbetriebs, bei der Entsorgung der abgebrannten Brennelemente und bei der Stilllegung ausgedienter Kernanlagen entstanden und entstehen.

Das Forschungsziel ist die Erarbeitung von Grundlagendaten, auf deren Basis verbesserte Voraussagemethoden für die Radionuklidmigration gemacht werden können. Diese Voraussagen sind wesentlich für die Entwicklung geeigneter Sanierungstechnologien für kontaminierte Flächen, die zum Beispiel als Altlasten des Uranerzbergbaus in Sachsen und Thüringen, als weitflächige Kontaminationen aus der Kernwaffenentwicklung und -produktion in den Nachfolgestaaten der früheren Sowjetunion und den USA und als kontaminierte Gebiete durch Nuklearunfälle vorliegen. Weiterhin sind Voraussagen zur Radionuklidmigration wesentlich für eine Abschätzung der ökologischen Konsequenzen für Mensch und Umwelt vor und nach einer Sanierungsmaßnahme. Die Forschungsergebnisse sind für die Risikoanalyse geplanter notwendiger nuklearer Endlager und in gewissem Umfang für Sondermülldeponien anwendbar, wo ebenfalls die Auswirkung von Störfallszenarien betrachtet werden muß.

Für die Grundlagenforschung ergeben sich daraus methodische Ansätze, besonders im Hinblick auf die Bestimmung der Speziation und Migration der radioaktiven Inhaltsstoffe und weiterer relevanter Schwermetalle, auch unter dem Aspekt der Wechselwirkung mit anthropogenen und natürlichen Organika. Die Forschung umfaßt die Beschreibung der Aus-

breitung radioaktiver Stoffe in Grund- und Oberflächenwässern sowie über den Luftpfad. Es werden unter anderem die Wechselwirkungen an der Phasengrenzfläche zwischen wäßriger Phase und Gesteinen, Mineralien und Erden, die Bildung und Ausbreitung von Kolloiden und Aerosolen sowie die Mobilisierung oder Retardierung der Radionuklide untersucht. Dabei stehen die Laborexperimente mit den Experimenten im Feld in engem Zusammenhang.

Das Institut beteiligt sich innerhalb einer nationalen Kooperation an mikrobiologischen Forschungen, deren Ziel es ist, die Wechselwirkungen von Mikroorganismen mit natürlichen Radionukliden hinsichtlich ihres Ausbreitungsverhalten und der Erarbeitung von Bioremediationsverfahren aufzuklären.

Der Schadstoffaustrag wurde bisher meist nur makroskopisch beobachtet und phänomenologisch beschrieben. Ein grundlegendes Forschungsziel des Instituts ist es, die ablaufenden Vorgänge in Einzelprozesse zu zerlegen und diese auf molekularer Ebene aufzuklären. Unter Verwendung bestehender und noch zu entwickelnder Transportmodelle wird es möglich, aus der mikroskopischen Information makroskopische Voraussagen abzuleiten. Dadurch kann der Schadstofftransport umfassender beschrieben werden.

Wichtigste Ergebnisse

Die Forschungsarbeiten des Instituts erbrachten 1996 weitere Grundlagendaten zur besseren Beschreibung des Radionuklid- und Schadstofftransportes in der Bio- und Geosphäre. Der Jahresbericht des Instituts (Annual Report 1996) informiert detailliert über die erzielten Ergebnisse.

Neue, zukunftssträchtige Themen wurden aufgegriffen: zum einen die Charakterisierung der Biosorption von radioaktivitätstragenden Schadstoffen durch Mikroorganismen im Hinblick auf das Ausbreitungsverhalten und den Einsatz zur Bioremediation und zum anderen Untersuchungen zu den Transferfaktoren Boden-Pflanze des Urans in Abhängigkeit von dessen chemischem Zustand unter umweltrelevanten Bedingungen.

Ein wissenschaftlicher Schwerpunkt im Berichtszeitraum war das Auswählen einer cha-

rakteristischen Halde des Uranerzbergbaues, an der erste praktische Vermessungen durchgeführt wurden. Vom Institut initiiert soll vorerst in einer nationalen Kooperation, später erweitert auf internationaler Ebene, eine Halde als praktisches Beispiel für eine interdisziplinäre und anwendungsorientierte Forschung dienen. Insbesondere sind die Fachdisziplinen Radiochemie, Hydrogeologie, Mineralogie, Biochemie, Mikrobiologie und Sicherheitsforschung daran beteiligt. Gegenwärtig wird die „Haberlandhalde“ in Johanngeorgenstadt untersucht. Erst nach Abschluß der orientierenden Vorversuche kann über die Eignung dieser Halde als Beispielobjekt entschieden werden.

Hervorzuheben ist die Einrichtung von zwei neuen Laboratorien für molekularbiologische Arbeiten. In diesen Labors werden moderne molekularbiologische Methoden wie Polymerase-Kettenreaktion und Pulsed-Field Gel-Elektrophorese eingesetzt, um die Analyse der Bakterien durchführen zu können, die aus Halden oder Gruben des Uranerzbergbaues separiert werden und der Gewinnung von Grundlagendaten für Bioremediationsverfahren dienen.

Mit der Installation eines Hochleistungs-FTIR-Spektrometers wurde eine apparative Lücke bei der Identifizierung von Organika und deren Metallkomplexen überwunden.

Das System der laserinduzierten Photoakustikspektroskopie konnte weiter vervollkommen werden. Erstmals wurde mit diesem Lasersystem das Lanthanidelement Holmium im gesamten Spektralbereich seiner Absorption vermessen. Holmium kann als chemisches Analogon für bestimmte Aktinidelemente gelten. Mit herkömmlichen Farbstofflasern ist die Vermessung des Spektrums in diesem engen Raster aufgrund der fehlenden Farbstoffe nicht möglich. Diese Messung diente gleichzeitig der Validierung des Gesamtsystems.

Im Berichtszeitraum wurden erste Ergebnisse erhalten, die auf eine monodentate Kopplung des Urans an die Huminsäure hinweisen. Dieses Ergebnis geht auf EXAFS-Strukturuntersuchungen zurück, die an den Synchrotronanlagen DESY/Hamburg und SSRL/Stanford, USA mit natürlichen und synthetischen Huminsäuren in wäßriger Phase begonnen wurden. Dies ist ein wichtiger Schritt zur Beschreibung der Anbindung des Urans und des Transports mit diesen Stoffen.

Zur Beschreibung des chemischen Zustands

des Urans in umweltrelevanten Wässern werden die Programme EQ 3/6 und HYDRAQL eingesetzt. Der Vergleich mittels laserspektroskopischer Messungen gewonnener Daten der Uranspeziation in Tailingwässern des Uranerzbergbaues mit Modellrechnungen zeigte, daß das Modellierungsprogramm EQ 3/6 bei Verwendung der entsprechenden Programmdatenbanken den chemischen Zustand des Urans in diesen bergbautypischen Wässern genauer beschreibt.

Folgende weitere Forschungsergebnisse sollen herausgehoben werden:

Es konnte erstmalig gezeigt werden, daß durch XANES-Messungen eine qualitative und quantitative In-Situ-Bestimmung der Arsenkomponenten in uran- und anderen schwermetallhaltigen Umweltwässern möglich ist, was mit den klassischen Methoden nicht oder nur eingeschränkt erreicht werden kann.

Untersuchungen zur Komplexbildung des Urans mit Phenolcarbonsäuren, die beim natürlichen Holzligninabbau in gefluteten Uranerzgruben entstehen, ergaben, daß besonders die Urankomplexe mit gebildeter Protocatechusäure einen starken Einfluß auf das Sorptions- und Migrationsverhalten des Urans haben können.

Mittels Photonenkorrelationsspektroskopie und Rasterelektronenmikroskopie konnte die Partikelgröße in Holzextrakten von Bergbaugrubenhölzern bestimmt werden. In diesen Extrakten sind Agglomerate von 100-200 nm neben einem Überschuß von kolloidalen organischen Molekülen (< 20 nm) enthalten. Die exakte Bestimmung der Größenverteilung der Partikel bildet die Basis für die Bewertung des kolloidalen Transportes von Schadstoffen.

Innerhalb der Arbeiten zur Chemie der schwersten Elemente konnte gezeigt werden, daß Seaborgiumoxichlorid schwerer flüchtig als Wolframchlorid ist. Dieses experimentelle Ergebnis beweist die theoretischen Vorhersagen unter Berücksichtigung der relativistischen Effekte.

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Innerhalb der zentrumsübergreifenden Forschungs- und Entwicklungsarbeit steht weiterhin der Aufbau der ROBL-Beam-Line an der ESRF, der in enger Kooperation zwischen dem Institut für Ionenstrahlphysik und Material-

forschung (FWI), dem Institut für Radiochemie (FWR) und der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik (FWF) erfolgt, im Mittelpunkt.

Ein wesentliches Ziel der Zusammenarbeit mit dem Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie (FWB) ist das Gebiet der chemischen Strukturanalyse.

Neben den Methoden der Infrarotspektroskopie und der Nuklearmagnetischen Resonanzspektroskopie sind die gemeinsamen Anstrengungen auf die Röntgenabsorptionstechniken am Synchrotron zur Strukturaufklärung von Rhenium-, Technetium- und Uranverbindungen gerichtet.

Die Bewertung von physiko-chemischen Daten und Modellen hinsichtlich der Beschreibung des Urantransportes in Bergbauhalden ist das Thema der Zusammenarbeit mit dem Institut für Sicherheitsforschung und der Zentralabteilung Analytik (FWA). Gemeinsam wurde eine Datenbank über allgemein zugängliche Programme für die Speziations- und Transportmodellierung, einschließlich der gekoppelten Modelle, angelegt.

Das Programm UNSATCHEM wurde getestet, dokumentiert und partiell erweitert. Dadurch ist z. B. die Speziation und der Transport des Urans in ungesättigten Zonen, wie sie in Bergbauhalden vorliegen, beschreibbar.

Zur Erzeugung von kurzlebigen Molybdän- und Wolframisotopen am Zyklotron U-120 für Modellexperimente zur chemischen Charakterisierung des Seaborgiums ist die enge Kooperation mit der Zentralabteilung Neue Beschleuniger unabdingbar.

In zentrumsübergreifender Arbeitsteilung wurde der Bau des Radiochemischen Laborgebäudes (Nutzer werden die Institute FWB, FWR, FWI und die Zentralabteilung FWA sein) von der Hauptabteilung Technische Infrastruktur und dem Institut für Radiochemie koordiniert. Eine Hauptaufgabe bei der Vorbereitung des inaktiven Betriebes dieses Gebäudes liegt in der Umsetzung der Empfehlungen, die aus dem TÜV-Gutachten, welches mit 8-monatiger Verspätung zum abgesprochenen Termin erstellt wurde, resultieren. Die qualitätsgerechte Zulieferung der technischen Dokumentationen der beteiligten Firmen und die straffe Koordination und Durchführung der Restarbeiten, die sich aus den Empfehlungen ergaben, sind die Bedingungen, um 1997 eine strahlenschutzrechtliche Betriebsgenehmigung zu erlangen.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Voraussetzung für den Aufbau des Radiochemischen Meßplatzes am Strahlrohr ROBL ist die enge Kooperation mit den entsprechenden Mitarbeitern der ESRF, Grenoble bei der Lösung der strahlenschutztechnischen und meßtechnischen Aufgaben.

EXAFS-Untersuchungen zur Komplexierung des Urans in umweltrelevanten Lösungen werden gemeinsam mit der Actinide Chemistry Group des LBNL am SSRL durchgeführt.

Mit russischen Wissenschaftlern der Universität in St. Petersburg wird an der Entwicklung eines Uransensors gearbeitet. Ein wesentliches Ziel der Zusammenarbeit mit dem Institut für Geologie, Lehrstuhl für Hydrologie der TU Bergakademie Freiberg, dem Umweltforschungszentrum Leipzig, Sektion Umweltmikrobiologie und dem Institut für Mikrobiologie der TU Dresden besteht in der umfassenden radio-chemischen, geologischen, hydrogeologischen und mikrobiologischen Charakterisierung einer Halde des ehemaligen Uranerzbergbaus einschließlich der Erarbeitung von Bioremediationsverfahren.

Innerhalb von drei EU-Projekten zu den Themen „Einfluß von Huminstoffen auf den Transport von Radionukliden“, „Erarbeitung von Sanierungsstrategien für radioaktiv belastete Flächen (RESTRAT)“ und „Erarbeitung einer Europäischen Thermodynamischen Datenbasis zur Umweltmodellierung (JETDEM)“ wird mit 16 verschiedenen Instituten aus 7 europäischen Ländern kooperiert.

Der Einfluß von Huminstoffen auf das Migrationsverhalten radioaktiver und nichtradioaktiver Stoffe unter naturnahen Bedingungen ist das Thema der Zusammenarbeit mit dem Institut für Kernchemie der Universität Mainz, der Fachrichtung 11.4 Anorganische, Analytische Chemie und Radiochemie der Universität des Saarlandes und dem Institut für Nukleare Entsorgungstechnik des Forschungszentrums Karlsruhe.

Hervorzuheben ist weiterhin die gemeinsame Bearbeitung des Themas „Ermittlung von Transferfaktoren Boden - Pflanze natürlicher Radionuklide“ mit dem Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik e.V. und dem Institut für Pflanzen- und Holzchemie der TU Dresden.

Die Arbeiten zur Chemie der schwersten Elemente sind in eine internationale Kollaboration integriert, die getragen wird von der GSI Darmstadt, der Universität Mainz, dem PSI Villigen und dem VIK Dubna.

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

- Transportverhalten von Radionukliden in der Bio- und Geosphäre
- Physikalisch-chemische Untersuchungen radioaktiver Kolloide und Aerosole
- Wechselwirkung von Radionukliden mit anthropogenen und natürlichen Organika
- Strukturaufklärung von Radionuklidverbindungen mittels Synchrotronstrahlung
- Chemie der schwersten Elemente

Statistischer Überblick

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		30			Wissenschaftler			12			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	2	2,0	Doktoranden	3	2,8	Gastwissenschaftler	8	0,7	Hilfskräfte	5	1,5
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	12	6,7	Technisches Personal	4	2,2	Stipendiaten			Doktoranden	3	3,0
Gastwissenschaftler	4	0,3	Studentische Hilfskr.	2	0,4						
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		459,3			drittmittelfinanziert			189,9			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Publikationen		21			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			61			
Patentanmeldungen		1			Doktorarbeiten			1			

Abteilungsleiter : Dr. G. Bernhard : Entsorgungs- und Ökoradiochemie
 : Dr. K-H. Heise : Organische Tracerchemie
 : Dr. T. Reich : Synchrotronstrahlungsanwendungen
 : Dr. P. Merker : Kolloide und Aerosole
 : B. Eisold : Radioaktive Arbeitstechniken

Direktor : Prof. Dr. H. Nitsche
 Tel.: (03 51) 260-32 10
 e-mail: H.Nitsche@fz-rossendorf.de

Überblick über die Zielstellung

Die wissenschaftliche Arbeit im Institut für Kern- und Hadronenphysik konzentriert sich auf Untersuchungen komplexer Systeme des Mikrokosmos; eine große Rolle spielen dabei subnukleare (hadronische) Freiheitsgrade in Atomkernen sowie die Struktur der Kerne. Die bei deren theoretischer Behandlung auftretenden quantenmechanischen und Vielteilchenaspekte sind nicht nur für das Verständnis von Hadronen und Kernen wichtig, auch bei der Untersuchung anderer komplexer mesoskopischer Systeme - wie z. B. Metallischen Clustern - konnten analoge theoretische Methoden angewandt werden. Ähnlich werden im experimentellen Bereich Erfahrungen aus der kernphysikalischen Grundlagenforschung an großen Beschleunigern außerhalb des FZR übernommen und eingebracht in biomedizinische Forschungsprojekte sowie in die sich neu ergebenden Forschungsmöglichkeiten an der Strahlungsquelle ELBE. Es stehen hier Konzeptstudien im Vordergrund, vor allem die Strahlungsemission in periodischen Undulatorstrukturen und in kristallinen Festkörpern betreffend. Vielfältige experimentelle Untersuchungen hierzu werden - quasi als Vorbereitung auf die Arbeit an ELBE - an anderen Elektronenbeschleunigern, vor allem an dem supraleitenden Linearbeschleuniger der TH Darmstadt - durchgeführt.

Wichtigste Ergebnisse

Im Zusammenhang mit der Neugliederung des Instituts in die Abteilungen Strahlungsphysik, Kernphysik und Hadronenphysik und wegen der sich durch die Strahlungsquelle ELBE ergebenden neuen Forschungsmöglichkeiten, werden insbesondere im Bereich der Kernphysik verschiedene Projekte zum Abschluß gebracht.

Dies betrifft vor allem die Kernreaktionsstudien und hier insbesondere das Vielteilchenspektrometer FOBOS am VIK Dubna, an dem bisher permanent eine Gruppe des Instituts gearbeitet hat. FOBOS hat nach langwierigen Vorbereitungen und Testreihen im Jahre 1996 aus dem zwischenzeitlich stark verbesserten Zyklotron U400M Ionenstrahlen hinreichender

Qualität erhalten und erfolgreich Messungen mit sehr guter statistischer Signifikanz durchgeführt. In der schwerioneninduzierten Spaltung schwerer Kerne konnte erstmalig der Aufbruch in drei ungefähr gleich große Fragmente beobachtet werden, die offensichtlich aus einer linearen Konfiguration heraus entstehen. Anfang 1997 wird eine weitere FOBOS-Meßreihe mit Ionen anderer Energie durchgeführt werden, kurz bevor die zum VIK entsandten FZR-Mitarbeiter zurückkehren. Die Datenauswertung wird 1998 abgeschlossen, wenn die BMBF-Förderung für dieses Dubna-Projekt ausläuft.

Die Kernspektroskopiegruppe konnte, bedingt durch die sehr enge Kooperation zwischen Theorie und Experiment, trotz einer recht kleinen Mitarbeiterzahl internationale Beachtung erringen: Im Rahmen der europäischen Gammaskopie-Experimentreihe am LNL bei Padua, wo sich auch der über 30 Mio. DM teure EUROBALL-Detektor im Aufbau befindet, wird schon im Februar 1997 ein Rossendorfer Experimentvorschlag zum Studium der magnetischen Rotation von Kernen realisiert. Die weiterführende Untersuchung der Konsequenzen dieses interessanten Phänomens wird unter Beteiligung des Niels-Bohr-Instituts in Kopenhagen erfolgen.

In der Hadronenphysik ist die erfolgreiche Weiterführung des Baus der Nachweisdetektoranordnungen für die TOF- und ANKE-Experimente am Jülicher Synchrotron COSY hervorzuheben (s. Abb. S. 3) sowie die nicht unbedeutende Rossendorfer Beteiligung an den interessanten Experimenten zur Erzeugung seltener Hadronen bei Kern-Kern-Kollisionen, wie sie am Darmstädter Schwerionensynchrotron SIS untersucht wurden. Die beobachteten überraschend hohen Produktionsquerschnitte werden auf die Absenkung der Massen von seltamen Hadronen im nuklearen Medium zurückgeführt; die Übertragung dieses Effektes auf die Situation in einem Neutronenstern läßt einen sehr starken Einfluß auf dessen Dynamik hin zur Supernova erwarten. Bei diesen Experimenten - ebenso wie bei zugehörigen theoretischen Arbeiten - ist das FZR zu einem wichtigen Partner in internationalen Kollaborationen geworden.

Auch bezüglich der Rossendorfer Pläne für die Strahlungsquelle ELBE wurde die Basis für internationale Kooperationen geschaffen: Durch Laborbesuche in den relevanten Instituten in Europa und vor allem durch den im September 1996 am FZR abgehaltenen „ELBE-Workshop“ mit seiner starken Beteiligung aus den USA konnte Erfahrung aus allen wichtigen Freie-Elektronen-Laser-Labors unserem Projekt nutzbar gemacht werden. Die geringe Emittanz des Elektronenstrahls zusammen mit seiner durch die supraleitenden Beschleunigerstrukturen möglichen großen Stabilität und Intensität erlaubt die Erzeugung kohärenter elektromagnetischer Strahlung sehr hoher Brillanz, wodurch ELBE für viele Anwendungen bessere Möglichkeiten eröffnen soll als andere Anlagen. In der jüngst angehaltenen Zentrums-Seminar-Reihe „Strahlungsquelle ELBE“ werden die vielfältigen Möglichkeiten für anwendungsorientierte Forschung eine wichtige Rolle spielen. Zusammen mit den geplanten Nutzertreffen wird so der Grundstein gelegt für die angestrebte besondere Leistungsfähigkeit auch der Experimentierstationen an ELBE.

Auf dem im März 1996 vom Institut in Holzgau organisierten internationalen Workshop wurde die Forschung mit Strahlungsquellen ähnlich ELBE durch mehrere Vorträge - aus den USA, Japan und dem europäischen Ausland - repräsentiert. Daneben wurden auch Themen aus den anderen Bereichen des Instituts - insbesondere der Kernstruktur- und Hadronenphysik - diskutiert. Eine weitere Forschungsaktivität des Instituts, die methodischen Entwicklungen zur Positronen-Emissions-Tomographie (PET), hat im Zusammenhang mit der Schwerionen-Tumorbestrahlung große Beachtung gefunden. Die vom FZR eingebrachte PET-Simultankontrolle konnte kurz nach ihrer Installation am Schwerionensynchrotron in Darmstadt die Positionierung des Therapiestrahls sehr effizient verbessern; sie wird nach den sehr erfolgreich abgeschlossenen vor-klinischen Experimenten daher auch bei dem demnächst anlaufenden explorativen Behandlungsprogramm eine wichtige Rolle spielen.

Die PET-Arbeiten des Instituts wurden ebenso wie Arbeiten aus der Kern- und Hadronenphysik durch das BMBF im Rahmen des Förderprogramms „Komplexe Systeme der Kern- und Hadronenphysik“ stark unterstützt.

Auch in der Diskussion der im Jahre 1997 neu beginnenden Förderperiode durch den vom BMBF eingesetzten Gutachterausschuß wurden mehrere Projekte des Instituts positiv beurteilt, so daß mit Fördermitteln für 6 Doktoranden und 2 Postdoktoranden gerechnet werden kann.

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit des Instituts mit Partnern im Forschungszentrum betrifft in erster Linie die Kooperation mit den Zentralabteilungen Forschungs- und Informationstechnik und Neue Beschleuniger sowie der Hauptabteilung Technische Infrastruktur im Rahmen des Projektes „Strahlungsquelle ELBE“. Im Ergebnis dieser Zusammenarbeit wurden insbesondere die Gebäudekonzeption einschließlich der Gewährleistung des Strahlenschutzes sowie das Raumbedarfsprogramm für die Beantragung entsprechender Genehmigungen bei der obersten Finanzdirektion und dem SMU erarbeitet. Die enge Kooperation drückt sich auch in einer Reihe gemeinsamer Seminare und Arbeitsbesprechungen aus und wird ihren ausführlichen Niederschlag im Jahresbericht des Institutes finden.

Eine thematische Verbindung des Instituts mit dem Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie (FWB) sowie dem Institut für Sicherheitsforschung (FWS) gibt es bei Arbeiten zum Einsatz der Positronen-Emissions-Tomographie. In Zusammenarbeit mit FWB und Partnern aus der Medizin wurde mit dem Design eines PET-Scanners mit hohem räumlichen Auflösungsvermögen für Studien an kleinen Tiermodellen begonnen. Experimentelle Studien zu geeigneten Szintillationsdetektoren wurden im Detektorlabor ausgeführt. Dies betrifft auch die Unterstützung methodischer Arbeiten des Instituts für Sicherheitsforschung zum Einsatz von PET für die Diagnostik in technischen Systemen wie beispielsweise für Dichtemessungen von Schäumen.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Wie schon dargelegt, spielt im Bereich der Kernphysik die internationale Kooperation im Rahmen des EUROBALL-Projektes eine herausragende Rolle. In der Hadronenphysik ist

die Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich, der GSI Darmstadt und mit den an den dortigen Anlagen arbeitenden anderen externen Gruppen sehr wichtig. Die Arbeiten in der Strahlungsphysik und bei der Vorbereitung des ELBE-Projekts haben entschei-

dend profitiert von der engen Zusammenarbeit mit der TH Darmstadt, mit DESY in Hamburg und mit der Stanford University; enge Kontakte zu anderen Instituten mit Elektronenbeschleunigern bestehen und werden weiterentwickelt.

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

- Theorie subatomarer Systeme
- Experimentelle Kernspektroskopie
- Hadronenphysik (Experimentelle Mittlereenergiephysik)
- Schwerionenreaktionen
- Strahlungsphysik
- Entwicklung und Bau von Detektoren

Statistischer Überblick

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		50			Wissenschaftler			22,0			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	5	2,5	Doktoranden	6	4,6	Gastwissenschaftler	28	2	Hilfskräfte	3	0,3
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	14	7,8	Technisches Personal			Stipendiaten	1	0,6	Doktoranden	7	6,7
Gastwissenschaftler	10	1,3									
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		684,9			drittmittelfinanziert			676,8			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Publikationen		62			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			193			

Abteilungsleiter : Prof. Dr. E. Grosse : Schwerionenphysik / Hadronenphysik
 : Dr. F. Dönau : Subatomare Physik / Kernphysik
 : Dr. H. Prade : Experimententechnik / Strahlungsphysik

Direktor : Prof. Dr. E. Grosse
 Tel.: (03 51) 260-22 70
 e-mail: E.Grosse@fz-rossendorf.de

Überblick über die Zielstellung

Die Forschung des Institutes ist auf die Sicherheitsbewertung der Auslegung risikoträchtiger Anlagen gerichtet, auf die Entwicklung von Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen möglicher Störfälle sowie auf die Erhöhung der Betriebssicherheit durch verbesserte Anlagenüberwachung. Untersucht werden gleichermaßen kerntechnische und verfahrenstechnische Einrichtungen.

Zur Analyse der thermofluidodynamischen Phänomene bei Störfallabläufen sind physikalische Modelle und Computercodes für Mehrphasen- und Mehrkomponentenströmungen sowie für die orts- und zeitabhängige Leistungsfreisetzung (Neutronenkinetik bei Leichtwasserreaktoren bzw. Reaktionskinetik für exotherme chemische Reaktionen) zu entwickeln. Die Schwerpunkte liegen auf der Beschreibung räumlich mehrdimensionaler Strömungseffekte und der zeitlichen Veränderung der Strömungsformen. Durch die Entwicklung hochstandfester Zweiphasenmeßtechnik bis hin zur Strömungstomographie ist der Zugang zu solchen Strömungsparametern zu verbessern, die den Impuls-, Energie- und Massenaustausch zwischen den Phasen und Komponenten charakterisieren.

Die Arbeiten zur Materialsicherheit widmen sich dem Verhalten von Werkstoffen unter Neutronen- und Gammabestahlung. Mit Hilfe bruchmechanischer Untersuchungen an bestrahlten und thermisch ausgeheilten Proben sind die Versprödungssuszeptibilität und die Beständigkeit der Ausheilung in Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung zu bestimmen. Die mikrostrukturellen Mechanismen der Bestrahlungsversprödung sollen durch hochauflösende Strukturanalysemethoden aufgeklärt werden.

Um die für solche Versprödungsuntersuchungen benötigten Angaben zu den Strahlungsfluenzen zuverlässig bestimmen zu können, sind hochgenaue Methoden der Strahlungsfeldberechnung zu entwickeln und am Experiment zu validieren.

Ausgehend von den Störfalllasten (Drücke, Temperaturen) und den bruchmechanischen Eigenschaften der sicherheitsrelevanten Komponenten ist die Integrität der Anlagen über strukturdynamische Berechnungen zu bewer-

ten. Dabei müssen die thermischen und mechanischen Wechselwirkungen zwischen den Fluiden und den Komponenten berücksichtigt werden.

Die Arbeiten zur Prozeß- und Anlagendiagnostik stellen grundlegende Verfahren der Fehlerfrüherkennung und Betriebsüberwachung und damit zur Störfallvermeidung bereit.

Neuere Initiativen des Institutes sind bei der Modellierung des Schadstofftransports in der Hydro- und Geosphäre angesiedelt. Besonderes Gewicht liegt dabei auf der Entwicklung von Rechenprogrammen zur Simulation der physikalischen und chemischen Vorgänge beim Transport von Schadstoffen in mit Wasser unvollständig gesättigten Erdzonen.

Wichtigste Ergebnisse

1996 sind wesentliche Schritte zur Konzentration des Forschungsprofils getan worden.

U. a. sind die Arbeiten zu Erneuerbaren Energien zum Jahresende bis auf ein noch laufendes BMBF-Projekt eingestellt worden. Dieses läuft Anfang 1998 ebenfalls aus.

Nach der Bewilligung eines DFG-Innovationskollegs zur Magnetofluiddynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten, an dem die Arbeitsgruppe Magnetohydrodynamik mit 5 Vorhaben beteiligt ist, wurde die Thematik als eigene Abteilung im Institut etabliert. Die Abteilung hat insgesamt 17 Mitarbeiter, davon sind lediglich 2 über den Haushalt des FZR finanziert. Neben dem Innovationskolleg gibt es in dieser Abteilung eine ganze Reihe weiterer Förder- und Industrieprojekte.

Im einzelnen soll auf folgende wissenschaftliche Ergebnisse besonders hingewiesen werden:

Thermofluiddynamik/Neutronenkinetik

Für die Berechnung der Druckentlastung von Rührkesselreaktoren ist ein eindimensionales Modell entwickelt worden, das die Vorgänge im Kessel, der Abblaseleitung und im Sicherheitsventil beschreibt. Durch Rechnung und Experiment konnte gezeigt werden, daß bei ungünstigen geometrischen Verhältnissen star-

ke Schwankungen des ausgetragenen Massenstromes auftreten können.

Die Version des Rossendorfer Neutronenkinetik-Codes DYN3D/R für westliche Leichtwasserreaktoren ist inzwischen verfügbar und teilweise validiert worden.

Benchmarkrechnungen liegen für Regelstabauswürfe bei Druckwasserreaktoren und für Unterkühlungstransienten von Siedewasserreaktoren vor.

Thermofluiddynamische Einzeleffekte

Anhand einer einfachen Modellreaktion konnte gezeigt werden, daß die bei einer Druckentlastung aus einem chemischen Reaktor ausgetragene Masse sehr empfindlich von der Beimengung geringster Mengen an Tensiden abhängt. Diese Experimente bilden die Grundlage von Detailuntersuchungen zur Kinetik von Schäumen und Schaumströmungen.

Das Institut hat mit seiner fortgeschrittenen Zweiphasenmeßtechnik an Experimenten in Jülich zur Auslegung eines Notkondensators für neue Siedewasserreaktoren teilgenommen und ausgewählte Experimente erstmals mit einem 3-dimensionalen Fluidodynamikprogramm nachgerechnet. Die Rechnung liefert übereinstimmend mit dem Experiment im Einphasenbereich eine ausgeprägte Temperaturschichtung unterhalb des Wärmeübertragerbündels im Flutbecken.

Materialsicherheit

Der Aufbau eines Radionuklidlabors zur Prüfung bestrahlter Reaktorwerkstoffe konnte bis Jahresende weitgehend abgeschlossen werden, so daß mit der Erteilung der Betriebsgenehmigung für das 1. Halbjahr 1997 gerechnet werden darf.

Die Strukturanalysen mit Röntgen- und Neutronenkleinwinkelstreuung haben einen anerkannten Stand erreicht. Bei einigen Reaktorstählen erhöht die Bestrahlung vor allem die Zahl kleiner Ausscheidungen mit einem Durchmesser von 2 - 4 nm. Die Anzahldichte eines weiteren Ausscheidungstyps mit größerem Durchmesser wird durch die Bestrahlung nicht beeinflußt. Die Arbeiten haben Interesse im ORNL gefunden, das Proben von ASTM-Stählen zur Analyse nach Rossendorf gegeben hat.

Angewandte Entscheidungsanalyse

Das Entscheidungsanalysemodell zur Auswahl von Sanierungsmethoden ist am Fall einer Deponiealtlast in Bergen/Lausitz erprobt worden. Defizite der Entscheidungsanalyse,

die bei der Anwendung festgestellt wurden, sind durch wesentliche methodische Erweiterungen behoben worden. Ein Beispiel hierfür ist die Behandlung iterativer Entscheidungsabläufe durch rekursive Handlungsnetzwerke.

Zentrumsübergreifende Zusammenarbeit

Seit 1996 verfolgen die Institute für Radiochemie (FWR) und Sicherheitsforschung (FWS) ein gemeinsames Vorhaben zur Modellierung der Migration von natürlichen Radionukliden in Uranbergbauhalden.

Im Institut für Sicherheitsforschung ist bislang ein Programm zur Berechnung des Wassertransports in ungesättigten Zonen entwickelt worden, das derzeit verifiziert wird. FWR ermittelt die wichtigsten Schwermetallspezies, deren Reaktionen in einem zweiten Schritt in das Transportprogramm einzubauen sind.

Auf dem Gebiet der Materialsicherheit gibt es eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung (FWI). Ionenstrahlmodifizierte Oberflächen werden bei FWS auf Verschleißfestigkeit geprüft. Hierfür steht ein Ultraschall-Kavitationsprüfstand zur Verfügung.

Die bereits früher begonnen Kooperationen mit dem Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie bzw. mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik zur Leichionentumorthherapie und zur technischen Nutzung von PET werden fortgeführt.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Die Arbeiten zu Mikrostrukturuntersuchungen strahlungs- und verformungsgeschädigter Werkstoffe mit Kleinwinkelstreuverfahren hängen in besonderer Weise von stabilen Kooperationen ab. Die Analysen zur Größenverteilung der strahlungsinduzierten Gefügeausscheidungen sind an einem Strahlrohr des Forschungsreaktors FRJ-2 in Jülich durchgeführt worden. Seit 1996 wird auch die MICROFOCUS-Beamline der ESRF Grenoble genutzt, um die verformungsinduzierten Gefügeveränderungen vor der Spitze eines Risses im Gefüge aufzudecken.

Im Berichtszeitraum hat das Institut eine Zusammenarbeit mit dem IRS des FZ Jülich zu passiven Komponenten fortgeschrittener Siedewasserreaktoren (SWR) begonnen. Rossendorf unterstützt die Jülicher Experimente

zum Notkondensator (NOKO) durch Meßtechnik und theoretische Analysen der Konvektionsströmungen im Flutbecken des NOKO. Diese Kooperation hat dazu geführt, daß das Institut ab Anfang 1997 an einer konzertierten Forschungsaktion der EU zu Sicherheitsaspekten von SWR beteiligt sein wird.

Im Bereich der chemischen Sicherheitsforschung konnte eine dauerhafte Kooperation mit dem UMSICHT-Institut Oberhausen aufgebaut werden. Zwei BMBF-Vorhaben zu Druckschlägen in chemischen Apparaten und

zur Früherkennung gefährlicher Betriebszustände bearbeiten UMSICHT und FZR im Verbund.

Eine sehr erfreuliche Entwicklung gibt es bei der Zusammenarbeit mit der Industrie. Dies gilt sowohl für die Reaktorsicherheit (VGB, HEW) als auch für die chemische Verfahrenstechnik (UHDE GmbH). 8% des gesamten Budgets des Institutes wurden 1996 aus Forschungsaufträgen finanziert; dies sind größtenteils Mittel der Industrie.

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

- Thermohydraulik- und Neutronenkinetikcodes für die Störfallanalyse
- Experimentelle Untersuchung sicherheitsrelevanter thermofluidynamischer Effekte in Zweiphasenströmungen
- Materialsicherheit
- Mechanische Integrität technischer Systeme und Prozeßüberwachung
- Simulation von Teilchen- und Strahlungsfeldern
- Angewandte Entscheidungsanalyse und Risikobewertung
- Erneuerbare Energien

Statistischer Überblick

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		50			Wissenschaftler			16,0			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	4	2,2	Doktoranden	7	5,6	Gastwissenschaftler	21	2	Hilfskräfte	5	2,3
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	36	26,9	Technisches Personal	4	4,0	Stipendiaten	2	0,7	Doktoranden	4	2,5
Gastwissenschaftler	62	2,6	Forschungs-ABM	5	3,3	Studentische Hilfskr.	5	3,6			
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		765,1			drittmittelfinanziert			271,1			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Publikationen		63			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			38			
Seminare		21			Meetings/workshops			7			
Patentanmeldungen		4									

Abteilungsleiter : Dr. H.-M. Prasser : Störfallanalyse
 : Dr. J. Böhmert : Neutronenversprödung
 : Dr. K. Noack : Teilchen- und Strahlungstransport
 : Prof. Dr. F.-P. Weiß : Mechanische Integrität

Direktor : Prof. Dr. F.-P. Weiß
 Tel.: (03 51) 260-34 80
 e-mail: F.P.Weiss@fz-rossendorf.de

ZENTRALABTEILUNG FORSCHUNGS- UND INFORMATIONSTECHNIK

Überblick über die Zielstellung

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

- Meßtechnik
(sensornahе Hardware, Meßmethodik)
- Informationstechnik
(Instrumentierungssysteme, Rechentechnik, Softwareentwicklung)
- Mechanische Entwicklung
(Konstruktion, Projektierung)

Daneben gibt es eine Gruppe für mechanische Technologie mit einer leistungsstarken Versuchswerkstatt.

Schwerpunkte bildeten im Jahre 1996 die Arbeiten zur Rossendorfer Beamline ROBL, die an der ESRF in Grenoble errichtet wird, Arbeiten für das Materialprüflabor, Entwicklungsarbeiten für den Tandembeschleuniger und die Arbeiten am 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

EUROBALL

Für die EUROBALL-Kollaboration wurden die Arbeiten an der Nachweiselektronik des Clusterdetektors weitergeführt. Der in Rossendorf zu entwickelnde Modul beinhaltet die Elektronik für die Verarbeitung der Signale der 18 BGO-Kristalle des Detektorschirmes aus Wismut-Germanat. Nachdem im Jahre 1995 der Prototyp im Labor erfolgreich getestet wurde, werden nun Tests zusammen mit dem VXI-Modul für die Ge-Kristalle (Entwicklung erfolgte in Daresbury) und der im EUROBALL-

Projekt vorgesehenen Datenerfassung durchgeführt. Parallel dazu wurden 18 Module für den EUROBALL-Detektor aufgebaut und bis Ende des Jahres 13 Module getestet und in Legarno installiert.

Werkstoffprüflabor

1996 wurde die 1. Ausbaustufe des Werkstoffprüflabors (Institut für Sicherheitsforschung) konzipiert und aufgebaut. Es wurden wesentliche Komponenten für die Steuerung der Prüfprozesse sowie diverse mechanische Baugruppen (Probenpositionierer, Clipvorrichtung, Probenbrecher usw.) entwickelt und gefertigt. Bei der Umsetzung von TÜV-Empfehlungen wurde mitgearbeitet.

Begonnen wurden die Arbeiten an der 2. Ausbaustufe, dem Präparations-Labor des Labors für Werkstoffuntersuchungen.

Tandem-Beschleuniger

Am Tandem-Beschleuniger wurden die Steuerregler rekonstruiert und ein neuer Feldregleranschluß konzipiert. Es entstand der Entwurf für die Hilfsspulen der SIMATIC-Steuerung. Die Tandeminstrumentierung wurde 1996 weitergeführt.

PET-Zentrum

Nach der TÜV-Abnahme des Aktivitätstransportsystems im Januar 1996 konzentrierte sich die Arbeit auf die Erprobung und Verbesserung des Systems sowie auf das Training der Mitarbeiter. Die Entwicklung eigener Synthese-einheiten wurde mit dem Aufbau des Steuersystems und der Prozeßvisualisierung mit einem neuen Programm der Methyliodidanlage begonnen.

Inspektionsmolch für Pipelines

In Zusammenarbeit mit der Pipetronix GmbH Karlsruhe wurde ein Inspektionsmolch für die Rißprüfung in erdverlegten Rohrfernleitungen entwickelt und als Prototyp aufgebaut. Das FZR entwickelte dafür ein speziell angepaßtes Wirbelstrom-Prüfverfahren einschließlich Sensorik und Front-End-Elektronik. Die Zulassung des Verfahrens für Pipelineprüfungen erfolgte im Mai 1995 nach eingehender Begutachtung durch den TÜV. Algorithmen für die

Visualisierung und Interpretation der Meßdaten wurden entwickelt und in einem anwenderorientierten Programmsystem umgesetzt. Mittels vollautomatischer Detektion und Klassifikation relevanter Anzeigen konnte der Zeitbedarf für die Datenauswertung drastisch gesenkt werden. Es wurden mehrere Testläufe sowie erste Kundeneinsätze absolviert. Zur Weiterentwicklung des Prüfverfahrens liefen Untersuchungen über die Möglichkeiten der Korrosionsprüfung sowie der Prüfung auf verdeckte Fehler in Pipelinerohren.

ROBL

Die Projektierungs- und Entwicklungsarbeiten für das Beamline-Kontrollsystem und die Datenerfassung wurden weitergeführt. Es wurden die Aufgabenstellungen für die Elektroinstallation und für das Interlocksystem erarbeitet und abgestimmt.

Der Gesamtaufbau der Elektronik wurde entworfen und die Installation und Inbetriebnahme vorbereitet einschließlich der Vorarbeiten für das Kabelprojekt.

Experiment ANKE

Im ersten Halbjahr wurde der von Rutherford Lab neu entwickelte Chip RAL170 (Musterlieferung 04/96) zunächst im Labor, dann an der Rossendorfer Kammer auf seine Eigenschaften und Verwendungsfähigkeit für das Experiment ANKE getestet. Testboards wurden auch nach Jülich und Dubna geliefert. Es stellte sich heraus, daß die gewählte Struktur des Chips (Ladungsverstärker) viele Probleme mit sich bringt, die den Einsatz an der Rossendorfer Kammer nur unter erhöhtem Aufwand zuläßt. Für die Auswertung der schnellen Signale der Dubna-Kammer ist der Chip nicht geeignet.

Es folgte der Versuch, den Analogpart des Chip-Sets RAL170-RAL111 durch eine Stromverstärker-Anordnung zu ersetzen. Messungen an einer Kammer in Jülich im Sommer bestätigten die Brauchbarkeit dieser Lösung, die jedoch nicht weiter verfolgt wurde, nachdem 10/96 von Rutherford Lab alternativ der Chip RAL118 angeboten wurde. Bei diesem Chip handelt es sich um eine Stromverstärker-Anordnung; er ist schneller und empfindlicher im Vergleich zum RAL170. Wiederum wurden Testboards nach Jülich und Dubna geliefert. Die Untersuchungen an den Kammern werden voraussichtlich 03/97 beendet.

Projekt ELBE-Strahlungsquelle

Die Abteilung war an den Ergebnissen der Projektgruppe maßgeblich beteiligt (siehe Seite 95).

Werkstattarbeiten

Die Werkstatt war an den Projekten ELBE-Strahlungsquelle, ROBL, EUROBALL und Werkstoffprüflabor beteiligt.

Außerdem wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- 83 Aufträge von verschiedenen Auftraggebern des FZR kleineren und mittleren Umfangs in allen Gewerken der Werkstatt, die keinen der o.g. Projekte zugeordnet werden können
- Herstellung einer Linsenjustiervorrichtung (FWI)
- Herstellung Clustersystem (FWI)
- Herstellung von Meßköpfen für Detektoren BASE 1-60 (FWK)
- Herstellung von Gittersensoren (FWS)
- Herstellung verschiedener Sonden und Zubehör (FWS)

Statistischer Überblick

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		52			Wissenschaftler			11,0			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc		Doktoranden	1	0,9	Gastwissenschaftler	2	0	Hilfskräfte	4	0,5	
Geräteinvestitionen [TDM]											
grundfinanziert		689,2			drittmittelfinanziert			14,5			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Publikationen		9			Konferenzbeiträge/Poster			12			

Abteilungsleiter : Dr. F. Gabriel
 Tel.: (03 51) 260-31 09
 e-mail: F.Gabriel@fz-rossendorf.de

ZENTRALABTEILUNG ANALYTIK

Überblick über die Zielstellung

Die Zentralabteilung Analytik als Teil der wissenschaftlichen Infrastruktur führte für die Institute des FZR zahlreiche verschiedenartige Untersuchungen mit chemischen, radiochemischen und festkörperphysikalischen Methoden durch. Aus den gesetzlichen Erfordernissen des Umwelt- und Strahlenschutzes am Standort Rossendorf ergab sich ein weiterer wesentlicher Teil der Aufgaben. Darüber hinaus wurden auch Leistungen für Anwender außerhalb des FZR erbracht.

Wichtigste Ergebnisse

Die Elementanalytik setzte ihr methodisches Potential (ICP-Massenspektrometrie und Atomabsorptionsspektrometrie, verbunden mit einer Palette von Aufschlußverfahren) für zahlreiche Analysen der verschiedensten Probenmaterialien ein. Schwerpunkte dabei sind umfangreiche Untersuchungen im Zusammenhang mit Forschungsthemen insbesondere des Institutes für Radiochemie sowie Analysen umweltrelevanter Proben für die Umgebungsüberwachung bzw. in Verbindung mit Entsorgungsaufgaben. Zum großen Teil handelt es sich nicht um Routinemessungen, sondern um Untersuchungsreihen mit neuartigen analytischen Problemstellungen, die methodische Entwicklungsarbeiten erfordern. Für die Komponentenanalytik wurde im Berichtszeitraum ein automatisiertes Gerätesystem zur Bestimmung von organisch und anorganisch gebundenem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff (TOC/TN - Analysator) in Betrieb genommen. Insbesondere das Institut für Radiochemie und die Umgebungsüberwachung

nutzen intensiv die neuen Möglichkeiten. Weiterhin gestattet jetzt ein neues Mikro-Aufschlußsystem die Bestimmung von Fluor, Chlor, Brom, Iod und Schwefel in sehr kleinen Mengen organischer Substanzen.

Die erfolgreiche Teilnahme an mehreren Ringversuchen als Bestandteil der Qualitätssicherung bestätigte die Richtigkeit der angewendeten Methoden der Element- und Komponentenanalytik.

Hauptauftraggeber für strukturanalytische Untersuchungen (Rasterelektronenmikroskopie und Metallographie) waren die Institute für Ionenstrahlphysik und Materialforschung (z. B. implantierte Schichten in Si und SiN), für Radiochemie (Aerosolpartikel) und für Sicherheitsforschung (Kerbschlagbiegeproben).

Methodische Arbeiten waren auf die Ermittlung der Leistungsfähigkeit des vorhandenen Mikroanalysesystems im Bereich leichter Elemente gerichtet.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Neben der Durchführung von Analysen für externe Auftraggeber auf kommerzieller Basis besteht ein enger Kontakt auf dem Gebiet der Elementanalytik mit den entsprechenden Arbeitsgruppen des Sächsischen Landesamtes für Geologie und Umwelt sowie der Landesuntersuchungsanstalt für Gesundheits- und Veterinärwesen. Dabei stehen der Erfahrungsaustausch, Vergleichsmessungen und die Untersuchung von Standards im Mittelpunkt. Weiterhin gibt es eine Zusammenarbeit bei der Mikrobereichsanalyse am Rasterelektronenmikroskop mit dem Institut für Anorganische Chemie der TU Dresden.

Statistischer Überblick

Mitarbeiter [Planstellen]			
Gesamt	12	Wissenschaftler	4,0
Geräteinvestitionen [TDM]			
grundfinanziert	192,3		

Abteilungsleiter : Dr. K. Krogner
Tel.: (03 51) 260-31 33
e-mail: K.Krogner@fz-rossendorf.de

ZENTRALABTEILUNG NEUE BESCHLEUNIGER

Überblick über die Zielstellung

Die Zentralabteilung Neue Beschleuniger hat als Teil der wissenschaftlichen Infrastruktur die Aufgabe, Projektierungs- und Entwicklungsarbeiten für das Projekt der ELBE-Strahlungsquelle durchzuführen, wie z. B.

- beschleunigungstheoretische Berechnungen und Gun-Entwicklung
- HF-Technik
- Strahlenschutz.

Des Weiteren wird das Zyklotron U-120 für interne und externe Nutzer betrieben und gewartet.

- (n,f)-Reaktionen für Modellexperimente mit dem Gas-Jet zur Chemie der schwersten Elemente (FZR/Institut für Radiochemie; TU Dresden)
- Nuklidherstellung für Modellexperimente mit Molybdän- und Wolfram-Isotopen zur chemischen Charakterisierung des Elementes 106 (FZR/Institut für Radiochemie; internationale Kollaboration)
- Aktivierungen zur Untersuchung von Gitterfehlbesetzungen in ternären Halbleitermaterialien (TU BA Freiberg)
- Dünnschichtaktivierungen für Verschleißuntersuchungen (überregionale Auftraggeber).

Wichtigste Ergebnisse

ELBE-Projekt

Die Abteilung war an den Ergebnissen der Projektgruppe maßgeblich beteiligt (siehe Seite 95).

Betrieb des Zyklotrons U-120

Die Hauptanwendungen waren:

- Herstellen kurzlebiger PET-Nuklide für die radiochemische Forschung und diagnostische Anwendung am Patienten (FZR/Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie; Rossendorfer PET-Zentrum)
- Herstellen von ^{211}At und $^{94\text{g,m}}\text{Tc}$ für die medizinische Forschung (FZR/Institut für Radiochemie; TU Dresden; Universität Leipzig)

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Im Rahmen des ELBE-Projektes wurde mit den Instituten Stanford FEL Center, DESY Hamburg, TH Darmstadt und Budker-Institut Novosibirsk eng zusammengearbeitet.

Da in den neuen Bundesländern die Zyklotrontechnik nur in Rossendorf angesiedelt ist, wird diese Technik neben Wissenschaftlern des FZR auch gern von externen Forschergruppen in Anspruch genommen. Bei der Herstellung von ^{211}At z. B. bahnt sich die Erweiterung der wissenschaftlichen Kooperation mit der Medizinischen Fakultät der TU Dresden und dem Institut für Radiochemie durch Einbeziehen des Institutes für Strahlungsphysik der Universität Göteborg an. Voraussetzung für die Herstellung von ^{211}At ist der Strahl beschleunigter α -Teilchen des Zyklotrons U-120.

Statistischer Überblick

Mitarbeiter [Planstellen]										
Gesamt		10			Wissenschaftler			3		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]										
Postdoc		Doktoranden	1	1,0	Gastwissenschaftler		Hilfskräfte	1	0,1	
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]										
Gastwissenschaftler	6	0,2								
Geräteinvestitionen [TDM]										
grundfinanziert	128,2			drittmittelfinanziert						
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]										
Publikationen		4			Vorträge			5		

Abteilungsleiter : Dr. H. Guratzsch
 Tel.: (03 51) 260-32 83
 e-mail: H.Guratzsch@fz-rossendorf.de

ABTEILUNG KOMMUNIKATION UND DATENVERARBEITUNG

Überblick über die Zielstellung

Die Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung ist als Teil der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur für Planung, Koordination und Betrieb der Informatik-Infrastruktur am Forschungsstandort Rossendorf zuständig. Zu ihren Aufgaben gehören der Betrieb der Zentralen Server, der Benutzerservice auf den Gebieten Numerik, Programmierung, Visualisierung und Textsysteme sowie die Koordination der PC-Software für den Forschungsstandort. Hinzu kommen Planung, Ausbau und Betreuung des Datennetzes am Forschungsstandort sowie dessen Anbindung an das Wissenschaftsnetz (WIN).

Wichtigste Ergebnisse

Die zentralen Server wurden 1996 um die Workstations IBM RS/6000 Mod. 591 und HP 9000/715 ergänzt. Auf der neuen IBM-Maschine steht das Datenbankmanagementsystem Oracle 7 u. a. für ein campusweites Informationssystem zur Verfügung. Ein Windows-NT-Server ermöglicht, Windows-Anwendungen über WinDD von X-Terminals aus zu nutzen. Gegenwärtig sind 590 Nutzer an den zentralen Servern eingetragen. Die Technologie der Video-

erstellung wurde weiterentwickelt und bei der Erzeugung wissenschaftlicher Videos eingesetzt. Die Herstellung von Druckvorlagen und Vortragsfolien am Farbdrucker (über Netz) hat sich zu einem zentrumsweit genutzten Dienst entwickelt. Neben dem Ausbau des lokalen Datennetzes auf gegenwärtig über 900 aktive Anschlüsse wurden Arbeiten durchgeführt zur Einführung innovativer Netztechnologien. Des weiteren gelang durch Lastanalysen, Umstrukturierung und Lasttrennung eine Durchsatzverbesserung stark belasteter Netzabschnitte. Mit Einführung des Software-Produkts SAMBA konnte der Zugriff von PC-Netzen auf UNIX-Dateien stabilisiert und vereinfacht werden. Der Benutzerservice unterstützte die Anwender auf den Gebieten Numerik, Programmierung, Visualisierung, Textverarbeitung und Systemnutzung. Er erschloß neue Software-Produkte, u. a. Systeme der Computeralgebra (MAPLE) sowie der Textverarbeitung und machte die Nutzer mit deren Anwendung bekannt. Zentrale Aufgabe ist die Einführung des parallelen Rechnens durch Erschließung neuer Tools, Programmanalysen und Nutzerberatungen. Für die dezentrale PC-Technik beschaffte der Benutzerservice im Berichtszeitraum 758 Software-Produkte im Wert von insgesamt 680 TDM.

Statistischer Überblick

Mitarbeiter [Planstellen]													
Gesamt		15			Wissenschaftler			5					
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]													
Postdoc		Doktoranden		1	0,9	Gastwissenschaftler		5	0	Hilfskräfte		7	2,8
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]													
Gastwissenschaftler		1	0,1										
Geräteinvestitionen [TDM]													
grundfinanziert		235,1			drittmittelfinanziert								
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]													
Publikationen		1			Vorträge			3					

Abteilungsleiter : Dr. R. Fülle
 Tel.: (03 51) 260-32 64
 e-mail: R.Fuelle@fz-rossendorf.de

PROJEKTGRUPPE ESRF-BEAM-LINE

Überblick über die Zielstellung

Die Projektgruppe verfolgt das Ziel, an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle (ESRF) in Grenoble ein Strahlrohr am Ablenkmagneten BM20 für die Nutzung durch das FZR aufzubauen (Projekt ROBL). Es sind 2 Experimenthütten für folgende Aufgabenstellungen vorgesehen:

- radiochemische Untersuchungen mit Röntgenabsorptionsspektroskopie
- Strukturuntersuchungen an Schichten, Schmelzen und Kristallen mit Diffraktometrie

Wichtigste Ergebnisse

Der offizielle Vertrag zwischen der ESRF und dem FZR zur Einrichtung der CRG (Collaborating Research Group) wurde zum Jahreswechsel 1995/96 unterzeichnet.

Im Mai begann der Aufbau der Beamline-Struktur. Es wurden die bleiabgeschirmten Meßhütten und die Kontrollkabinen errichtet sowie die Installation von Kraftstrom, Licht, Gas- und Wasserrohren durchgeführt. Entsprechend den Sicherheitsanforderungen wurden das Ventilationssystem und die Fortluftüberwachung für das Radiochemieexperiment spezifiziert und in Auftrag gegeben bzw. entsprechende Komponenten beschafft. Seit Mai/Juni 1996 sind 2 Wissenschaftler des

FZR permanent bei der ESRF tätig. Sie konnten im September die eigenen Büro- und Laborräume beziehen.

Das gesamte Optik- und Vakuumsystem wurde bei Firmen in Auftrag gegeben. Die detaillierten technischen Spezifikationen wurden erarbeitet bzw. abgestimmt. Die Entwicklung des zugehörigen Kontrollsystems erfolgt in Rossendorf.

Für den Radiochemiemeßplatz wurde die Erarbeitung der endgültigen Konzeption abgeschlossen und mit den Konstruktions- und Beschaffungsarbeiten begonnen.

Die Grundausüstung des Materialforschungsmeßplatzes (Goniometer, Szintillationsdetektor, Hochtemperaturkammer) konnte erworben werden.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Hauptpartner der Projektgruppe ist die ESRF. Sie unterstützt den Aufbau der Beamline durch aktive Beratung in technischen Fragen. Interne Dokumentationen und technische Zeichnungen sind uns zugänglich und wurden für Teilaufgaben intensiv genutzt. Die Inanspruchnahme der Infrastruktur der ESRF ist teilweise kostenpflichtig, wobei die Sätze für alle externen Gruppen einheitlich geregelt sind.

Statistischer Überblick

Mitarbeiter am Projekt [beteiligte Mitarbeiter]			
Gesamt		19	Wissenschaftler 10
Postdoc	2		
Investitionen [TDM]			
grundfinanziert		4490,7	drittmittelfinanziert
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]			
Publikationen		5	Vorträge 3

Die Projektgruppe setzt sich überwiegend aus Mitarbeitern des Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung, des Instituts für Radiochemie sowie der Zentralabteilung Forschungs-

und Informationstechnik zusammen. Die Mitarbeiter sind in der Regel nur für einen Teil ihrer Arbeitszeit in der Projektgruppe tätig.

Leiter : Dr. W. Matz

PROJEKTGRUPPE ELBE-QUELLE

Überblick über die Zielstellung

Die Projektgruppe verfolgt das Ziel, am Forschungsstandort Rossendorf einen supraleitenden 20 MeV Elektronenbeschleuniger mit hoher Brillanz und niedriger Emittanz (ELBE) u.a. mit einem Freie-Elektronen-Laser (FEL) für den Infrarotbereich aufzubauen. Für die Nutzung der FEL-Strahlung wird eine User Facility eingerichtet werden, so daß 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 Positronen und Neutronen für Materialuntersuchungen (TU Dresden) ist geplant.

Wichtigste Ergebnisse

cw-Injektor-Versuchsaufbau

Der gesamte mechanische und elektronische Aufbau des Versuchstandes für die cw-Injektor wurde bis zum Sommer 1996 fertiggestellt. Das beinhaltet u.a. die 300 kV und 60 kV Hochspannungsversorgung, die 300 kV elektronische Beschleunigungs-Strecke, diverse Netzteile für die Strahldiagnostik (Dipole, Linsen, Steerer ...), zwei Hochfrequenzversorgungen (1,3 GHz, 100 W), die Präzisionsmechanik für die Glühkathodenjustage, ein komplettes Hochvakuumsystem incl. Massenspektrometer für die Restgasdiagnose, die Strahldiagnostik für Strahlanlage, Strahlstrom, Strahlprofil und Emittanz, das Strahlenschutzsystem (Meßtechnik, massive Abschirmvorrichtungen), das Interlocksystem sowie die komplette Steuerungs- und Regelungselektronik für alle o.g. Komponenten (auf Basis von SIMATIC) einschließlich der dazugehörigen Software und eine spezielle Auswertesoftware für die Strahldiagnose. Im 2. Halbjahr erfolgte die schrittweise Inbetriebnahme der Gun. Mit einer LaB₆-Kathode (Durchmesser 150 µm) wurden Energiebreite (≤ 10 keV) und Emittanz (normierte Emittanz $\epsilon_n = 0,2 \pi$ mm mrad) des Elektronen-Strahles durch Auswertung der Übergangsstrahlung gemessen. Die Resultate befinden sich in guter Übereinstimmung mit

den vorausgehenden theoretischen Betrachtungen. Die Entwicklung und der Aufbau einer Bunchlängenmessung wurden begonnen. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Budker-Institut in Novosibirsk zur Entwicklung einer supraleitenden lasergepulsten HF-Elektronenquelle wurde die Konstruktion des Versuchsresonators abgeschlossen. Erste Tests sind für Mitte 1997 geplant.

Arbeiten zum Gesamtaufbau der ELBE-Strahlungsquelle

Das Raumbedarfsprogramm für die Beschleunigerhalle wurde fertiggestellt und an die OFD eingereicht.

Für den Antrag auf Errichtungsgenehmigung wurden Rechnungen zum Strahlenschutz durchgeführt. Wesentliche Teile der Konstruktionsarbeiten zum Kryostaten für die supraleitenden Kavitäten einschließlich des Tuningsystems wurden realisiert. Für den Montage- und Reinraum wurden erste konzeptionelle Arbeiten begonnen. Des weiteren erfolgte die vertragliche Bindung für die Entwicklung bzw. Lieferung wesentlicher Hauptkomponenten (He-Kälteanlage, supraleitende Kavitäten, Klystrons und deren Hochspannungsnetzteile).

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Der schnelle Fortschritt bei der Entwicklung des Elektronenbeschleunigers als auch die Entwicklung des FEL sind ohne die umfangreiche Unterstützung externer Partner aus den verschiedensten Fachgebieten undenkbar. Aus der Vielzahl dieser Partner können hier nur einige genannt werden:

- TH Darmstadt, Institut für Kernphysik
- DESY Hamburg, Tesla-Projekt
- Universität Stanford, HEPL (Kalifornien, USA)
- CEBAF (Virginia, USA)
- Universität Mainz, Institut für Kernphysik
- Universität Bonn, Physikalisches Institut
- Universität Bonn, Geodätisches Institut
- Universität Dortmund, Fachbereich Physik
- Budger-Institut Novosibirsk

Statistischer Überblick

Die Projektgruppe setzt sich überwiegend aus Mitarbeitern der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik, des Instituts für Kern- und Hadronenphysik sowie der Zentralab-

teilung Neue Beschleuniger zusammen. Die Mitarbeiter sind in der Regel nur zu einem Teil ihrer Arbeitszeit für die Projektgruppe tätig.

Mitarbeiter [am Projekt beteiligte Mitarbeiter]				
Gesamt		28	Wissenschaftler	13
Postdoc	3			
Investitionen [TDM]				
grundfinanziert		3.960,7	drittmittelfinanziert	
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]				
Publikationen/Vorträge		3		

Leiter : Dr. F. Gabriel

ADMINISTRATIVE UND TECHNISCHE INFRASTRUKTUR

Die administrativ-technische Infrastruktur des Forschungszentrums Rossendorf umfaßt die Bereiche Finanz- und Rechnungswesen, Personal- und Sozialwesen, Technische Infrastruktur, Recht, Patente, Liegenschaften, Einkauf und Materialwirtschaft, Allgemeine Dienste sowie die Projektträgerschaften Energie und Umwelt.

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Kenndaten der finanziellen Ausstattung des FZR im Jahr 1996 gegeben.

Übersicht der Grundfinanzierung einschließlich von Sonderzuwendungen, Projektfördermitteln und Forschungsverträgen

	TDM	TDM	TDM
Betriebsausgaben			
Personalausgaben			
Vergütung der Angestellten und Arbeiter	33.145,4		
Annexpersonal	2.750,5		
Nebenamtlich u. -beruflich Tätige	198,6		
Sonstige	73,0	36.167,5	
Sächliche Verwaltungsaufgaben			
Bewirtschaftung	6.387,0		
Instandhaltung	4.165,2		
Verbrauchsmittel	3.009,0		
Objektsicherung	1.663,3		
Sonstiges	5.880,7	21.105,2	57.272,7
Investitionen			
Ausbauprogramm			
Sanierung u. Ausbau Gebäude sowie technische Infrastruktur	9.813,0		
Ausbau Ionenstrahltechnik	6.451,3		
Synchrotron-Meßplatz in Grenoble	4.490,7		
Strahlungsquelle ELBE	3.960,7		
Sonstiges	1.127,0	25.842,9	
Neu- und Ersatzbeschaffungen			
Forschung und Entwicklung	4.089,3		
Infrastruktur und Verwaltung	2.842,3		
Software	251,2	7.182,8	33.025,6
			90.298,3
Projektfördermittel			8.292,0
Forschungsverträge			2.614,8

Neben dem Abschluß der Arbeiten am Neubau Radiochemisches Laborgebäude und am PET-Zentrum Medizin sind die Errichtung eines Anbaues an das Tandemgebäude für die Ionenstrahltechnik und die Vorbereitungsarbeiten für die Errichtung der Strahlungsquelle ELBE zu nennen. Weiterhin sind umfangreiche Sanierungen an Gebäuden, Sanitäreinrichtungen und an der technischen Infrastruktur durchgeführt worden.

Besondere Bedeutung für den Fortgang der Forschungsarbeiten hatten die Rekonstruktion zahlreicher Laboratorien in den Kontrollbereichen.

Die Finanzierung der Ausgaben erfolgte durch die institutionelle Förderung des Bundes und des Freistaates Sachsen zu je 50 % unter Berücksichtigung von Sonderzuwendungen (DM 6,8 Mio.) sowie von eigenen Einnahmen (DM 1,4 Mio.).

Impressum:

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

Telefon: (03 51) 260-0
Telefax: (03 51) 269-04 61
Telex: 32 86 83 fzf d
USt-IdNr.: DE140213784
Internet: <http://www.fz-rossendorf.de>

Fotos: Fotos ohne Quellennachweis stammen
von Mitarbeitern des FZR und dem FZR-Fotoarchiv

Gesamtherstellung: Initial Satz & Grafik Studio, Rossendorf

Als Manuscript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

