

Forschung

für Mensch und Umwelt 2001/2002



FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
Forschung für Mensch und Umwelt 2001/2002

Herausgeber: Vorstand
Redaktion: Dr. Silke Ottow
Schriftenreihe: Wissenschaftlich-Technische Berichte
FZR-349
Januar 2003
ISSN 1437-322X

Impressum:

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

Telefon: (03 51) 260-2450
Telefax: (03 51) 260-2700
E-Mail: kontakt@fz-rossendorf.de
Internet: <http://www.fz-rossendorf.de>

Schriftenreihe: Wissenschaftlich-Technische Berichte
FZR-349
Januar 2003
ISSN 1437-322X

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

Gesamtherstellung: Initial Satz & Grafik Studio, Rossendorf

Als Manuscript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

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

EINLEITUNG



Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Vorwort	7
Ereignisse	9
Ausgezeichnete Arbeiten	11
Beständigkeit in der Berufsausbildung: FZR erhält IHK-Preis	14
... und erstmals strahlt die ELBE	14
Brillantes Forschungsgerät eingeweiht	15
Hohe Magnetfelder im FZR	16
Sonderforschungsbereich MHD genehmigt	16
Tag der offenen Tür 2001 und 2002	18
Preiswerte Arbeiten von Schülern	18
Nanotech und Biomat auf der Hannover Messe 2001 und 2002	20
In jedem Computer steckt ein Stück Rossendorf – 10 Jahre FZR	23
Lehrerfortbildung 2001/2002	23
Ehrenkolloquium aus Anlass des 65. Geburtstags von Prof. Frank Pobell	24
Präsentation in Brüssel	24
Personalia	25
Konferenzen	25
Besuche	26
Ergebnisse	27
Ein weit verzweigtes Transportsystem	29
Radiomarkierte intelligente Nanomoleküle für die Krebstherapie	
Hydrodynamische Auffahrunfälle	35
Ein einfaches Prinzip zur Vermeidung von Druckstößen in Rohrleitungen	
Sicherheit durch Vermischung	39
Experimentelle Untersuchung der Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren	
Die ELBE-Quelle in Rossendorf?	43
Ein Elektronenbeschleuniger zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung	
Ionenstrahlen werden sichtbar	47
Tumorthherapie-Kontrolle mit PET – vom Kohlenstoff zu den Protonen	
Mit Lasern auf Spurensuche	53
Das Verhalten von Actiniden in der Umwelt erforschen	
Winzige Nanoteilchen speichern Ladungen	61
Ein Ansatz für neue nichtflüchtige Halbleiterspeicher	
Wie dünne Schichten wachsen	69
Der Texturentwicklung von Titanitrid im status nascendi zugeschaut	
Daten und Fakten	77
Organigramm	79
Organe und Gremien	80
Überblick 2001/2002	82
Übersicht über die Forschungsschwerpunkte und -vorhaben 2001/2002	83
Übersicht über die institutsübergreifende Zusammenarbeit	84
Überblick	85
Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung IIM	87
Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie IBR	91
Institut für Radiochemie IRC	95
Institut für Sicherheitsforschung IFS	99
Institut für Kern- und Hadronenphysik IKH	103
Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik ZFI	107
Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE ZSE	111
Projektgruppe ESRF-Beam-Line ROBL	115
Projektgruppe ELBE-Quelle ELBE	119
Projektgruppe Hochfeldlabor HLD	123
Administrative und technische Infrastruktur	125

Vorwort

Das Forschungszentrum Rossendorf (FZR) wurde 1992 gegründet und blickt damit auf inzwischen zehn Jahre Forschung mit neuem Profil zurück. Seine Wissenschaftler betreiben anwendungsorientierte Grundlagenforschung mit den Schwerpunkten Materialforschung, Biochemie, Biomedizin, Radioökologie, Sicherheitsforschung sowie Kern- und Strahlungsphysik. Den Kern des Forschungszentrums bilden fünf Institute:

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

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

Das FZR ist Mitglied der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz (WGL) und ist mit 600 Mitarbeitern und einem Budget von rund fünfzig Millionen Euro die größte außeruniversitäre Forschungseinrichtung Sachsens und die größte Einrichtung der WGL. Das FZR wird zu je fünfzig Prozent von der Bundesrepublik Deutschland und den Ländern, vor allem dem Freistaat Sachsen, getragen.

Zu den herausragenden Ereignissen des Jahres 2001 gehörte die Inbetriebnahme und Optimierung des ersten Beschleuniger- und Strahlführungsabschnitts von ELBE, einem hochmodernen Elektronenbeschleuniger mit hoher Brillanz und geringer Emittanz. Die Elektronen dieses zweitstärksten supraleitenden Beschleunigers Deutschlands wollen die Wissenschaftler nutzen, um hochenergetische Bremsstrahlung, Röntgenstrahlung und Neutronen für Experimente zu produzie-

ren. Zudem wird an ELBE ein so genannter Freie-Elektronen-Laser (FEL) aufgebaut. Mit Hilfe der Elektronen kann man somit Infrarotlicht produzieren, das sich über einen weiten Wellenlängenbereich (5 bis 150 Mikrometer) einstellen lässt. Dieses wollen die Wissenschaftler unter anderem nutzen, um Halbleiter und Biomoleküle zu untersuchen. Zudem soll der ELBE-Beschleuniger zu einer Nutzereinrichtung ausgebaut werden, an der Wissenschaftler aus der ganzen Welt experimentieren können. Im Mai 2001 kam zum ersten Mal das Signal „Wir haben Strahl“ und im September 2001 feierte das FZR mit prominenten Gästen die offizielle Einweihung der Strahlungsquelle ELBE.

In jedem Computer steckt ein Stück Rossendorf, unter diesem Motto standen die Feierlichkeiten zum zehnjährigen Bestehen des FZR im Januar 2002. Denn Wissenschaftler aus dem Forschungszentrum Rossendorf (FZR) haben mit Partnern das Verfahren entwickelt, mit dem die Silizium-Einkristalle für das 300-Millimeter-Waferprojekt hergestellt werden. Und die Redner, Hans-Olaf Henkel – der Präsident der Leibniz-Gemeinschaft –, Kurt Biedenkopf – der damalige Ministerpräsident des Freistaates Sachsen – und Wolf Häfke – der ehemalige Wissenschaftliche Direktor des FZR – waren sich einig: Das Forschungszentrum Rossendorf hat seit seiner Gründung vor zehn Jahren eine sehr positive Entwicklung genommen.

Ein weiteres herausragendes Ereignis des Jahres 2002 war die außerordentlich positive Bewertung des Hochfeldlabors Dresden (HLD) durch den Wissenschaftsrat (WR). HLD ist ein Labor für sehr hohe gepulste Magnetfelder bis zu 100 Tesla. Dieses Forschungsprojekt, das das FZR gemeinsam mit weiteren Dresdner Forschungseinrichtungen und der Technischen Universität Dresden plant, wurde vom Wissenschaftsrat begutachtet und ist eines der zwei Großprojekte, die der WR als unbedingt förderungswürdig empfohlen hat. Verschiedene nationale Preise zeugen von

den herausragenden Leistungen Rossendorfer Wissenschaftler. So hat Dr. Thomas Dekorsy für seine hervorragenden Arbeiten an der RWTH Aachen zur kohärenten Ultrakurzzeitspektroskopie an Halbleitern den Gustav-Hertz-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft erhalten. Prof. Tobias Reich erhielt den Fritz-Straßmann-Preis der Fachgruppe Nuklearchemie der Gesellschaft Deutscher Chemiker und die Kerntechnische Gesellschaft verlieh Dr. Andreas Schaffrath den Karl-Wirtz-Preis. Zudem wurden zwei Rossendorfer Doktoranden beim Frühjahrsmeeting der Europäischen Materialforschungsgesellschaft mit dem „Young Scientist Award“ ausgezeichnet.

Herr Prof. Jörg Steinbach ist im Juli 2001 dem Ruf auf die Stelle des Direktors des Instituts für Interdisziplinäre Isotopenforschung e. V. an der Universität Leipzig, verbunden mit einer C4-Professur für Isotopenforschung an der Universität Leipzig, gefolgt. Herr Prof. Thomas Fanghänel hat den Ruf auf eine C4-Professur an der Universität Heidelberg, verbunden mit der Position des Direktors des Instituts für Nukleare Entsorgung am Forschungszentrum Karlsruhe, angenommen. Herr Prof. Tobias Reich hat den Ruf auf eine C3-Professur für Kernchemie an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz angenommen.

Ein wichtiger Schritt zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit waren die Wettbewerbe „Physikpreise 2001“ und „Physikpreise 2002“ unter sächsischen Schülern. „Physikpreise“ verleiht das FZR gemeinsam mit den Universitäten und Technischen Hochschulen Dresden, Leipzig, Chemnitz und Freiberg. Dank einer Spende von Infineon wurden die zehn besten Facharbeiten im Bereich Physik mit einem Preisgeld von je 375 Euro belohnt. Die Preisverleihungen fanden an den Tagen der offenen Tür im FZR statt. Der Technische Leiter von Infineon Dresden, Christian Esser, nahm gemeinsam mit dem Wissenschaftlichen Direktor des FZR, Prof. Frank Pobell, die Auszeichnungen vor.

Frank Pobell
Wissenschaftlicher Direktor

Peter Joehnk
Kaufmännischer Direktor

EREIGNISSE



Ausgezeichnete Arbeiten

Karl-Wirtz-Preis für Rossendorfer Post-Doc

Die Kerntechnische Gesellschaft (KTG) ehrte anlässlich der Kerntechnischen Jahrestagung im Mai 2001 Dr. Andreas Schaffrath. Der 36-jährige Wissenschaftler erhielt den Karl-Wirtz-Preis.

Die KTG hat den Preis gestiftet, um „den Fortschritt von Wissenschaft und Technik bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie zu fördern“ und „herausragende wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der Kerntechnik oder verwandter Disziplinen auszuzeichnen“.

Andreas Schaffrath erhielt die Auszeichnung für seine Doktorarbeit über „Experimentelle und analytische Untersu-

chungen zur Wirksamkeit von passiven Komponenten innovativer Reaktorkonzepte“ und seine Studien zu Zweiphasenströmungen. Die passiven Komponenten für die Notkühlung von Siedewasser-Reaktoren hatte er noch während seiner Tätigkeit am Forschungszentrum Jülich untersucht. Die ebenfalls ausgezeichneten Arbeiten zu den Zweiphasenströmungen verfolgt er seit 1997 am FZR weiter.

Benannt ist der Preis nach einem Pionier der deutschen Kerntechnik: Prof. Dr. Karl Wirtz (1910 - 1994) war Mitarbeiter von Prof. Werner Heisenberg am damaligen



Dr. Andreas Schaffrath

Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin und später maßgeblich an der Gründung des Kernforschungszentrums Karlsruhe beteiligt.

Gustav-Hertz-Preis für Thomas Dekorsy

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) hat ihre höchste Auszeichnung für Nachwuchswissenschaftler, den Gustav-Hertz-Preis, 2001 an Dr. Thomas Dekorsy vom Forschungszentrum Rossendorf (FZR) verliehen. Der 35-jährige Physiker erhielt den mit 10 000 Mark dotierten Preis für seine Arbeit über die Wechselwirkung zwischen den Schwingungen der Elektronen und der Atome in künstlichen Halbleiter-Kristallen. Die Erkenntnisse Dekorsys bedeuten einen wichtigen Schritt in Richtung eines Halbleiter-Bauelementes, das Licht mit stufenlos regelbarer Wellenlänge im fernen Infrarotbereich aussendet. Seine Arbeit, für die er die Auszeichnung erhält, hat er am Institut für Halbleitertechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen-Hochschule in Aachen (RWTH-Aachen) angefertigt. Seit Juli 2000 ist er Leiter der Abteilung Halbleiterspektroskopie im Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des FZR. Er wird hier mit Inbetriebnahme der weltstärksten Infrarotquelle – dem Freie-Elektronen-Laser am Elektronenbeschleuniger ELBE – seine Forschungen weiterführen.

Schon seit Jahren versuchen Wissenschaftler, Bauelemente aus Halbleitermaterial herzustellen, die Licht im fernen Infrarotbereich aussenden; damit können sie zum Beispiel die Struktur von Biomolekülen oder Halbleitern untersuchen. Doch für diese Wellenlängen gibt es praktisch

noch keine Lichtquellen – ein Umstand, der diesem Bereich die Bezeichnung „spektroskopische Lücke“ eingehandelt hat.

Eine Möglichkeit, Lichtemission zu erreichen, ist, die Wellenbewegung von Elektronen auszunutzen; denn wenn die geladenen Teilchen schwingen, also wiederholt abbremsten und beschleunigen, senden sie Licht aus. Thomas Dekorsy ist ein wichtiger Schritt in Richtung einer solchen „Lichtquelle“ auf Halbleiterbasis gelungen: Er hat in so genannten Halbleiter-Übergittern, an denen eine Gleichspannung anliegt, mit Hilfe eines Lichtblitzes die völlig gleichförmige Schwingung von Elektronen angeregt und deren Oszillationen gemessen.

Die Frequenz, mit der die Elektronen schwingen, liegt zwischen einhundert Gigahertz (Milliarde Hertz) und zehn Terahertz (Billion Hertz); die Wellenlänge des Lichtes, das die Elektronen dabei aussenden, liegt im fernen Infrarotbereich. Doch die Schwingungsfrequenz der Elektronen ist nicht fest, sie lässt sich variieren. Verändern die Wissenschaftler die Spannung am Halbleiter, ändert sich auch die Schwingungsfrequenz der Elektronen und damit die Lichtwellenlänge – die „Lichtquelle“ lässt sich stufenlos regeln.

Dekorsys Arbeit enthält einige Besonderheiten: Ihm und seinen Mitarbeitern sind die Messungen zum ersten Mal bei Raumtemperatur gelungen, bisher waren die



Dr. Thomas Dekorsy

Beobachtungen nur bei extrem tiefen Temperaturen (etwa Minus 260 Grad Celsius) möglich gewesen; damit haben sie eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine spätere Nutzung geschaffen. Allerdings mussten sie dafür eine besonders schnelle Messtechnik entwickeln, denn die Oszillationen dauern in diesem Temperaturbereich nur den Bruchteil von einigen Pikosekunden (billionstel Sekunden) an. „Es reicht ja nicht, dass man eine Methode hat, mit der man die Elektronen anregen kann, man braucht auch einen geeigneten Weg, um sich das Ergebnis anzuschauen“, so Dekorsy. Ein weiterer Lichtblick der Arbeit, den bisher niemand für möglich gehalten hatte: Ab einer bestimmten Elektronenenergie treten die Elektronen mit den Gitterbausteinen in Wechselwirkung, sodass Elektronen und Kristallgitter im Takt oszillieren. – Dieses Phänomen führt zu deutlich längeren Oszillationszeiten.



Prof. Tobias Reich

Tobias Reich erhält den Fritz-Strassmann-Preis 2001

Die Arbeitsgruppe Nuklearchemie der Gesellschaft deutscher Chemiker (GDCh) hat Prof. Tobias Reich mit dem Fritz-Strassmann-Preis 2001 ausgezeichnet. Die Gruppe sieht ihre Hauptaufgabe in der Förderung von Kern-, Radio- und Strahlenchemie sowie der dort tätigen Studenten, Techniker und Wissenschaftler. Mit dem Fritz-Strassmann-Preis fördert sie Nachwuchswissenschaftler, die sich auf dem Gebiet der Nuklearchemie ausgezeichnet haben.

Sie hat Tobias Reich ihren Preis in Anerkennung seiner hervorragenden Leistungen zur Strukturklärung von Actinidenkomplexen in aquatischer Lösung, bei Sorptionsprozessen an Gesteinen/Mineralien und bei der Biosorption und Biomineralisation an Mikroorganismen verliehen. Zudem würdigte sie seine Leistungen bei Aufbau und Betrieb des Rossendorfer radiochemischen Messplatzes ROBL für die Röntgenabsorptionsspektroskopie an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle (ESRF) in Grenoble (Frankreich). In der Laudatio der Fachgruppe, die den Preis im Regelfall alle zwei Jahre verleihen kann, heißt es weiterhin: „[Tobias Reich] hat den Forschungsarbeiten zur Chemie der Actiniden neue Impulse verliehen.“

Ausgezeichnete Arbeiten des FZR 2001

In jedem Jahr zeichnet das FZR seine besten Wissenschaftler in den Bereichen Forschung, Technologie und für die beste Doktorarbeit aus. Für den Forschungspreis steht Interdisziplinarität und die Bedeutung der Arbeit für das FZR im Vordergrund. Beim Technologiepreis liegt der Schwerpunkt auf der Patentwürdigkeit der Arbeit oder auf einem möglichen Technologietransfer.

Dr. Jürgen Stefan erhält den Technologiepreis 2001

für die „Entwicklung des Beschleuniger-Moduls für die Strahlungsquelle ELBE“
Der Elektronenbeschleuniger ELBE im FZR gehört zu einer neuen Beschleuniger-Generation. Durch seinen besonderen Bau und seine Materialeigenschaften ist es möglich, die Elektronen auf einer Strecke von nur zwei Metern auf fast Lichtgeschwindigkeit und Energien von zwanzig Mega-Elektronenvolt zu beschleunigen. Jürgen Stephan hat das Modul rund um die neuen Beschleuniger-Strukturen entwickelt und die Anlage genau auf die Zielstellung des ELBE-Projektes angepasst.

Dr. Gunter Gerbeth, Thomas Gundrum und Dr. Frank Stefani erhalten den Forschungspreis 2001

für ihre „Beiträge zum Rigaer Dynamoexperiment“
Seit sich Menschen für Naturphänomene interessieren, haben sie darüber gerätselt, wie die Erde zu ihrem Magnetfeld kommt. Noch Albert Einstein hatte es als eines der großen Rätsel der Physik angesehen. Seit etwa Mitte des letzten Jahrhunderts galt schließlich die Theorie allgemein als gesichert, dass Strömungen von flüssigem Metall im Erdinneren das Feld erzeugen. Der praktische Nachweis ist in einem gemeinsamen Experiment mit Forschern aus Riga weltweit erstmalig gelungen. Das Experiment haben Frank Stefani, Thomas Gundrum und Gunter Gerbeth mit Forschern der TU-Dresden entworfen und ausgewertet.

Dr. Antje Gupta erhält den Doktorandenpreis 2001

für ihre Doktorarbeit „In-vivo und In-vitro-Stabilität und Metabolismus von Gemischtligandenkomplexen des ^{99m}Tc “
Wuchernde Tumorgewebe oder gestörte Hirnfunktionen lassen sich in der Nuklearmedizin durch bestimmte bildgebende Verfahren erkennen. Dazu ist das Design so genannter Radiotracer notwendig, die im menschlichen Körper zum Beispiel selektiv an ganz bestimmte Rezeptoren binden. Ein besonders kurzlebige radioaktive Element, das in diesen Verbindungen enthalten ist, macht dann die Stoffwechselprozesse sichtbar. Antje Gupta hat spezielle Metallverbindungen untersucht und deren möglichen Einsatz beurteilt. Sie hat damit die Entwicklung einer ganz neuen Generation von Radiopharmaka unterstützt.



Prof. Häfele gratuliert Dr. Jürgen Stefan.



Hans-Olaf Henkel überreicht Dr. Gunter Gerbeth, Thomas Gundrum und Dr. Frank Stefani die Urkunde.



Prof. Frank Pobell gratuliert Dr. Antje Gupta

Preise für Dresdner Nanotechnologie

Zwei Doktoranden des Forschungszentrums haben beim Frühjahrsmeeting 2002 der Europäischen Materialforschungsgesellschaft (E-MRS) in Straßburg, Frankreich, die Auszeichnung „Young Scientist Award“ erhalten. Auf dem jährlich stattfindenden Treffen mit über 1300 Teilnehmern aus aller Welt werden aktuelle Entwicklungen der Materialforschung diskutiert. Thoralf Gebel erhielt den Preis für seine Arbeiten zur Entwicklung von Lichtquellen, die in herkömmlichen Siliziumchips integriert werden können. Dabei wird durch winzige Cluster von nur wenigen Nanometern Größe, so genannte Nanocluster, dem Silizium Licht „entlockt“. – Ein Effekt, der noch vor wenigen Jahren undenkbar schien. Damit können perspektivisch Chips untereinander kommunizieren und so zukünftige Computer noch schneller werden. Torsten Müller wurde für seine Arbeiten zu neuen Speichertechnologien ausgezeichnet. Er beschäftigt sich mit Nanostrukturen zur Herstellung innovativer Halbleiterspeicher, die für Anwendungen in der mobilen Kommunikation deutliche Vorteile aufweisen.



Dr. Thoralf Gebel



Torsten Müller

Ausgezeichnete Arbeiten des FZR 2002

Dr. Johannes von Borany, Dr. Thoralf Gebel, Dr. Bernd Schmidt, Dr. Karl-Heinz Heinig und Torsten Müller erhalten den **Technologiepreis 2002**

für ihre Beiträge zur „Entwicklung eines neuartigen nichtflüchtigen Nanokristall-Halbleiterspeichers“.

Die Daten in Handys, Organizern und auch im BIOS des PCs sind in nichtflüchtigen Speichern abgelegt. Die herkömmliche Technologie stößt allerdings bald an ihre Grenzen, sodass Forscher schon lange nach neuen Möglichkeiten der permanenten Datenspeicherung suchen. In Zusammenarbeit mit dem ZMD Dresden haben Johannes von Borany, Thoralf Gebel, Karl-Heinz Heinig, Bernd Schmidt und Torsten Müller einen neuen nichtflüchtigen Halbleiterspeicher entwickelt. Die Daten sind dabei in einzelnen separaten, so genannten Nanoclustern, gespeichert. Im ZMD wurde weltweit erstmalig der Prototyp eines nichtflüchtigen Nanocluster-Speichers realisiert.



Torsten Müller, Dr. Bernd Schmidt, Dr. Karl-Heinz Heinig und Dr. Johannes von Borany (v. l. n. r.).

Dr. Eberhard Altstadt und Hans-Georg Willschütz erhalten den **Forschungspreis 2002**

für ihre Beiträge zum „Verständnis des Verhaltens eines Reaktordruckbehälters bei einem Kernschmelzszenarium“.

Eine ganze Reihe von Nuklearanlagen sind in Deutschland noch am Netz, und auch unsere europäischen Nachbarn produzieren einen Teil ihres Stroms in Kernkraftwerken. Grund genug also, für die Sicherheit von Nuklearanlagen zu forschen: Eberhard Altstadt und Hans-Georg Willschütz haben sich mit der Frage beschäftigt, wie sich ein schwerer Störfall auf den Reaktordruckbehälter eines Leichtwasserreaktors auswirken würden. Aus der Analyse der Ergebnisse haben sie Verbesserungsvorschläge unterbreitet, die zu einer noch höheren Sicherheit von Nuklearanlagen führen würden. Die Arbeit hat international ein sehr positives Echo hervorgerufen.



Prof. Frank Pobell (l.) gratuliert Hans-Georg Willschütz (Mitte). Rechts: Dr. Eberhard Altstadt.

Dr. Johannes Raff erhält den **Doktorandenpreis 2002**

für seine Doktorarbeit „Wechselwirkungen der Hüllproteine von Bakterien aus Uranabfallhalden mit Schwermetallen“. In ehemaligen Urangruben, Abfallhalden und anderen Hinterlassenschaften des Uranbergbaus findet man Bakterien, die das Uran auf ihren Oberflächenmembranen anlagern. Johannes Raff hat diese Bakterien untersucht und hat unter anderem eine neue Klasse von keramischen Funktionswerkstoffen entwickelt. Diese so genannten Biocere vereinigen die Eigenschaften von keramischen und biologischen Materialien und sollen als Filter für schwermetallhaltige Abwässer eingesetzt werden. Gemeinsame Tests mit der Wismut GmbH haben bereits stattgefunden.



Dr. Johannes Raff (l.) erhält den Doktorandenpreis von Prof. Frank Pobell (r.).

Beständigkeit in der Berufsausbildung: FZR erhält IHK-Preis

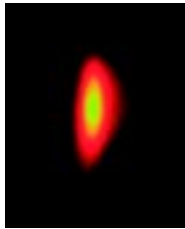
Schon das dritte Jahr in Folge erhielt das FZR einen Preis von der Industrie- und Handelskammer (IHK). Die IKH Dresden hat dem FZR mit einer Urkunde ihre besondere Anerkennung „... für herausragende Leistungen in der dualen Berufsausbildung ...“ im Jahr 2000, 2001 und 2002 ausgesprochen. Rund 30 Lehrlinge sind im FZR in Ausbildung – bei knapp 420 fest angestellten Mitarbeitern ergibt das eine Ausbildungsquote, die sich sehen lassen kann. Aber nicht die Anzahl, sondern das hohe Niveau der Ausbildung im Forschungszentrum Rossendorf hat

die IHK mit ihrer Auszeichnung gewürdigt. Ein Hinweis auf dieses Niveau sind die besonders guten Leistungen, die Rossendorfer Azubis immer wieder erreichen: Beispielsweise war ein im FZR ausgebildeter Physiklaborant 2000 einer der 78 besten Jungfacharbeiter, die die IHK ausgezeichnet hat. Im Jahr 2001 erhielt die Auszeichnung „bester sächsischer Jungfacharbeiter“ ein im FZR ausgebildeter Technischer Zeichner, und 2002 ging die Auszeichnung erneut an einen Physiklaboranten des Forschungszentrums Rossendorf.

Um die Lehrlinge und Praktikanten kümmern sich am Standort zehn qualifizierte Ausbilder, darunter diplomierte und promovierte Physiker, Technologen, Chemie-Ingenieure und Betriebswirte. Alle haben eine spezielle Qualifikation der IHK und die entsprechenden Prüfungen durchlaufen. Sie widmen sich neben ihrem eigentlichen Beruf der Lehrlings- und Praktikantenausbildung und stellen sich damit zwar einer hohen Belastung, gewähren ihren Azubis aber auch den Vorteil praxisnaher und interessanter Tätigkeiten.

... und erstmals strahlt die ELBE

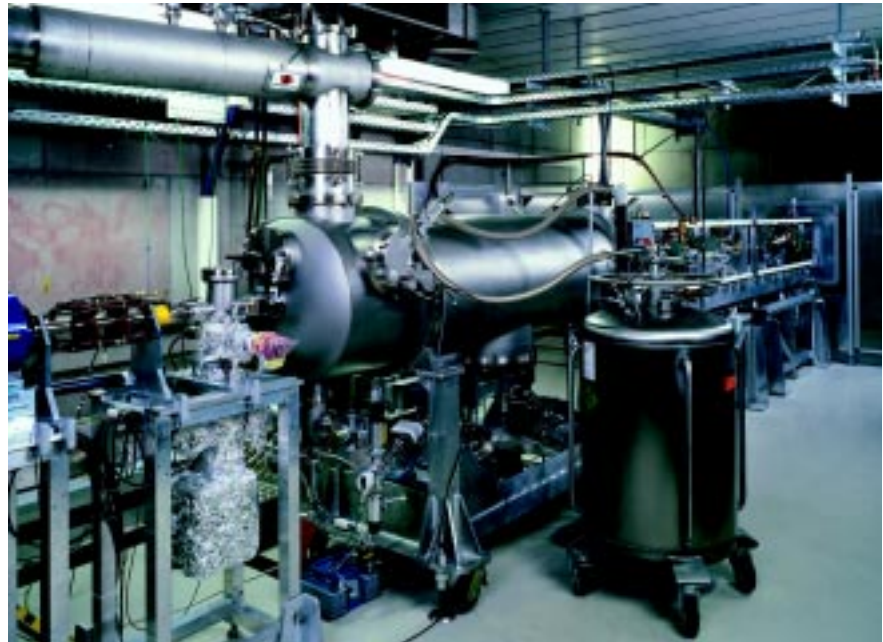
Ein Leuchtfleck, den der erste Elektronenstrahl der ELBE-Quelle (Foto ganz rechts) hinterließ.



Linearbeschleuniger erzeugt schnelle Elektronen

Am 3. Mai 2001 war es endlich so weit: Der Monitor zeigte den lang erwarteten Strahlfleck. Nach drei Jahren Aufbau und einer intensiven Vorbereitungsphase hatten Wissenschaftler und Ingenieure des Forschungszentrums Rossendorf erstmals Elektronen auf eine Energie von sechs Millionen Volt beschleunigt. Im Vorfeld dieses Experiments waren alle bisher fertig gestellten Komponenten der Beschleunigeranlage ELBE überprüft und teilweise verbessert worden.

Die Anlage besteht aus zwei Hochfrequenz-Beschleunigermodulen, wobei jede dieser komplizierten Funktionseinheiten zwei supraleitende, neunzellige Hohlraum-Resonatoren enthält. Diese wellenartig geformten und supraleitenden Resonatoren arbeiten bei einer Temperatur von weniger als zwei Kelvin (etwa Minus 270 Grad Celsius) in flüssigem



Helium. Das erste Beschleunigermodul ging mit der Erzeugung des oben erwähnten Elektronenstrahls in Betrieb. Alle technischen Parameter des Beschleunigermoduls, der Heliumverflüssigeranlage, des Vakuum- und des Hochfrequenz-Systems waren ohne größere Probleme erreicht worden.

Ein Leuchtfleck, den der erste Elektronenstrahl der ELBE-Quelle kurz nach seiner „Geburt“ auf einem Leucht-Target hinterließ. (Target = Zielscheibe; in der Phy-

sik ist damit ein Material gemeint, in dem bei Auftreffen energiereicher Strahlung Wechselwirkungen ausgelöst werden.) Relativistische Elektronen – Elektronen, deren Geschwindigkeit an die des Lichtes heranreicht – emittieren beim Übergang vom Vakuum in ein metallisches Target eine so genannte optische Übergangsstrahlung. Die Lichtquanten dieser Strahlung kann man nutzen, um den Elektronenstrahl über ein entsprechendes optisches System und eine Bilderfassung darzustellen.

Brillantes Forschungsgerät eingeweiht

Reichlich drei Jahre nach der Grundsteinlegung durch den Ministerpräsidenten des Freistaats Sachsen, Prof. Kurt Biedenkopf, hat das FZR am 11. September 2001 die Strahlungsquelle ELBE feierlich eingeweiht. Beim Festakt anwesend waren der sächsische Staatsminister für Wissenschaft und Kunst, Prof. Hans Joachim Meyer, der Leiter der Abteilung Forschung, Umwelt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Dr. Hermann Schunck, sowie zahlreiche weitere Gäste aus der wissenschaftlichen und politischen Öffentlichkeit.



Der sächsische Staatsminister für Wissenschaft und Kunst, Prof. Hans Joachim Meyer.

Die offizielle Einweihung der ELBE-Quelle war der vorläufige Höhepunkt eines mehr als sieben Jahre währenden Projektierungs-, Entwicklungs- und Aufbauprozesses. – Der Elektronenbeschleuniger mit hoher Brillanz und geringer Emittanz ist das größte Forschungsgerät im Freistaat Sachsen. Es wird in Zukunft für zahlreiche Wissenschaftler Quelle für ihre Experimente sein und sicherlich noch häufiger von sich reden machen. Aus einigen Vorstudien entstand 1995 die Idee, eine supraleitende, quasi-kontinuierliche (cw) 20-Mega-Elektronenvolt-Elektronenquelle – die ELBE-Quelle – aufzubauen. Die Quelle sollte Strahlen von hoher Brillanz und geringer Emittanz liefern, und ihr sollte ein Freie-Elektronen-Laser (FEL) nachgeordnet sein.

Nicht nur Kernresonanzfluoreszenzexperimente zur Untersuchung der Kernstruktur sollten damit möglich sein; ein Forschungsgerät zu schaffen, das den

Peter Michel (r.) erklärt Gästen, darunter Prof. Hans Joachim Meyer (Sächsischer Staatsminister für Wissenschaft und Kunst, 2. v. r.) und Prof. Achim Mehlhorn (Rektor der TU Dresden, 3. v. r.) den Elektronenbeschleuniger.



wissenschaftlichen Arbeiten des gesamten Zentrums zugänglich sein sollte, war vorrangiges Ziel: „Die Erzeugung brillanter elektromagnetischer Strahlung im Infrarot- bis Röntgenbereich durch nicht-konventionelle Photonenquellen, vor allem aber die Bereitstellung intensiver, kohärenter FEL-Strahlung, bieten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Materialforschung, Biomedizin und Chemie und lassen somit einen Synergieeffekt für das gesamte Forschungszentrum erwarten.“ Davon ließen sich sowohl die Mitglieder des eigens gegründeten „Ma-

ne Energie von sechs Mega-Elektronenvolt bei einer Stromstärke von fünf Mikroampere zu beschleunigen. Das kurz darauf tagende MAC würdigte dies als großen Erfolg und sprach allen Mitarbeitern seine Glückwünsche aus.

Nun soll der 20-Mega-Elektronenvolt-Strahl möglichst schnell für Experimente, insbesondere in der Kern- und Strahlungsphysik, genutzt werden, auch um Erfahrungen für die weitere Auslegung der Maschine zu sammeln. Doch zunächst wurde erst einmal gefeiert ...



Viele Gäste bei der ELBE-Einweihung, so auch Dr. Hermann Schunck (BMBF).



Institutsdirektoren im Gespräch mit Dr. Ekkehard Warmuth (BMBF).

chine Advisory Committee“ (MAC) als auch die Zuwendungsgeber überzeugen. – Der erste Spatenstich erfolgte im Oktober 1997, und Richtfest konnte im September 1998 gefeiert werden. Dann aber begann erst die eigentliche Arbeit: Der Aufbau des Beschleunigers einschließlich der notwendigen Strahlführungs- und Strahldiagnosesysteme. Nach Konzeption, Entwicklung, Aufbau und Erprobung der Beschleunigerelemente gelang es im Mai 2001 im ersten (zwanzig MeV) Beschleunigerabschnitt von ELBE erstmals, die Elektronen auf ei-

Die in der Zeit von 1994 bis 2000 vom Bund und den Ländern, vor allem dem Freistaat Sachsen, bereitgestellten und vom FZR verbauten Mittel in Höhe von mehr als 17 Millionen Euro sollten es Wert sein, das fanden jedenfalls auch die Festredner. Eine solche Feier ist aber auch der Moment, um den wichtigsten Kooperationspartnern zu danken. Außer der TU Dresden seien hier besonders die TU Darmstadt, DESY Hamburg, die Stanford University und das CEBAF-Institut (beide USA) sowie die Universitäten Mainz, Bonn und Dortmund hervorgehoben.

Hohe Magnetfelder im FZR

„Das geplante Labor für gepulste, sehr hohe Magnetfelder bis zu 100 Tesla ermöglicht einzigartig neue Untersuchungen in der Physik der kondensierten Materie und den Materialwissenschaften“, heißt es in der Stellungnahme des Wissenschaftsrats (WR) vom 15. Juli 2002 zum Hochfeldlabor Dresden (HLD).

Am 24. und 25. Januar 2002 hatte eine 12-köpfige Bewertungskommission des Wissenschaftsrates, zu der neben verschiedenen anderen Spezialisten der Hochfeldforschung auch der Physik-Nobelpreisträger Klaus von Klitzing gehörte, den Antrag von Dresdner Forschungseinrichtungen für ein Hochfeldlabor (HLD) begutachtet. Das Ergebnis ist ein großes Lob an alle Beteiligten; der Antrag sei fundiert, ausführlich und besonders gut ausgearbeitet, zudem gäbe es bereits erhebliche Vorarbeiten. Der WR befürwortet in allen Punkten den Bau einer solchen Einrichtung. Er zählt das Dresdner Hochfeldlabor zu einer Gruppe von Großgeräten, „mit deren Realisierung Forschungsinfrastrukturen einer neuen Qualität verfügbar werden, die in ganz entscheidendem Maße zur Weiterentwicklung des jeweiligen Forschungsgebietes beitragen und neue wissenschaftliche Erkenntnisse erwarten lassen.“

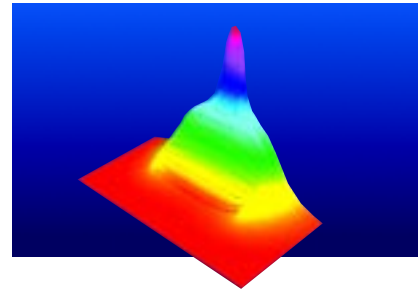
Das Hochfeldlabor soll gepulste Magnetfelder mit bislang noch nicht erreichten Feldstärken erzeugen. Bei 100 Tesla soll die Pulsdauer etwa zehn Millisekunden,

bei 60 Tesla sogar etwa eine Sekunde betragen; das entspricht so genannten quasistatischen Bedingungen. Durch seinen geplanten Standort auf dem Gelände des Forschungszentrums Rossendorf erhält das HLD eine weltweit herausragende Stellung: Es entsteht in der Nähe zum Freie-Elektronen-Laser des Elektronenbeschleunigers ELBE. So kann Festkörperspektroskopie unter hohen Magnetfeldern betrieben werden. Der Untersuchung von Halbleitern, magnetischen Materialien oder Hochtemperatur-Supraleitern sind damit ganz neue Horizonte gesetzt.

Der Baubeginn wird Anfang 2003 sein; erste Experimente werden voraussichtlich 2006 erfolgen.

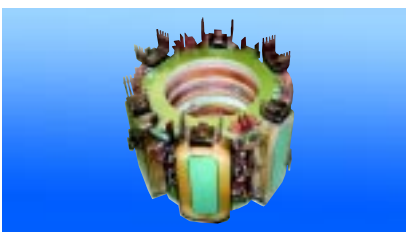
Die beteiligten Institute:

- Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung
Prof. Helmut Eschrig
Prof. Ludwig Schultz
- Forschungszentrum Rossendorf
Prof. Frank Pobell
- Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme
Prof. Peter Fulde
- Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe
Prof. Frank Steglich
- Technische Universität Dresden
Prof. Michael Loewenhaupt
Prof. Jochen Wosnitzer



Die Evaluierungskommission:

- Prof. Peter Paul (Vorsitzender)
Brookhaven National Laboratory
- Dr. Greg Boebinger
Los Alamos National Laboratory
- Regierungsdirektor Thomas Delissen
Finanzbehörde HH
- Prof. Klaus von Klitzing
MPI für Festkörperforschung, Stuttgart
- Prof. Peter Mayr
Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen
- Prof. Ulrich Merkt
Universität Hamburg
- Prof. Thomas Prisner
Johann-Wolfgang-Goethe Universität, Frankfurt
- Prof. Hans Wolfgang Spiëß
MPI für Polymerforschung, Mainz
- Prof. Michael Springford
University of Bristol
- Ministerialrat Dr. Hermann F. Wagner
BMBF
- Prof. Peter Wyder
Grenoble High Magnetic Field Laboratory
- Prof. Hartmut Zabel
Ruhr-Universität Bochum



Den neuen Sonderforschungsbereich (SFB) 609 zur Magnetofluidynamik hat die DFG genehmigt. Dazu schreibt sie in ihrer Pressemitteilung vom 30. November 2001:

„Im Mittelpunkt des Sonderforschungsbereichs ‚Elektromagnetische Strömungsbeeinflussung in Metallurgie, Kristall-

Sonderforschungsbereich MHD genehmigt

züchtung und Elektrochemie‘ [...] steht die Magnetofluidynamik, die sich mit den komplizierten Wechselwirkungen zwischen elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten und elektromagnetischen Feldern befasst. Mit Hilfe der Magnetofluidynamik lassen sich etwa flüssige Metalle, Halbleiterschmelzen oder Elektrolyte wie das Salzwasser gezielt und ohne direkten Kontakt beeinflussen. Die Forschungsarbeiten zur gezielten Wirkung elektromagnetischer Felder auf Strömungen und Transportprozesse in elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten sollen Anwendun-

gen in der Werkstoff- und Verfahrenstechnik, der Strömungsmechanik und nicht zuletzt im Maschinenbau erlauben.“

Der SFB 609 wird vor allem von der TU Dresden und dem FZR getragen, weitere Partner sind das IFW Dresden, die TU Bergakademie Freiberg und das Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden. Fünf der insgesamt vierzehn Teilprojekte des SFB liegen in der Verantwortung des Institutes für Sicherheitsforschung des FZR. An weiteren zwei Projekten ist das Institut beteiligt.

Projekte in Verantwortung des FZR

- Experimentelle Untersuchungen turbulenter magnetofluidynamischer Strömungen:

Magnetfelder werden in der Metallurgie und der Kristallzucht bereits seit einigen Jahren eingesetzt. Ziel dabei ist es, den Stoff- und Wärmetransport im Schmelzbad zu steuern. In den letzten Jahren zeichnet sich der Trend ab, nicht mehr nur mit einem Gleichfeld die Schmelze zu beruhigen oder mit einem Wechselfeld in einfacher Weise anzutreiben. – Eine komplexe Beeinflussung über die Kombination der verschiedenen Felder ist erwünscht. In diesem Sinne sollen die Strömungs- und Turbulenzstrukturen von Flüssigmetallströmungen in einem geschlossenen zylindrischen Behälter experimentell bestimmt werden.

- Magnetofluidynamische Zweiphasenströmungen:

In der Metallurgie spielen Blasensäulen eine wichtige Rolle bei Raffinationsprozessen von Metallschmelzen. Mittels Stoffaustausch über die Gasphase werden chemische Reaktionen kontrolliert oder nichtmetallische Verunreinigungen entfernt. Wesentliche Prozessparameter sind die Phasengrenzfläche zwischen Gasblasen und Schmelze sowie der Turbulenzgrad in der Flüssigkeit. Diese Größen lassen sich durch Magnetfelder gezielt beeinflussen. Ziel des Projektes ist es, zu einem grundlegenden Verständnis der strömungsphysikalischen Vorgänge in Zweiphasenströmungen beizutragen. Dazu sollen geeignete Messverfahren bereitgestellt beziehungsweise entwickelt werden.

- Tomographische Verfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung in elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten aus externen Messungen zeitabhängiger Magnetfelder:

Durch Wechselwirkung der Strömung einer elektrisch leitfähigen Flüssigkeit mit einem Magnetfeld entstehen Ströme, die ihrerseits ein zusätzliches Magnetfeld sowie ein elektrisches Potenzial erzeugen. Das außerhalb der Schmelze messbare Magnetfeld enthält somit Informationen über die Strömung im Inneren der Schmelze. Es soll eine Verallgemeinerung des inversen Problems der MFD auf zeitabhängige

Primärfelder vorgenommen werden und zur Geschwindigkeitsbestimmung der Strömungen ausgebaut werden.

- Theorie und Numerik von Transportphänomenen in Kristallzüchtungsprozessen unter Magnetfeldeinfluss:

Bei Kristallzüchtung aus Schmelzen besteht bei allen Verfahren der Wunsch, Qualität und Größe des gezogenen Kristalls zu verbessern, die Züchtung schneller zu realisieren sowie den Züchtungsprozess zu optimieren und zu stabilisieren. Dazu bieten Magnetfelder eine komfortable Möglichkeit, da sie die Steuerung völlig kontaktlos und nahezu ohne Eingriff in die vorhandene Züchtungsanlage erlauben. Es sollen theoretische Grundlagenkenntnisse entwickelt werden, die dann in die numerische Simulation realer Kristallzüchtungsprozesse einfließen sollen.

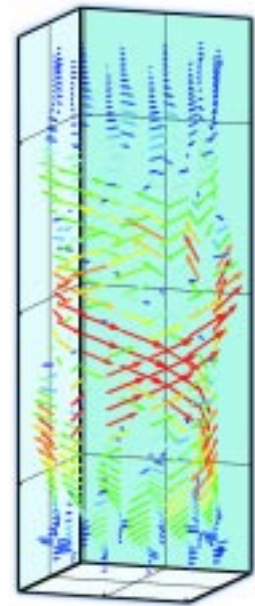
- Experimente zur elektromagnetischen Kontrolle von Körperumströmungen in elektrisch schwach leitfähigen Flüssigkeiten:

Im Projekt sind experimentelle Untersuchungen zur Kontrolle von Strömungen elektrisch schwach leitfähiger Fluide (Elektrolyte, Salzwasser) mit elektromagnetischen Kräften geplant. Die Untersuchungen sollen sich vor allem auf die Kontrolle ablösender Strömungen mittels oszillierender Lorentzkräfte, die Verminderung des Reibungswiderstandes einer turbulenten Grenzschicht durch oszillierende Lorentzkräfte und die Verbesserung der Stabilitätseigenschaften laminarer Grenzschichtprofile mittels stationärer Lorentzkräfte konzentrieren.

Projekte mit FZR-Beteiligung

- Magnetfeldbeeinflusste Erstarrungsvorgänge:

Untersucht werden soll die Anwendung von Magnetfeldern bei der Erstarrung. Die Beeinflussung eines Temperaturfeldes durch magnetfeldinduzierte Strömungen beim Phasenübergang flüssig/fest lässt wegen der Auswirkungen auf Keimbildungs- und Kornwachstumsreaktionen ein bisher kaum beachtetes Entwicklungspotenzial für Werkstoffe und Technologien erwarten. Zielstellung der Arbeiten ist



die Erzeugung eines feinkörnigen, globulitischen Gefüges bereits in Folge des Erstarrungsprozesses. Zu klären ist, inwieweit Konzentrations- und Eigenschaftsgradienten sowie Lunkerbildung unterdrückt werden können. Zudem soll untersucht werden, inwieweit Dauer und Intensität magnetfeldinduzierter Strömungsvorgänge Einfluss auf die Entstehung und den Aufbau des Endgefüges nehmen können.

- Magnetfeldkontrolle der Einkristallzüchtung intermetallischer Verbindungen:

Die so genannte Floating-Zone-Einkristallzüchtung mehrkomponentiger intermetallischer Verbindungen ist außerordentlich problematisch, da sich auf Grund der ungünstigen Geometrie der Fest-Flüssig-Phasengrenze zwischen wachsendem Kristall und Schmelze die Verbindung nicht über den gesamten Querschnitt einkristallin herstellen lässt. Die Kontrolle des konvektiven Wärme- und Stofftransportes sowie eine weitere Verbesserung der Zonengeometrie sind nur durch den Einsatz zusätzlicher konstruktiver Elemente möglich. Innovative Mittel sind hierbei Magnetfelder zur Strömungsbeeinflussung und damit Temperaturfeldbeeinflussung. Ziel des Vorhabens ist die Kontrolle des konvektiven Wärme- und Stofftransportes zur Einstellung der Geometrie der Fest-Flüssig-Phasengrenze mit Hilfe eines maßgeschneiderten Magnetfeldes.

Tag der offenen Tür 2001 und 2002

Es ist Trubel im FZR, und manchmal geht es eng zu – einmal im Jahr, im September, wenn die Türen und Tore im Forschungszentrum geöffnet sind. Viele nutzen die Gelegenheit, hinter die Forschungs-Kulissen schauen zu können; fast 1700 Besucher waren es am Tag der offenen Tür 2001, etwa 1800 zum Tag der offenen Tür 2002 – zwei neue Rekorde.



Ein Foucaultsches Pendel in der ELBE-Halle.



Alles selbst gemacht.



Versuche mit Lasern: „Aus Rot wird Blau“. Fast 1800 Besucher interessierten sich in diesem Jahr für die Wissenschaft im FZR.



Unterstützung auch von außerhalb: Am Stand der TU Dresden ist immer was los.



Hier gab es selbst gebastelte Fernrohre und Fluggleiter.

An diesem Tag stehen auch die Türen auf, die sonst für Besucher geschlossen sind: Im PET-Zentrum beispielsweise, ein Medizinzentrum, das das FZR gemeinsam mit der Dresdner Uni-Klinik betreibt, sollen sich die Patienten ungestört untersuchen lassen können. Daher sind Besucher hier nur an diesem einen Tag im Jahr zugelassen. Als regelrechter Publikumsmagnet entpuppte sich der erst 2001 in Betrieb gegangene Elektronenbeschleuniger ELBE. Dort riss der Besucherstrom den ganzen Tag nicht ab.

Und gab es schon 2001 Unterhaltsames für Kinder – in der ELBE-Halle wurde gebastelt, experimentiert und gespielt – so wurde das Unterhaltungsprogramm 2002 noch erweitert: Hüpfburg für die Kleinen, Go-Kart-Bahn für Jugendliche ab dreizehn und das Wissenschaftsmobil vom Landesverband Sächsischer Jugendbildungswerke trugen dazu bei.

Preiswerte Arbeiten von Schülern

„Physikpreise“ ist ein Wettbewerb, der Schüler für ihre herausragende Facharbeit belohnt. – Schüler in Sachsen haben die Möglichkeit, in der 11. und 12. Klasse eine Besondere Lernleistung anzufertigen. Diese können sie sich im Abitur anrechnen lassen. „Physikpreise“ prämiiert die Lernleistungen oder ähnliche Facharbeiten im Bereich Physik, wenn die Schule diese für auszeichnungswürdig hält und sie zu dem Wettbewerb einsendet. Den Wettbewerb lobt das Forschungszentrum

Rosendorf gemeinsam mit den sächsischen Hochschulen (TU Dresden, TU Chemnitz, TU Bergakademie Freiberg, Universität Leipzig) in allen sächsischen Gymnasien aus. Unterstützt wird er von Infineon Technologies Dresden und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG).

Das Themenspektrum der Arbeiten ist breit gefächert, doch eines ist allen Projekten gemeinsam: Spaß an dieser Naturwissenschaft merkt man ihnen allen an, und Qualität sowie Arbeitsaufwand sind zum Teil mit Diplomarbeiten vergleichbar.



Christian Esser (rechts), Technischer Leiter von Infineon Dresden, überreicht die Schecks.



„Physikpreise 2001“

Sie beschäftigen sich mit dem „Bodeneffekt“ – ein Phänomen, das die Veränderung des Flugverhaltens von Flugzeugen in Bodennähe beschreibt – oder modellieren und optimieren pumpengesteuerte Solaranlagen. Andere entwickeln computergestützte Messsysteme für den Physikunterricht oder beschäftigen sich mit der Frage, wie sich Kulturobjekte, die Dresden schließlich reichlich bietet, mit Hilfe von Laserstrahlen besonders schonend restaurieren lassen.

Die Preisverleihung zum Wettbewerb „Physikpreise 2001“ fand am 8. September 2001 im Forschungszentrum Rossendorf statt. Die Preisträger sind:

- Sascha Henning, Sebastian Bubel
Glückauf-Gymnasium, Dippoldiswalde
- Robert Zierold
Annen-Gymnasium, Dresden
- Nils Neubauer
F.-A.-Brockhauerschule, Leipzig
- Martin Franke
Johann-Wolfgang-von-Goethe-Gymnasium, Chemnitz
- Holger Fischer
Johannes-Kepler-Gymnasium, Chemnitz
- Marko Storch, Martin Weigert
Johannes-Kepler-Gymnasium, Chemnitz
- Ralf Hambach
Werner-Heisenberg-Gymnasium, Chemnitz
- Jan Winderlich
Gymnasium Dresden Blasewitz
- Johannes Kunert
Humboldt-Gymnasium, Radeberg
- Richard Wenzel
Thomasschule zu Leipzig



„Physikpreise 2002“

„Physik lebt“ titelt Andreas Franze vom Goethe-Gymnasium Sebnitz seine preisgekrönte Arbeit. Er ist einer von insgesamt 23 Schülern aus ganz Sachsen, die an dem Wettbewerb „Physikpreise 2002“ teilgenommen haben. Andreas Franze hat in seinem Projekt drei anschauliche Experimente für den Physikunterricht aufgebaut. – Experimente, die den Unterricht anschaulicher machen sollen. Das gleiche Ziel verfolgen Michael Noll und Thomas Zichner mit ihrer Arbeit. Sie haben ein PC-gestütztes Oszilloskop für den Physikunterricht entwickelt. Weitere Themen sind Untersuchungen über die Verwendung regenerativer Energien in Sachsen oder die

Entwicklung eines PC-Programmes zur Berechnung und Simulation eines Raumfluges zum Mars.

Die Preisverleihung zum „Physikpreis 2002“ fand am 14. September 2002 im Forschungszentrum Rossendorf statt. Die Preisträger sind:

- Susann Schöne
Gymnasium Einsiedel
- Markus Aswendt
Johannes-Kepler-Gymnasium, Chemnitz
- Michael Noll, Thomas Zichner
Georgius-Agricola-Gymnasium, Chemnitz
- Felix Noack
Martin-Luther-Gymnasium, Frankenberg
- Christian Schubert
Drei-Tannen-Gymnasium, Thalheim
- Andreas Kiel
Bernhard-von-Cotta-Gymnasium, Brand-Erbisdorf
- Andreas und Frank Herklotz sowie Robin Taubert
Manfred-von-Ardenne-Gymnasium, Freital
- Sebastian Sager und Hans-Henning Koch
Wilhelm-Ostwald-Schule, Leipzig
- Sebastian Remmler und Marcus Gutzer
Johann-Wolfgang-von-Goethe-Gymnasium, Chemnitz
- Andreas Franze
Goethe-Gymnasium, Sebnitz

Nanotech und Biomat auf der Hannover Messe 2001 und 2002

Mit vier Exponaten aus drei Instituten präsentierte sich das FZR zur Hannover Messe der Industrie 2001. Nanotechnologie, Biomaterialien, Anlagensicherheit und Rückbau von Nuklearanlagen waren die vier Themen aus den Instituten für Ionenstrahlphysik und Materialforschung, für Sicherheitsforschung und für Radiochemie. Außerdem warb das Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung zusätzlich mit einem eigenen Stand um Industriekontakte.



Jochen Zschau (r.) im Gespräch mit dem ungarischen Wirtschaftsminister, Herrn Dr. Szabo (l.).

Live auf der Hannover Messe: weltweit erster integrierter Optokoppler auf Siliziumbasis

Mit dem weltweit ersten integrierten Optokoppler auf Siliziumbasis lässt sich zum ersten Mal einfach und kostengünstig die optische Datenübertragung auf engstem Raum, also innerhalb eines oder zwischen benachbarten Chips, verwirklichen; aber auch eine einfache Analyse biochemischer Substanzen ist denkbar. Schon seit vielen Jahren versuchen Wissenschaftler, Silizium, dem Stoff, aus dem die Mikroelektronik ist, Licht zu entlocken. Doch das galt lange Zeit als undenkbar, denn die so genannten Energiebänder, die dabei ins Spiel kommen, liegen einfach zu ungünstig. Mit Hilfe der Nanotechnologie lässt sich dieses Problem zurechtrücken, und dank einer guten Idee einiger Wissenschaftler aus dem Institut für Ionenstrahlphysik und Mate-



Thoralf Gebel vor seinem Stand.

rialforschung um Dr. Wolfgang Skorupa leuchtet der Halbleiter inzwischen besonders energiereich in blau.

Diesen Umstand nutzen die Forscher in ihrem integrierten Optokoppler, einem Bauelement, das sowohl Licht aussendet als auch welches empfangen kann. Er lässt sich in den üblichen Herstellungsschritten für die Chipproduktion aufbauen und daher leicht und kostengünstig direkt in einen Chip integrieren. Dort kann er zur optischen Datenübertragung genutzt werden. Dadurch könnten Chips noch einmal deutlich kleiner werden, denn die herkömmlichen elektrischen Anschlüsse wirken wie kleine Antennen. Wenn sie zu dicht sitzen, beeinflussen sie sich gegenseitig – optisch sind hier keine Grenzen gesetzt. Aber auch andere Anwendungen, zum Beispiel in der Gentechnik oder Biotechnologie, sind in Arbeit; so wollen die Forscher mit dem Optokoppler ein Analytiklabor in Chipgröße verwirklichen.

Künstliche Gelenke – so werden sie verträglicher

Künstliche Gelenke können die Lebensqualität von Menschen, die unter schweren Gelenkerkrankungen leiden, deutlich erhöhen. Allerdings kann es bei einigen Patienten zu Komplikationen kommen, sodass diese in relativ kurzen Abständen mehrere Operationen durchstehen müssen. Gerade Hüft- oder Kniege-



Staatssekretär Noack widmet seine ungeteilte Aufmerksamkeit den Erläuterungen von Silke Ottow.

lenke müssen eine besonders große Belastung aushalten, denn sie tragen das mehrfache Körpergewicht eines Menschen. Um seine Funktion über lange Zeit erfüllen zu können, müssen Implantate gut im Knochen anwachsen. Vor allem bei älteren Patienten, Rheumatikern oder Diabetikern treten dabei Probleme auf; bei ihnen löst sich die Verbindung zwischen Gelenk und Knochen schon relativ bald, das künstliche Gelenk wird locker und muss ausgetauscht werden.

Dr. Manfred Maitz und Kollegen vom Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des FZR haben ein Verfahren entwickelt, bei dem sie Knochensubstanz direkt auf der Oberfläche des künstlichen Gelenkes verankern, sodass es im Körper wie eigener Knochen anwachsen kann. Zellkulturversuche mit knochenbildenden Zellen haben sehr gute Ergebnisse gebracht – die Zellen vermehren sich auf der künstlichen Knöchenschicht des Gelenkes und bilden neue Knochensubstanz.

In einem weiteren Forschungsprojekt verankern die Forscher so genannte Wachstumsfaktoren auf der Metalloberfläche der Gelenke. Diese Faktoren bilden die natürliche Umgebung der Zellen nach, sie fördern also die Zellteilung und damit ebenfalls das Anwachsen des Fremdkörpers im Knochen. Einen Einsatz dieser Gelenke sieht Maitz vor allem bei Patienten, die mit herkömmlichen Gelenken bereits Probleme hatten.

Druckstöße in Rohrleitungen verhindern: Störfälle in Industrieanlagen vermeiden

Große Mengen zum Teil gefährlicher Flüssigkeiten werden in Rohrleitungen von einem Ort zum anderen transportiert. Werden dabei Ventile geschlossen und die Flüssigkeit dadurch plötzlich gebremst, wirken Kräfte auf die Leitung, die im Extremfall sogar zum Rohrbruch führen können. Wissenschaftler aus dem Institut für Sicherheitsforschung des FZR um Dr. Horst-Michael Prasser haben gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT zur Hannover Messe in einem eindrucksvollen Exponat gezeigt, wie sich solche Druckstöße vermeiden lassen.

Im Straßenverkehr kommt es besonders häufig zu Unfällen, wenn sich die Geschwindigkeit einer Autoschlange abrupt ändert, wenn also Autos zum Beispiel an ein Stauende heranfahren: Eine zunächst mit genügendem Abstand fahrende Autoschlange gerät plötzlich unter Druck. Ein ganz ähnliches Phänomen zeigt sich, wenn Flüssigkeiten in Rohrleitungen plötzlich gebremst werden. Die enormen Kräfte, die dabei auf die Leitung wirken, haben vor allem zwei Ursachen: Während hinter dem Absperrventil ein Vakuum entsteht, eine so genannte Kavitationsblase, die in sich zusammenfällt, drückt vor der Absperrarmatur eine enorme Flüssigkeitssäule auf das Ventil. Beide Phänomene äußern sich in lauten Schlägen, aus den Halterungen springenden Leitungen, oder es entstehen sogar Risse.

Bisher mussten solche Druckstöße in Rohrleitungen durch kostspielige zusätzliche Installationen entschärft werden. Wissenschaftler vom FZR und von UMSICHT haben mit der geeigneten Anordnung einer Rückschlagklappe hinter der eigentlichen Absperrarmatur und einer so genannten ABS-Armatur vor dem Ventil eine kostengünstige und einfache Lösung für das Problem gefunden. Die Rückschlagklappe verhindert dabei den Kollaps der Blase, während die ABS-Armatur – ähnlich wie das Anti-Blockier-System im Auto – mit Hilfe einer Scheibenbremse das Verschließen des Ventils immer dann, wenn der Druck in der Leitung durch die nachströmende Flüssigkeit zu groß wird, kontrolliert bremst. Auf



Eine Arbeitsgruppe aus dem Wirtschaftsministerium lässt sich das Druckstoßmodell erklären.

diese Weise kommt die Flüssigkeit nicht mehr plötzlich, sondern ganz allmählich zum Stehen.

Vom Kernkraftwerk zur grünen Wiese

In Deutschland ist der Ausstieg aus der Kernenergie geplant – doch selbst wenn sich diese Vorstellung nicht durchsetzen sollte, können Nuklearanlagen nur eine gewisse Zeit betrieben werden und müssen irgendwann beseitigt werden. Dabei fallen riesige Mengen Bauschutt an, von denen nur ein Bruchteil als radioaktiver Sondermüll entsorgt werden muss. Den Anteil des Sondermülls auszumachen, war bisher ein sehr aufwändiges und zeitraubendes Unterfangen.

Um zu entscheiden, welcher Teil des Abfalls Sondermüll ist und welcher nicht, ist es beim Abriss von Nuklearanlagen notwendig, den Anteil an radioaktiven Stoffen zu bestimmen – aus Gründen des Strahlenschutzes, aber auch aus Kostengründen: Alleine beim Abriss des Kernkraftwerkes Greifswald fallen fast zwei Millionen Tonnen Bauschutt an. Dabei muss der gesamte Schutt auf eine radioaktive Belastung hin geprüft werden, auch wenn mehr als neunzig Prozent davon vollkommen unbedenklich ist. – Bisher ein aufwändiges Unternehmen, denn die Aufarbeitung des Schuttes und seine Analyse auf nur einen einzigen Alpha-Strahler kann mehrere Tage dauern; doch der Abfall muss nicht nur auf einen Stoff, sondern auf eine ganze Palette radioaktiver Substanzen hin untersucht werden.

Cordula Nebelung, Forscherin im Institut für Radiochemie des FZR, hat ein ein-

faches und schnelles Verfahren zur Analyse der im Bauschutt enthaltenen Alpha-Strahler entwickelt. Ihr Verfahren hat wesentliche Vorteile: Nicht nur, dass sie mit einer Messung alle im Bauschutt enthaltenen Alpha-Strahler bestimmen kann, die Analyse ist zudem auch noch in wenigen Stunden abgeschlossen. Dazu muss sie die Probe lediglich vorher mechanisch zerkleinern und auf ein Trägermaterial sprühen. Die Empfindlichkeit ihrer Methode ist so hoch, dass sich damit auch in gewöhnlichem Schutt die natürlich vorhandenen Alpha-Strahler nachweisen lassen.

HMI 2002

Das FZR war auch 2002 wieder mit zwei Ständen auf der Hannover Messe der Industrie vertreten: In Halle 4 hatte das Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung einen eigenen Stand im Innovationszentrum Ingenieurwerkstoffe. Auf dem Gemeinschaftsstand Forschungsland Sachsen präsentierte sich das FZR mit vier Projekten. Mit von der Partie waren die Biomaterialien und der integrierte Optokoppler als „Lab on Chip“-System – beides vom Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung – sowie der Gittersensor aus dem Institut für Sicherheitsforschung.

Biomaterialien – Stents ... und künstliche Gelenke

Herzinfarkt entsteht durch eine schwere Durchblutungsstörung des Herzens. Dazu kommt es, wenn die Gefäßwand durch wucherndes Gewebe immer dicker wird,



Begeisterung selbst bei den jüngsten Messebesuchern.

verhärtet und an Flexibilität verliert. Zusätzlich lagern sich Cholesterin und Kalk ab. Stents (feine Drahtgeflechte zum Stützen des Gefäßes) sind dann eine echte Alternative zur Bypass-Operation. Damit sich keine Blutgerinnsel auf den Stentoberflächen bilden, implantieren Dr. Minh-Tan Pham, Dr. Manfred Maitz und Kollegen vom Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung Tantal in die Stentoberflächen. Zusätzlich erreichen sie damit einen wesentlich besseren Röntgenkontrast, verbessern also die Nachkontrolle dieser Therapie, denn der unbehandelte Stent ist auf dem Röntgenbild praktisch nicht zu sehen. Wird ein Stent in eine Ader eingesetzt, geht das nicht spurlos an den empfindlichen Gefäßen vorüber. Sie werden verletzt, und der Körper kann mit erneuten Wucherungen reagieren. – Dieselbe Stelle droht wieder zu verschließen. Das zu verhindern, ist Dr. Bernhard Noll vom Institut für Bioanorganische und Radio-pharmazeutische Chemie gelungen, indem er die Stents mit Radionukliden behandelt hat. In einem weiteren Projekt

beschichtet Maitz die Stents mit medikamenthaltigen Kunststoffen, die entzündungshemmend wirken. – Was die Radionuklide bereits heute bewirken, also Wucherungen verhindern, will Maitz auch ohne Radioaktivität erreichen. Zudem waren, genauso wie 2001, auch auf der HMI 2002 die künstlichen Hüftgelenke wieder Thema.

fach und handlich: Man kann das Labor mit in die Natur nehmen und muss die Proben nicht mehr ins Labor holen. Zudem ist es besonders kostengünstig, es eignet sich zum Einwegartikel.

Integrierter Optokoppler als „Lab on Chip“-System

Was für die Mikroelektronik immer kleinere Strukturen und schnellere Datenübertragung sind, ist für Umwelt- und Biotechnologie der Wunsch nach schnellen und kostengünstigen Analysemöglichkeiten. So genannte „Lab on Chip“-Systeme, Minilabore, mit denen sich kleinste Mengen Flüssigkeit beispielsweise auf Pestizidrückstände oder Umweltgifte hin analysieren lassen. – Der weltweit erste integrierte Optokoppler in Siliziumtechnologie macht beides möglich. Dr. Wolfgang Skorupa, Dr. Thoralf Gebel und Kollegen vom Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung haben ihn entwickelt.

Gittersensor – Voraussetzung für Computersimulationen sind Experimente

Mischungen aus Flüssigkeiten und Gasen fließen durch unzählige Rohrleitungen und Apparate der chemischen Industrie und Kraftwerkstechnik. Dabei können die Gasblasen die abenteuerlichsten Formen annehmen und ständig Form und Größe ändern. Die rasch wechselnde Gestalt der Grenzflächen zwischen Gas und Flüssigkeit vorhersagen zu können, ist der Wunschtraum vieler Ingenieure, denn damit wäre der Schritt zu Computersimulationen nicht mehr weit. Ließen sich die Vorgänge in Flüssigkeitsströmungen simulieren, könnte sich die Industrie teure Großversuche sparen, die beim Aufbau und der Auslegung neuer Anlagen immer wieder notwendig sind.



Thoralf Gebel (links) erklärt sein Messmodell.

Inzwischen haben die Wissenschaftler ein Bauteil erschaffen, das sich besonders gut für „Lab on Chip“-Systeme für die Sensorik eignet. Der integrierte Optokoppler auf Siliziumbasis kann in den herkömmlichen Prozessschritten für die Chipherstellung aufgebaut und in einen Chip integriert werden. Er besteht aus einem Lichtemitter und einem Empfänger. Versieht man nun den Bereich zwischen Emitter und Empfänger mit kleinen Hohlräumen, können dort die Flüssigkeiten hindurchströmen, die man analysieren möchte. Die Anordnung ist ein-

Dr. Horst-Michael Prasser hat gemeinsam mit Kollegen vom FZR sowie in Kooperation mit der Firma Teletronic Rossendorf den so genannten Gittersensor entwickelt. Der Gittersensor blickt wie eine Zeitlupe in die Zwei-Phasenströmung und nutzt dabei die Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit, die in der Flüssigkeit vorhanden, im Gas jedoch nahezu null ist. Der Sensor liefert bis zu 10 000 Bilder pro Sekunde und macht selbst bei Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als zehn Metern pro Sekunde noch einzelne kleine Gasblasen sichtbar.

In jedem Computer steckt ein Stück Rossendorf – 10 Jahre FZR

Wissenschaftler aus dem Forschungszentrum Rossendorf (FZR) haben mit Partnern das Verfahren entwickelt, mit dem die Silizium-Einkristalle für das 300-Millimeter-Waferprojekt hergestellt werden. „Und so steckt in jedem zukünftigen Computer wohl ein Stück Rossendorf,“ so Frank Pobell, der Wissenschaftliche Direktor des FZR, in seiner Begrüßungsansprache zur Feier des zehnjährigen Bestehens des Forschungszentrums Rossendorf am 7. Januar 2002.

Doch nicht nur Pobell, auch der damalige Ministerpräsident des Freistaates Sachsen, Kurt Biedenkopf, und der Präsident der Leibniz-Gemeinschaft, Hans-Olaf Henkel, sind sich sicher, dass das Forschungszentrum Rossendorf in den zehn Jahren seines Bestehens eine außerordentlich positive Entwicklung genommen hat. „In den unscheinbaren grauen Gebäuden steckt Spitzenforschung, die den weltweiten Vergleich nicht scheuen muss,“ formuliert Henkel, und so sieht es auch der Sächsische Ministerpräsident Kurt Biedenkopf in seinem Grußwort. – Und ebenso urteilte der Wissenschaftsrat in seinem Bewertungsbericht vom November 2000: „Das FZR hat wegen seiner internationalen Ausstrahlung eine hohe Anerkennung in der Wissenschaftsgemeinschaft gefunden.“

Die Festveranstaltung zum zehnjährigen Bestehen des FZR nahmen sowohl Henkel als auch Biedenkopf zum Anlass, auf die Wichtigkeit von exzellenten Forschungseinrichtungen gerade in Ostdeutschland hinzuweisen. „Sachsen hat nur dann eine Zukunft, wenn die Forschung in Sachsen eine Zukunft hat“, betonte Biedenkopf in seinem Grußwort. Auch die Ansiedlung von Infineon und



Die Feierlichkeiten zum zehnjährigen Bestehen des Forschungszentrums Rossendorf. Prof. Frank Pobell, Prof. Kurt Biedenkopf und Prof. Hans-Olaf Henkel.

AMD sei nur erreicht worden, so Biedenkopf, weil Dresden mit seiner Technischen Hochschule und zahlreichen weiteren angesehenen Forschungseinrichtungen habe aufwarten können.

Henkel forderte Subventionen für die Wissenschaft. Forschung koste nun mal Geld, so Henkel, und mit Blick auf Amerika: Dort wird deutlich mehr Geld für Forschung ausgegeben. Wenn wir unsere Pro-Kopf-Ausgaben für die Wissenschaft daran angleichen wollten, müssten wir in jedem Jahr 20 Milliarden Euro zusätzlich für Forschung bereitstellen, so Henkel. Angesichts der 600 Milliarden Euro, die die deutschen Sozialsysteme in jedem Jahr verbrauchen, sei das allerdings gar nicht so viel. – Vor allem, wenn man bedenke, dass die Kosten in diesem Bereich alleine im Jahr 2002 noch einmal um 12,5 Milliarden Euro steigen würden. Und er klagt an: „Bildung hat keine Lobby in Deutschland. Und das in einem

Land, wo es für alles eine Lobby gibt – selbst fürs Auto fahren.“ Und so verpassen wir den Anschluss. Die Lücke wird immer größer, gerade für den Osten Deutschlands werde die Luft immer dünner. „Im Osten gibt es nur einen Wissenschaftler auf 1000 Bewohner, im Westen sind es vier und in Japan sogar acht,“ sagt Henkel.

Das Forschungszentrum Rossendorf wurde am 1. Januar 1992 gegründet. Es ist Mitglied der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz (WGL). Der WGL gehören 80 außeruniversitäre Forschungseinrichtungen an, von denen neben dem FZR noch drei weitere in Dresden ansässig sind. Die Institute der Leibniz Gemeinschaft arbeiten nachfrageorientiert und interdisziplinär; sie sind von überregionaler Bedeutung, betreiben Vorhaben im gesamtstaatlichen Interesse und werden deshalb von Bund und Ländern gemeinsam gefördert.

Lehrerfortbildung 2001/2002

Über 90 Teilnehmer fanden sich am 16. Januar 2002 zur Lehrerfortbildung im FZR ein. – Es waren auch einige Schüler dabei, die etwas über „Geladene Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern“ lernen wollten. Die Vorträge hielten Dr. Peter Michel (Von der Lorentzkraft zur Strahlungsquelle ELBE), Prof. Wolfhard Möller (Schnelle Ionen für die Materialforschung), Dr. Wolfgang Enghardt (Schwere Ionen im Kampf gegen den Krebs) und Dr. Wolfgang Matz (Elektronenkreisbeschleuniger für Biomedizin, Materialforschung und Umwelt). Anschließend führten Dr. Wieland Bürger und Dr. Edgar Richter die Teilnehmer durch das Ionenstrahlzentrum und die Mitarbeiter der Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE organisierten eine Führung in der ELBE-Halle. Zudem gab es einen Film über Schwerionentumorthérapie zu sehen.

Ehrenkolloquium aus Anlass des 65. Geburtstags von Prof. Frank Pobell



Prof.
Frank
Pobell

„Erntedankfest für Professor Pobell“ heißt es in der Presse einen Tag nach dem Ehrenkolloquium, das aus Anlass des 65. Geburtstags von Prof. Frank Pobell am 13. September 2002 im FZR stattfand. Matthias Röbler, der Sächsische Staatsminister für Wissenschaft und Kunst, der Staatssekretär aus dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, Uwe Thomas, sowie Hans-Olaf Henkel, der Präsident der Leibniz-Gemeinschaft, richteten Grußworte an Pobell. Alle Redner waren sich darüber einig, dass Pobell auf eine großartige Karriere sowohl als Wissenschaftler als auch im Wissenschaftsmanagement zurückblicke. „Er hat eine reichliche wissenschaftliche Ernte eingefahren, dafür danken wir ihm heute“, bringt Henkel es auf den Punkt.

Doch auch darüber sind die Redner sich einig: „Über Frank Pobells wissenschaftliche Meriten sollen andere sprechen“, so Henkel. „Ich verstehe nicht viel von Physik. Von Physik bei Temperaturen nahe des absoluten Nullpunkts ganz zu schweigen.“ Über Pobells Zeit als Präsident der Leibniz-Gemeinschaft könne er sich schon eher ein Urteil erlauben, und das tut er dann auch.

Einer der Meilensteine in der Amtszeit Pobells als Präsident der Leibniz-Gemeinschaft sei der Abschluss der Begutachtung aller Leibniz-Institute durch den Wissenschaftsrat (WR) gewesen. „Da wäre der Bericht des WR über die so genannte Systemevaluation zu nennen, der sich im trockenen Stil des Wissenschaftsrates dennoch vor Lob geradezu überschlägt,“ so Henkel in seinem Grußwort. Pobell habe den Prozess moderiert, der die Leibniz-Gemeinschaft zum anerkannten und angesehenen Teil des außeruniversitären Forschungssystems werden ließ, „Frank Pobell hat weit mehr als nur eine Basis für meine Amtsführung geschaffen,“ so Henkel, „er hat auf eine beharrliche und sachliche, dabei ganz uneitle Weise das Ansehen der Leibniz-Gemeinschaft sehr stark gemehrt“. – Eine erfolgreiche Laufbahn habe ihn an die Spitze der größten Forschungseinrichtung Sachsens geführt.

Für den wissenschaftlichen Teil von Pobells Wirken und Schaffen waren nach den Grußworten andere zuständig: Drei seiner ehemaligen Mitarbeiter aus der Bayreuther Zeit haben dem Publikum die Arbeit bei extrem tiefen Temperaturen näher gebracht. Darunter auch Thomas Herrmannsdörfer, der seit einem Jahr im FZR tätig ist und das Dresdner Hochfeldprojekt plant.

Pobell hält mit seiner Arbeitsgruppe aus Bayreuth seit 1996 den Weltrekord für die tiefste jemals erreichte Temperatur: Nur eineinhalb Mikrokkelvin (millionstel Kelvin) haben die Forscher damals erreicht. Es war nicht ihr erster Weltrekord, doch die vorhergehenden wurden immer wieder von anderen Arbeitsgruppen eingeholt. – Dieser besteht seit sechs Jahren.

Pobell ist seit 1996 Wissenschaftlicher Direktor des Forschungszentrums Rossendorf. Er war von 1998 bis 2001 Präsident der WGL, seit 2001 berät er Henkel als Past-Präsident in wissenschaftlichen Fragen. Pobell, der in München Physik studiert und sich dort auch habilitiert hat, war nach Stationen an der Cornell University, USA, im Forschungszentrum Jülich und an der Universität Bayreuth tätig. Dort hat er dann mit seinen Mitarbeitern die weltweit besten Tiefsttemperaturanlagen aufgebaut.

Präsentation in Brüssel

Auch für die Leibniz-Gemeinschaft wird die europäische Forschungsförderung immer wichtiger. Am 1. Oktober 2002 stellten sich 27 ausgewählte Leibniz-Institute mit einer Abendpräsentation in Brüssel vor. Darunter auch das Forschungszentrum Rossendorf.

Aus dem FZR waren vor allem die Aktivitäten des Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung mit ihrem von der EU geförderten Ionenstrahlzentrum und der Gittersensor aus dem Institut für Sicherheitsforschung ein Thema. Mit dem Gittersensor lassen sich zum Beispiel Strömungen aus Gas und Flüssigkeit sichtbar machen. Noch bei Strömungsgeschwindigkeiten von zehn Metern pro



Sekunde sind einzelne Gasblasen zu erkennen.

Etwa 130 Abgeordnete des Europäischen Parlaments und Beamte der Forschungsadministration nutzten die Gelegenheit, sich über das Forschungs- und Dienstleistungsspektrum der Leibniz-Institute zu in-



formieren. An der FZR-Präsentation fanden besonders angeregte Diskussionen zwischen dem EU-Forschungskommissar Philippe Busquin und Dr. Horst-Michael Prasser (FZR) statt. Auch Busquins Büroleiterin, Tania Friederichs, wollte nichts verpassen.

Personalia

Wechsel an der Spitze – das FZR hat einen neuen Kaufmännischen Direktor

Im März 2002 verabschiedete sich Gerd Parniewski nach zehnjähriger Tätigkeit als Kaufmännischer Direktor aus dem FZR, um in den Ruhestand zu treten.



Dr. Peter Joehnk ist seit April 2002 Kaufmännischer Direktor im FZR. Er leitete die letzten zehn Jahre das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW) administrativ.



Professor Häfele ist Ehrenmitglied des Vereins



Seit November 2002 ist Prof. Wolf Häfele Ehrenmitglied des Vereins Forschungszentrum Rossendorf. Häfele ist Gründungsdirektor des FZR und stand dem FZR von April 1991 bis Februar 1996 vor.

Berufungen

- Herr Prof. Jörg Steinbach ist am 1. Juli 2001 dem Ruf auf die Stelle des Direktors des Instituts für Interdisziplinäre Isotopenforschung an der Universität Leipzig, verbunden mit einer C4-Professur für Isotopenforschung an der Universität Leipzig, gefolgt.
- Herr Prof. Thomas Fanghänel hat den Ruf auf eine C4-Professur an der Universität Heidelberg, verbunden mit der Position des Direktors des Instituts für Nukleare Entsorgung am Forschungszentrum Karlsruhe, angenommen.
- Herr Dr. Tobias Reich hat den Ruf auf eine C3-Professur für Kernchemie an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz erhalten.

Konferenzen

Auch in den Jahren 2001/2002 hat das Forschungszentrum Rossendorf wichtige internationale Konferenzen und Workshops ausgerichtet oder war an deren Organisation beteiligt.

- Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung:
 - Sommerschule „Nuclear Probes and Ion Beams“
 - 12. Internationale Sommerschule „Vacuum, Electron and Ion Technologies“
 - 9. Internationaler Workshop „Slow Positron Beam Techniques for Solids and Surfaces (SLOPOS-9)“
 - Internationaler Workshop „Nanostructures for Electronics and Optics (NEOP)“
 - 6. Internationale Konferenz „Computer Simulation of Radiation Effects in Solids (COSIRES)“
- Institut für Kern- und Hadronenphysik:
 - Internationaler Workshop „Antikaon production in nucleon-nucleus collisions near threshold“
 - Internationaler Workshop „Multiwire-driftchambers for di-lepton spectroscopy at SIS-HADES“

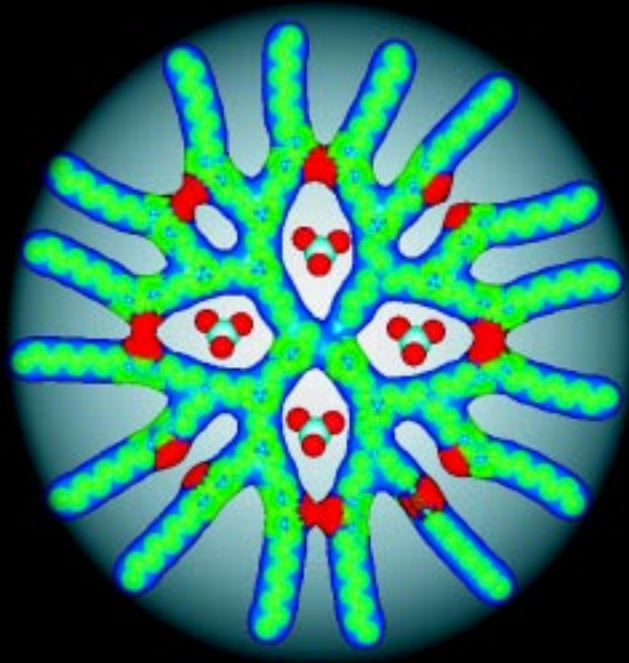
- Gemeinsamer Workshop der Institute für Kern- und Hadronenphysik sowie für Ionenstrahlphysik und Materialforschung:
 - Workshop „Infrared and THz Radiation: Generation and Application“
- Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie:
 - Workshop „Development of novel peptide based radiopharmaceuticals for in vivo receptor associated tumor diagnosis and therapy“
 - „2nd Rhenium-188 Meeting“
- Institut für Radiochemie
 - „MIGRATION '01 – 8th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere“
- Institut für Sicherheitsforschung
 - Workshop „Prozessführung und Zustandserkennung in Chemieanlagen“
 - Abschlusstagung des Innovationskollegs „Magnetofluidynamik elektrisch

Besuche

Unter den etwa 5000 Gästen, die das FZR in den Jahren 2001 und 2002 besucht haben, befanden sich der Ministerpräsident des Freistaates Sachsen, Prof. Kurt Biedenkopf, der Sächsische Staatsminister für Wissenschaft und Kunst, Prof. Hans Joachim Meyer, und sein Nachfolger im Amt, Dr. Matthias Röβler. Außerdem besuchten das FZR der Staatssekretär aus dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, Dr.-Ing. E.h. Uwe Thomas, der Wirtschaftsbürgermeister der Stadt Dresden, Dirk Hilbert, der Präsident der Leibniz-Gemeinschaft, Prof. Dr.-Ing. E.h. Hans-Olaf Henkel, der Leiter der Abteilung Forschung, Umwelt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Ministerialdirektor Dr. Hermann Schunck und der Amtschef des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft, W.-E. Kuhl.

ERGEBNISSE





Ein weit verzweigtes Transportsystem

Radiomarkierte intelligente Nanomoleküle für die Krebstherapie

Holger Stephan¹, Hartmut Spies¹, Bernd Johannsen¹,
Karsten Gloe², Uwe Hahn³ und Fritz Vögtle³

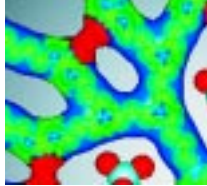
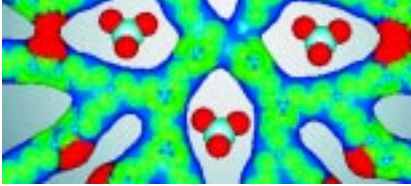
¹Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie

²Institut für Anorganische Chemie, Technische Universität Dresden

³Kekulé-Institut für Organische Chemie und Biochemie, Universität Bonn

Weltweit werden jährlich zehn Millionen Neuerkrankungen an Krebs diagnostiziert, und diese Zahl wird sich in den nächsten zwanzig Jahren noch verdoppeln [1]. Noch immer sind die Therapieerfolge bei einigen aggressiven Tumoren oder generell im fortgeschrittenen Stadium der Krankheit sehr begrenzt. Eine der großen Herausforderungen an die Medizin im 21. Jahrhundert besteht daher in der weiteren Vervollkommnung der Krebstherapie. Die Behandlung von Krebs erfolgt in der Regel durch einen chirurgischen Eingriff, durch externe Strahlentherapie oder Chemotherapie. Doch es gibt auch andere Möglichkeiten. Bei bestimmten Tumoren ist beispielsweise

eine so genannte Radionuklidtherapie besonders wirksam. Bekanntestes Beispiel dafür ist die Behandlung von Schilddrüsenkarzinomen mit Iodid-131. Da sich Iod vor allem in der Schilddrüse anreichert, kann die Strahlung des Radionuklids dort direkt auf den Tumor einwirken. Ein weiteres viel versprechendes Konzept bei der Krebsbehandlung ist die Radioimmunotherapie. Hierbei werden Radionuklide an tumorsuchende Antikörper oder Fragmente von Antikörpern gekoppelt. Mit den Antikörpern gelangen die Radionuklide zum Tumor, wo die radioaktive Strahlung ihre zellzerstörende Wirkung entfalten kann. Gesundes Gewebe wird dabei weitgehend geschont.



Syntheschema zur Herstellung von Kaskadenmolekülen: Durch Umsetzung einer Verbindung mit zwei reaktiven Endgruppen (Diamin) mit einem ungesättigten Nitril gelangt man zu einem Molekül mit vier reaktiven Nitrilgruppen, aus dem durch einen nachfolgenden Reduktionsschritt die entsprechende Verbindung mit vier reaktiven Aminogruppen entsteht. Durch Wiederholung (repetitive Strategie) der Syntheschritte ist es möglich, Moleküle mit der jeweils doppelten Anzahl an reaktiven Endgruppen zu erzielen. So erzeugt man Generation für Generation (1. Generation: vier Endgruppen, 2. Generation: acht Endgruppen, 3. Generation: sechzehn Endgruppen...). Zunächst wurde für diese Verbindungsklasse der Begriff Kaskadenmoleküle eingeführt.

Dendrimermolekül der 5. Generation: Ein Dendrimer mit Polyamin-Grundgerüst. Es ist auf dem divergenten Syntheseweg zugänglich und weist 64 reaktive Aminogruppen an der Peripherie auf. Solche Moleküle werden bereits im Kilogramm-Maßstab hergestellt und sind auch mit Hydroxyl- oder Carbonsäuregruppen auf der Oberfläche käuflich.

Dendronmolekül der 3. Generation: Auf dem konvergenten Syntheseweg gelangt man zu Dendrons mit einer Polyetheraryll-Struktur, die beispielsweise bei der Entwicklung von künstlichen Enzymsystemen eine Rolle spielen [3].

☐ = fokale Gruppe

In dem Zusammenhang gewinnt in jüngster Zeit eine neue Klasse chemischer Verbindungen an Bedeutung, die so genannten Dendrimere. Begonnen hat die Dendrimerchemie mit der Beschreibung von Kaskadenmolekülen – stark verzweigte baumartige Moleküle – im Jahre 1978 [2]. Eine zunächst verhaltene, aber nunmehr stürmische Entwicklung eines neuen Arbeitsgebietes war die Folge. Aus der Molekülarchitektur hat man die heute gebräuchliche Bezeichnung Dendrimer (griechisch: dendron = der Baum, meros = der Teil) für diese Stoffklasse abgeleitet.

Die Idee, Moleküle mit perfekter Verzweigung und einer bestimmten Anzahl funktioneller Gruppen aufzubauen, haben verschiedene Forschergruppen mit dem Ziel aufgegriffen, neue Materialeigenschaften zu erzeugen und damit vielfältige Anwendungsgebiete zu erschließen. In der Zwischenzeit haben sich sowohl die Synthesekunst als auch die Charakterisierungsmethoden verbessert, sodass Wissenschaftler zielgerichtet Struktur und Funktion solcher Moleküle einstellen können.

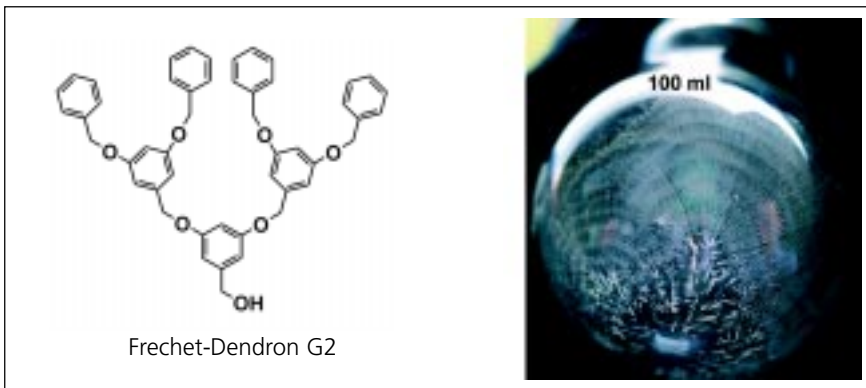
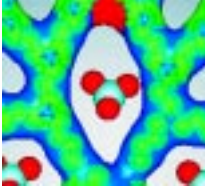
Für die Synthese der Dendrimer gibt es zwei verschiedene Konzepte. Zum einen geht man von einem Kernmolekül aus und ordnet darum herum von innen nach

außen Verzweigungseinheit für Verzweigungseinheit an (divergenter Weg). Auf diese Weise gelangt man beispielsweise zu Molekülen mit einem Polyamin-Grundgerüst. Eine weitere Möglichkeit, perfekt verzweigte Moleküle zu entwickeln, ergibt sich daraus, einzelne Äste (Dendrons), ausgehend von fokalen Gruppen, aufzubauen. In einem abschließenden Schritt kann man dann die Äste mit Hilfe dieser fokalen Gruppen mehrfach an einen gewünschten Kernbaustein heften (konvergenter Weg). Die erhaltenen Dendrimermoleküle weisen eine faszinierende Ästhetik auf und erinnern uns dabei an bekannte Struk-

turen aus unserem Leben – Korallen, Nervenzellen, ja sogar Bonsai sind ähnlich fein verzweigt. Mit etwas Glück erhält man sogar bei der Herstellung derartiger Moleküle im Laborkolben makroskopische Strukturen, die der Struktur auf molekularer Ebene entsprechen. Aufgrund vielfältiger Strukturvariationen, die sich sowohl für den Aufbau des Grundgerüsts als auch für die Modifizierung der Peripherie ergeben, lassen sich die Eigenschaften von Dendrimeren für die verschiedensten Anwendungsgebiete maßschneidern. Zu einem der attraktivsten Forschungsfelder gehört dabei zweifellos die Medi-



Beispiele aus dem täglichen Leben mit einer typischen Dendrimerstruktur: Nervenzelle (Foto links: Science 1999, 283, 1924); Bonsai (Mitte); Koralle (rechts).



Kristallisationsmuster, das bei der Herstellung eines so genannten *Frechet-Dendrons* der 2. Generation in einem 100-ml-Kolben entstand.

zin mit Anwendungen in Diagnostik und Therapie. Entwicklungsarbeiten zu neuen hochauflösenden Kontrastmitteln für die Abbildung von Blutgefäßen sowie zu synthetischen Impfstoffen und zu Arzneimitteltransportsystemen auf der Basis von Dendrimern sind im Gange [4]. Darüber hinaus sind Dendrimere als Enzym- und Liposomenmodelle sowie im Hinblick auf die Entwicklung synthetischer Zellen für die Molekular- und Zellbiologie interessant.

Knäuel oder Stäbchenform?

In Abhängigkeit von Art und Generation der verwendeten Verzweigungseinheiten sowie der an der Peripherie aufgepfropf-

ten Molekülteile überstreichen Dendrimere einen Größenbereich zwischen einem und zehn Nanometern (millionstel Millimeter). Niedrige Generationen haben eher eine flache seesternartige Form. Mit zunehmender Anzahl der Generation nehmen sie dann eine kugelige Gestalt an, und insbesondere in physiologischer Umgebung stabilisieren sie sich zu einem kompakten Knäuel. Der Durchmesser eines Dendrimers mit Polyamin-Grundgerüst der 4. Generation liegt in Lösung etwas unter vier Nanometer, der der 5. Generation liegt etwas darüber [5]. Dendrimere ab der 6. Generation – die mittlerweile nahezu strukturperfekt herstellbar sind – ähneln in Größe und Gestalt Biomolekülen wie globulären Pro-

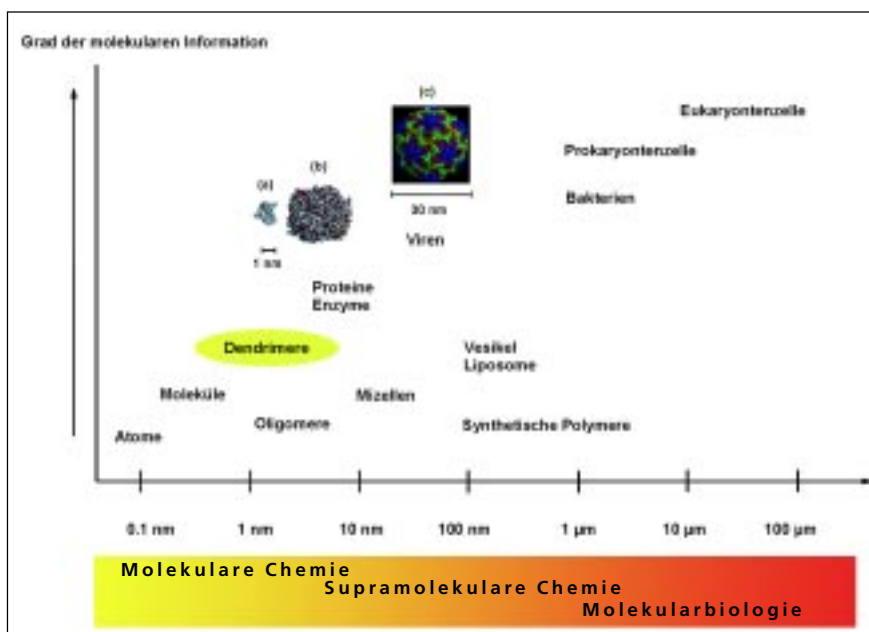
teinen und Enzymen. So erreicht man mit Dendrimern der 6. und 7. Generation die Größe und Gestalt von Hämoglobin (etwa sechs Nanometer), dem wichtigsten, mit der Atmung verbundenen Protein des Menschen.

Wir sind inzwischen auch in der Lage – durch den Einsatz von speziellen Kernmolekülen – die Gestalt der Dendrimere zu variieren. So müssen Dendrimere nicht mehr unbedingt eine kugelige Gestalt haben, sie können auch Stäbchenform aufweisen. Diese Form ist in der Natur ebenfalls weit verbreitet und tritt beispielsweise bei Bakterien oder Viren auf. Durch geschickte chemische Modifizierung an der Dendrimeroberfläche gelingt es weiterhin, einzelne Dendrimere zu stabilen Molekülverbänden zusammenzuschließen. Sie gruppieren sich unter bestimmten Bedingungen ohne äußeres Zutun, durch Selbstorganisation.

Somit können wir Strukturen erzeugen, die der Größe von Viren oder Liposomen entsprechen. Im Vergleich zu Bakterien oder einer menschlichen Zelle sind die derzeitigen Dendrimere beziehungsweise deren Molekülverbände allerdings sehr klein. Damit besitzt diese Stoffklasse ideale Größe und Eigenschaften, um sie zum Transport von Wirkstoffen in verschiedene Regionen des Körpers einzusetzen.

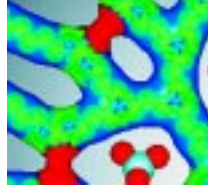
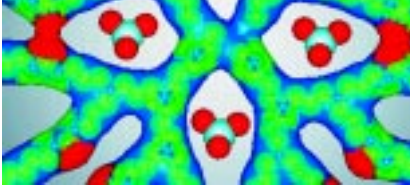
Dendrimere für die Krebstherapie?

Dendrimere mit einer positiven Oberflächenladung bilden hinreichend stabile Assoziate mit negativ geladenen Genen beziehungsweise der DNA aus. Sie können diese in eine Zelle und sogar bis in den Zellkern transportieren. Arbeiten an solchen nichtviralen Transportsystemen sollen es möglich machen, heilende Gene in kranke Zellen einzuschleusen [6]. Die Gentherapie ist ein hoffnungsvoller Ansatz, um zukünftig den Krebs zu besiegen.



Dimensionshierarchie von Atomen über Moleküle bis zu biologischen Zellen in Abhängigkeit vom Grad der molekularen Information.

(a – Polypropylenamin-Dendrimere der 3. Generation, b – Desoxyhämoglobin, c – Rhinovirus)



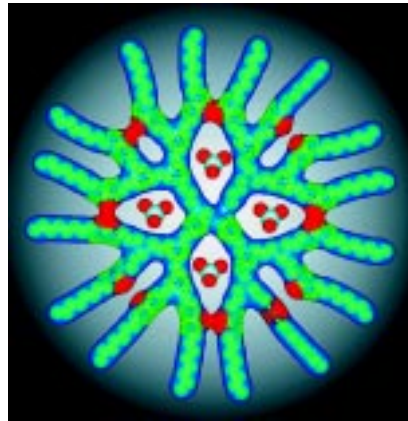
Eine weitere Möglichkeit bietet die Neutroneneinfangtherapie. Hierzu benötigt man Clustermoleküle, die eine möglichst große Anzahl von Isotopen mit einem hohen Einfangquerschnitt für thermische Neutronen aufweisen. Dazu gehören beispielsweise Bor-10 und Gadolinium-157. Heute sind Dendrimere bekannt, die 80 Bor- beziehungsweise über 250 Gadoliniumatome pro Molekül aufnehmen können [7, 8]. Nach einer Deponierung im Tumorgewebe müssen die Verbindungen mit einem externen Neutronenstrahl aktiviert werden. Erst dann erzeugen sie eine für das kranke Gewebe letale Strahlungsenergie.

Wir verfolgen einen anderen Weg, und zwar wollen wir eine hohe zelltoxische Strahlung direkt vor Ort bringen. Um das zu erreichen, packen wir radioaktive Moleküle fest in Dendrimere ein. Gleichzeitig modifizieren wir die Dendrimeroberfläche so, dass sie sich spezifisch in einem Tumorgewebe anreichert. Für eine derartige Anwendung sind hochwirksame Radionuklide notwendig, die beim Zerfall Partikel aussenden und Halbwertszeiten im Bereich einiger Stunden bis wenige Tage aufweisen. Es soll also genügend Zeit für die Herstellung der Verbindungen zur Verfügung stehen. Um die Strahlenbelastung zu minimieren, müssen auf der anderen Seite die Radionuklide in relativ kurzer Zeit in stabile Folgeprodukte übergehen.

Wir haben die Radioisotope Kupfer-64 und Rhenium-188 mit Halbwertszeiten von etwa dreizehn beziehungsweise sieben Stunden ausgewählt. Neben der gewünschten Partikelstrahlung (Beta-Strahlung) senden diese Isotope gleichzeitig Gammastrahlung aus, die es mit Hilfe einer speziellen Kamera erlaubt, die Verteilung der Radioaktivität zu erfassen und bildlich darzustellen. Darüber hinaus sind die Isotope leicht verfügbar. Kupfer-64 können wir im instituts-eigenen Zyclotron herstellen. Für die Gewinnung von Rhenium-188 nutzen wir einen geeigneten Generator, der auch in Kliniken aufgestellt werden kann. Die unterschiedliche Eindringtiefe der Strahlung in das Gewebe – etwa 0,2 Millimeter für Kupfer-64 und 11 Millimeter für Rhenium-188 – gestattet eine breite Anwendung für Tumore verschiedener Größe.

Maßgeschneidertes Nichts

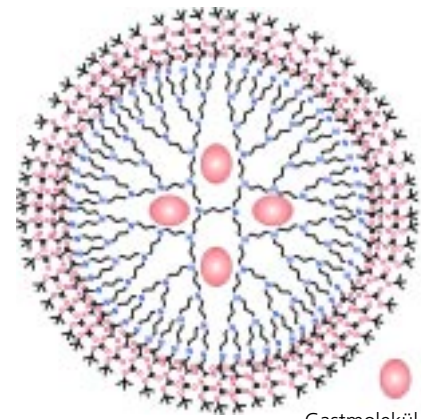
Da Dendrimere definierte Hohlräume ausbilden, bieten sie die Möglichkeit, radioaktive Gastmoleküle einzulagern. Diese Eigenschaft haben wir uns zunutze gemacht und unter anderem harnstoffhaltige Dendrimere mit einem Polyamin-Grundgerüst entwickelt und eingesetzt. Die Verbindungen sind unter physiologischen Bedingungen im Inneren positiv geladen und können demzufolge negativ geladene Moleküle aufnehmen. So ist es möglich, das therapeutisch relevante Radionuklid Rhenium-188 in seiner stabilsten Form als Anion zu binden.



Computermodell eines harnstoffhaltigen Dendrimers der 3. Generation mit vier eingeschlossenen Perrhenat-Anionen.

Bei unseren Experimenten haben wir mit der Erhöhung der Generation verschiedene Abhängigkeiten festgestellt: Ein Dendrimer der 3. Generation kann bis zu vier Perrhenat-Anionen im Hohlraum aufnehmen. Untersuchungen an einem Dendrimer der 4. Generation haben gezeigt, dass bis zu acht Anionen im Hohlraum angeordnet sind. – Je höher die Generation, um so mehr Anionen können die Dendrimere aufnehmen; gleichzeitig steigt auch die Bindungsstärke.

Im Tierversuch konnten wir nachweisen, dass der Organismus harnstoffhaltige Dendrimere gut verträgt und die Verbindungen eine günstige Bioverteilung aufweisen. Jedoch sind die elektrostatischen Wechselwirkungen noch zu schwach, um im Körper die radioaktiven Gastmoleküle am Dendrimer hinreichend stabil



Gastmolekül

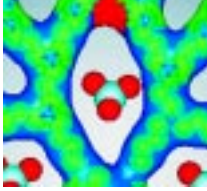
Dendritische Box mit eingeschlossenen Gastmolekülen.

zu binden. Hierzu ist ein weiterer Schritt notwendig.

Eine holländische Forschergruppe hat so genannte dendritische Boxen entwickelt, die beispielsweise Farbstoffmoleküle fest im Inneren des Dendrimers einschließen [9]. Dazu werden die negativ geladenen Farbstoffmoleküle durch das positiv geladene Polyamingerüst des Dendrimers gebunden. Anschließend pflöpfen die Wissenschaftler an der Peripherie des Dendrimers kovalent besonders voluminöse Aminosäurebausteine auf. Der Einschluss ist so stabil, dass erst nach Kochen in Salzsäure und dem damit verbundenen Abbau der Pflöpfe die Farbstoffmoleküle freigesetzt werden können. Dendritische Boxen dieser Struktur sind allerdings aufgrund von Löslichkeitsproblemen nicht für einen Einsatz unter physiologischen Bedingungen geeignet. Wir wollen nun versuchen, dendritische Boxen mit bioverträglichen Pflöpfen zu entwickeln, die radioaktive Gastmoleküle stabil einschließen und gleichzeitig einen zielgerichteten Transport in vivo ermöglichen.

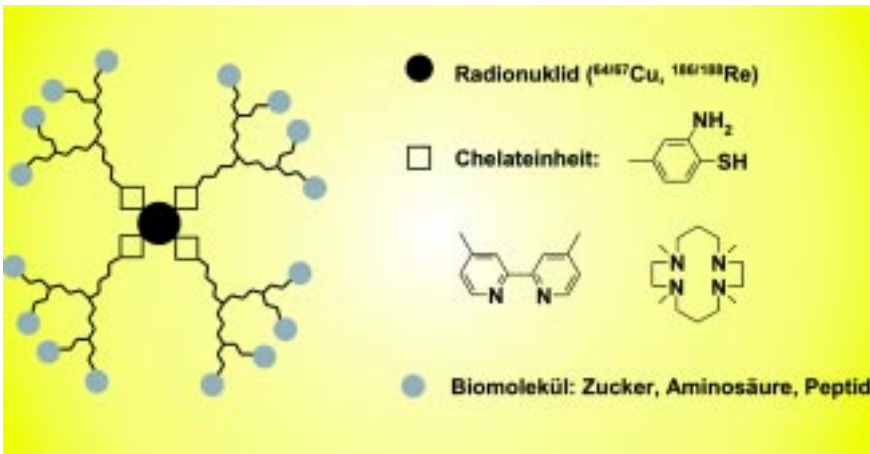
Umhüllte radioaktive Metalle

In biologischen Systemen binden metallhaltige Proteine das Metall durch eine komplexierende Einheit in ihrem Zentrum, außen herum sind Aminosäureketten angeordnet. Beispielsweise wird das Eisen im Hämoglobin durch einen Porphyrin-Ring komplexiert und ist von mehreren hundert Aminosäuren von der Umgebung abgeschirmt.

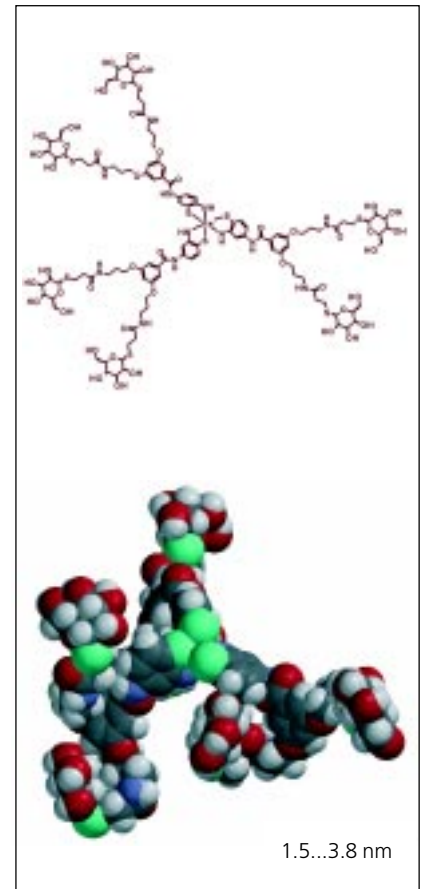


Die Nachahmung dieses häufig genutzten Konzepts erscheint besonders aussichtsreich im Hinblick auf ein festes Verpacken von radioaktiven Metallen. Daher wollen wir in analoger Weise die radioaktiven Isotope Kupfer-64 und Rhenium-188 mit Hilfe starker Chelatbildner fest binden und um dieses Kernmolekül Verzweigungseinheiten plazieren, die an der Oberfläche Biomoleküle wie Zucker, Aminosäuren und Peptide enthalten. Die Biomoleküle sollen eine Anreicherung im Tumorgewebe bewirken. Gegenwärtig arbeiten wir an rheniumhaltigen Dendrimeren mit sechs Glucosemolekülen an der Peripherie.

Die Herstellung weiterer Metallodendrimerer und die Charakterisierung ihres Verhaltens im sowie außerhalb des Körpers ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die uns in den folgenden Jahren beschäftigen wird. Dazu ist die Zusammenarbeit von Experten aus unterschiedlichen Fachdisziplinen wie der klassischen Chemie, der supramolekularen Chemie (Chemie von Molekülverbänden auf der Basis von nichtkovalenten intermolekularen Wechselwirkungen) und der Molekularbiologie unerlässlich. Eine enge Kooperation des FZ Rossendorf mit der TU Dresden, der Universität Bonn, der TU Bergakademie Freiberg und dem Institut für Polymerforschung Dresden soll zum Gelingen dieses Vorhabens beitragen.



Konzeption für die Entwicklung nanoskopischer Dendrimerer mit eingekapselten Radionukliden für die Radioimmuntherapie.



Rheniumhaltiges Dendrimer der 1. Generation mit sechs Glucosemolekülen an der Peripherie.

Die Arbeiten werden vom Sächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert.

Literatur

- [1] S. Plesničar, A. Plesničar: Cancer: A Reality in the Emerging World, *Semin. Oncol.* 2001, 28, 210-216.
- [2] E. Buhleier, W. Wehner, F. Vögtle: „Cascade“- and „Nonskid-Chain-like“ Synthesis of Molecular Cavity Topologies, *Synthesis* 1978, 155-158.
- [3] S. Hecht, J. M. J. Frechet: Dendritische Einkapselung von aktiven Zentren, *Angew. Chem.* 2001, 113, 76-94.
- [4] vgl. M. Fischer, F. Vögtle: Dendrimerer: vom Design zur Anwendung – ein Fortschrittsbericht, *Angew. Chem.* 1999, 111, 934-955; K. Inoue: Functional dendrimers, hyperbranched and star polymers, *Progr. Polym. Sci.* 2000, 25, 453-571.
- [5] D. Pötschke, M. Ballauf, P. Lindner, M. Fischer, F. Vögtle: Analysis of the Structure of Dendrimerer in Solution by Small-Angle Neutron Scattering using Contrast Variation, *J. Appl. Cryst.* 2000, 33, 605-608.
- [6] M. Weber: Neue Techniken zum Gentransfer in Eukaryontenzellen, *Nachr. Chem.* 2000, 48, 18-23.
- [7] B. Qualmann, M. M. Kessels, H.-J. Musiol, W. D. Sierralta, P. W. Jungblut, L. Moroder: Synthese Bor-reicher Lysindendrimerer zur Proteinmarkierung in der Elektronenmikroskopie, *Angew. Chem.* 1996, 108, 970-973.
- [8] H. Kobayashi, S. Kawamoto, T. Saga, N. Sato, T. Ishimori, J. Konishi, K. Ono, K. Togashi, M. Brechbiel: Avidin-dendrimer-(1B4M-Gd)₂₅₄: A Tumor-Targeting Therapeutic Agent for Gadolinium Neutron Capture Therapy of Intraperitoneal Disseminated Tumor Which Can Be Monitored by MRI, *Bioconjugate Chem.* 2001, 12, 587-593.
- [9] J. F. G. A. Jansen, E. M. M. de Brabander-van den Berg, E. W. Meijer: Encapsulation of Guest Molecules into a Dendritic Box, *Science* 1994, 266, 1226-29.



Hydrodynamische Auffahrunfälle

Ein einfaches Prinzip zur Vermeidung von Druckstößen in Rohrleitungen

Horst-Michael Prasser¹, Andreas Dudlik² und Stefan Schlüter²

¹Institut für Sicherheitsforschung

²Fraunhofer-Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT

Bremsen quietschen, von hinten heranrasende Fahrzeuge krachen in eine immer weiter anwachsende Wand aus Schrott. Die auftretenden hohen Kräfte falten die stolzesten Karossen zu Knäuel zusammen als wären sie aus Pappe. Glücklicherweise, der da unbeschadet herauskommt. Das passiert bei einem Auffahrunfall, wenn sich dem Verkehr unerwartet ein Hindernis entgegenstellt und abgebremst werden muss – schneller als es die Bremsen hergeben. Physikalisch wird Bewegungsimpuls in Kraft umgesetzt – in Kraft, die die Autos deformiert und so den Schaden verursacht. In Rohrleitungen geht es nicht viel anders zu, wenn eine strömende Flüssigkeit beispielsweise durch ein Ventil schnell gebremst wird. Nur, dass die „Autobahn“ hier

noch viel dichter befahren ist. Eine unvorstellbare Anzahl von Molekülen rast ohne jeden Sicherheitsabstand dahin. Am Absperrventil ist dann Schluss; der Fluss wird gestoppt, und der Druck steigt plötzlich an. Die Moleküle, die von hinten kommen, fahren auf – genauso wie Autos auf der Autobahn. Das Ergebnis ist eine Druckwelle, die sich entgegen der anfänglichen Strömungsrichtung mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Je nach Höhe des Drucks können Dichtungen bersten, die Rohrleitung platzt, oder das Ventil wird zerstört. Größere Flüssigkeitsmassen, die plötzlich ihre Geschwindigkeit oder ihre Bewegungsrichtung ändern, rütteln an der Rohrleitung und lassen sie von den Auflagern springen.



Störfall mit Schadstoffemission

Was dann passiert, ist, je nachdem, was da strömt, entweder ein Chemiestörfall mit Gefahrstoffemissionen in die Umwelt, ein Brand oder, bei glimpflichem Verlauf, einfach nur der Verlust der Anlage und teurerer Produktionsausfall. Aus diesem Grunde suchen Betriebsingenieure, denen die Risiken des schnellen Absperrens von Rohrleitungen bekannt sind, nach pragmatischen Methoden zur Vermeidung von Druckstößen. Das kann zum Beispiel ein verzögertes Schließen beziehungsweise Öffnen von Armaturen oder eine stärkere Auslegung der Leitungen und Halterungen sein.

Doch diese Maßnahmen muten bei genauem Hinsehen eher wie Notlösungen an: Die Verstärkung von Bauteilen verteuert die Anlage, es ist also immer erstrebenswert, den Druckstoß von vornherein zu verhindern. Fest ausgelegte Sicherheitseinrichtungen haben jedoch den Nachteil, dass sie bei wechselnden Betriebsbedingungen nicht immer optimal angepasst sein können. Auch ist es schwierig, alle zu erwartenden Betriebszustände von Anfang an vorherzusehen und die entsprechenden Sicherheitssysteme zu planen. Die Strömungsvorgänge können sich schon bei vergleichsweise einfachen Anlagen durch das Zusammenspiel der Einflussgrößen Leitungsgeometrie (Länge, Profil und Lagerung), Grad der Vernetzung des Leitungssystems und der möglichen Abweichungen vom Normalbetrieb (Pumpenausfall, Notabsperren, Leckagen, Anfahrvorgänge) von Fall zu Fall stark unterscheiden. Daher ist hier Sicherheitstechnik gefragt, die sich von selbst den jeweils vorliegenden Randbedingungen anpasst, das heißt, die adaptiv funktioniert. Außerdem sollten sicherheitstechnische Zusätze möglichst zuverlässig sein, und dazu gehört, dass sie ohne Hilfsenergie auskommen. Daher bieten sich passive und natürlich kostengünstige Systeme zur Verhinderung der „Auffahrunfälle in Rohrleitungen“ an.

Flüssigkeiten lassen sich nicht ruckartig abbremsen: Bringt man die Strömung durch ein Ventil zum Stillstand, entsteht zunächst ein Druckstoß und einige Sekunden später ein Kavitationsschlag. Die Folge sind extrem hohe Belastungen, die auf Absperrarmatur und Rohrleitung wirken.

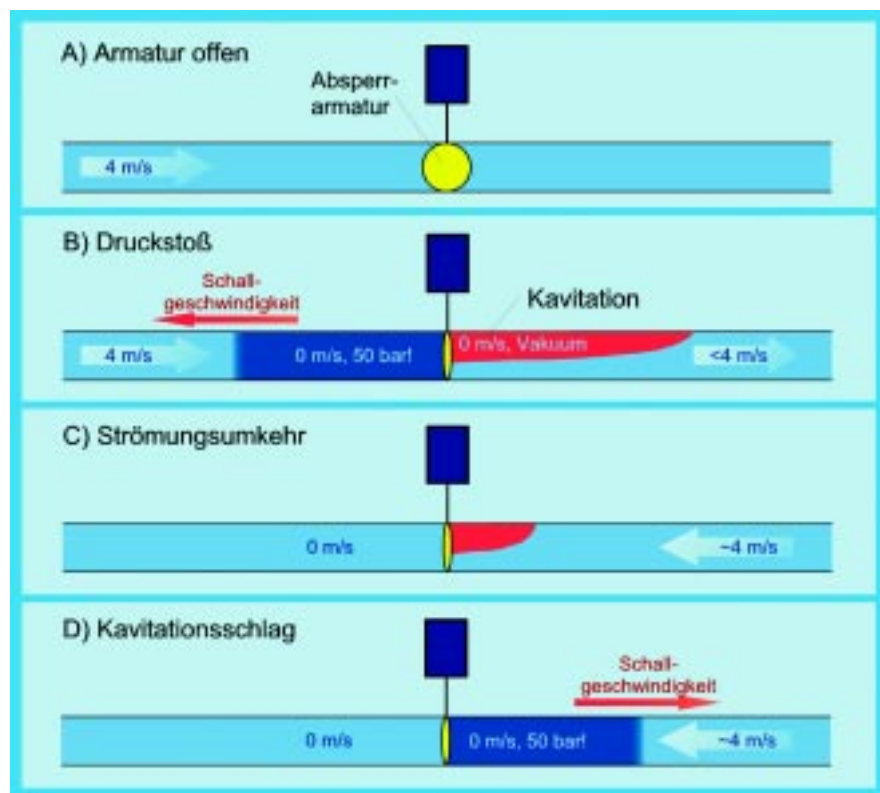
Doch was passiert eigentlich beim Schließen eines Ventils? – Es gibt deutliche Unterschiede im Verhalten der Flüssigkeit in der Rohrleitung vor und hinter der Absperrarmatur. Während sich das Abbremsen vor dem Ventil in kurzzeitigem Druckanstieg äußert, kommt es hinter der Armatur erst einmal zu einem Druckabfall. Nehmen wir ein Beispiel: Vor der Armatur kann der Druck in einer Stahlleitung, in der Wasser bei Umgebungstemperatur mit vier Metern pro Sekunde fließt, durch schnelles Absperrern auf fünfzig Bar ansteigen. Die resultierenden Kräfte, die auf einen Festpunkt wirken, können dabei die normalen Gewicht- und Reibungskräfte durchaus um das 100-fache übersteigen. Hinter der Absperrstelle fließt die Transportflüssigkeit, die das Ventil schon passiert hat, aufgrund ihrer Trägheit zunächst annähernd mit Ausgangsgeschwindigkeit weiter. Dabei sinkt der Druck hinter dem Ventil rasch ab. Wenn dann der Siededruck unterschritten wird, bilden sich großräumige, expandierende Dampfblasen. Der Druck hinter der Absperrstelle (Sättigungsdruck der Flüssigkeit) ist nun kleiner als am Ende der Leitung. Dadurch wird die Flüssigkeitsströmung verzögert und schließlich wieder zurück in Richtung

der Absperrstelle beschleunigt. – Es tritt Strömungsumkehr ein. Die vorher gebildeten Dampfblasen kondensieren schnell, die Flüssigkeit prallt auf die geschlossene Armatur. Das Resultat ist ebenfalls ein Druckstoß, der in diesem Fall Kavitationsschlag genannt wird.

Die Wirkung des Kavitationsschlages stromabwärts ist vergleichbar mit der des Druckstoßes stromaufwärts der Armatur, nur tritt der Kavitationsschlag meist erst einige Sekunden nach dem Schließen der Armatur auf. Da die beiden Arten von Druckstößen verschiedene Ursachen haben, mussten wir demzufolge auch unterschiedliche Methoden zu ihrer Vermeidung finden.

Ein in der Praxis durchaus übliches Herangehen, um Druckstöße zu verhindern, beruht auf der Verzögerung des Schließvorgangs der Armatur. Dazu kann man die Armatur mit einem Dämpfer ausstatten, der es ermöglicht, die Schließzeit fest einzustellen. Damit wird die Armatur langsam genug geschlossen, und der Druckstoß auf der Zulaufseite verschwindet.

Doch die erforderliche Schließzeit steigt mit zunehmender Länge der Zuleitung und mit steigender Fördermenge an und



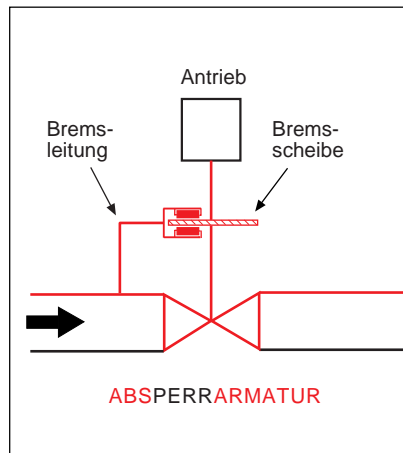


ist zudem noch von einigen weiteren Faktoren abhängig. Eine einmal eingestellte Schließzeit ist deshalb nicht immer optimal. Man denke an ein System mit mehreren Tanks, aus denen das Medium über unterschiedlich lange Leitungen zu einer Anlage oder einem Tankschiff gefördert wird – einmal über eine kurze, ein anderes Mal über eine lange Zuleitung. Um in allen Fällen Druckstöße ausschließen zu können, muss die sich aus der größten Zuleitungslänge ergebende Schließzeit eingestellt werden. Wenn man dann auf einen Behälter mit kürzerer Verbindungsleitung umschaltet, ist die Schließzeit unnötig groß. Bei einer Notabspernung würde so noch deutlich mehr Flüssigkeit durch die Leitung strömen, als bei einem optimierten Schließvorgang. Umgekehrt würde eine auf eine zu kleine Strömungsgeschwindigkeit ausgelegte Armatur bei Erhöhung der Fördermenge den Druckstoß nicht mehr verhindern.

Bremse stoppt Flüssigkeit

Wir haben das Problem gelöst, indem wir die Armatur – in unserem Fall handelte es sich um eine Schnellschlussklappe – mit einer Scheibenbremse ausgestattet haben. Die Scheibe wirkt direkt auf die Antriebswelle der Klappe. Der Bremszylinder wird nun mit der Rohrleitung vor der Armatur verbunden. Steigt der Druck in der Leitung an, wirkt die Druckerhöhung durch die Direktverbindung zwischen Zylinder und Leitung unmittelbar auf den Bremszylinder und die Bremscheibe. Auf diese Weise löst der Druckanstieg im Strömungsmedium selbst den Bremsvorgang aus. Wenn die Armatur beginnt, sich zu schließen, geschieht das durch eine Drehbewegung der Antriebswelle. Genau diese Bewegung wird von der Scheibenbremse gestoppt, wenn der Druck in der Rohrleitung zu hoch wird. Erst wenn der Druck wieder unter den Ansprechdruck der Bremse abfällt, setzt sich der Schließvorgang fort. Die neue Armatur wirkt somit ähnlich wie das Anti-Blockier-System im Auto – deshalb haben wir sie ABS-Armatur® genannt.

Eine Schnellschlussklappe mit Bremse haben wir in einer Versuchsleitung des Fraunhofer-Instituts Umwelt-, Sicherheits-,

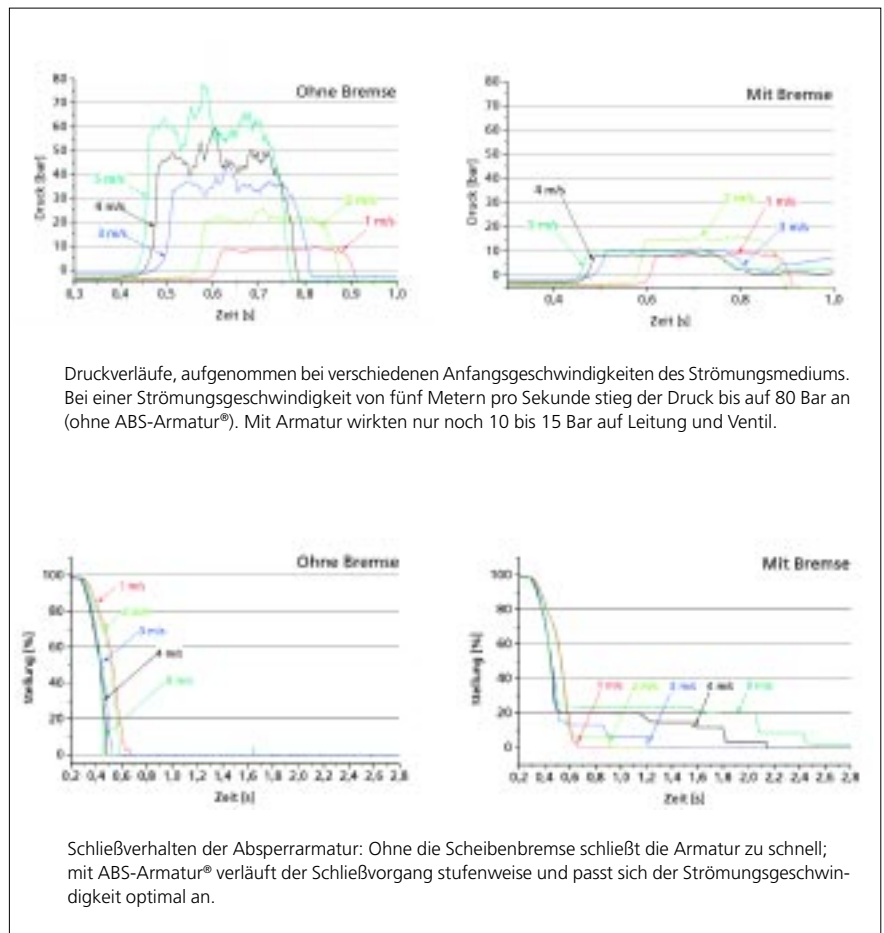


Die ABS-Armatur®
– eine Absperrklappe mit Scheibenbremse.

Energietechnik UMSICHT in Oberhausen erprobt. Die Rohrleitung war insgesamt etwa 200 Meter lang, als Modellflüssigkeit haben wir Wasser bei Umgebungstemperatur verwendet. Bei den Ex-

perimenten zeigte sich, dass die Armatur tatsächlich in der Lage ist, sich wechselnden Verhältnissen in der Rohrleitung optimal anzupassen, sich also adaptiv zu verhalten. Sie begrenzt den Druck nahezu unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit auf einen Wert zwischen zehn und fünfzehn Bar. Bei Vergleichsversuchen mit abgeschalteter Scheibenbremse haben wir hingegen die typischen Druckstöße beobachtet, deren Amplitude mit zunehmender Geschwindigkeit anwächst.

Die Wirkungsweise wird deutlich, wenn man den Schließvorgang betrachtet. Bei abgeschalteter Bremse dauert das Schließen der Klappe nur etwa eine halbe Sekunde. Mit aktivierter Bremse fährt die Armatur stufenweise zu. Der Schließvorgang passt sich automatisch den Strömungsverhältnissen an, die Leitung wird jeweils in der kürzest möglichen Zeit abgesperrt. – Und dabei benötigt die Bremse keinerlei Hilfsenergie.



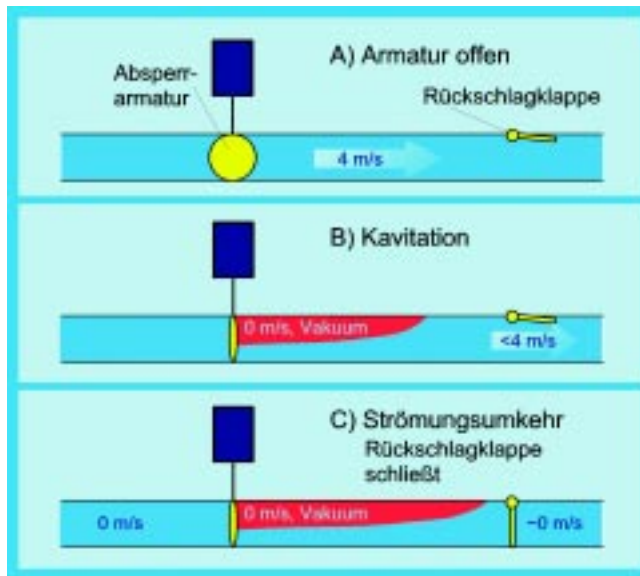
Druckverläufe, aufgenommen bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten des Strömungsmediums. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von fünf Metern pro Sekunde stieg der Druck bis auf 80 Bar an (ohne ABS-Armatur®). Mit Armatur wirkten nur noch 10 bis 15 Bar auf Leitung und Ventil.

Schließverhalten der Absperrarmatur: Ohne die Scheibenbremse schließt die Armatur zu schnell; mit ABS-Armatur® verläuft der Schließvorgang stufenweise und passt sich der Strömungsgeschwindigkeit optimal an.

Schließverhalten und Wirkung der ABS-Armatur®.



Eine einfache Rückschlagklappe verhindert den Kavitationsschlag. Im Moment der Strömungsumkehr, fällt die Klappe und schließt die Vakuumblase ein. Anschließend muss die Blase nur noch langsam aufgefüllt werden.



Kavitationsschläge verhindern

Allerdings lässt sich mit der ABS-Armatur® allein nur der Druckstoß vor der Absperrstelle, nicht aber der Kavitationsschlag vermeiden. Das liegt an der großen Lebensdauer der Kavitationsblase. Sie kollabiert erst, nachdem die Flüssigkeitssäule hinter der Armatur durch den Gegendruck, der am Leitungsende anliegt, abgebremst wird und sich die Strömungsrichtung umkehrt. Der Druckanstieg tritt auf, wenn die Blase aufgebraucht und die Flüssigkeit auf die geschlossene Armatur prallt.

Doch auch hier haben wir eine Möglichkeit gefunden, um den Kavitationsschlag zu verhindern: In einigem Abstand hin-

ter der eigentlichen Absperrarmatur haben wir eine Hilfsarmatur angeordnet, die genau dann schließt, wenn das Strömungsmedium gerade seine Richtung ändert. Dabei tritt kein Druckanstieg auf, da die Geschwindigkeit in diesem Moment nahezu Null ist. Nachfolgend kann das Medium jedoch auch nicht mehr in Richtung auf die geschlossene Absperrarmatur beschleunigt werden. Die Kavitationsblase bleibt zwischen beiden Armaturen eingeschlossen – Kavitationsschlag ade.

Doch Vorsicht! Man darf natürlich die Leitung in diesem Zustand nicht einfach wieder in Betrieb nehmen. Öffnet man die Absperrarmatur bei vorhandener Blase, kommt es zu einem heftigen Konden-

sationsschlag. Man löst dieses Problem jedoch leicht, indem man den Leitungsabschnitt zwischen den Armaturen „sanft“ auffüllt. Das kann zum Beispiel durch eine kleine Überströmleitung geschehen oder indem man die Absperrarmatur sehr langsam öffnet.

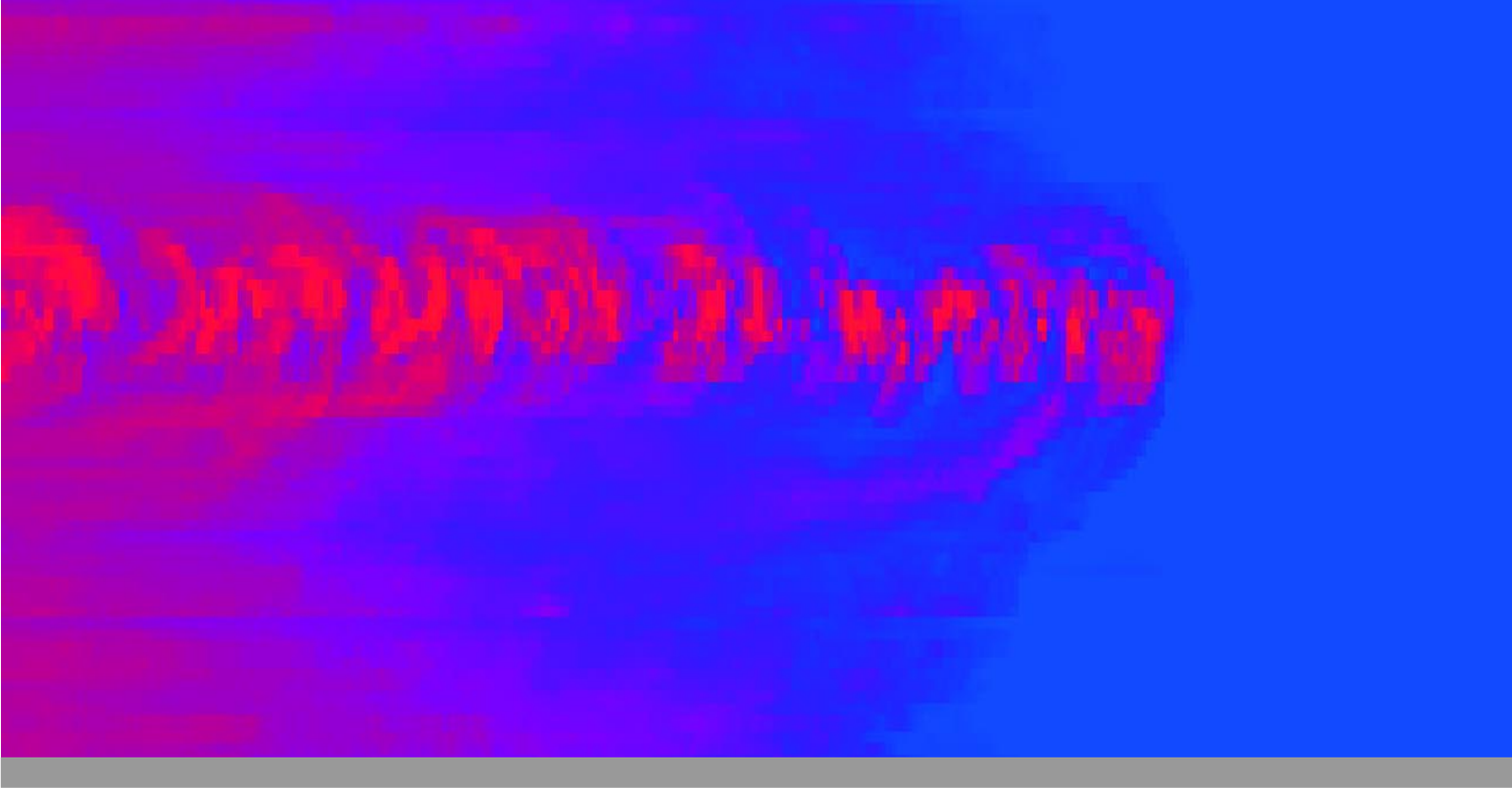
Und auch diese Lösung ist denkbar einfach: Als Hilfsarmatur bietet sich eine Rückschlagklappe an. Sie lässt das Strömungsmedium in der normalen Förderichtung durch und schließt von selbst, wenn sich die Strömung umkehrt. Damit haben wir auch zur Verhinderung der Kavitationsschläge ein passives System gefunden – es kommt ganz ohne Steuerung und Hilfsenergie aus. Natürlich muss man bei der Auslegung aufpassen. Denn wenn der Abstand zwischen den beiden Armaturen nicht richtig berechnet ist, breitet sich die Kavitationsblase in der Rohrleitung bis hinter die Rückschlagklappe aus. Dann tritt dort später ein so genannter sekundärer Kavitationsschlag auf. – Die Bedeutung einer theoretischen Modellierung von Strömungsprozessen in Rohrleitungen ist also offensichtlich.

Mit Rückschlagklappe und ABS-Armatur® haben wir ein System entwickelt und patentiert, mit dem eine Rohrleitung schnell und ohne gefährliche Belastungen abgesperrt werden kann. Sowohl einzeln für sich als auch in Kombination stellen beide Verfahren passive und adaptive Sicherheitssysteme gegen „hydrodynamische Auffahrunfälle“ in Rohrleitungen dar.

Literatur

Prasser, H.-M.; Schlüter, S.; Dudlik, A.: Anordnung zur Verhinderung unerwünschter Drücke beim Absperrern oder Drosseln der Flüssigkeitsförderung in einer Rohrleitung, Patent DE 199 40 096 C2, Offenlegungsschrift DE 199 40 096 A1, Europäische Patentanmeldung EP 1079161 A2.

Prasser, H.-M.; Schlüter, S.; Dudlik, A.: Anordnung zur Verhinderung eines Kavitationsschlages beim schnellen Absperrern einer zum Transport von Flüssigkeiten genutzten Rohrleitung, Patent DE 198 15 242 A 1.



Sicherheit durch Vermischung

Experimentelle Untersuchung der Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren

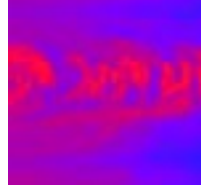
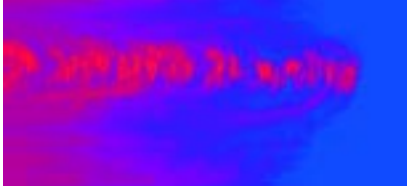
Gerhard Grunwald, Thomas Höhne, Sören Kliem, Horst-Michael Prasser, Ulrich Rohde
Institut für Sicherheitsforschung

„Es geht los!“, ruft der Versuchsleiter und drückt einen Knopf am PC. Die Pumpe beginnt sich zu drehen. Einige Sekunden später ertönt ein Knall. Das Computerprogramm hat mit Hilfe von Druckluft – daher der Knall – ein Ventil geöffnet. Salzhaltiges Wasser wird seitlich in eine Rohrleitung der Versuchsanlage eingespritzt. Dort sorgt ein Mixer für eine gleichmäßige Durchmischung des Pfropfens mit dem vorbeifließenden Wasser der Versuchsanlage. Ein zweiter Knall ertönt und signalisiert das Schließen des Ventils.

Ein Pfropfen, dessen Größe wir vorher genau berechnet haben, hat sich auf die Reise durch die Versuchsanlage begeben. Nach 10 bis 300 Sekunden hat er alle 1000 Messpositionen der Versuchsanlage passiert, und wir können den Versuch beenden.

Ein Pfropfen wird vermischt

Und wozu das Ganze? Kühlkreisläufe sind die Sicherheitsgarantie für alle Reaktoren der chemischen Industrie und der Kraftwerkstechnik. Treten Pannen in diesen Systemen auf, können die Folgen verheerend sein. Um Störfälle dieser Art abschätzen zu können, gehen wir verschiedenen Fragen nach: Was passiert, wenn Teile eines Kühlsystems ausfallen? Mischt sich ein Pfropfen heißes (oder kaltes) Wasser relativ schnell mit dem Wasser des Kühlkreislaufs oder durchwandert er die gesamte Anlage? Welche Auswirkungen hat fehlende Durchmischung auf den Betrieb der Anlage? – Was uns also interessiert, ist der Grad der Vermischung des zu dosierten Wassers mit dem Umgebungswasser. Das Messprinzip, das wir dabei anwenden, sind Unterschiede in der Leitfähig-

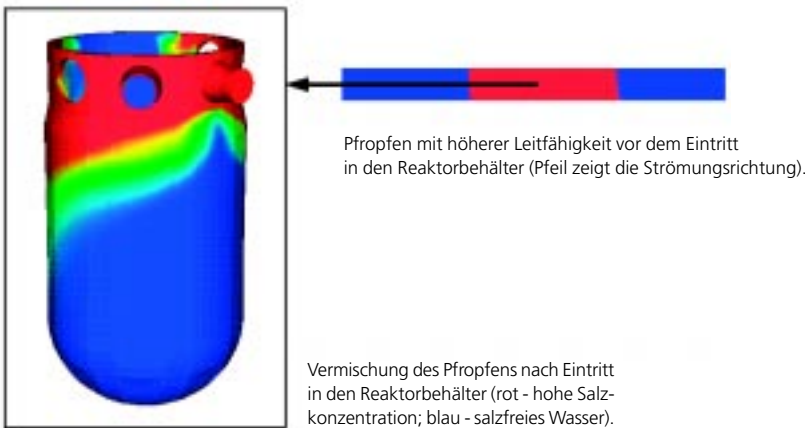


keit zwischen Pfpfropfen und Umgebungswasser. Die Leitfähigkeit ist im salzhaltigen Pfpfropfen vorhanden, im deionisierten Wasser der Versuchsanlage aber nahezu Null. Dabei liefert uns die Messung eine riesige Menge aufgezeichneter Daten, die uns Hinweise über den zeitlichen Verlauf der Salzkonzentration an allen Messstellen geben. Sie können nach einer Umrechnung in Prozentwerte als Digitalvideo abgespielt werden.

Form von Borsäure. Ist die Borkonzentration zu gering, fehlt Absorber, und es entstehen Überschussneutronen, die einen starken Leistungsanstieg im Reaktor hervorrufen können. Ähnliches geschieht, wenn die Temperatur des Kühlwassers zu stark absinkt. Mit abnehmender Temperatur nimmt die Effektivität der Kettenreaktion zu. – Dies ist übrigens gleichzeitig ein wichtiger Sicherheitsmechanismus, da im umgekehrten Fall einer Überhitzung

fallswärme Wasser, welches am Dampferzeuger wieder kondensiert. Da die Borsäure im Dampf nahezu unlöslich ist, sammelt sich am Dampferzeuger ein Pfpfropfen so genannten sauberen Kondensats an. Bei einem solchen Störfall schaltet sich der Reaktor ab, und die Kühlmittelpumpen stehen still. Werden sie dann wieder angeschaltet oder wird der Kühlkreislauf gar mit Notkühlwasser aufgefüllt, kann der schwach borierte Pfpfropfen in den Reaktorkern gelangen und das dort befindliche hochborierte Wasser verdrängen. – Ein Leistungsanstieg im Reaktor wäre die Folge.

Teilweise vermischen sich die Pfpfropfen auf dem Weg ihrer Entstehung bis zum Reaktorkern mit hochboriertem beziehungsweise heißerem Umgebungswasser. Es existiert also ein selbstwirkender Sicherheitsmechanismus. – Doch wie stark bei einem Borverdünnungs- oder Unterkühlungsstörfall die Leistung des Reaktors ansteigt, hängt davon ab, wie effektiv diese Vermischung ist.



Ein Schwerpunkt der Arbeiten im Institut für Sicherheitsforschung liegt derzeit auf der Untersuchung der Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren (DWR). In einem DWR wird die im Reaktorkern durch die Brennstäbe erzeugte Wärme genutzt, um das Wasser der Kühlkreislaufschleife zu erwärmen. Der Kühlkreislauf steht unter einem Druck von etwa 150 Bar, sodass das Wasser auch bei Temperaturen um 300 Grad Celsius nicht zu sieden beginnt. Auf seinem Weg durch den Kühlkreislauf gelangt das heiße Wasser zu den Dampferzeugern. Der hier erzeugte Dampf wird zu den Turbinen geleitet, wo ein angeschlossener Generator den elektrischen Strom erzeugt. Der Dampf selber wird wieder kondensiert und gelangt zurück in den Reaktorkern.

Wenig Bor und kaltes Wasser

Bor ist ein Neutronenabsorber, es sorgt dafür, dass die Neutronenkonzentration nicht zu hoch wird. Daher enthält das Kühlwasser einen geringen Anteil Bor in

des Reaktors die Kettenreaktion gebremst wird.

Hypothetische Störfälle in Druckwasserreaktoren sind daher zum Beispiel solche, bei denen eine der Schleifen stärker auskühlt als die anderen. Etwa bei einem Leck am entsprechenden Dampferzeuger; dabei fällt der Druck und damit auch die Temperatur sofort ab.

Ein weiteres Szenarium ist ein so genannter Borverdünnungsstörfall. Durch verschiedene externe oder inhärente Mechanismen kann ein Pfpfropfen zu schwach boriertes Wasser entstehen, der sich bei abgeschaltetem Reaktor, also ausgeschalteten Kühlmittelumwälzpumpen, zunächst nicht mit dem boriertem Kühlmittel vermischt.

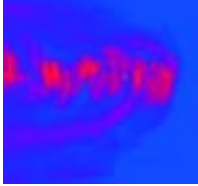
Durch äußere Ursachen bedingte Deborierungen können zum Beispiel Fehler im Wasseraufbereitungssystem sein, bei denen versehentlich unboriertes Wasser zuge speist wird. Im Gegensatz dazu ist ein inhärenter, also durch innere Ursachen bedingter Mechanismus, wenn bei einem Leckstörfall Wasser aus einer Kühlschleife ausdampft. Dabei verdampft im Reaktorkern infolge der radioaktiven Zer-

Ein transparentes Reaktormodell

Für solche Vermischungsuntersuchungen haben wir die Versuchsanlage ROCOM (**R**ossendorf **C**oolant **M**ixing **T**est **F**acility) aufgebaut. ROCOM ist ein 1:5-Modell eines deutschen Reaktors vom Typ Konvoi. Um Geschwindigkeitsfelder der Kühlfüssigkeit mit optischen Methoden (Laser-Doppler-Anemometrie) messen zu können, besteht das Modell des Reaktordruckbehälters aus Plexiglas. Es enthält vier Kühlwasserschleifen, in denen regelbare Pumpen die Simulation sehr verschiedener Strömungsregimes erlauben.

Da unser Modell aus Plexiglas besteht und wir auch aus Sicherheitsgründen nicht bei den extrem hohen Drücken und Temperaturen, wie sie in Druckwasserreaktoren üblicherweise herrschen, experimentieren möchten, haben wir für unsere Vermischungsexperimente die Leitfähigkeit als zu untersuchende Größe gewählt. Damit verfolgen wir die Konzentration eines Pfpfropfens Salzlösung als Tracersubstanz in deionisiertem Wasser an mehr als 1000 Positionen in der Versuchsanlage.

Die Messung der Salzkonzentration erfolgt über die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit des Fluids mit Hilfe von so



Versuchsanlage ROCOM zur Modellierung der Kühlmittelströmung in einem Kernreaktor – die Rohre und orangefarbenen Behälter stellen die Elemente der Kühlschleifen dar, in der Mitte leuchtet das Reaktormodell.



Das Reaktormodell bildet das Kernstück von ROCOM – es ist detailgetreu aus Plexiglas (1:5-Modell) gefertigt und ermöglicht auch Messungen der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers mit optischen Methoden (Laserstrahlen).

genannten Gittersensoren. Die Sensoren sind wie ein sich kreuzendes Drahtgeflecht aufgebaut, in dem jeder Kreuzungspunkt eine Messstelle darstellt. Durch geschickte elektronische Ansteuerung der Messstellen erreichen wir eine Messfrequenz von bis zu 200 Hertz. Da die Salzkonzentration sehr niedrig ist – nach Durchmischung des Tracerpfropfens in der gesamten Anlage liegt sie immer noch unter der von normalem Leitungswasser! – können wir mit Hilfe des Tracers zwar Konzentrations-, aber keine Dichteunterschiede simulieren. Höhere Salzkonzentrationen verbieten

sich wegen der extremen Empfindlichkeit der Sensoren.

Doch wir haben mit Hilfe strömungsmechanischer Berechnungen nachgewiesen, dass Dichteunterschiede für die oben beschriebene Art der Vermischung nicht relevant sind. Denn der Impulseintrag in die Strömung ist sehr hoch, da der Pfropfen durch die Kraft der anfahrenen Pumpe gewissermaßen in den Kühlkreislauf geschleudert wird. Erst bei einem deutlich geringerem Impulseintrag, also bei sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten, gewinnen die durch Dichteunterschiede bedingten Auftriebskräfte in der Strömung an Bedeutung.

Realitätsnahe Sicherheitsanalysen

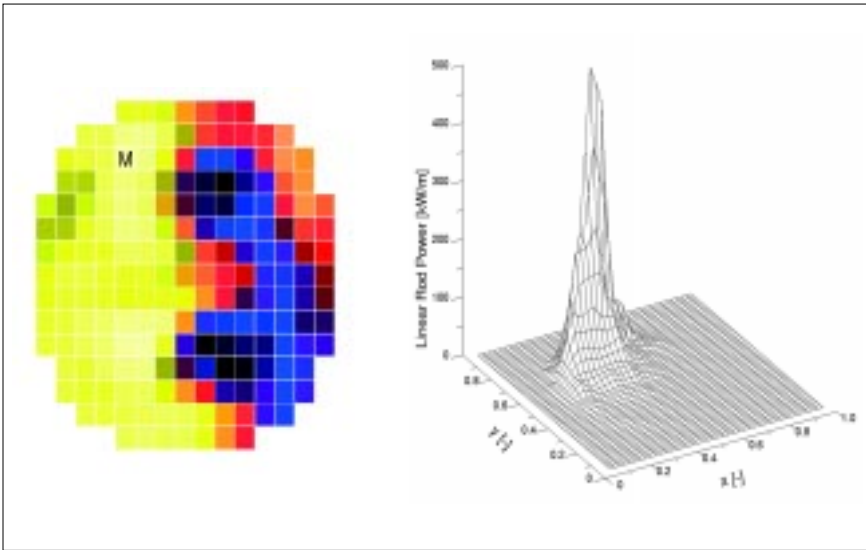
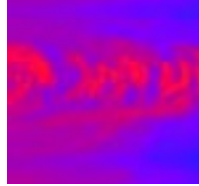
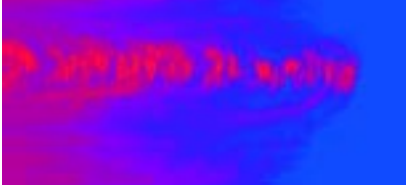
Die Ergebnisse der Experimente und Berechnungen zur Kühlmittelvermischung liefern wichtige Eingangsdaten für die anschließenden reaktordynamischen Störfallanalysen. Hierfür haben wir im FZR das Neutronenkinetikprogramm DYN3D entwickelt. Ein Programm, mit dem wir Berechnungen zum Ablauf hypothetischer Störfälle durchführen können – unter anderem auch für die genannten Borverdünnungs- und Unterkühlungsstörfälle. DYN3D modelliert in dem Fall nicht die Vermischung selbst, sondern die aus den Störfällen resultierenden Prozesse im Reaktorkern, also die räumlich-zeitliche Entwicklung der Leistungsverteilung und

die daraus resultierenden Brennstoff- und Kühlmitteltemperaturen. Dabei berechnet es die sicherheitstechnisch relevanten Parameter wie die maximale Temperatur des Brennstoffs und der ihn einschließenden Hüllrohre oder den Dampfgehalt im Reaktorkern und ermittelt daraus den Abstand zu den zulässigen Grenzwerten.

Die Vorbedingungen für das Verhalten des Reaktorkerns leiten wir aus den beschriebenen Experimenten ab. Die Temperatur- oder Borkonzentrationsverteilung am Eintritt in den Kern erhalten wir direkt aus den Ergebnissen der Vermischungsexperimente und aus numerischen Simulationen.

Dafür haben wir ein Modell entwickelt, das in der Lage ist, auf der Basis einiger weniger Experimente eine große Anzahl von möglichen Anfangsparametern zu variieren. Der Trick dabei ist, nach der oben beschriebenen Experimentiermethode kleine (kurze) Pfropfen zu verschiedenen Zeitpunkten in die Versuchsanlage einzuspeisen und deren Vermischung zu messen. Große Pfropfen oder Pfropfen komplizierter Form können wir dann numerisch aus diesen kleinen Referenzpfropfen zusammensetzen. So erspart man sich Zeit für zusätzliche Experimente.

Bei einer Rechnung für einen bestimmten Störfall gibt man Anfangsposition, Pfropfengröße und -form vor. Daraus resultiert eine Verteilung der Störung am Eintritt des Kühlwassers in die Brennelemente des Reaktors (der betrachtete Reaktor hat 193 solcher Elemente). Aus dieser Verteilung berechnet das Programm DYN3D die Leistungsfreisetzung für jedes der 193 Brennelemente. Im Ergebnis erhalten wir die dreidimensionale Form der Leistungsverteilung im Reaktorkern. Form und Höhe dieser Verteilung werden entscheidend durch die Bedingungen der Eingangsparameter, also den Salzgehalt (stellvertretend für Temperatur und Borkonzentration) sowie Größe und Form des Pfropfens, beeinflusst. Deren genaue Kenntnis entscheidet somit über die Realitätsnähe und die Aussagekraft der Rechenergebnisse.

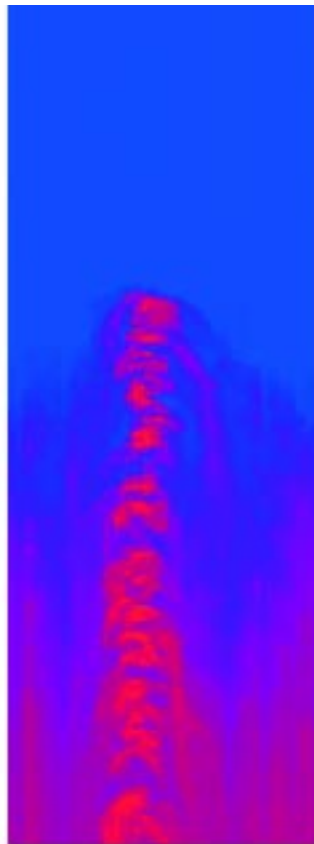


Links: Detailliert (für jedes Brennelement ein Wert) werden die Eingangsdaten für die Störfallanalyse bereitgestellt. (Dunkel bedeutet hohe, hell geringe Borkonzentration.) An der mit M gekennzeichneten Position befindet sich das Maximum der Verdünnung und somit auch das Maximum der Leistungsverteilung.
Rechts: 3D-Verteilung der Leistungsdichte im Reaktorkern, berechnet mit DYN3D unter Verwendung der links gezeigten Eingangsdaten.

Zucker und Sahne

Mit der hochauflösenden Messtechnik lassen sich auch turbulente Fluktuationen in der Strömung visualisieren. Die Vermischung in einer turbulenten Strömung ist nicht nur sicherheitstechnisch für Kernreaktoren relevant, sondern gleichzeitig ein grundlegendes strömungsmechanisches Phänomen, das durch die Herausbildung von Wirbeln, Totwasserbereichen oder Schichtungen beeinflusst wird. Man kann diese turbulenten Vermischungsstrukturen selbst beobachten, wenn man Sahne in Kaffee oder Tee gießt.

Die Experimente an ROCOM stellen uns insbesondere Tests für die Überprüfung unserer strömungsmechanischen Berechnungen zur Verfügung. Eine spezielle Herausforderung für diese Berechnungsverfahren ist die Simulation von Vermischungsvorgängen, wenn bei langsamen Strömungsgeschwindigkeiten Wasser mit einer anderen Dichte eindosiert wird. Die Herausforderung ist dadurch gegeben, dass bei diesen auftriebsdominierten Vermischungsvorgängen die treibenden Kräfte für die Vermischung sehr viel geringer sind als beim Zuschalten einer Pumpe. Dadurch können komplizierte turbulente Strukturen relativ stabil bestehen bleiben, die bei großen An-



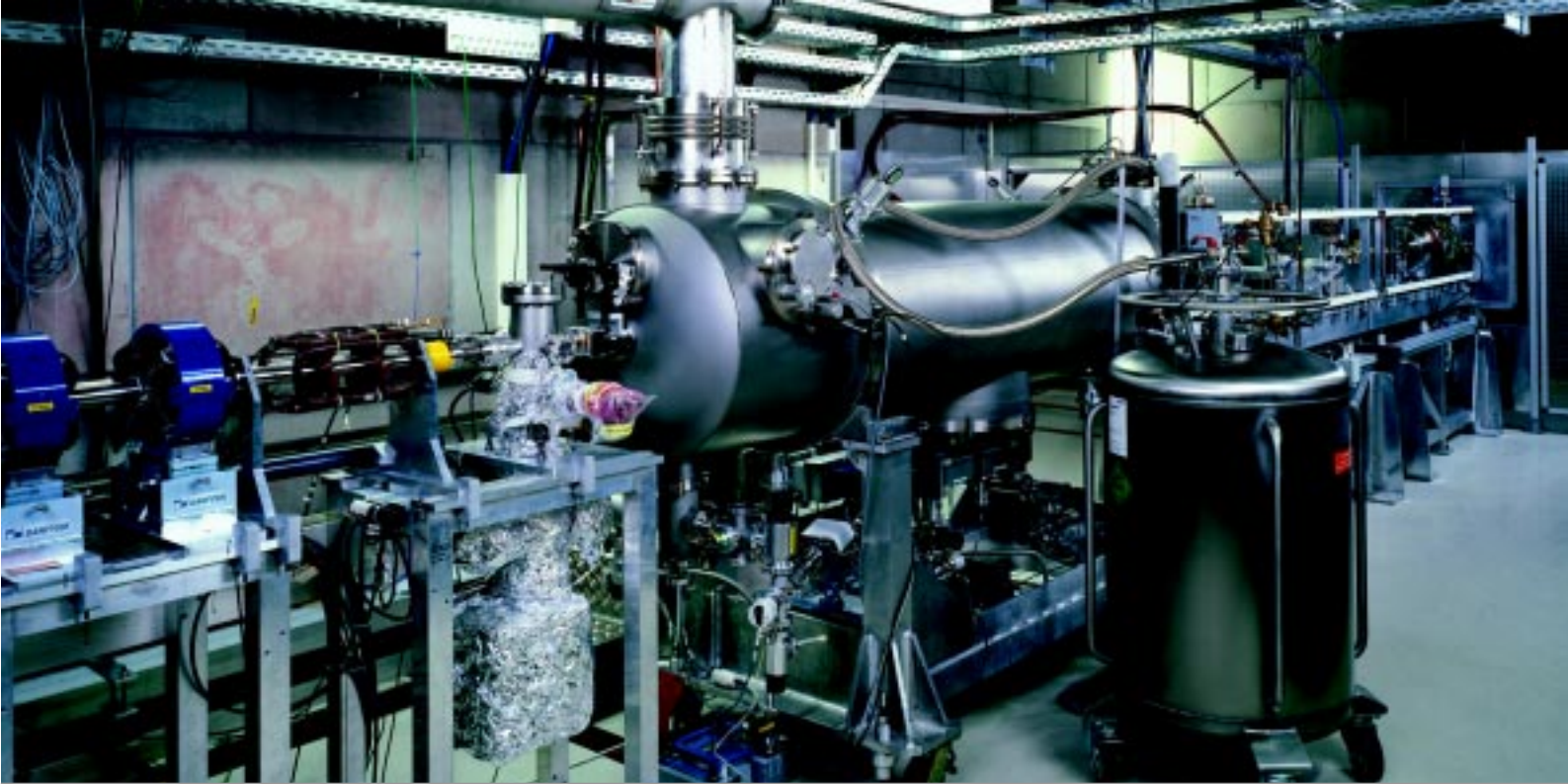
Digitalvideo (in Pfeilrichtung läuft die Zeit) eines Versuchs zur Einspeisung von Zuckerwasser (zur Simulation einer Dichteerhöhung) an einer Messposition im unteren Teil des Reaktorbehälters. Die hochauflösende Messtechnik zeigt die durch diese Dichteunterschiede hervorgerufenen turbulenten Wirbelstrukturen (rot).

triebskräften für die Strömung sofort wieder zerstört würden. Diese turbulenten Strukturen sind aber dadurch gekennzeichnet, dass sie sich bei kleinster Änderung der Kräfte in nahezu chaotischer Weise verändern können, somit also sehr schwierig zu berechnen sind. Dichteunterschiede erreicht man normalerweise durch Verwendung kälteren oder heißeren Wassers. Da unsere Versuchsanlage aber aus Plexiglas besteht, fällt das natürlich aus. Da sich hohe Salzkonzentrationen aus oben genannten Gründen verbieten, erreichen wir eine Dichteerhöhung, indem wir in dem einzuspeisenden Wasser eine große Menge Zucker auflösen. Das Wasser wird etwas dickflüssiger, behält aber sonst alle notwendigen Eigenschaften. Das Zuckerwasser muss natürlich ordentlich umgerührt werden, bevor wir es eindosieren. Die Strömungsbilder, die wir dabei erhalten, weichen völlig vom Strömungsbild bei „normalen“ Versuchen ab. Turbulente Wirbelstrukturen werden sichtbar. – Wieder sind eine Menge nahezu einzigartiger Messdaten erzeugt worden. Die Computerprogramme zur Nachrechnung dieser Experimente können gestartet werden.

Neben der direkten Verwendung für Sicherheitsanalysen nutzen wir die Daten also auch zur Überprüfung theoretischer Computermodelle, die wir für die dreidimensionale Modellierung von Strömungsprozessen entwickelt haben. Das ist der Grund, warum sich nicht nur die Betreiber von Kernkraftwerken für unsere Ergebnisse interessieren, sondern auch Forschergruppen in Schweden, Finnland, Großbritannien und der Schweiz, denen wir im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes zur Reaktorsicherheit unsere Ergebnisse zur Verfügung stellen.

Dank den Sponsoren

Die Untersuchungen zur Kühlmittelvermischung werden im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, zum Teil auch von den Betreibern der Kernkraftwerke und von der EU finanziert.



Die ELBE-Quelle in Rossendorf?

Ein Elektronenbeschleuniger zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung

Ulf Lehnert, Peter Michel, Jochen Teichert
Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE

Schon die alten Bauern wussten es. Denn schließlich waren sie es, die die Weisheit aufgestellt haben, dass nachts alle Katzen grau sind. Eine optimale Abbildung unserer Umgebung ist nur dann möglich, wenn genügend Licht vorhanden ist – elektromagnetische Strahlung eines ganz bestimmten Spektralbereichs. Nur so kann unser Auge seiner Arbeit nachgehen.

Die Untersuchung unbekannter Materie mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung ist somit eine uralte Methode des Menschen. Wir beleuchten ein Objekt mit einem Lichtstrahl, um dessen Eigenschaften wie etwa die Farbe oder auch seine Form zu erkunden. Je nach seiner Beschaffenheit durchstrahlt das Licht das Objekt, wird gebeugt oder auch reflek-

tiert. Den reflektierten Teil des Lichtes fängt das Auge wieder auf. Somit erhält der Mensch ein Abbild des Objektes. Was uns mit dem Auge allerdings selten gelingt, ist, Informationen über den inneren Zustand von Objekten zu erhalten. Daher ist der Aufwand, den Forscher betreiben müssen, um Objekte zu untersuchen, um ein Vielfaches größer. Ihnen reicht es nicht aus, deren oberflächliche Beschaffenheit zu sehen, sie möchten etwas über ihren Aufbau erfahren. Denn nur wer die Beschaffenheit eines Materials, die Funktion biologischer Strukturen oder die Kräfte in Atomkernen genau kennt, kann Materialien gezielt verändern, medizinische Fortschritte erzielen oder die Frage klären, was die Welt im Innersten zusammenhält.



Forschungsobjekte können hinsichtlich ihrer Größe oder ihrer Struktur sehr unterschiedlich sein, und zudem kommt es darauf an, ganz bestimmte Eigenschaften gezielt und selektiv zu untersuchen. Hier stellt sich also die Frage, welches die für die jeweiligen Forschungsaufgaben am besten geeigneten Lichtquellen sind und welche Eigenschaften diese besitzen müssen.

Forschung mit Licht

Das uns umgebende Licht ist eine Mischung aus elektromagnetischen Wellen, und man kann es durch eine Reihe von Parametern wie die Wellenlänge, die Intensität, die Polarisation oder die Bündelung beschreiben. Betrachtet man nur die Wellenlängen des gesamten Spektralbereichs, so eröffnet sich dem Forscher ein enorm breites Feld physikalischer Phänomene, die sie damit untersuchen können. Das Spektrum reicht auf der langwelligen Seite von den uns allen bekannten Radiowellen bis zu den kurzwelligen und damit besonders hochenergetischen Gammastrahlen. Dazwischen liegen mehr als fünfzehn Größenordnungen und eine Vielzahl von Erscheinungen der uns umgebenden natürlichen und künstlichen Welt.

Um herauszufinden, welche Wellenlänge für die jeweilige Fragestellung die richtige ist, gibt es einen Schlüssel: Damit eine elektromagnetische Welle Informationen vom Forschungsobjekt entnehmen und forttragen kann, muss sie mit diesem in Wechselwirkung treten können.

Elektromagnetische Wellen können Atome oder Moleküle zu Schwingungen anregen. Die Art und Weise dieser Schwingungsanregungen, aber auch die Prozesse, wie die Atome und Moleküle wieder in den Ruhezustand zurückkehren, verraten uns vieles über die innere Struktur der Materie. Der Forscher hat also nichts anderes zu tun, als durch die Bestrahlung des Objektes mit elektromagnetischen Wellen bestimmter Parameter nach diesen Schwingungsanregungen zu suchen. Interessanterweise sind diese meist bei Wellenlängen zu finden, die mit der Dimension der zu erforschenden Struktur vergleichbar sind.

ELBE als Lichtquelle

Der Elektronenbeschleuniger ELBE (**E**lektronenbeschleuniger mit hoher **B**rillanz und geringer **E**mittanz) soll elektromagnetische Strahlung für Strukturuntersuchungen liefern. Um ein möglichst breites Forschungsspektrum abzudecken, erzeugt die Strahlungsquelle ELBE [1] intensive Strahlung ganz unterschiedlicher Wellenlängen dies- und jenseits des sichtbaren Lichtes.

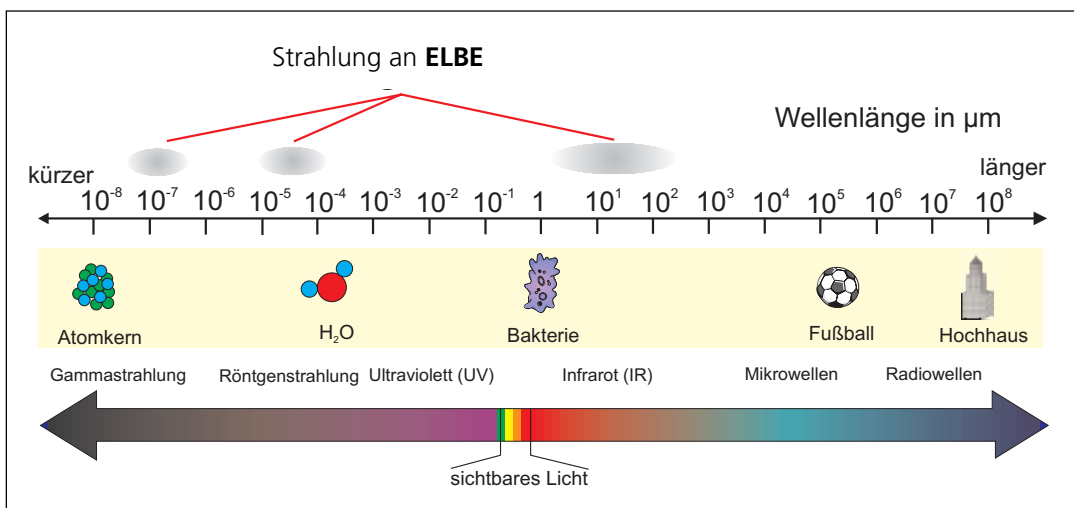
Für die Erforschung von Atomkernen – Atomkerne haben eine Ausdehnung von wenigen Femtometern (millionster Teil eines millionstel Millimeters) – produziert ELBE so genannte Bremsstrahlung. Diese sehr kurzwellige und energiereiche Strahlung regt Atomkerne zum Beispiel zu Deformationsschwingungen und Ro-

tationen an. Deren Untersuchung nennt man Kernspektroskopie. Sie erlaubt es, die inneren Kräfte und den Aufbau der Atomkerne zu bestimmen.

Die Welt der Atome – ihr Radius beträgt etwa 0,1 Nanometer (zehn millionstel Millimeter) – und damit die der atomaren Prozesse, erschließt sich mit Hilfe von Röntgenstrahlung. Dafür liefert ELBE einen gebündelten, intensiven und monochromatischen Röntgenstrahl zwischen einem zehntel und einem hundertstel Nanometer Wellenlänge. Röntgenstrahlung solcher Qualität kann mit herkömmlichen Röntgenapparaturen nicht erzeugt werden. Hier sind neuartige Forschungen auf biologischem und medizinischem Gebiet das Ziel.

Ein breiter Bereich von infrarotem Laserlicht mit Wellenlängen zwischen 3 und 150 Mikrometern (tausendstel Millimeter) liefern die an ELBE installierten Freielektronen-Laser (FEL). Diese Strahlung dient zur Untersuchung von Molekülen (Chemie, Biologie), aber auch von Materialien und Prozessen in der Festkörper-, insbesondere der Halbleiterphysik.

Durch kernphysikalische Prozesse beim Auftreffen von hochenergetischen Elektronen auf Atomkerne entstehen aber auch Teilchen wie Neutronen oder Positronen. Diese so genannten Sekundärteilchenstrahlen werden an ELBE ebenfalls erzeugt und stehen einem breiten Spektrum von Experimenten in der Grundlagen-, aber auch der Materialforschung zur Verfügung.



Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung und die Wellenlängenbereiche der Strahlungsquelle ELBE.



Der supraleitende Generator

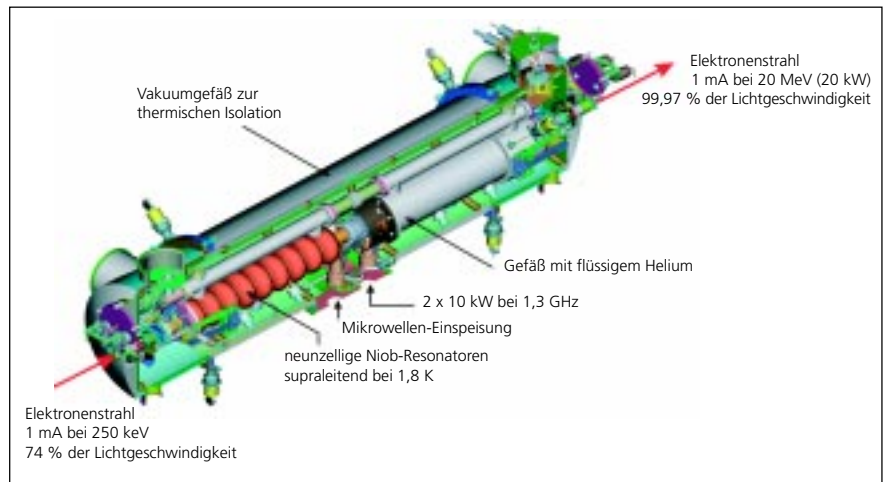
ELBE beschleunigt Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit. Die Energie der hochbeschleunigten Elektronen wird in Strahlung konvertiert. Je nach der zu erzeugenden Wellenlänge verwenden wir unterschiedliche Konversionsprozesse. Dabei ist zu beachten, dass sich eine Reihe von Eigenschaften des Elektronenstrahls, wie zum Beispiel die Intensität, die Divergenz oder auch die Zeitstruktur, direkt vom Elektronenstrahl auf den elektromagnetischen Sekundärstrahl übertragen.

Die in ELBE beschleunigten Elektronen werden zunächst in einer thermischen Kathode erzeugt und in einem elektrostatischen Feld mit 250 000 Volt vorbebeschleunigt. Ein elektronisch gepulstes Gitter am Anfang der Beschleunigungsstrecke entlässt im 13-Megahertz-Takt Elektronenpakete, die jeweils etwa eine Nanosekunde (milliardstel Sekunde) lang sind.

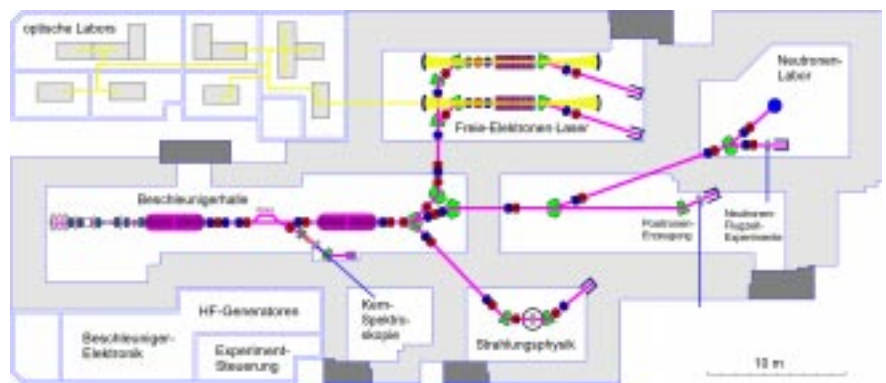
Mit Hilfe so genannter Buncher werden diese Pakete dann komprimiert. Das geschieht, indem die Elektronen im vorderen Teil des Paketes etwas abgebremst und die im hinteren Teil beschleunigt werden. Nach einer bestimmten Flugstrecke befinden sich alle Elektronen nahezu gleichauf, und die Pulslängen betragen nur noch wenige Picosekunden (tausendster Teil einer milliardstel Sekunde).

Jetzt befinden sich die Pakete bereits am Eingang des zweistufigen Hochfrequenzbeschleunigers [2]. Die erste Stufe beschleunigt die Elektronen auf zwanzig, die zweite Stufe auf vierzig Mega-Elektronenvolt (MeV).

Das beschleunigende Feld wird in so genannten Resonatoren als stehende elektromagnetische Welle erzeugt, die die Elektronen mit einer elektrischen Feldstärke von mehr als zehn Megavolt pro Meter beschleunigt. Die Resonatoren bestehen aus Niob und werden durch Kühlung mit flüssigem Helium bei etwa zwei Kelvin supraleitend gehalten. (Ihre Güte ist mit größer als 10^{10} enorm hoch.) Ohne Widerstandsverluste in den Resonatoren kann die eingekoppelte Hochfrequenzleistung nahezu verlustfrei auf den Elektronenstrahl übertragen werden. Nur mit Hilfe dieser supraleitenden Technologie ist es heutzutage möglich, derarti-



Die Beschleunigerstufen von ELBE enthalten jeweils zwei neunzellige Niob-Resonatoren, die durch Kühlung mit flüssigem Helium im supraleitenden Zustand gehalten werden.



Vom Ausgang des Beschleunigers wird der Elektronenstrahl mit einem System von Ablenkmagneten und magnetischen Linsen zu den jeweiligen Strahlungserzeugern transportiert.

ge Teilchenbeschleuniger kontinuierlich (cw-Mode) zu betreiben. Anderenfalls müsste der Strahl zur Abkühlung regelmäßig unterbrochen werden.

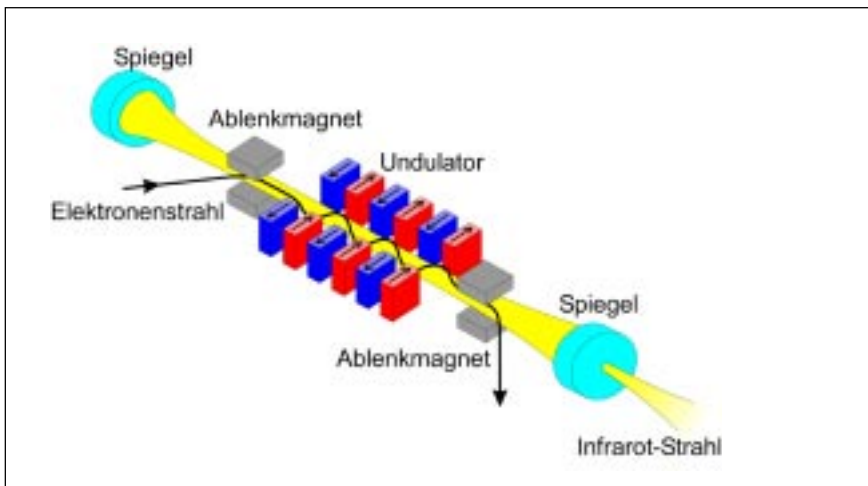
Elektronen erzeugen Licht

Immer, wenn geladene Teilchen beschleunigt, zum Beispiel aus einer geraden Bahn abgelenkt werden, emittieren sie elektromagnetische Wellen. Diesen Effekt nutzen wir bei ELBE auf verschiedene Weise, um die Strahlung für unsere Experimente zu erzeugen. Das wohl offensichtlichste Beispiel sind die Freie-Elektronen-Laser (FEL) [2], die hochintensive Infrarot-Strahlung produzieren. Bei diesem Laser leiten wir den Elektronenstrahl in so genannte Undulatoren. Sie bestehen aus einer Reihe von Magneten, die beidseitig des Strahlrohres angebracht sind. Dabei sind

benachbarte Magnete immer entgegengesetzt gepolt, das heißt, Nord- und Südpol wechseln sich ab – es entsteht ein wechselseitig gepoltes Magnetfeld.

Geladene Teilchen werden von einem Magnetfeld abgelenkt. Gelangen die Elektronen in den Undulator, beschreiben sie eine wellenförmige Bahn. Dadurch emittieren sie Strahlung, die aufgrund der Größe der Wellenbewegung und der Elektronenenergie im Infrarotbereich liegt. Da sich der Abstand der Magnete und damit die Stärke des Magnetfeldes variieren lässt, kann man die Wellenlänge des Infrarotlichtes einstellen.

Die entstehende Infrarot-Strahlung trifft auf einen Spiegel und läuft auf dem Strahlweg durch den Undulator zurück. Nun trifft sie auf einen zweiten Spiegel, wird dort ebenfalls reflektiert und gelangt – genau gleichzeitig mit dem nächsten Elektronenpuls – wieder in den Undulator.



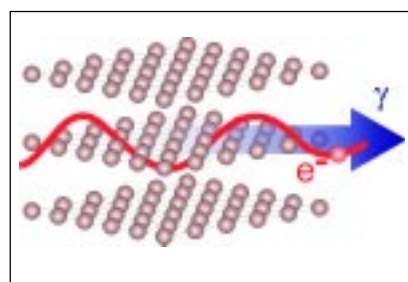
Bei einem Freie-Elektronen-Laser zwingt ein Undulator die Elektronen auf eine wellenförmige Bahn. Dabei wird die Energie des Elektronenstrahls auf den optischen Strahl übertragen.

Zu einem Laser wird die ganze Anordnung dadurch, dass der Infrarotstrahl seinerseits auf den Elektronenstrahl zurückwirkt und ihn zu Pulsen moduliert, die kürzer sind als die Wellenlänge der Infrarotstrahlung. Dies geschieht, indem sich die Elektronen unter dem Einfluss des elektrischen Feldes des Lichtstrahls und des magnetischen Feldes des Undulators in der Periode der Lichtwellenlänge gruppieren. Die nun von diesen Mikropulsen im Undulator-Feld erzeugte Strahlung schwingt gleichphasig zum umlaufenden Licht und verstärkt dieses. Damit entsteht eine scharf gebündelte, schmalbandige und gleichphasig schwingende Lichtwelle.

Ein kleiner Teil der zwischen den Spiegeln umlaufenden und immer wieder verstärkten Strahlung wird durch ein Loch in einem der Spiegel ausgekoppelt und zu den Experimenten geführt.

Auf einer viel kleineren Größenskala nutzen wir denselben Effekt, um intensive, quasi-monochromatische Röntgenstrahlung zu erzeugen. Dazu wird der Elektronenstrahl so fokussiert, dass er unter

einem sehr kleinen Winkel genau entlang der Kristallachse durch einen dünnen Diamantkristall hindurch geschossen werden kann. Die Elektronen werden von den Kristallebenen reflektiert und können so zwischen zwei Ebenen eingefangen werden (Elektronen-Channeling) [3]. Da sie nun ebenfalls eine wellenförmige Bahn durch den Kristall beschreiben, emittieren sie wieder elektromagnetische Strahlung. Die Periode der Bewegung ist durch den Abstand der die Elektronen ablenkenden Kristallebenen bestimmt, sie ist deshalb



Die Oszillationsbewegung der Elektronen um die Gitterebenen eines Kristalls führen zur Emission eines gebündelten Röntgenstrahls.

wesentlich kleiner als beim FEL. Daher ist auch die resultierende Wellenlänge erheblich kürzer, sie liegt im Röntgenbereich. Aufgrund der extrem geringen Abstände zwischen den Kristallebenen ist der ganze Prozess durch quantenmechanische Effekte dominiert. Sie lassen nur ganz bestimmte Elektronenbahnen (in der Quantenmechanik als gebundene Zustände beschrieben) zu. Die Elektronen können von einem dieser Zustände in einen anderen wechseln, indem sie Röntgenlicht mit einer für den betreffenden Übergang spezifischen Wellenlänge emittieren. Über die Energie der Elektronen lassen sich diese Wellenlängen innerhalb eines bestimmten Bereiches kontinuierlich einstellen.

Indem wir den Elektronenstrahl in einem Festkörper stoppen, wird ein Teil seiner Energie bei den auftretenden Streu- und Abbremsvorgängen ebenfalls in Form elektromagnetischer Strahlung emittiert. Diese verteilt sich über ein breites Spektrum, wobei die höchsten auftretenden Photonenenergien der Energie der Elektronen selbst entsprechen. Bei ELBE reichen diese Energien bis in den Bereich der Gammastrahlung.

Werkzeug für die Forschung

ELBE im Forschungszentrum Rossendorf ist eine hochmoderne und leistungsfähige Quelle für elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche und Sekundärteilchen. Sie bildet als zentrales FZR-Forschungsinstrument eine Klammer zwischen den verschiedenen Forschungsrichtungen und Traditionen am Standort und wird auch durch Synergieeffekte zur weiteren Erhöhung des wissenschaftlichen Niveaus der Forschungsarbeiten im FZR beitragen.

Die Konzeption und der Aufbau der Strahlungsquelle ELBE wurden sehr erfolgreich von einer Projektgruppe unter der Leitung von Herrn Dr. Frank Gabriel durchgeführt. Die Autoren danken an dieser Stelle allen Beteiligten für die konstruktive und fruchtbare Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] F. Gabriel et al., Nucl. Instr. And Meth. B 161-163 (2000) 1143.
- [2] K. Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, B.G. Teubner Stuttgart.
- [3] Allan H. Sorensen, Eric Uggerhoj, Der Channeling-Effekt in Kristallen, Spektrum der Wissenschaft, August 1989.



Foto: Achim Zschau, GSI

Ionenstrahlen werden sichtbar

Tumorthherapie-Kontrolle mit PET – vom Kohlenstoff zu den Protonen

Wolfgang Enghardt, Katia Parodi, Jörg Pawelke, Falk Pönisch
Institut für Kern- und Hadronenphysik

Teilchenbeschleuniger – nur ein Instrument für die Grundlagenforschung? Keineswegs, die breiteste Anwendung von Beschleunigern besteht in der Medizin: In der Bundesrepublik kommt auf etwa 300 000 Einwohner ein Elektronen-Beschleuniger für medizinische Anwendungen. Diese Beschleuniger werden zur Strahlentherapie bösartiger Geschwülste eingesetzt.

So können durch Bestrahlung mit Elektronen oder Megavolt-Röntgenstrahlung, durch einen chirurgischen Eingriff oder durch die Kombination von beidem über vierzig Prozent aller Krebspatienten lang-

fristig geheilt werden – vor allem dann, wenn es sich um lokal begrenzte, einzelne Tumoren handelt.

Allerdings gibt es auch eine Reihe von Geschwülsten, die zwar potentiell heilbar, aber durch herkömmliche Therapien nicht behandelbar sind. Das ist zum Beispiel immer dann der Fall, wenn es sich um besonders strahlenresistente Tumoren handelt oder wenn die Geschwülste in der Nähe von lebenswichtigen oder strahlenempfindlichen Organen liegen. Vielen dieser Patienten könnte eine relativ neue Therapie mit Ionenstrahlen helfen.



Das Deutsche Schwerionen-Tumorthera-
pie-Projekt ist ein Vorhaben, das die
Gesellschaft für Schwerionenforschung
Darmstadt (GSI), das Deutsche Krebsfor-
schungszentrum (DKFZ) und die Radio-
logische Universitätsklinik Heidelberg
sowie das Forschungszentrum Rossen-
dorf realisiert haben. Die Behandlung der
Tumoren erfolgt mit Strahlen von Koh-
lenstoffionen am Beschleuniger der GSI.
Dieser Beschleuniger ist die einzige An-
lage in Europa, an der schwere Ionen auf
so hohe Geschwindigkeiten beschleunigt
werden können, dass sie auch tief im
Körper liegende Tumoren erreichen.

Im Dezember 1997 wurden die ersten
beiden Krebspatienten mit Kohlenstoff-
ionen bestrahlt, und seit Sommer 1998
werden regelmäßig Patienten dort be-
handelt – insgesamt 112 bis zum Ende
des Jahres 2001.

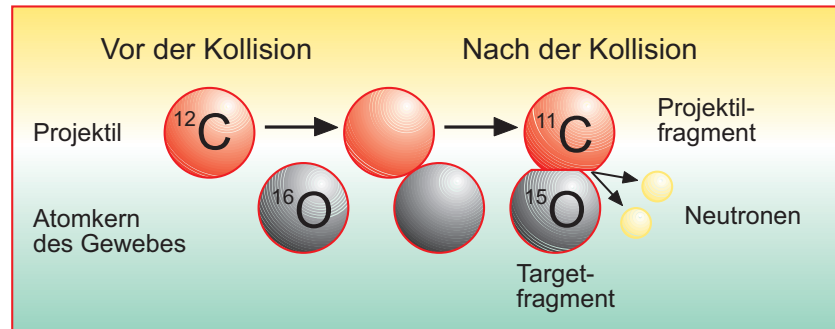
Inzwischen liegen die Erfahrungen aus
drei Jahren Schwerionentherapie vor, und
die durch die Heidelberger Radioonkolo-
gen vorgenommenen Nachuntersuch-
ungen der Patienten zeigen sehr posi-
tive Resultate: Mit Hilfe von Ionenstrah-
len lassen sich auch Tumoren erfolgreich
behandeln, für die etablierte strahlen-
therapeutische Methoden keine befriedi-
genden Ergebnisse liefern.

Präzise Tumorbestrahlung

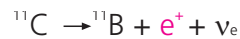
Die meisten der an der GSI behandelten
Patienten sind im Kopf-Hals-Bereich er-
krankt. Hier finden die Ionenstrahlen vor
allem Anwendung, wenn die Geschwül-
ste in der Nähe strahlenempfindlicher Or-
gane wachsen. Im Kopf-Hals-Bereich sind
es Teile des Auges (zum Beispiel die Lin-
se), Sehnerven, Hirnstamm und Rücken-
mark, die durch die Behandlung nicht in
Mitleidenschaft gezogen werden dürfen.
Dabei kommt es darauf an, das kranke
Gewebe zu vernichten, aber das die Ge-
schwulst unmittelbar umgebende gesun-
de und teilweise sehr strahlenempfind-
liche Gewebe zu schonen.

Die biologische Wirksamkeit der Ionen-
strahlen, das heißt im Falle der Krebs-
therapie die zellzerstörende Wirkung, kann
mit besonders hoher Präzision auf den
Tumor fokussiert werden. Doch um diese
Genauigkeit erreichen zu können, ist es
unbedingt notwendig, den unsichtbaren
Therapiestrahler zu kontrollieren. Und ge-

1) Nukleare Fragmentierung



2) β^+ -Zerfall:



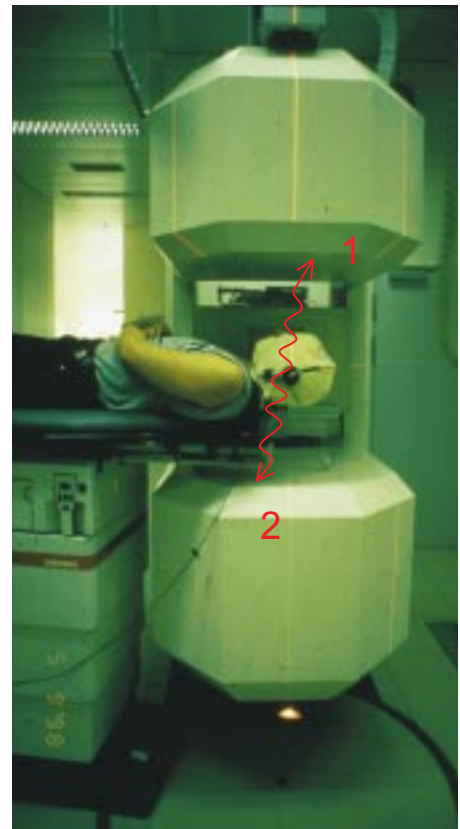
3) Positronenannihilation



$$E(\gamma_1) = E(\gamma_2) = 511 \text{ keV}$$

$$\angle(\gamma_1, \gamma_2) = 180^\circ$$

4) PET-Messung



Das Prinzip von PET für die Kontrolle der Ionenstrahltherapie:

- (1) Bei ihrer Kollision werden vom Projektil (Kohlenstoff-12) und einem Atomkern des Gewebes (zum Beispiel Sauerstoff-16) Nukleonen (in diesem Beispiel jeweils ein Neutron) abgerissen. Es entstehen positronenradioaktive Kerne wie Kohlenstoff-11 und Sauerstoff-15.
- (2) Positronenemitter unterliegen dem Beta-Zerfall. Der radioaktive Ausgangskern zerfällt in einen stabilen Kern, ein Positron (e^+ oder β^+) und ein Neutrino (ν_e).
- (3) Das Positron ist Antimaterie und deswegen nicht stabil; es wandelt sich gemeinsam mit einem Elektron in zwei Gamma-Strahlungsquanten um. Sie haben jeweils eine Energie von 511 Kilo-Elektronenvolt (keV) und laufen entlang einer Linie auseinander.
- (4) Die Gamma-Strahlung verlässt den Körper des Patienten und wird mit den ortsempfindlichen Detektoren des im FZ Rossendorf entwickelten Positronen-Emissions-Tomographen, die ober- und unterhalb des Patienten angeordnet sind, nachgewiesen. Der hier bestrahlte Patient litt an einem Tumor an der Schädelbasis. Zur Sicherung der Präzision der Bestrahlung lagert sein Kopf in einer individuell angefertigten Maske.



nau hier setzt die in Rossendorf entwickelte Komponente der Therapieanlage an.

Mit unserem Verfahren zur Kontrolle der Ionentherapie kann man die Genauigkeit von Tumorbestrahlungen überprüfen, ohne den Patienten zu belasten (nicht-invasiv). Es beruht auf der bildgebenden Technik der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und nutzt den physikalischen Effekt, dass im bestrahlten Gewebe als „Nebenprodukt“ geringste Mengen radioaktiver Nuklide gebildet werden. Sie entstehen, wenn Ionen des Therapiestrahls – sie bewegen sich mit bis zu 70 Prozent der Lichtgeschwindigkeit – mit Atomkernen des Gewebes zusammenstoßen. Dort lösen sie eine Kernreaktion, die so genannte nukleare Fragmentierung, aus.

Die Radionuklide können dabei sowohl aus den Ionen des Therapiestrahls selbst, den Projektilen, als auch aus den Atomkernen des Gewebes, des Targets, entstehen. Man spricht daher von Projektilbeziehungsweise Targetfragmenten.

Eine Spur radioaktiver Atomkerne

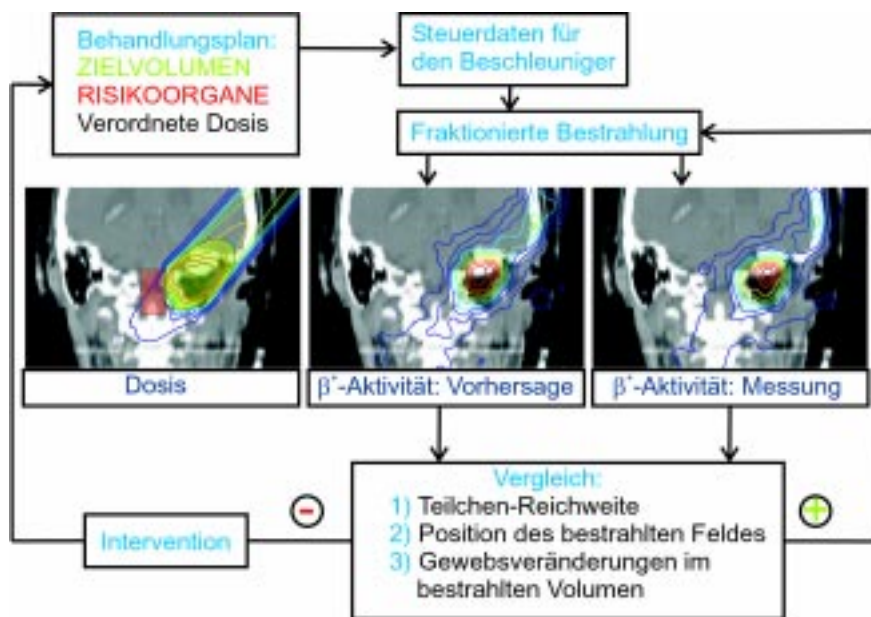
Die dabei entstehenden und für unser PET-Verfahren wichtigen Radionuklide sind Positronenstrahler. Ein Kohlenstoff-Therapiestrahler liefert im Wesentlichen die Positronen emittierenden Projektilfragmente Kohlenstoff-11 (Halbwertszeit 20 Minuten) und Kohlenstoff-10 (Halbwertszeit 19 Sekunden). Aus den am häufigsten in Gewebe vorkommenden Atomkernen des Sauerstoffs, Kohlenstoffs und Stickstoffs (Sauerstoff-16, Kohlenstoff-12, Stickstoff-14) entstehen als wichtigste Targetfragmente die Positronenstrahler Sauerstoff-15 (Halbwertszeit 2 Minuten), Sauerstoff-14 (Halbwertszeit 70 Sekunden), Stickstoff-13 (Halbwertszeit 10 Minuten) sowie ebenfalls Kohlenstoff-11 und Kohlenstoff-10.

Ein Ionenstrahl hinterlässt also im Gewebe eine Spur radioaktiver Atomkerne. Diese wandeln sich durch Beta-Zerfall in stabile Kerne um und emittieren dabei jeweils ein Positron. Dieses ist als Antiteilchen des Elektrons nicht stabil; es zerstrahlt (annihiliert) zusammen mit einem Elektron in zwei Gamma-Strahlungsquanten (Photonen).

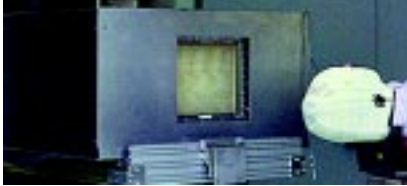
Die Photonen laufen kollinear auseinander und können wegen ihrer hohen Energie von jeweils 511 Kilo-Elektronenvolt (keV) den Körper des Patienten verlassen. Sie lassen sich mit einem Positronen-Emissions-Tomographen, der aus einer Anordnung ortsempfindlicher Strahlungsdetektoren besteht, nachweisen. Aus den Messergebnissen rekonstruieren wir mittels numerischer Verfahren die räumliche Verteilung der Radioaktivität im Körper des Patienten – wir machen also die Spur des Ionenstrahls im Gewebe sichtbar.

Will der Strahlentherapeut die Güte seiner Behandlung beurteilen, interessiert er sich jedoch nicht primär für die entstehende Radioaktivität, sondern er muss die biologische Wirkung der Strahlung kennen. Diese ist mit der durch die ionisierende Strahlung im Gewebe deponierten Energie, der Dosis, korreliert. Die mit PET gemessene Verteilung der Radioaktivität wird zwar ebenfalls von der Dosis bestimmt, trotzdem ergeben beide Verteilungen ein unterschiedliches Bild. Wir können also Radioaktivitäts- und Dosisverteilung nicht direkt miteinander vergleichen.

Um dennoch aus der gemessenen Radioaktivität ableiten zu können, ob die Dosis in der vom Strahlentherapeuten verordneten Weise im Tumor angekommen ist, haben wir ein spezielles Verfahren entwickelt: Aus dem Bestrahlungsplan, also der vom Arzt gewünschten Dosisverteilung im Körper des Patienten, sagen wir die zu erwartende Radioaktivitätsverteilung vorher. Dies geschieht durch eine recht aufwändige Computersimulation, in der alle bei der Erzeugung und dem Nachweis der Radioaktivität ablaufenden physikalischen Prozesse möglichst genau modelliert werden: die Bremsung der Ionen im Gewebe, die Erzeugung von Positronenstrahlern durch nukleare Fragmentierung, der Beta-Zerfall der radioaktiven Kerne, die Bewegung der Positronen im Gewebe und ihre Annihilation (Vernichtung) sowie die Ausbreitung und der Nachweis der Gamma-Strahlung. Während der Behandlung messen wir dann die Radioaktivitätsverteilung mit dem Positronen-Emissions-Tomographen. Erst ein Vergleich der Vorhersage mit dem Ergebnis der PET-Messung erlaubt eine realistische Einschätzung einer eventuellen Abweichung zwischen geplanter und der



Patient mit einem Tumor (hellgrün) am Hirnstamm (roter Bereich): Der behandelnde Arzt macht Vorgaben über die Lage des Tumors, der Risikoorgane (hier: der Hirnstamm) sowie zur Höhe der Dosis. Diese werden auf der Basis von Röntgen-Computertomogrammen bei der Bestrahlungsplanung in eine Dosisverteilung (links) umgesetzt. Daraus leiten Physiker die Steuerdaten für den Teilchenbeschleuniger ab. Sie enthalten Informationen zu Energie, Intensität, Form und Richtung des Ionenstrahles. Aus diesen Daten sagen wir für jede Bestrahlung die Radioaktivitätsverteilung (Mitte) vorher und vergleichen sie nach der Bestrahlung mit der gemessenen PET-Verteilung (rechts).



bei der Bestrahlung wirklich realisierten Dosisverteilung. Wir können also erst nach einer Bestrahlung beurteilen, ob die Therapie planmäßig verlaufen ist. Dieser Weg ist möglich, ohne den Patienten zu gefährden, weil die gesamte für die Vernichtung des Tumors erforderliche Dosis nicht in einer Bestrahlung, sondern in kleinen Fraktionen über 20 Behandlungstage verabreicht wird. Bei einer mit dem PET-Verfahren festgestellten Unregelmäßigkeit besteht also immer die Möglichkeit, in den folgenden Fraktionen korrigierend einzugreifen, zum Beispiel durch Modifizieren des Bestrahlungsplanes.

Bestrahlungspräzision verbessert

Liegt nun zum Beispiel das Tumervolumen direkt am Hirnstamm, könnte dessen Bestrahlung mit einer unzulässig hohen Dosis zu Ausfällen in der Motorik des Patienten bis hin zur Querschnittslähmung führen. Während einer Behandlung ist daher darauf zu achten, dass die in den Kopf des Patienten eintretenden Kohlenstoffstrahlen zuverlässig vor dem Erreichen des Hirnstammes stoppen.

Solch anspruchsvolle Behandlungen haben die Heidelberger Radioonkologen erst ins Auge gefasst, nachdem sie sicher waren, dass die Kohlenstoffionen genau so weit in das Gewebe eindringen, wie es die Medizinphysiker im Zuge der Bestrahlungsplanung berechnet haben. Die Berechnungen der Bestrahlungsplanung beruhen auf einem physikalischen Modell, das den Bremsprozess und die damit einhergehende Dosisdeposition für Kohlenstoffionen in Gewebe beschreibt. Doch jedes Modell gibt die Realität nur mit einer begrenzten Genauigkeit wieder, und auch wir wurden mit dieser wohlbekanntem Tatsache konfrontiert: Bei den ersten behandelten Patienten zeigten unsere PET-Messungen systematische Abweichungen zwischen geplanter und gemessener Reichweite. Diese Befunde nahmen die Kollegen der GSI zum Anlass, noch einmal präzise Reichweitemessungen für Kohlenstoffionen in Gewebe durchzuführen. Auf Basis der neuen Messungen haben die Forscher das physikalische Strahlmodell dann geringfügig modifiziert. Erst das war der Start für die Präzisionsbestrahlungen, wie

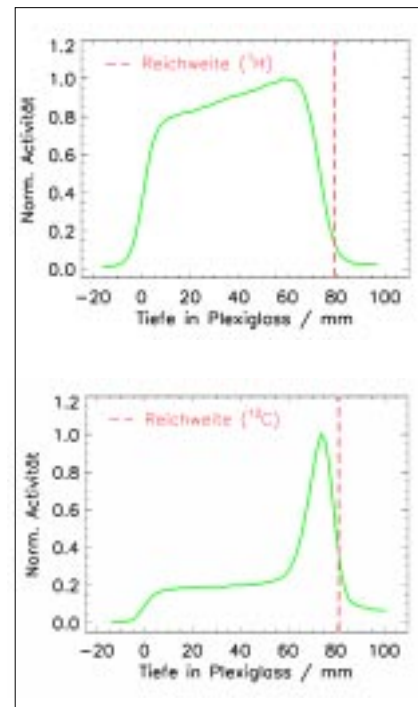
sie die Therapie-Gruppe in Darmstadt heute durchführt.

Doch die PET-Kontrolle hat nicht nur zu einer besseren Bestrahlungsplanung geführt. Tatsächlich gibt es auch Ursachen für Diskrepanzen zwischen vorausberechneter und gemessener Radioaktivitätsverteilung, die zufälligen Charakters und nicht ohne weiteres vorhersehbar sind. Beispielsweise können bei der Positionierung des Patienten am Bestrahlungsgerät Fehler bis zu etwa einem Millimeter auftreten. Zudem spielen anatomische Veränderungen eine entscheidende Rolle. So können Schleimhäute an- oder abschwellen und Körperhöhlen mit Sekret gefüllt sein. Auslöser kann die Wirkung der Strahlen selbst sein, aber im Falle der Nase und ihren Nebenhöhlen kann das Phänomen auch durch eine Erkältung ausgelöst werden. Um solche Veränderungen zu erkennen, müssen wir die vorausberechneten und gemessenen Radioaktivitätsverteilungen für jede Therapiebestrahlung sorgfältig vergleichen. Weichen diese voneinander ab, hängt die Reaktion des Radioonkologen darauf vom Einfluss auf den Behandlungserfolg ab – sie kann bis zur Unterbrechung der Therapie und der Neuerstellung eines Bestrahlungsplanes reichen.

Therapie mit Protonenstrahlen

Die positiven Ergebnisse der Krebsbehandlung mit Kohlenstoffstrahlen haben zu dem Wunsch geführt, diese hochwirksame Form der Therapie einer größeren Zahl von Patienten zugute kommen zu lassen. Radioonkologen sagen vorher, dass – selbst bei restriktiver Indikationsstellung – in Deutschland jährlich einige tausend Patienten von dieser Behandlungsform profitieren könnten. Doch die GSI in Darmstadt ist eine Einrichtung für physikalische Grundlagenforschung und die Tumorthherapie lediglich eine Pilotanlage. Aus logistischen und technischen Gründen könnte sie einen solchen Ansturm von Patienten nicht verkraften. Daher wird gegenwärtig eine ausschließlich klinisch genutzte Anlage für die Ionenstrahltherapie konzipiert, die dann in Verbindung mit einer großen Klinik betrieben werden soll.

Das Projekt sieht vor, dass sie eng mit der Radiologischen Universitätsklinik



Die Verteilungen der Positronenradioaktivität von Kohlenstoff- und Protonenstrahlen unterscheiden sich erheblich (hier in Plexiglas mit einer Reichweite von acht Zentimetern): Während die vom Kohlenstoff stammende Spur ein von Projekttilfragmenten gebildetes Maximum hat, zeigt die Verteilung für Protonen einen flachen Verlauf. Der Grund: Protonen selbst bilden keine Positronenstrahler, es treten daher keine radioaktiven Projekttilfragmente auf.

Heidelberg kooperiert und in deren direkter Nachbarschaft nahe dem DKFZ gebaut wird. Bei dieser Anlage werden die gesamte Infrastruktur, vor allem aber auch die Parameter des Beschleunigers, ganz speziell für die Therapie optimiert. An ihr soll neben der Bestrahlung mit Kohlenstoffionen auch die Therapie mit Strahlen anderer Teilchen (Protonen, Helium- und Sauerstoffionen) möglich sein. Die Strahlentherapeuten wollen hier vergleichende klinische Studien mit unterschiedlichen Ionen durchführen mit dem Ziel, in Abhängigkeit von der Tumorspezies diejenige Ionensorte zu finden, welche die besten Heilungsergebnisse hervorbringt. An der neuen Anlage, die bis zum Jahr 2006 fertiggestellt sein soll, können die Radioonkologen dann etwa 1000 Patienten pro Jahr behandeln.

Eine besondere Rolle im Teilchenspektrum fällt den Protonen zu. Sie erfordern den geringsten Aufwand bei der Beschleunigung und Strahlablenkung und sind

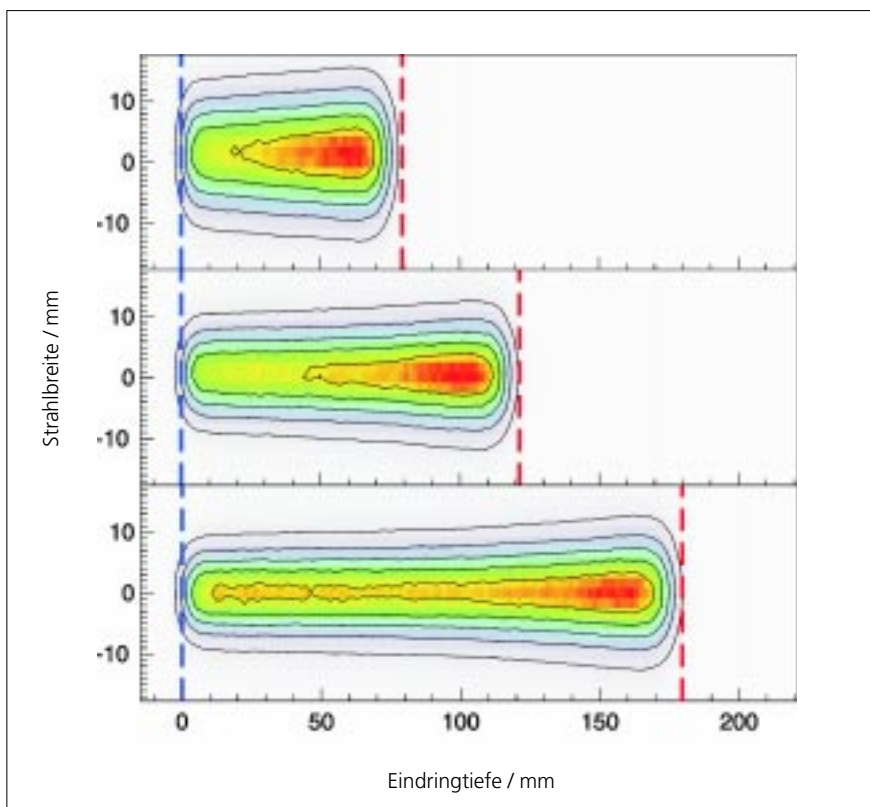


deshalb die gegenwärtig am häufigsten in der Krebstherapie eingesetzten Ionenstrahlen. Doch auch diese Teilchenstrahlen kann man nicht sehen, riechen, spüren; und somit ist es hier ebenfalls notwendig, die Therapiekontrolle weiter zu entwickeln. Daher wollen wir unser Verfahren zur Kontrolle der Kohlenstofftherapie auch für die Protonen nutzbar machen.

Dafür sind allerdings erhebliche Vorarbeiten notwendig: Betrachtet man die Tiefenverteilung der Aktivität, wenn Kohlenstoffionen und Protonen in Plexiglas eindringen – Plexiglas wird wegen seiner stöchiometrischen Zusammensetzung ($C_5H_8O_2$)_n und seiner leichten Handhabbarkeit in Bestrahlungsexperimenten gern als Ersatz für Gewebe genutzt – stellt man fest, dass sich beide Verteilungen deutlich unterscheiden. Im Unterschied zu Kohlenstoff (und auch Sauerstoff) fehlt bei Protonenstrahlen das Maximum, das uns den Ort der höchsten Dosis anzeigt.

Zwar markieren Kohlenstoffionen und auch Protonen das Gewebe entlang des Strahlweges durch Targetfragmente nahezu gleichmäßig. Doch zusätzlich entstehen aus den eingestrahelten Kohlenstoffionen Positronenstrahler (Projektilfragmente). Diese treten nur am Ende des Strahlweges auf, bilden dort also das Maximum. Dies ist nur bei schwereren Ionen möglich; leichte Ionen, wie Protonen, bilden selbst keine Positronenemitter. Daher fehlt bei Protonen das Maximum, was eine Reichweitebestimmung um einiges erschwert.

Trotz dieses wenig ermutigenden Verteilungsbildes entschlossen wir uns vor etwa zwei Jahren, die Möglichkeit von PET für die Kontrolle der Protonentherapie zu studieren. Zunächst versuchten wir mit einer Computersimulation, die Frage zu beantworten wie hoch die Radioaktivität ist, die im Gewebe des Patienten erzeugt wird. Dabei gingen wir davon aus, dass ein und derselbe Tumor mit Protonen anstatt mit Kohlenstoffionen bestrahlt wird; die deponierte Energiedosis für beide Bestrahlungen sollte die gleiche sein. Das Ergebnis lautete: Bei einer Protonenbestrahlung entsteht eine wenigstens doppelt so hohe Aktivität wie bei einer Kohlenstoffbestrahlung. Dieses Resultat – es verspricht Positronen-Emissions-Tomogramme besserer



PET-Bilder zeigen die radioaktiven Spuren, die Protonenstrahlen in Plexiglas hinterlassen. Die Energie der Protonen: 110 Mega-Elektronenvolt (MeV), oben; 140 MeV, Mitte; und 175 MeV, unten. Der Durchmesser der bestrahlten Fläche betrug etwa fünfzehn Millimeter (Halbwertsbreite).

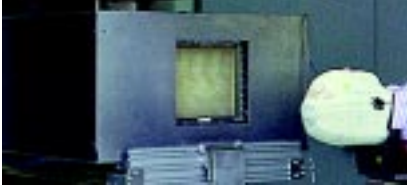
Zählstatistik und damit höherer Aussagekraft – haben wir experimentell überprüft. Der vom FZR an der Bestrahlungsanlage der GSI errichtete Positronen-Emissions-Tomograph bietet dazu sehr gute Möglichkeiten, ist er doch gegenwärtig die einzige Anlage auf der Welt, an der PET-Messungen simultan zu Ionenbestrahlungen ausgeführt werden können.

Das erlaubt, auch den Zerfall sehr kurzlebiger Radionuklide verlustfrei zu registrieren; zum Beispiel Sauerstoff-15 (Halbwertszeit 2 Minuten) und sogar Kohlenstoff-10 (Halbwertszeit 19 Sekunden). Diese Möglichkeit war Bedingung bei unserem experimentellen Test, weil gerade das Sauerstoffisotop-15 das bei der Bestrahlung von Gewebe mit Protonen am häufigsten erzeugte positronenemittierende Radionuklid ist.

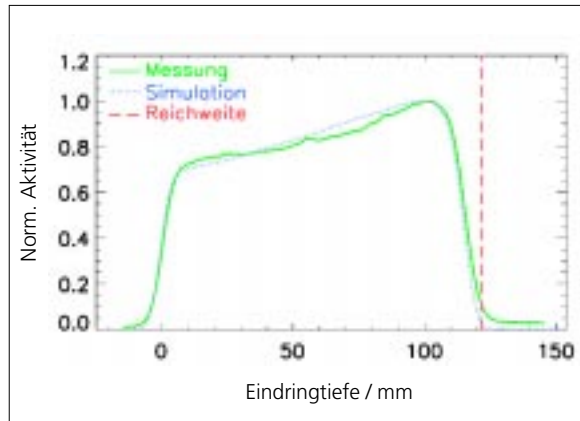
Die Verteilung der protoneninduzierten Radioaktivität in Plexiglas-Probekörpern zeigt deutlich, dass auch Protonen eine mit ihrer Reichweite eindeutig korrelierte Radioaktivitätsspur in gewebeähn-

lichem Material hinterlassen. Die im Versuch mit Protonen erhaltenen Daten haben wir mit den Resultaten verglichen, die wir bei früheren Experimenten mit Kohlenstoffstrahlen gleicher Reichweite und Dosis erhalten hatten. Dabei zeigte sich, dass die Spur der Protonen die dreifache Intensität ($3,2 \pm 0,4$) der durch Kohlenstoffstrahlen erzeugten Radioaktivität aufweist.

Bei therapeutischen Bestrahlungen wird sich das Verhältnis noch weiter zugunsten der Protonen verschieben; denn die relative biologische Wirksamkeit von Kohlenstoff beträgt zwei bis drei, die von Protonen liegt jedoch nahe eins. Um also Tumorgewebe gleich stark zu schädigen, muss man bei Protonenbestrahlung eine im Vergleich mit Kohlenstoff zwei- bis dreimal höhere Energiedosis applizieren. Vorsichtig geschätzt, können wir also bei Bestrahlung des gleichen Tumors mit Protonen anstatt mit Kohlenstoffionen PET-Bilder mit fünffacher Zählstatistik erwarten. Dies sollte auch den offensichtlichen Nachteil eines fehlenden Maximums bei Protonen kompensieren.



Für den Erfolg der PET-Methode bei der Kohlenstofftherapie war entscheidend, dass es uns gelungen ist, aus der Radioaktivitätsverteilung Rückschlüsse auf die Dosisverteilung ziehen zu können. Dafür hatten wir die Verteilung der Radioaktivität im Körper des Patienten auf Basis des Bestrahlungsplanes vorhergesagt und diese mit der tatsächlichen Radioaktivitätsverteilung verglichen. Würde diese Vorhersage auch für Protonen gelingen? Mit Hilfe des Simulationscodes FLUKA, den Wissenschaftler an der Universität Mailand und am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf für die Beschreibung der Wechselwirkung von Strahlung mit Materie entwickelt haben, konnten wir diese Aufgabe für unsere Experimente mit Plexiglasphantomen erfolgreich lösen. Die genauen Wirkungsquerschnitte für die protoneninduzierte Bildung von Positronenstrahlern, die wir dafür brauchten, haben wir aus einer großen Datenbank der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) für Kenngrößen von Kernreaktionen entnommen.



Gemessene und mit dem Strahlungstransport-Programm FLUKA berechnete Tiefenverteilung der Radioaktivität, die Protonenstrahlen in Plexiglas erzeugen (140 MeV).

Der Einsatz von PET ist wichtig für die Sicherung der Präzision von Tumor-Bestrahlungen mit Ionen. Es ist die einzige bekannte Methode, die es erlaubt, die Präzision der Krebsbehandlung mit Ionenstrahlen nicht-invasiv zu kontrollieren. Das Verfahren haben wir im Forschungszentrum Rossendorf für Strahlen von Kohlenstoffionen ausgearbeitet und an der experimentellen Schwerionen-Therapieanlage bei der GSI Darmstadt

zur klinischen Anwendung gebracht. Zwar sind unsere theoretischen und experimentellen Studien, die PET-Methode auf Protonenstrahlen zu übertragen, noch nicht vollständig abgeschlossen, doch sie legen nahe, dass in Zukunft auch Patienten, die mit den in der Radioonkologie weit häufiger eingesetzten Protonenstrahlen behandelt werden, von den Möglichkeiten der Therapiekontrolle mittels PET profitieren könnten.



Mit Lasern auf Spurensuche

Das Verhalten von Actiniden in der Umwelt erforschen

Gerhard Geipel, Thomas Stumpf, Gert Bernhard und Thomas Fanghänel
Institut für Radiochemie

In Ostdeutschland wurde in den Jahren 1945 bis 1990 intensiv Uranbergbau betrieben. Etwa 220 000 Tonnen Uran hat die Wismut AG in Sachsen und Thüringen gewonnen. Das entspricht etwa 60 Prozent des in diesen Jahren in der Sowjetunion insgesamt verwendeten Materials.

Zurückgeblieben sind ein umfangreiches Grubensystem, riesige Gesteinshalden und großflächige Absetzbecken – Gebiete, die es heute zu sanieren gilt.

Doch was im Bergbau seinen Anfang findet, setzt sich in Aufarbeitung und Verwendung des abgebauten Materials fort. So sind bis zum Jahr 2000 durch die friedliche Nutzung der Kernenergie weltweit

etwa 220 000 Tonnen hochradioaktive abgebrannte Brennelemente erzeugt worden [1]. Allein auf Deutschland entfallen dabei 8 000 Tonnen. Im Prozess der Energieerzeugung durch Kernspaltung entstehen in diesen Brennelementen neben den Spaltprodukten die zu den Actiniden gehörenden Elemente Neptunium, Plutonium, Americium und Curium. Darüber hinaus enthalten die Abfälle noch erhebliche Mengen Uran.

Somit sind die umweltgerechte Verwahrung der Hinterlassenschaften des Uranbergbaus und die sichere Beseitigung der radioaktiven Abfälle von zentraler Bedeutung für den Schutz heutiger und künftiger Generationen.



Es gibt vielfältige Möglichkeiten, wie Actiniden in die Umwelt gelangen können.

Als Actiniden bezeichnet man die im Periodensystem dem Actinium folgenden vierzehn Elemente. Unter ihnen befinden sich auch Thorium und Uran mit den Ordnungszahlen 90 und 92. Diese beiden radioaktiven Elemente sind, wenn auch in geringen Konzentrationen, in der uns umgebenden Natur überall vorhanden. Elemente mit höheren Ordnungszahlen kommen in wägbaren Mengen in der Natur nicht vor; sie entstehen nur künstlich durch Kernreaktionen.

Die Actiniden gehören zu den Schwermetallen und sind radioaktiv, zerfallen also über einen längeren oder kürzeren Zeitraum in stabile Elemente mit niedrigerer Ordnungszahl. Die meisten Actiniden sind Alphastrahler mit sehr großen Halbwertszeiten. Plutonium-239 beispielsweise hat eine Halbwertszeit von 20 000 Jahren und die Halbwertszeit von Neptunium-237 beträgt sogar über zwei Millionen Jahre. Kein Wunder also, dass diese Elemente, wenn sie durch Kernwaffentests oder als Folge der friedlichen Nutzung der Kernenergie ungewollt in die Umwelt gelangen, besondere Bedeutung für umweltrelevante Prozesse besitzen.

Wasser – das Transportmedium

Die Problematik dieser ausschließlich vom Menschen in den Umlauf gebrachten Elemente ist: Wir kennen ihr geochemisches Verhalten bisher ungenügend. Bei allen

in der Natur vorkommenden Elementen sind Ausbreitungswege und Zersetzungsprodukte meist besser bekannt. Um aber die Ausbreitung der Actiniden beschreiben und prognostizieren zu können, sind detaillierte Kenntnisse zu den vielfältigen Wechselwirkungen dieser Elemente in natürlichen Systemen erforderlich.

Von zentraler Bedeutung ist daher deren Speziation: Wir müssen wissen, in welcher chemischen Form die Actiniden unter den verschiedenen in der Natur herrschenden Bedingungen vorliegen. Das wichtigste Transportmedium in der Natur ist Wasser. Auch die Ausbreitung der Actiniden erfolgt über den Wasserweg. Daher interessiert uns, mit welchen Bodenbestandteilen sie Verbindungen eingehen und wie die gebildeten Reaktionsprodukte in Wasser löslich sind. Denn lösliche Verbindungen werden sich mit dem Wasser ausbreiten. Aber auch ein Transport der Actiniden in unlöslicher Form, gebunden an Kolloide, ist möglich.

Actinid-Ionen können Komplexe mit einer Vielzahl von anorganischen und organischen Liganden bilden, sie können an mineralischen Oberflächen sorbiert oder auch in Mineralphasen eingebaut werden. Potenzielle organische Liganden für Actiniden sind vor allem Humin- und Fulvinsäuren. Aber auch Holzabbauprodukte, ja selbst Waschmittel und Biozide können als Komplexbildner für Actiniden sowohl in gelöster als auch kolloidaler

Form fungieren. Das Spektrum an Verbindungen, die Actinide mit den verschiedenen Bodenbestandteilen bilden können, ist groß.

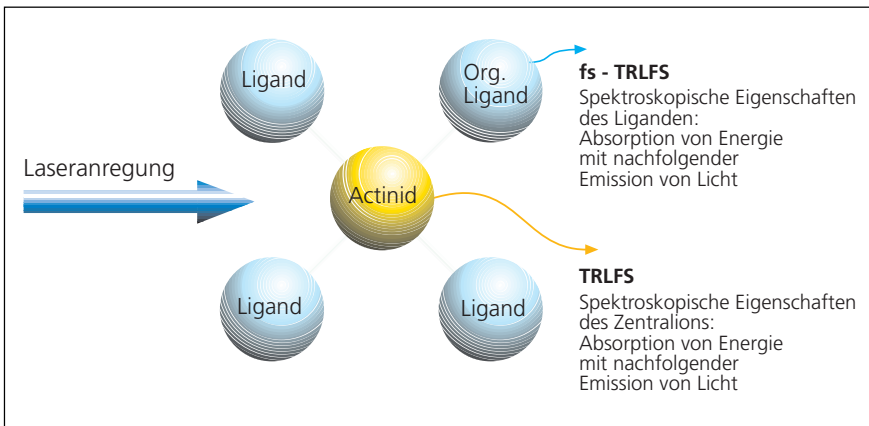
Photonen sind das Mittel der Wahl

Möchte man das Verhalten von Actiniden in der Umwelt erforschen, muss man im Labor umweltrelevante Bedingungen schaffen. Erforscht man ihr Verhalten in wässrigen Systemen, ist eine besondere Schwierigkeit, dass diese Elemente in extrem niedrigen Konzentrationen in der Umwelt auftreten. Ein Liter Haldensickerwasser enthält beispielsweise nur ein Milligramm Uran. Für die anderen Actiniden liegen die Konzentrationen noch einmal um mehrere Größenordnungen niedriger. Für uns galt es also, Untersuchungsmethoden zu finden, mit denen sich die Charakteristika dieser Elemente in ihren Verbindungen auch noch bei so niedrigen Konzentrationen nachweisen lassen. Hier sind Photonen das Mittel der Wahl; Lichtquanten lassen sich auf einfache Weise und zudem noch besonders sensitiv mit einem geeigneten Detektor nachweisen. Wir haben uns der laserinduzierten zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie (TRLFS) bedient. Eine hochsensitive experimentelle Methode, die niedrigste Nachweisgrenzen erreicht, es also gestattet, Untersuchungen bei sehr kleinen Actinidkonzentrationen durchzuführen.

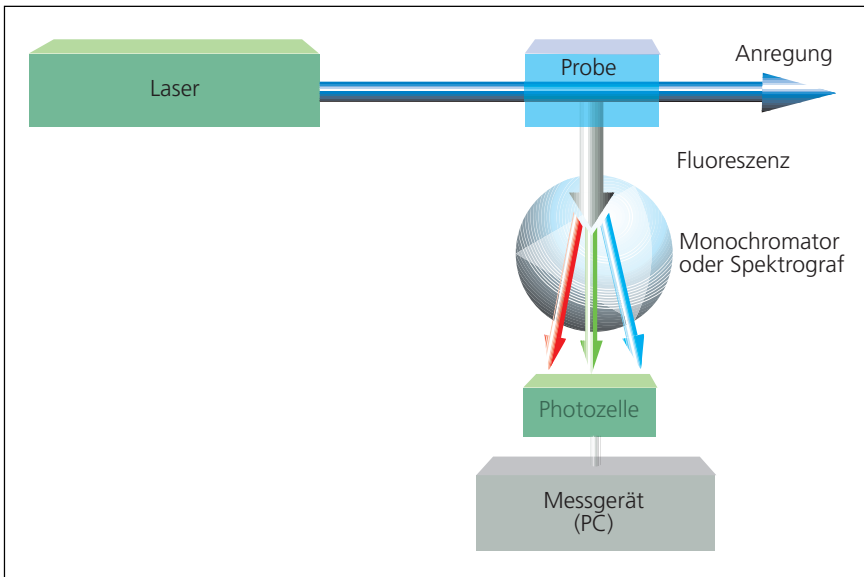
Für die Fluoreszenzmessungen benötigt man einen Laser, mit dem man die zu untersuchende Probe bestrahlt. Diese

Alpha-Strahler

Die Reichweite von Alphastrahlern ist zwar sehr gering, in Luft beispielsweise nur wenige Zentimeter, Alphastrahler haben aber gegenüber Beta- und Gamma-Emittern einen deutlich höheren Dosisfaktor. Denn die kinetische Energie dieser Teilchen ist sehr hoch und führt bei Aufnahme dieser Elemente in den menschlichen Körper durch Inhalation und Ingestion zu sehr hohen lokalen Strahlenbelastungen.



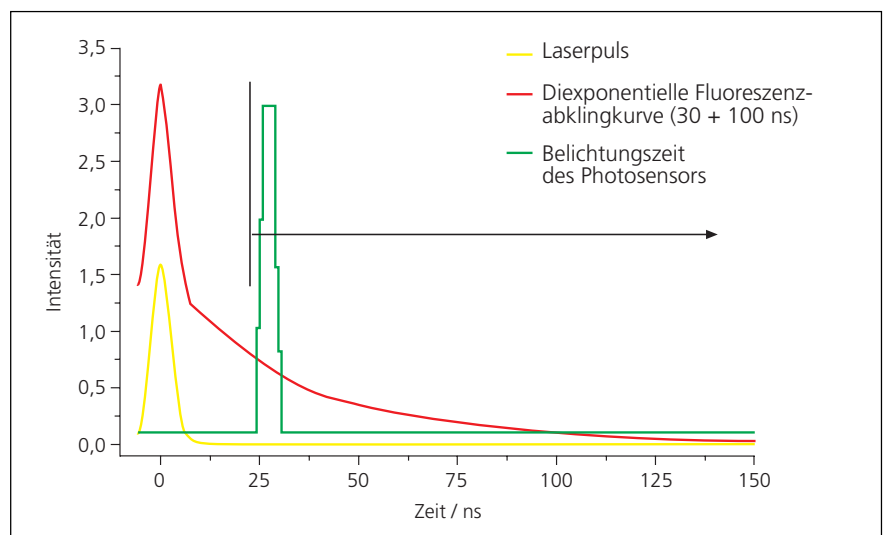
Bei laserinduzierten Untersuchungen absorbieren sowohl Metallion, Ligand und gebildeter Komplex Licht. Die emittierten Photonen haben je nach Herkunft unterschiedliche Eigenschaften.



In der Fluoreszenzspektroskopie wird das emittierte Licht im rechten Winkel zur Richtung des Anregungslasers in einen Spektrografen geleitet, dort in seine optischen Bestandteile zerlegt und mit einer vielkanaligen Photozelle gemessen.

nimmt aus dem Laserstrahl Energie auf und wird angeregt. Anschließend geht die Probe wieder in den Grundzustand über und emittiert nun ihrerseits Licht. Die emittierte Strahlung breitet sich kugelsymmetrisch von der angeregten Probe aus. Im rechten Winkel zum einge-

Zeitaufgelöste Fluoreszenzspektren lassen sich mit Hilfe steuerbarer Photosensoren aufnehmen. Der Laserpuls (gelb) regt die Probe an, das emittierte Signal (rot) wird nach Abklingen des Laserpulses während der Belichtungszeiten des Photosensors (grün) gemessen. Der Zeitpunkt der Belichtung kann relativ zum Laserpuls verändert werden. Hier wird die Messung etwa 25 Nanosekunden nach dem Laserpuls (schwarz) begonnen.



strahlten Laserpuls misst man dann die Fluoreszenz. Das Licht wird einem Spektrografen zugeleitet, in dem es von optischen Gittern in seine spektralen Anteile zerlegt und anschließend in einer Photozelle gemessen wird.

Bei der zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie setzt man gepulste Laser zur Anregung und besonders schnelle Kameras als Detektoren ein. Auch hier nimmt die Probe durch den Laserpuls Energie auf und geht, nachdem der Laserpuls abgeklungen ist, wieder in den Grundzustand über. Nach einem exponentiellen Zerfallsgesetz klingt die Fluoreszenz der Probe ab. Mit Hilfe eines elektronisch angesteuerten „Kameraverschlusses“ kann man das Abklingverhalten der Lumineszenzerscheinung als Funktion der Zeitdifferenz zwischen Laserpuls und Messung verfolgen. Dafür baut man den Verschluss vor dem Photosensor ein. Mit einem Zeitverzögerungsgenerator wird dieser dann so angesteuert, dass der Photosensor nur in einem bestimmten Zeitfenster nach dem Laserpuls durch die emittierten Photonen belichtet wird.

Als „Kameraverschluss“ dienen hochmoderne, vielkanalige Photonenvervielfacher, so genannte Multi-Channel-Plates (MCP). Zurzeit gibt es bereits MCPs, die Belichtungszeiten bis in den Picosekundenbereich (billionstel Sekunden) erlauben. Im Falle einer spektralen Auflösung des Fluoreszenzspektrums in einem Gitterspektrografen ermöglichen die MCPs eine gleichzeitige Messung des gesamten Spektrums.



Doch bei dieser Messmethode müssen einige wesentliche Bedingungen erfüllt sein. Zum einen fluoreszieren nicht alle Elemente, sodass wir zeitaufgelöste Spektren nur für bestimmte Actiniden mit definierten Oxidationszuständen aufnehmen können (unter anderem Uran(VI), Americium(III) und Curium(III)). Andere Oxidationsstufen und andere Actinidenelemente wie Uran(IV), Neptunium oder Plutonium können wir nicht direkt mit Fluoreszenzmethoden untersuchen. Hier muss man einen Umweg gehen und die Fluoreszenz der organischen Liganden nutzen. Ein weiterer Aspekt ist die Wellenlänge des Laserlichtes. Für die Anregung der zu untersuchenden Probe benötigt man Laserpulse mit einer Wellenlänge, die eine maximale Probenanregung ermöglichen. Man braucht also einen Laser, der eine geeignete Wellenlänge zur Verfügung stellt.

Ein dritter Punkt ist die Lebensdauer des Laserpulses. Da man den Einfluss des Laserpulses nicht mit einfachen Mitteln vom emittierten Fluoreszenzlicht trennen kann, muss der Laserpuls wesentlich kürzer sein als die zu erwartende Fluoreszenzlebensdauer der Probe. Und gerade diese Bedingung zeigt häufig die Grenzen der Methode auf: Zwar zeigen Metallionen wie Uran(VI) und Curium(III) relativ lange Fluoreszenzlebensdauern im Bereich von Mikrosekunden; für diese Elemente reicht es aus, wenn der Laserpuls einige Nanosekunden andauert. Schwieriger wird es, wenn man den Umweg über die organischen Liganden der Actiniden gehen muss. Deren Fluoreszenzlebensdauer ist um mehrere Größenordnungen kürzer, und es ist ein Fluoreszenzspektrometer nötig, das auf einem Ultrakurzpulslaser basiert – er erzeugt Laserpulse von nur wenigen Femtosekunden (milliardster Teil einer millionstel Sekunde).

Für die sehr unterschiedlichen Anforderungen an Laser und Detektionssystem haben wir verschiedene, auf die speziellen Fragestellungen optimierte Fluoreszenzmesssysteme aufgebaut.

Nicht einfach sich selbst überlassen

Wird der Uranerzbergbau eingestellt, bleiben Grube, Abraumhalden mit dem tauben Gestein und die infolge der Auf-



Ein Blick in das Laserlabor demonstriert die Komplexität des Aufbaus der Fluoreszenzspektroskopie.

arbeitung des Erzes entstandenen kontaminierten Flächen und Absetzbecken zurück. Dies alles sind Anlagen, die man nicht einfach sich selbst überlassen kann. Denn der Zufluss von Wasser löst eine Vielzahl von Verwitterungsprozessen aus, in deren Verlauf sich die noch vorhandenen natürlichen Radionuklide wie Uran und seine Zerfallsprodukte in der Umwelt ausbreiten können.

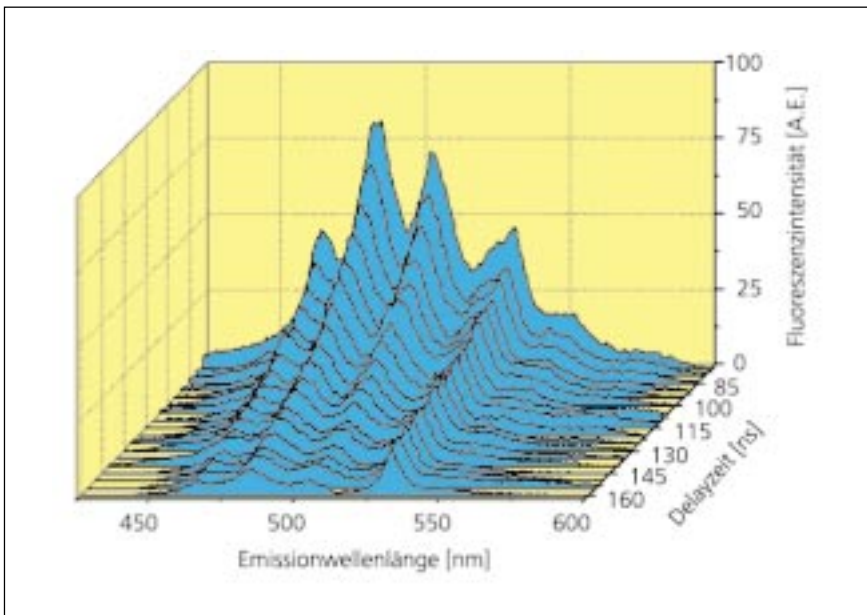
Der pH-Wert natürlicher Wässer liegt in der Regel um den Neutralbereich. Unter diesen Bedingungen löst sich in der Atmosphäre vorhandenes Kohlendioxid – das Wasser ist carbonathaltig. Während das Uran in sauren Lösungen als freies hydratisiertes Uranylion (UO_2^{2+}) vorliegt, gehen die Uranylionen in neutralen Wässern, unter natürlichen Bedingungen also, mit den Carbonationen eine starke Bindung ein – es bilden sich Komplexe. Die entstehenden Uranylcarbonatkomplexe sind im Gegensatz zum Uranylion nicht elektrisch positiv, sondern negativ geladen und zeigen damit ein völlig anderes Migrationsverhalten, als das zweifach positiv geladene Uranylion. Neben Carbonat sind zudem in den Uranbergbauwässern infolge von Verwitterungsprozessen eine ganze Reihe weiterer Kationen und Anionen in gelöster Form vorhanden, die als potenzielle Liganden um Koordinationsplätze am Uranylion konkurrieren. Die Eigenschaften der dabei gebildeten Komplexe bestimmen we-

sentlich die Mobilität des Urans. Die unterschiedlichen spektroskopischen Eigenschaften dieser Spezies gestatten, deren Anteil in wässrigen Lösungen exakt zu bestimmen.

Als Ergebnis zahlreicher Untersuchungen sind bereits die Komplexbildungskonstanten verschiedenster Urankomplexe in der Datenbank der Nuclear Energy Agency (NEA) zusammengefasst [2]. Mit Hilfe der Datenbank lässt sich berechnen, welche Uranylkomplexverbindungen unter den entsprechenden Bedingungen (pH-Wert, Elementkonzentrationen) in Haldensicker- und Grubenwässern vorherrschen sollten. Solche Berechnungen haben wir für verschiedene Haldensickerwässer angestellt.

Die Berechnungen sagten aus, dass ausschließlich zwei Uranylcarbonatkomplexe in den Lösungen stabil sein sollten – ein Dicarbonato- und ein Tricarbonatokomplex ($\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ und $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$). Die beiden löslichen Komplexe weisen keinerlei Fluoreszenzeigenschaften auf. Im Widerspruch dazu haben unsere Messungen der Haldensickerwässer jedoch ein Fluoreszenzspektrum gezeigt.

Daraufhin haben wir im Labor verschiedene Sickerwässer synthetisch hergestellt und einigen Calcium zugesetzt. Dabei stellte sich bald heraus, dass ein Fluoreszenzspektrum immer dann auftrat, wenn Calcium in der Uranyltricarbonatlösung



Zeitaufgelöstes Fluoreszenzspektrum, aufgenommen mit einem originalen Haldensickerwasser aus Schlema.

($\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$) anwesend war. Die Intensität der Fluoreszenz stand dabei in direktem Zusammenhang mit der Calciumkonzentration. Daraus lässt sich nur eine Schlussfolgerung ziehen: Das Uranyltricarbonat bildet mit dem Calcium einen Komplex. Eine anschließende systematische Variation der Calcium-, Uranyl- und Carbonatkonzentration machte deutlich, dass zwei Calciumionen mit dem Uranyltricarbonat reagieren und einen elektrisch neutralen Calciumuranyltricarbonatkomplex bilden ($\text{Ca}_2[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$). Mit den aus unseren Messungen ermittelten Komplexbildungskonstanten haben wir neue Berechnungen angestellt. Diese haben eindeutig ergeben, dass im pH-Bereich der Haldensicker- und Grubenwässer der Hauptanteil des Urans in Form dieses Komplexes vorliegt. Das ist vor allem deshalb erstaunlich, weil der Komplex bisher nur als Mineral bekannt war (Liebigit: $\text{Ca}_2[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3] \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$). Seine Entdeckung in gelöster Form hat weit reichende Konsequenzen für die Reinigung der Abwässer aus Urangruben. Der Komplex ist ungeladen und hat damit vollkommen andere Eigenschaften als die geladenen Uranverbindungen. Geladene Teilchen lassen sich aus wässrigen Lösungen durch Ionenaustausch entfernen; diese relativ einfache Variante der Reinigung lässt sich auf den neu entdeckten Komplex nicht anwenden. Zudem wissen wir nun, dass bei Anwe-

senheit einer ausreichenden Menge des Lösungsmittels Wasser das Mineral Liebigit ebenfalls migrationsfähig ist.

Komplexbildner in der Natur

Potenzielle organische Liganden für Actiniden sind in der Natur überall vorhanden. Den meisten dieser Verbindungen ist gemein, dass sie auf Grund aromatischer Bestandteile Fluoreszenzeigenschaften aufweisen. Gehen die Liganden nun Komplexe mit nichtfluoreszierenden Metallionen ein, ist eine Untersuchung der Komplexbildung durch den Umweg über eben diese organischen Liganden möglich.

Neptunium ist das dem Uran im Periodensystem benachbarte höhere Actinidenelement. Es entsteht durch Neutroneneinfang im Kernreaktor in immerhin noch bedeutenden Mengen (450 Gramm pro Tonne Brennelement). Die stabilste Oxidationsstufe von Neptunium in Lösung ist Neptunium(V).

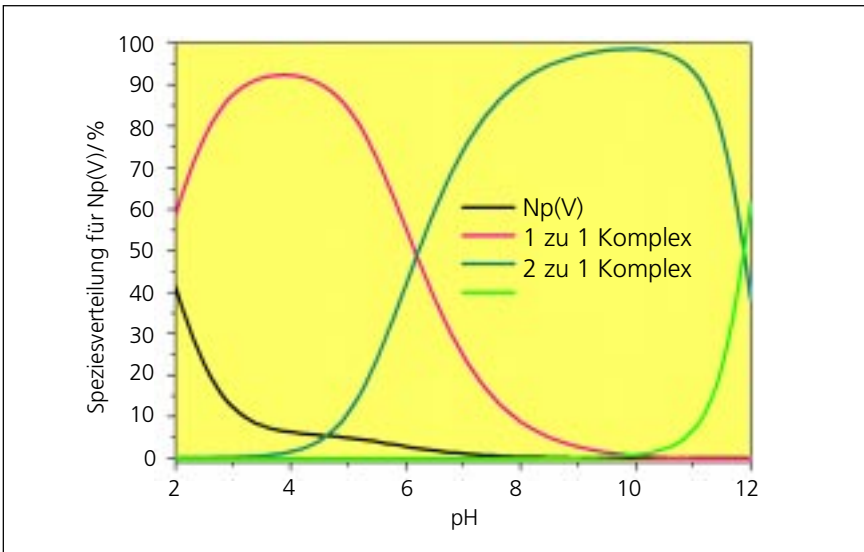
Neptunium selbst fluoresziert nicht. Bildet es allerdings Komplexe mit organischen Liganden, können sie über deren Fluoreszenzverhalten bestimmt werden. Als Beispiel haben wir die Komplexbildung mit 2,3-Dihydroxybenzoesäure, einer phenolischen Benzolcarbonsäure, untersucht. Die Verbindung hat ein Absorptionsmaximum bei einer Lichtwellen-

länge von 310 Nanometern, sodass die Fluoreszenz mit Laserpulsen dieser Wellenlänge angeregt werden kann. Die Fluoreszenzlebensdauer des Liganden beträgt 375 Picosekunden (millionster Teil einer millionstel Sekunde) und das Emissionsmaximum liegt bei 440 Nanometern. Aus den gemessenen Fluoreszenzintensitäten können wir Schlussfolgerungen über die Konzentrationen der einzelnen Spezies in der Lösung ziehen. Unter sauren Bedingungen haben wir einen eins zu eins Neptunium(V)-2,3-Dihydroxybenzoat-Komplex bestimmt. Dabei reagiert nur die Carboxylgruppe mit dem Neptunium(V). Dagegen reagieren in nahezu neutralen Lösungen zwei Neptunium(V)-Ionen mit der 2,3-Dihydroxybenzoesäure. Das bedeutet, dass unter diesen Bedingungen auch die phenolische OH-Gruppe am Benzolring zur Komplexbildung herangezogen wird. Gleiche Untersuchungen mit Uranylionen zeigen lediglich eine eins zu eins Komplexbildung. Es wird aber eine auffällige Abhängigkeit der Komplexbildungskonstante vom pH-Wert der Lösung beobachtet. Die Schlussfolgerung aus diesem Verhalten ist, dass dieses Actinidion bereits in relativ sauren Lösungen mit zwei Bindungsstellen des Liganden reagiert. Nämlich zusätzlich zur Carboxylgruppe auch mit der phenolischen OH-Gruppe – es bildet sich ein Chelat.

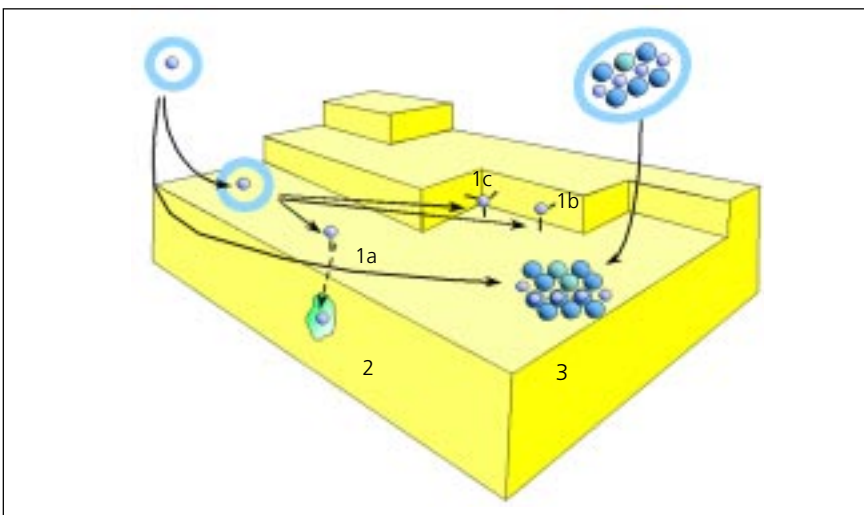
Die Einbeziehung der ermittelten Komplexbildungskonstanten in Berechnungen zeigt, dass die Komplexbildung mit organischen Liganden die Speziation der entsprechenden Actinide stark beeinflussen kann.

Hält Calcit Curium fest?

Urangruben stehen am Anfang des Kreislaufs der Kernenergienutzung, die Endlager stehen an seinem Schluss. Für eine Beurteilung der Langzeitsicherheit von Endlagern gehen wir wie im Fall der stillgelegten Uranerzgruben der Frage nach, ob sich die eingelagerten radioaktiven Spezies möglicherweise ausbreiten und in der Umwelt verteilen könnten. Hier spielen Sorptionsprozesse von Radionukliden an Mineraloberflächen, die beim Kontakt mit dem umgebenden Wirtsgestein auftreten können, eine entscheidende Rolle. Nähern sich durch Wasser mobilisierte Io-



Berechnete Speziesverteilung für 1 Milligramm pro Liter Neptunium(V) und 1,5 Milligramm pro Liter 2,3-Dihydroxybenzoesäure.



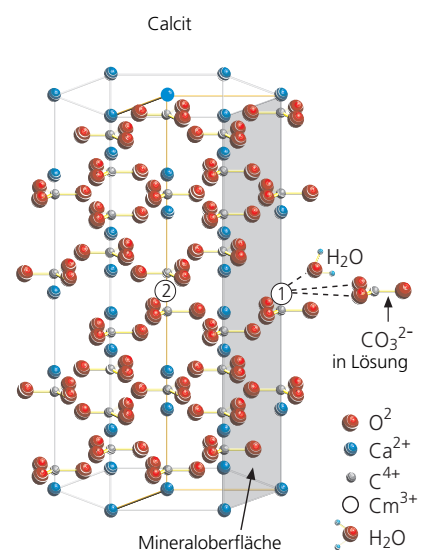
Die Actiniden können an Mineralien gebunden sein. Dabei sind verschiedene Bindungsmöglichkeiten denkbar (1a bis 1c). Nachhaltige Immobilisierung tritt immer dann auf, wenn die Ionen im Kristallgitter des Minerals eingebaut werden (2). Ebenso können durch die Sorption von Kolloiden Actiniden gebunden werden (3).

nen einer Mineraloberfläche, ist es möglich, dass sie als Oberflächenkomplexe daran gebunden werden. Eine nachhaltige Immobilisierung findet immer dann statt, wenn das Nuklid in das Kristallgitter des Minerals eingebaut wird. Calcit (CaCO_3) ist in der Natur allgegenwärtig und ist insbesondere als Verwitterungsprodukt des Zements in Endlagern radioaktiver Abfälle eine bedeutende Sekundärmineralphase. Aus Voruntersuchungen ist bekannt, dass Calcit sehr stark immobilisierend auf zwei- und dreiwertige Ionen wirkt. Am Beispiel von Curium(III) wollten wir daher herausfinden, ob der Einbau des Actinids in das Kristallgitter möglich ist.

Wir haben die Emissionsspektren dieses Elements nach verschiedenen langen Kontaktzeiten mit einer Calcitsuspension aufgenommen. Auch hier haben wir wieder unter umweltrelevanten Bedingungen gearbeitet und nur geringste Konzentrationen von Curium eingesetzt (0,02 Milligramm pro Liter). Dabei konnten wir zwei Curium(III)-Calcit-Oberflächenkomplexe nachweisen und charakterisieren. Das Maximum der Fluoreszenzemission einer der Curium-Spezies entspricht dem des Tetracarbonatkomplexes ($\text{Cm}(\text{CO}_3)_4^{5-}$) in Lösung. Mit zunehmender Curium(III)-Calcit-Kontaktzeit nahm die Stärke des Signals ab, und das Signal einer zweiten Curium-Calcit-Sorp-

tionsspezies wurde sichtbar. Die Verschiebung war besonders ausgeprägt und deutete auf eine starke Veränderung der chemischen Umgebung des Curiums hin. Doch nicht nur die Verschiebung der Curium-Emissionsspektren, auch die Fluoreszenzlebensdauer der verschiedenen Curium/Calcit-Sorptionsspezies ist eine wichtige Informationsquelle: Aus den gemessenen Fluoreszenzlebensdauern lässt sich die Zahl der Wassermoleküle, die das Curiumatom direkt umgeben, ableiten und somit auf die Art der Bindung des Metallions an die Mineraloberfläche rückschließen. Je weniger Wassermoleküle das Curiumatom umgeben, umso länger ist die Fluoreszenzlebensdauer.

Während das freie Curium-Aquoion von neun Wassermolekülen in der primären Koordinationssphäre umgeben ist – die Fluoreszenzlebensdauer beträgt etwa 70 Mikrosekunden (millionstel Sekunden) –, deutet die für den ersten Curium/Calcit-Oberflächenkomplex ermittelte Fluoreszenzlebensdauer (über 300 Mikrosekunden) auf nur noch ein Wassermolekül in der ersten Koordinationssphäre des Curiums hin. Für die zweite Curium/Calcit-Sorptionsspezies haben wir eine besonders lange Fluoreszenzlebensdauer gemessen, sie betrug über 1300 Mikrosekunden. Das entspricht ziemlich genau dem theoretischen Wert für die Fluores-



Den Einbau von Curium(III) in das Kristallgitter demonstriert das Strukturmodell. Während das oberflächennahe Curium(III) noch an Wasser gebunden ist (1), verfügt das vollständig in das Kristallgitter eingelagerte Curium(III) über keinerlei Wasserkoordination mehr (2).



zenzlebensdauer von Curium bei völliger Abwesenheit von Wasser – das Curium ist offensichtlich vollständig eingebaut worden. Die mit laserspektroskopischen Methoden erhaltenen Informationen zum Sorptions- und Einbaumechanismus von Actiniden an beziehungsweise in Calcit werden bei zukünftigen Berechnungen zu Langzeitsicherheitsanalysen von Endlagern für hochradioaktive Abfälle einfließen.

Die Beispiele zeigen, dass laserinduzierte spektroskopische Methoden wirksame Werkzeuge für das Studium des Verhaltens von Actiniden unter umweltrelevanten Bedingungen sind. Sie erlauben es, in geringste Konzentrationsbereiche vorzudringen. Bei diesen Konzentrationen kann man nicht nur einfache quantitative Gesamtelementbestimmungen ausführen. Indem man die unterschiedlichen spektroskopischen Eigenschaften der Spezies nutzt, ist eine gezielte Bestimmung der einzelnen existierenden Komplexe möglich. Dabei sind keinerlei Eingriffe in das System notwendig, die eine Veränderung durch Zugabe von Chemikalien oder Veränderung des Oxidationszustandes zur Folge hätten. Die Ergebnisse der Untersuchungen gestatten die Beschreibung komplexer Prozesse in der Umwelt. Es ist möglich, daraus Konsequenzen für Sanierungsmaßnahmen zu ziehen und die Langzeitstabilität von Endlagern für radioaktiven Abfall zu beurteilen.

Das Lasersystem

Für die Anregung der zu untersuchenden Proben benötigt man Laserpulse mit einer Wellenlänge, die eine maximale Anregung der Probe ermöglichen. Im Falle des Uranylions ist dies recht einfach, da das Uranylion bei Wellenlängen kleiner 320 Nanometer ein sehr breites Absorptionskontinuum aufweist. Man kann für die Anregung derartiger Proben Nd:YAG-Laser verwenden, bei denen durch die so genannte Frequenzvervielfachung der 1064 Nanometer-Emission-Laserpulse mit einer Wellenlänge von 266 Nanometer generiert werden.

Für die Curiumspektroskopie kann ein ähnliches Verfahren zur Erzeugung der notwendigen Laserpulse bei 396 Nanometer verwendet werden. Hierbei wird durch Quecksilberblitzlampen ein

Ti-Saphir-Stab angeregt, der seinerseits Laserpulse erzeugt, die zwischen 720 Nanometer und 820 Nanometer abstimbar sind. Die benötigten 396 Nanometer erzeugt man ebenfalls durch Frequenzvervielfachung.

Die Anregung organischer Liganden ist demgegenüber komplizierter. Sie werden zwar auch durch Nanosekundenpulse, wie sie ein Nd:YAG Laser erzeugt, angeregt, man kann aber spektroskopisch nicht mehr mit einfachen Mitteln das Spektrum des Laserpulses von dem emittierten Fluoreszenzlicht trennen. Für spektroskopische Anwendungen ist deshalb ein Laser erforderlich, der wesentlich kürzere Laserpulse erzeugen kann. Darüber hinaus haben die unterschiedlichen organischen Liganden auch unterschiedliche Maxima ihrer Anregung.

Literatur:

- [1] Wohin mit dem deutschen Plutonium?, Keßler, G., Kim, J.-I.; Gompper, K., atw, 49, (1999).
- [2] Grenthe, J. Fuger, R. J. Lemire, A. B. Muller, C. Nguyen-Trung and H. Wanner, Chemical Thermodynamics of Uranium, 1st ed., Elsevier Science Publishers, Amsterdam, (1992).



Winzige Nanoteilchen speichern Ladungen

Ein Ansatz für neue nichtflüchtige Halbleiterspeicher

Johannes von Borany¹, Thoralf Gebel¹ und Karl-Heinz Stegemann²

¹Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

²Zentrum Mikroelektronik Dresden AG

Wer kennt die Situation nicht: Man sitzt vor seinem Computer und will loslegen, aber zunächst ist das gute Stück eine geraume Zeit damit beschäftigt, die für die Arbeit notwendigen Programme und Daten von der Festplatte in den Arbeitsspeicher des Rechners zu laden. Dass es auch anders geht, zeigt die Arbeitsweise von Organizern, Handys oder Digitalkameras. Dort sind alle Daten unmittelbar verfügbar und gehen auch beim Abschalten des Gerätes oder bei einem Stromausfall nicht verloren.

Grund für diesen Unterschied sind zwei völlig verschiedene Speichertypen. Während bei Organizern oder Handys die notwendigen Dateien in nichtflüchtigen Speichern abgelegt sind, ist der Arbeitsspeicher eines konventionellen PCs ein

dynamischer Speicher, bei dem die Information permanent aufgefrischt werden muss.

Das eingangs beschriebene Szenario ist bei PCs lästig, aber technisch vertretbar. Es gibt aber auch viele Anwendungen, für die nichtflüchtige Speicher zwingend erforderlich sind, da betriebs- beziehungsweise sicherheitsrelevante Daten oder nutzerspezifische Informationen jederzeit und dauerhaft verfügbar sein müssen. Ob es sich dabei um das BIOS eines Rechners, das Telefonbuch in einem Handy, die Codenummer eines Autoradios, Zugriffsrechte in Sicherheitssystemen oder Grenz- und Kalibrierwerte in einem Gerät zur medizinischen Überwachung handelt, macht technisch gesehen keinen großen Unterschied.



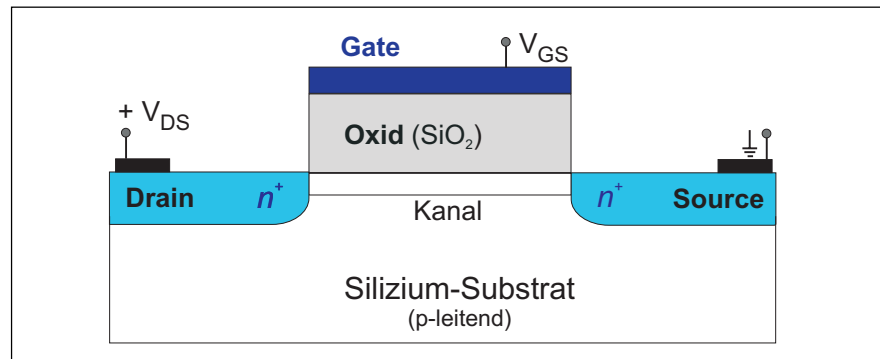
Speicher mit Langzeitgedächtnis

Für eine dauerhafte Speicherung umfangreicher Datenmengen sind die magnetischen Festplattenspeicher derzeit preislich unschlagbar. Daneben gibt es aber auch einen großen Bedarf an nichtflüchtigen Halbleiterspeichern, die das derzeit am stärksten wachsende Segment auf dem Speichermarkt darstellen (Marktprognose McClean Report 2001). Dies betrifft insbesondere integrierte Systemlösungen im Bereich der Automobil- und Kommunikationselektronik, der Medizintechnik oder der Sensorik. Dort ist das Speicherfeld nur ein Baustein einer komplexen elektronischen Anordnung auf einem Mikrochip, wobei alle Teilkomponenten einheitlich in Silizium-Technik herstellbar sein müssen. Bei magnetischen Speichersystemen ist dies gegenwärtig nicht möglich.

Als nichtflüchtige Halbleiterspeicher dominieren derzeit die (Flash)-EEPROM-Speicher (EEPROM = Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory). Dem Trend der Mikroelektronik folgend, wer-

Magnetische Speicher versus Halbleiterspeicher

In der Computer- oder digitalen Kommunikationstechnik werden alle Programme oder Daten in Form einer Folge von Bits codiert, wobei ein einzelner Bit jeweils den Zustand 0 oder 1 annehmen kann. In einem Speicherbaustein – welcher Art auch immer – wird dies durch zwei eindeutig voneinander unterscheidbare Zustände (meist physikalischer Natur) dargestellt. Bei magnetischen Massenspeichern wie der Festplatte handelt es sich dabei um die Richtung des magnetischen Flusses von Magnetpartikeln in einer dünnen Metallschicht auf dem Festplatten-träger (Aluminium, Glas), die durch einen Schreib- beziehungsweise Lesekopf programmiert oder ausgelesen werden. Beim Halbleiterspeicher ist das Grundelement einer Speicherzelle eine Feldeffekt-Transistor-Struktur, wobei der durch die Spannung an der Steuerelektrode (Gate) regelbare Stromfluss durch den Transistorkanal (Strom EIN/AUS) den Zustand eines Bits (1 oder 0) charakterisiert.



Aufbau eines n-Kanal Feldeffekttransistors

Je nach Spannung an der Gate-Elektrode (V_{GS}) kann zwischen Quelle (Source) und Senke (Drain) ein leitfähiger Kanal oder eine isolierende Raumladungszone erzeugt werden. Den Übergang vom leitfähigen zum isolierenden Zustand im Transistorkanal charakterisiert die so genannte Schwellspannung. Die beiden Zustände (leitender/nichtleitender Kanal) werden dem „1“- beziehungsweise „0“-Wert einer binären Information zugeordnet.

den auch an EEPROMs ständig steigende Anforderungen gestellt: Eine zunehmende Speicherdichte, immer niedrigere Programmierspannungen sowie die Steigerung der Anzahl möglicher Programmierzyklen stehen dabei genauso im Blickfeld wie eine preiswerte Fertigungstechnologie. Für komplexe Anwendungen kann der EEPROM diese Forderungen zunehmend nur noch bedingt erfüllen [1]. Prinzipielle Nachteile sind seine relativ große interne Programmierspannung zwischen zwölf und achtzehn Volt und die Begrenzung der Anwendung auf etwa einhunderttausend bis höchstens eine Million Schreib-/Löschzyklen.

Es ist absehbar, dass die EEPROM Speicherzelle für höchstintegrierte nichtflüchtige Speicher in der gegenwärtigen Form nicht angewendet werden kann. Deshalb wird schon seit Jahren nach Alternativen zum EEPROM-Speicher gesucht. Praktische Bedeutung hat in diesem Zusammenhang vor allem der ferroelektrische Speicher [2] und der Nitridspeicher erlangt [3]. Die Arbeiten zum seit langem prognostizierten „Universalspeicher“ auf der Grundlage der Magnetelektronik sind zwar in den letzten Jahren wesentlich vorangekommen, aber ein produktionsreifer Speicher wird frühestens in sechs bis sieben Jahren erwartet [4].

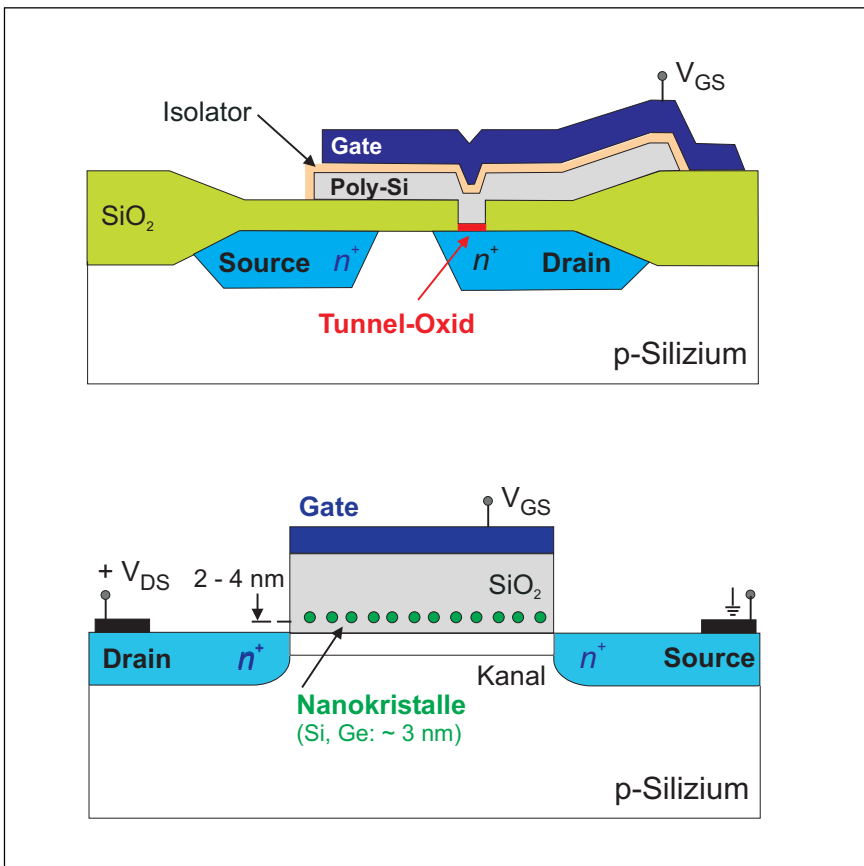
Nullen und Einsen in der Nanowelt

Es waren wieder einmal Forscher von IBM, die 1996 ein völlig neues Konzept eines skalierbaren, nichtflüchtigen Speichers präsentierten. Dabei wird die Poly-Sili-

zium-Schicht des EEPROM durch eine Vielzahl voneinander separierter, nur wenige Nanometer (millionstel Millimeter) große Germanium- oder Silizium-Nanokristalle ersetzt, die perlenartig in einem schmalen Band in unmittelbarer Nähe der Silizium/Siliziumoxid-Grenzfläche angeordnet sind. Die Beladung dieser Nanoteilchen (Cluster) mit jeweils wenigen Elektronen ist ausreichend, um den Stromfluss im Transistorkanal erheblich zu ändern.

Die Vorteile des Nanoclusterspeichers im Vergleich zum konventionellen EEPROM beruhen auf zwei prinzipiellen Unterschieden: Zum einen wird statt einer geschlossenen Schicht ein Ensemble diskreter Speicherzentren in Form der Nanocluster genutzt. Dies verspricht neben der sehr guten Skalierbarkeit der Speicherzelle auch eine verbesserte Defekt-Toleranz, da beim Ausfall einzelner Cluster die generelle Information der Speicherzelle erhalten bleibt. Zum anderen sollte als Folge des geringen Abstandes der Nanocluster zum Substrat eine Beladung der Cluster bei relativ geringen Programmierspannungen möglich sein – und damit auch die Anzahl nutzbarer Programmierzyklen steigen.

Einer der wesentlichen Knackpunkte bei der Realisierung des Nanocluster-Speichers ist die Lösung der Frage, wie dieses schmale Band mit Clustern definierter Größe, Dichte und Lage erzeugt werden kann. Übliche Verfahren der lithografischen Strukturierung sind bei der geforderten Clustergröße von wenigen Nanometern nicht anwendbar. Daher muss man auf Techniken zurückgreifen, bei denen die Bildung der Nanocluster selbstorganisierend aus der atomaren



Vergleich einer EEPROM-Speicherzelle und eines Nanoclusterspeichers

Querschnitt einer EEPROM-Speicherzelle (Bild oben) und der Speicherzelle eines Nanoclusterspeichers (Bild unten). Die unterschiedliche Art der Speicherzentren beim EEPROM (Poly-Silizium-Schicht) und beim Nanoclusterspeicher (Band separierter Nanocluster) ist deutlich zu erkennen. In beiden Fällen führt die Be- oder Entladung der Cluster infolge der Änderung der Kanalleitfähigkeit zu einer Variation des Drain-Source-Stromes und damit der Information der Speicherzelle.

Ebene heraus erfolgt. Viele Forschergruppen nutzen dazu Verfahren, bei denen sich die Cluster durch Kondensation in einer Hochtemperatur-Gasphase bilden. Diese Cluster werden dann auf einem sehr dünnen Tunneloxid (zwei bis vier Nanometer „dick“) abgeschieden und anschließend in einem weiteren Prozessschritt in ein Oxid eingebettet. Die dabei angewandten Techniken sind unter anderem die chemische Gasphasen-Abscheidung (CVD = chemical vapour deposition) oder eine spezielle Aerosoltechnik, bei der gröbenselektierte Cluster wie mit einer Sprühpistole auf das Tunneloxid aufgetragen werden. Diese Verfahren sind in der Regel technologisch sehr aufwändig und haben – mit Ausnahme der Aerosoltechnik – den Nachteil, dass sich damit nur relativ geringe Clusterdichten erzeugen lassen.

Mit Altbewährtem Neues schaffen

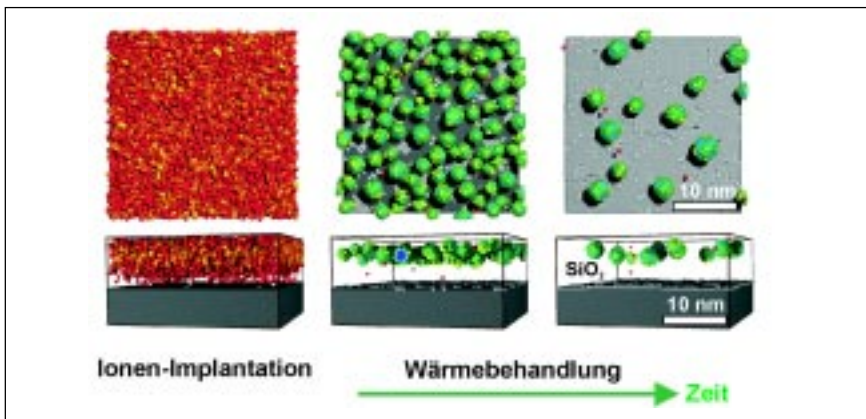
Wir haben einen anderen Ansatz gewählt, der technologisch wesentlich einfacher umsetzbar ist und vollständig auf Verfahren beruht, die bereits in der Chipfertigung eingesetzt werden. Die Erzeugung der Nanoteilchen erfolgt dabei mit Hilfe der Ionenstrahlsynthese. Technisch gesehen ist dies nichts anderes als die Kombination einer Ionenimplantation – Fremdatome werden mit Hilfe von Ionenbeschleunigern in die Oberfläche eines Materials eingebracht – und einer Wärmebehandlung. In den vorangegangenen Jahren hatten wir umfangreiche Erfahrungen bei der Synthese von Silizium-, Germanium- oder Zinnclustern in relativ dicken Siliziumdioxid-Schichten gesammelt. Solche Schichten zeigen eine intensive blaue Lichtemission und sind daher für optoelektronische Anwendungen von großem Interesse.

Vergleich EEPROM-Speicher und Nanokristallspeicher

Beides sind nichtflüchtige Speicher, bei denen eine Information dauerhaft verfügbar ist. Dies wird erreicht, indem im Transistor-Gate lokale Speicherzentren geschaffen werden. Der Ladungszustand dieser Speicherzentren (be-/entladen) beeinflusst über die Influenz die Leitfähigkeit im Transistorkanal. EEPROM und Nanokristallspeicher unterscheiden sich durch die Art dieser Speicherzentren. Beim EEPROM ist dies eine zusätzliche Poly-Silizium-Schicht im Gateoxid des Transistors. Durch Spannungsimpulse an der Steuerelektrode des Transistors gelangen Elektronen aus dem Silizium-Substrat durch ein dünnes Tunneloxid in das Poly-Silizium, um danach permanent in dieser Schicht zu verbleiben. Durch einen Spannungsimpuls umgekehrter Polarität werden die Elektronen wieder aus dieser Schicht entfernt.

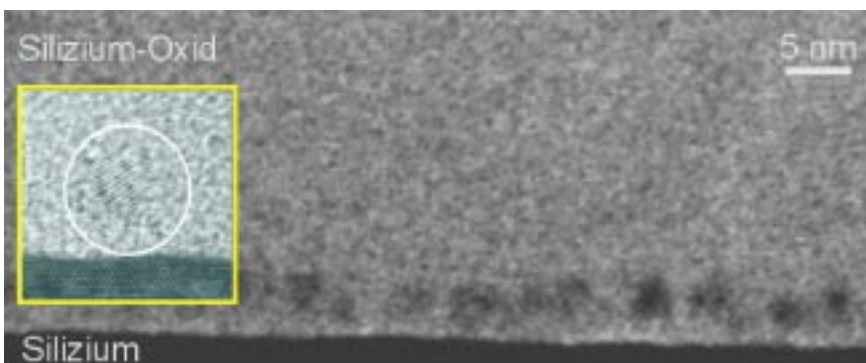
Im Unterschied dazu erfolgt die Ladungsspeicherung im Nanokristallspeicher in einem Ensemble von winzigen Clustern aus Silizium oder Germanium, die in das Gateoxid eines Transistors eingebettet sind. Diese müssen sich in einem geringen Abstand von der Silizium/Siliziumdioxid-Grenzfläche befinden, um beim Anlegen einer Gatespannung einen Ladungstransport von Elektronen aus dem Transistorkanal in die Cluster zu ermöglichen. Die Be- oder Entladung der Cluster führt analog wie beim EEPROM infolge der Änderung der Kanalleitfähigkeit zu einer Variation des Drain-Source-Stromes und damit der Information der Speicherzelle.

Die Frage war nun: Ist diese Clusterbildung in ähnlicher Weise auch in dünnen Gateoxiden möglich? Die Experimente zeigten, dass bei Anwendung der Niederenergie-Ionenimplantation und einer anschließenden Kurzzeit-Temperatur unter bestimmten Prozessbedingungen schmale Clusterbänder in dünnen Oxidschichten entstehen. Nachdem uns dieser Nachweis gelungen war, bestand die nächste Aufgabe in der



Simulation der Evolution von Nanoclustern

Das Bild zeigt Ergebnisse der Computersimulation zur Ionenstrahlsynthese von Nanoclustern in einem dünnen Gateoxid (transparent) auf dem Silizium-Substrat (grau). Drei Stadien der Clusterbildung sind dargestellt – jeweils als Draufsicht (oberer Teil) und im Querschnitt (unterer Bildteil): Der linke Bildteil zeigt die Verteilung der durch die Ionenimplantation eingebrachten Fremdatome (Silizium oder Germanium), die bei Überschreitung der Gleichgewichtslöslichkeit präzipitieren. Bei der Wärmebehandlung entsteht zunächst eine hohe Dichte kleiner Cluster (Bildmitte), mit zunehmender Dauer der Wärmebehandlung nimmt die mittlere Größe der Cluster zu und gleichzeitig die Clusterdichte ab (rechts). Infolge des sehr geringen Abstandes zum Substrat kann ein bestimmter Anteil der eingebrachten Fremdatome auch zum Substrat „wandern“ und damit für die Clusterbildung verloren gehen. Die Simulationen wurden von K.H. Heinig und T. Müller (beide FZR) im Rahmen des derzeit laufenden „NEON“-Projektes durchgeführt, das durch die Europäische Union gefördert wird.



Grenzflächennahes Germanium Nanocluster-Band

Elektronenmikroskopische Aufnahme eines dünnen grenzflächennahen Bandes von Ge-Clustern in einer SiO_2 -Schicht, wie sie für nichtflüchtige Speicher genutzt werden kann. Der Nachweis, dass es sich bei diesen Clustern dabei vielfach sogar um Nanokristalle handelt, gelingt durch die Abbildung von Netzebenen bei einer sehr hohen Vergrößerung (etwa 500 000-fach); die im linken Bildausschnitt zu erkennen sind.

Untersuchung der Speichereigenschaften dieser clusterhaltigen Gateoxide. Hier hat im Rahmen eines vom Land Sachsen geförderten Projektes eine intensive Zusammenarbeit mit dem Zentrum Mikroelektronik Dresden begonnen. Dies hatte zum Ziel, die Forschungsarbeiten nicht auf das akademische Interesse zu beschränken, sondern bereits in dieser Phase wichtige Ergebnisse hinsichtlich der technologischen Machbarkeit eines Nanoclusterspeichers zu erhalten. Daher haben wir Schichtsysteme, Prozessparameter und Strukturen betrachtet, wie sie auch bei Fertigung eines realen Speichers zum Einsatz kommen. Im Mittelpunkt der

Untersuchungen standen dabei die Eigenschaften von Einzel-Transistoren, da diese das Grundelement jeder Speicherzelle bilden. Das Gateoxid dieser Transistoren enthielt dabei eine Schicht mittels Ionenstrahlsynthese erzeugter Germanium- oder Siliziumcluster.

Datenerhalt für die Ewigkeit

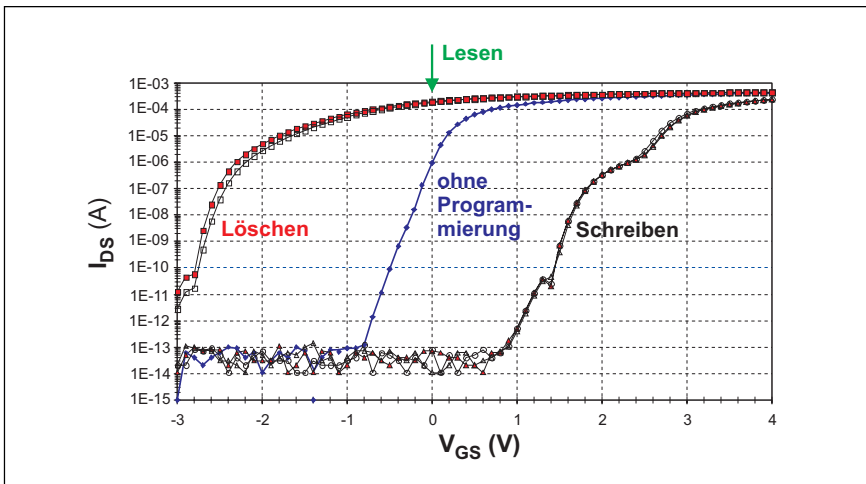
Die Experimente haben gezeigt, dass die Nanocluster tatsächlich Ladungen speichern und dies mit einer signifikanten Verschiebung der Kennlinie des Transistors einhergeht – für uns ein wichtiger

Ionenstrahlsynthese

Physikalisch basiert die Ionenstrahlsynthese von Nanoclustern auf der Phasenseparation in einer übersättigten Festkörperlösung. Mittels Ionenimplantation werden in ein dünnes Gateoxid Silizium- oder Germaniumatome in einer Konzentration eingebracht, welche die Löslichkeit des implantierten Elementes im Oxid überschreitet. Dadurch entsteht ein thermodynamischer Nichtgleichgewichtszustand, auf Grund dessen sich zu meist schon während der Ionenimplantation winzige Ausscheidungen (Präzipitate) bilden. Diese besitzen eine spezifische Größenverteilung, die neben den Implantationsbedingungen (Energie, Dosis, Temperatur) auch durch die Diffusionseigenschaften und Löslichkeit des eingebrachten Fremdatoms im Oxid bestimmt wird. Während einer anschließenden Wärmebehandlung bei Temperaturen oberhalb 600 Grad Celsius beginnen Nanocluster zu wachsen. Dieser Prozess ist als Ostwald-Reifen bekannt, wobei als treibende Kraft die Minimierung der Oberflächenenergie der Cluster wirkt. In einem Ensemble unterschiedlicher Clustergrößen wachsen dabei größere Nanocluster auf Kosten der kleineren, die sich nach und nach auflösen. Die Temperatur bei der Wärmebehandlung bestimmt ganz wesentlich die mittlere Clustergröße (typische Werte 2-6 Nanometer) und die Clusterdichte. Mittels Computerrechnungen gelingt es, die Bildung schmaler Clusterbänder in dünnen Oxidschichten zu simulieren.

Meilenstein und zugleich Motivation zur Fortsetzung der Arbeiten.

Gleichzeitig haben wir deutliche Unterschiede zwischen Gateoxiden mit Silizium- und Germanium-Nanoclustern festgestellt. Dies gilt vor allem in Bezug auf den Datenerhalt (engl.: Retention), der einer der wichtigsten Parameter eines nichtflüchtigen Speichers ist. Entsprechend der Bauelemente-Spezifikation muss der Datenerhalt bei einem nichtflüchtigen Speicher über mindestens



Speichereffekt in einer Transistor-Zelle mit Si-Nanoclustern

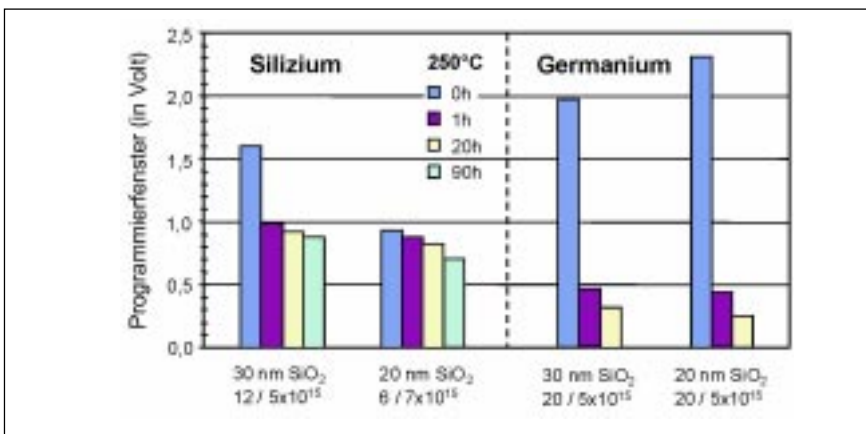
Der Graph zeigt die Kennlinie $I_{DS}(V_{GS})$ eines n-Kanal-Anreicherungs-Transistors mit Si-Nanoclustern im Gateoxid. Durch die Programmierung (Schreiben: $V_{GS} = +10$ V, Löschen: $V_{GS} = -10$ V, jeweils 50 ms) verschiebt sich die Kennlinie gegenüber dem Ausgangszustand („ohne Programmierung“). Die Kennlinie geht nach einem Löschimpuls nicht auf die Ausgangscharakteristik zurück, sondern wird in die entgegengesetzte Richtung verschoben. Dies zeigt, dass neben den Elektronen auch die Löcher die Ladungsspeicherung in clusterhaltigen Gateoxiden beeinflussen. Das Lesen des Speichers erfolgt bei $V_{GS} = 0$ V. Der Transistorstrom differiert je nach Programmierzustand um neun (!!) Stromdekaden, was eine ausgezeichnete Zuordnung der Information der Speicherzelle ermöglicht. Das Programmierfenster beträgt im gezeigten Beispiel etwa vier Volt, wobei für die Anwendung ein Programmierfenster von einem halben Volt ausreichend ist.

zehn Jahre gewährleistet sein. Wenn man bedenkt, dass ein Computer bereits nach zirka zwei bis drei Jahren Nutzung als veraltet gilt, ist das nahezu eine Ewigkeit.

Um den Datenerhalt zu überprüfen, verkürzt man die Zeit, indem man die Retention bei höheren Betriebstemperaturen misst. Ausgehend von einem Ent-

ladungsverhalten, das durch eine konstante Aktivierungsenergie bestimmt wird (Arrhenius-Gesetz), ist eine Retention von zehn Jahren bei Raumtemperatur gegeben, wenn ein Datenerhalt bei 250 Grad Celsius über zehn Stunden nachgewiesen werden kann. Unsere Untersuchungen haben ergeben, dass Gateoxide mit Germanium-Clustern ein recht

großes Programmierfenster, aber nur eine sehr geringe Retention (bei 250 Grad Celsius nur wenige Minuten) besitzen, während Silizium-implantierte Gateoxide ein geringeres, aber ausreichendes Programmierfenster (ein halbes bis zwei Volt), jedoch eine ausgezeichnete Retention aufweisen (bis zu 100 Stunden bei 250 Grad Celsius).

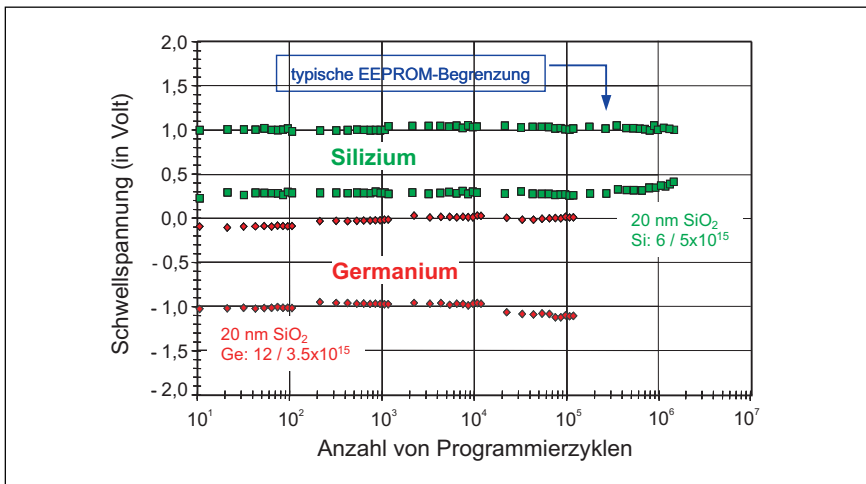


Ladungserhalt in nanoclusterhaltigen Gateoxiden

Der Ladungserhalt in Gateoxiden mit Ge- bzw. Si-Nanoclustern unterscheidet sich deutlich. Für Si-Nanocluster verringert sich das Programmierfenster für die hier dargestellten Fälle selbst nach einer Wärmebehandlung von 250 °C, 90 Stunden nur geringfügig. Dies entspricht einem Ladungserhalt von mindestens 30 Jahren. Bei Gateoxiden mit Ge-Nanoclustern sinkt das Programmierfenster bereits nach wenigen Minuten unter den für einen praktischen Einsatz relevanten Wert von einem halben Volt. Die Programmierung erfolgte im dargestellten Beispiel einheitlich bei einer Feldstärke von 5 MV/cm mit einem Spannungsimpuls von 10 ms Länge.

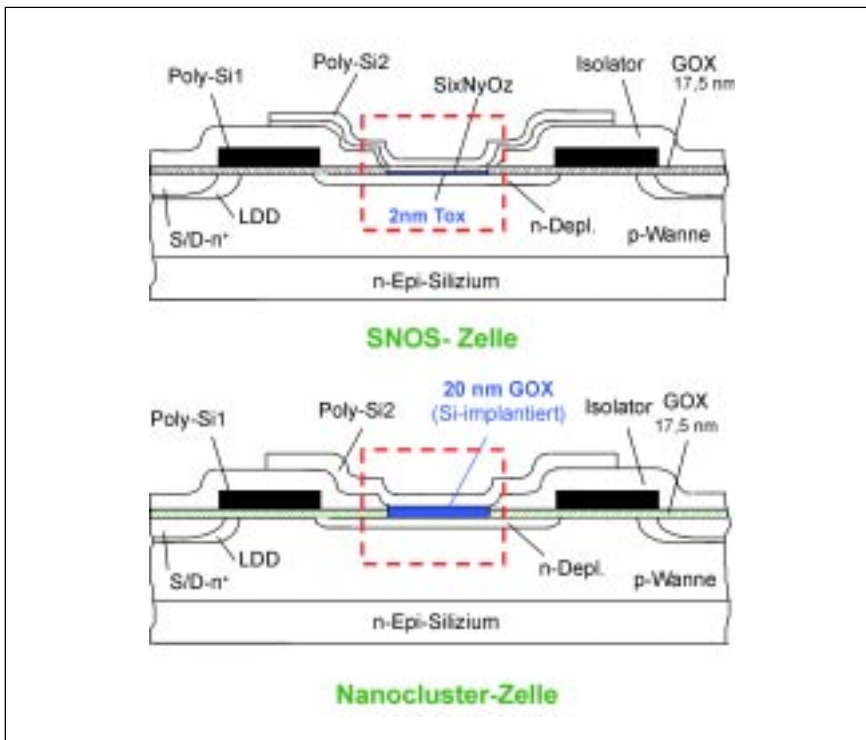
Silizium- oder Germanium-Cluster?

Genauere Untersuchungen haben gezeigt, dass die beobachteten Differenzen durch einen unterschiedlichen Abstand der Ge- bzw. Silizium-Cluster in Bezug auf die Silizium/Siliziumoxid-Grenzfläche erklärt werden können. Obwohl beide Elemente Halbleiter der vierten Hauptgruppe des Periodensystems sind, unterscheiden sie sich hinsichtlich ihres Verhaltens bei Temperprozessen erheblich. Infolge der geringeren Schmelztemperatur, einer größeren Diffusionsfähigkeit im Oxid und einer ausgeprägten Neigung zur Bildung flüchtiger Komponenten (zum Beispiel Monogerman: GeH_4) werden beim Germanium Umverteilungs- und Ausdiffusionseffekte beobachtet. Silizium verbleibt nach der Implantation hingegen weitgehend ortsstabil, wodurch die Lokalisierung der Cluster sehr gut möglich ist. Speziell beim Germanium haben wir die Selbstorganisation sehr grenzflächennaher Clusterbänder beobachtet. Diese lassen sich zwar sehr einfach beladen und führen damit zu einem relativ großen Programmierfenster. Andererseits kommt es ohne angelegtes Gatepotential zu einer spontanen Emission von Ladungsträgern und damit zu einem Datenverlust der betreffenden Speicherzelle. Vergrößert man den Abstand der Cluster zur Grenzfläche, lässt sich die Retention auch für Germanium verbessern. Dieses Verhalten wirft die Frage auf, ob grenzflächennahe Germaniumcluster nicht auch gezielt für einen neuen Typ dynamischer Speicher genutzt werden könnte ...



Anzahl der Programmierzyklen

Die Abbildung zeigt die Schwellspannung von Transistoren mit Ge (12 keV, $3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) oder Si (6 keV, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) implantierten Gateoxiden (20 nm) in Abhängigkeit von der Anzahl von Schreib-/Löschimpulsen ($\pm 10 \text{ V} / 10 \text{ ms}$). Die Untersuchungen zeigen, dass mit einem Nanoclusterspeicher im Vergleich mit einem EEPROM-Speicher eine höhere Anzahl von Schreib- und Löschzyklen realisierbar sind. Dadurch werden Anwendungen ermöglicht, bei denen Programme oder Daten oftmals überschrieben werden.



Vergleich der SNOS-Zelle und der Speicherzelle eines Nanoclusterspeichers, wie sie von ZMD bei der Realisierung des nvSRAM genutzt wurden. Die erfolgreiche Präparation des nvSRAM mit einem nanoclusterhaltigen Gateoxid führte zum erstmaligen Nachweis der Funktionsfähigkeit des Nanoclusterspeichers als nichtflüchtiger Speicher an kompletten 256k-Speicherfeldern.

Megavolt im Schaltkreis

Des Weiteren konnten wir zeigen, dass eine Programmierung in der Tat bereits bei Spannungen von acht bis zehn Volt möglich ist – und damit deutlich unter denen eines EEPROM-Speichers. Da die

Programmierspannung in jedem Speicher aus der Betriebsspannung des Speichers (derzeit zwei bis drei Volt) gewonnen werden muss, bedeutet dies einen erheblich geringeren Aufwand bei der Erzeugung der internen Programmierspannung.

Dies hat auch einen großen Einfluss auf die Anzahl nutzbarer Programmierzyklen. Während die Programmierung bei einem EEPROM-Speicher im so genannten Hochfeldbereich – die elektrische Feldstärke über dem Gateoxid ist dann zumeist größer als zehn Megavolt pro Zentimeter – stattfindet, ist die Programmierung eines Nanocluster-Speichers bereits bei mittleren elektrischen Feldstärken (typisch sind fünf bis acht Megavolt pro Zentimeter) möglich. Dadurch wird beim Stromtransport durch das Gateoxid der Anteil energiereicher („heißer“) Elektronen reduziert und damit die Oxidschädigung vermindert. Bereits erste Messungen zeigten uns, dass die Zahl möglicher Schreib-/Lese-Zyklen (engl.: Endurance) mindestens eine Größenordnung höher ist als beim EEPROM-Speicher und bei einer Verkürzung der Programmierzeit vermutlich sogar noch deutlich höhere Werte erreichen kann.

... nur der Speicher zählt

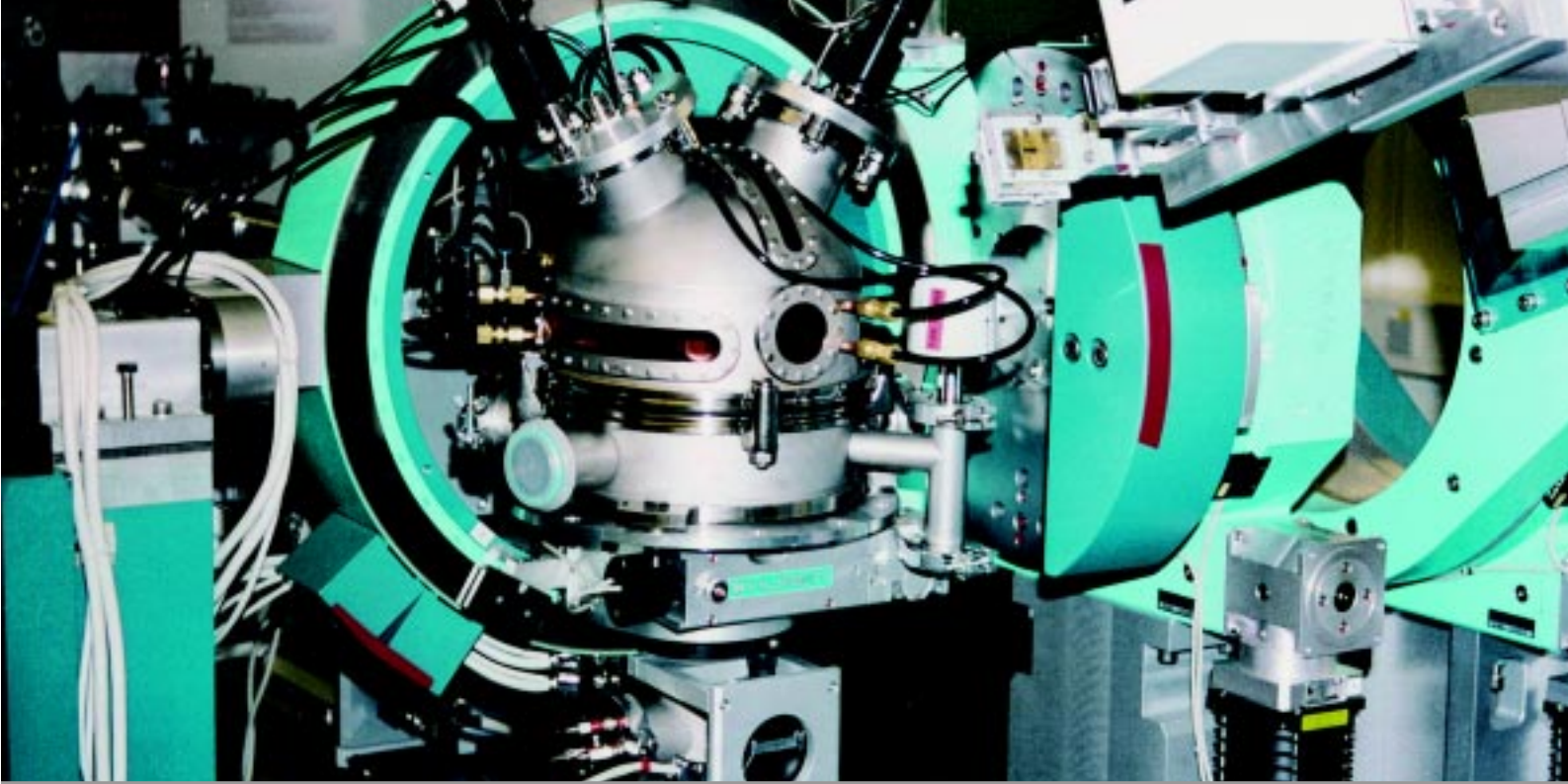
Nach diesen an Transistor-Einzelstrukturen gewonnenen erfolgversprechenden Zwischenergebnissen wollten wir es wissen: Das ZMD hat weltweit erstmalig in einer Prototyp-Serie vollständige nichtflüchtige Speicher vom Typ nvSRAM mit einer viertel Million Speicherzellen pro Chip auf der Basis nanoclusterhaltiger Gateoxide hergestellt. Ausgangspunkt war die so genannte SONOS-Zelle, bei der das Gate des Speichertransistors aus einer Oxid/ Nitrid-Stapelschicht besteht. Dieses Schichtsystem wurde durch ein Gateoxid mit Si-Nanoclustern ersetzt, ansonsten aber Struktur und Technologie unverändert beibehalten. Jetzt zahlte sich aus, dass wir in den vorangegangenen Untersuchungen schon technologierelevante Prozessparameter berücksichtigt hatten. Nach der Fertigstellung der Präparation waren wir auf das Äußerste gespannt, bis wir die Ergebnisse der ersten Prüfung in den Händen hielten: Viele der Speicher waren voll funktionsfähig und erfüllten die Spezifikationen, die von einem nichtflüchtigen Speicher hinsichtlich Programmierfenster (über ein halbes Volt) und Retention (größer als zehn Jahre) gestellt werden. Auch die niedrigere Programmierspannung und die verbesserte Endurance haben sich erneut bestätigt [5].



Kein Ende in Sicht

Wie wird es weitergehen? Ohne Frage wird die Bedeutung nichtflüchtiger Speicher zukünftig zunehmen und der Nanocluster-Speicher kann dabei – neben anderen Speicherkonzepten – eine gewichtige Rolle einnehmen. Erste Anwendungen dieses Speicherprinzips in so genannten „Embedded Systems“ treiben die Ingenieure vom Zentrum Mikroelektronik Dresden kontinuierlich weiter voran – sie sollen in etwa zwei bis drei Jahren produktionsreif sein. Unser spezifisches Know-how bei der Ionenstrahlsynthese

von Nanoclustern und die guten Ergebnisse der bisherigen Arbeiten bildeten die Grundlage für die inzwischen sehr intensive Zusammenarbeit des Institutes mit namhaften Chipherstellern wie ST Microelectronics oder Infineon Technologies im Rahmen europäischer und nationaler Projekte. Bei diesen Projekten stehen vor allem hochintegrierte Speichersysteme auf der Basis nanoclusterhaltiger Schichten im Mittelpunkt. Ob ein Nanoclusterspeicher vielleicht einmal auch als Arbeitsspeicher in einem Rechner eingesetzt wird, bleibt abzuwarten – unmöglich erscheint es nicht.



Wie dünne Schichten wachsen

Der Texturentwicklung von Titannitrid im *status nascendi* zugeschaut

Norbert Schell, Wolfgang Matz, Arndt Mücklich
Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

Hochtechnologien stellen immer extremere Anforderungen an die Werkstoffe, sodass viele Projekte ohne maßgeschneiderte Materialien nicht mehr realisierbar wären. Das Ziel einer Entwicklung muss es daher oftmals sein, scheinbar unvereinbare Eigenschaften in einem Werkstück zusammenzubringen. Bei dieser anspruchsvollen Aufgabe kommt den Forschern zu Hilfe, dass es nicht unbedingt das kompakte Material sein muss, das alle geforderten Eigenschaften in sich vereint. Eine sinnvolle Aufteilung zwischen einer dünnen Oberflächenschicht und dem Werkstoffvolumen ist häufig durchaus möglich. Man versucht zum Beispiel, dünne Schichten für eine anwendungsspezi-

fische, oft extreme Eigenschaft auf andere, weniger anspruchsvolle Werkstoffe aufzubringen. Die gewünschten Spitzeneigenschaften erreicht man entweder direkt beim Aufbringen der Schicht oder im Anschluss, indem man die Schicht modifiziert. Meist sind dafür aufwändige Technologien nötig. Die Dicke der Oberflächenschicht liegt meist im Bereich von einigen zehn Nanometern (millionstel Millimeter) bis zehn Mikrometern (tausendstel Millimeter). Um die gewünschte Spitzeneigenschaft eines Werkstücks zu erreichen, wird die dünne Oberflächenschicht modifiziert, oder sie wird durch aufwändige Technologien aufgebracht.

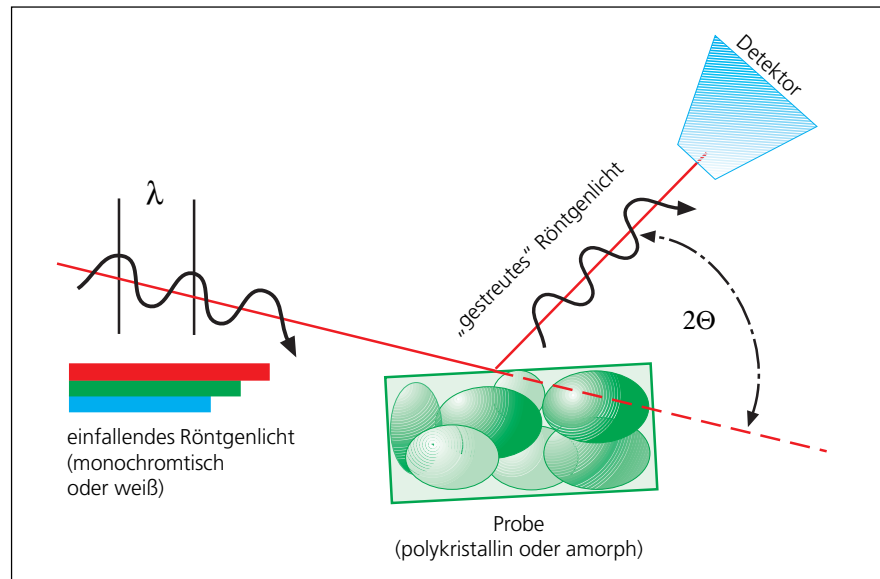


Die charakteristischen Eigenschaften einer Schicht, also die Phase (elementare Verbindung und ihre Kristallstruktur), die Korngröße (Ausdehnung der kleinsten homogenen Bereiche), die Textur (Ausrichtung der Atomebenen dieser Körner im Verhältnis zur Oberfläche) und auch die Spannungen in der Schicht, können von ihrer Dicke abhängen. Sie ändern sich oftmals dramatisch bei so genannten kritischen Dicken.

Das Aufwachsen der Schicht auf einem Substrat ist in der Regel kein gleichmäßiger Prozess, sondern es laufen währenddessen dynamische Prozesse ab, die die späteren Eigenschaften der dünnen Schicht ganz entscheidend bestimmen werden. Ihre Haftfestigkeit an der Unterlage kann zum Beispiel je nach Dicke besser oder schlechter sein, oder es können sich Spannungen aufbauen, die die Schicht abplatzen lassen. Die während des Wachstums ablaufenden Prozesse zu erkennen und ihre Ursachen zu verstehen, ist unser Ziel. Danach kann man dann die charakteristischen Eigenschaften einer Schicht für eine bestimmte Dicke und Zusammensetzung vorhersagen und das Modell vielleicht auch auf andere ähnliche Schichtsysteme übertragen. Letzteres könnte viel Entwicklungsarbeit ersparen.

Vielfältige Möglichkeiten

Möchten wir die Prozesse verfolgen, die die Eigenschaften von Schichten während des Wachstums bestimmen, benötigen wir eine Methode, mit der wir ihre Struktur untersuchen können. Röntgenstrahlen sind hier ein herausragendes Analysewerkzeug. Ihre Wellenlänge entspricht mit etwa einem zehnten Nanometer (millionstel Millimeter), dem Abstand der atomaren Bausteine. Damit sind sie ein ideales Instrument für die Vermessung der Kristallstruktur. Da sie andererseits bis zu einem Millimeter tief in das Material eindringen können, bieten sie den Vorteil, dass man die Versuchsbedingungen exakt an die momentanen Fragestellungen anpassen kann. Je nachdem, lassen sich damit sowohl die Oberfläche des Materials untersuchen als auch tiefere Schichten analysieren. Da sich Röntgenstrahlen nicht durch schlechtes Vakuum, Temperatur oder elektromag-



In einem Röntgenstreuungsexperiment lässt man Synchrotronröntgenstrahlen genau bestimmter Wellenlänge (bei sichtbarem Licht würde man Farbe sagen) und Intensität aus einer festgelegten Richtung auf eine Probe treffen. Detektiert wird die Intensitätsverteilung der Röntgenstrahlen hinter der Probe: Gibt es Bereiche im Raum, in denen besonders intensiv Röntgenstrahlung auftritt? Was ändert sich an dieser gestreuten Strahlung, wenn man die Probe dreht oder gar eine andere Probe ansieht? Die Antworten verraten die Atomstruktur der Probe, die ihrerseits die mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften bestimmt.

netische Streufelder beeinflussen lassen, sind sie eine ideale Probensonde zur *In-situ*-Untersuchung von wachsenden Schichten. Denn viel lehrreicher als eine fertige Schicht zu betrachten, ist es, eine Schicht im Entstehen, unter den Verhältnissen zu untersuchen, unter denen sie in der Apparatur wächst.

Wenn wir heute von Röntgenstrahlen zur Erforschung von Hightech-Materialien sprechen, meinen wir zumeist die Nutzung von Synchrotronstrahlung mit ihren unübertroffenen Eigenschaften von Brillanz, Intensität, spektraler Reinheit und Polarisation. An einer speziell dafür gebauten Großforschungseinrichtung, der Europäischen Synchrotron-Strahlungsquelle ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) in Grenoble, am Rande der französischen Alpen, hat das Forschungszentrum Rossendorf ein eigenes Strahlrohr (ROBL) aufgebaut, zu dem ein Materialforschungs-Messplatz und ein Radiochemie-Messplatz gehören [1-3]. Herzstück des Materialforschungs-Messplatzes ist ein so genanntes Sechs-Kreis-Diffraktometer. Die im Zentrum angeordnete Probe kann fast beliebig zum Synchrotronstrahl orientiert werden. Gleichzeitig wird der Detektor mit unabhängigen Bewegungen in die von der Untersu-

chungsstrategie vorgegebene Position gebracht. Um die hochpräzisen Analysen ausführen zu können, müssen die Winkelpositionen mit Genauigkeiten von einem tausendstel Grad und die Lagen mit einer Genauigkeit von einem Mikrometer einstellbar sein. Dies erlaubt unser Diffraktometer ohne Probleme.

Je nach Messaufbau gewinnt man mit Hilfe der Synchrotronstrahlung weit reichende Kenntnisse über einen Werkstoff: Wir erhalten Aussagen über die Struktur – ist das Material ein- oder polykristallin oder amorph – und die chemische Phasenzusammensetzung des Materials. Zudem bekommen wir Informationen über das tiefenabhängige Schichtprofil – die genaue Dicke einzelner Schichten, die Rauigkeit beziehungsweise Welligkeit der Oberfläche (oder Grenzfläche zu Zwischenschichten) – und über atomare Abstandsänderungen, das heißt kleinste Spannungsfelder.

Durch streifenden Strahlungseinfall lässt sich eine extreme Oberflächenempfindlichkeit von wenigen Nanometern erreichen und sogar die Nukleationsdichte, die Anzahl der „Wachstumskeime“ des aufgebrauchten Materials auf der Substratoberfläche, bestimmen. Indem wir die Untersuchungsbedingungen genau auf unsere Bedürfnisse abstimmen, ermög-



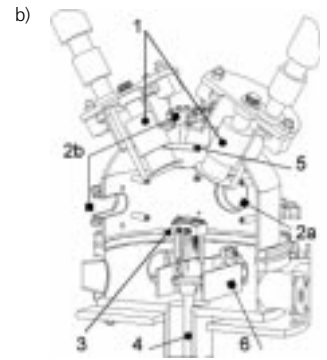
Von der Idee zum Experiment ist es zu meist ein langer Weg. Für die Schaffung der technischen Voraussetzungen müssen Spezialisten aus den unterschiedlichsten Bereichen zusammenarbeiten. Insbesondere bereits vorhandene Ausrüstung – wie das große Sechs-Kreis-Diffraktometer (a) bei ROBL an der ESRF Grenoble – müssen dabei berücksichtigt werden. Etwa ein Jahr hat es gedauert, bis die Beschichtungskammer entworfen und gebaut war und dann das erste Experiment mit ihr durchgeführt werden konnte.

(b) Schnitt durch die Kammer mit Magnetrans (Beschichtungsquellen)(1), Fenstern (2a,b), Probenhalter (3), Höhenjustage (4), Fenster für Synchrotronstrahlung (5) und Kühlelement (6).

(c) Fertig in das Goniometer eingebaute Kammer mit Versorgungsleitungen (Strom, Reaktivgase und Kühlwasser).



a)



b)



c)

licht uns die Synchrotronstrahlung, eine wachsende Schicht von der unberührten Ausgangsoberfläche über die ersten Monolagen bis hin zur texturierten Endschicht strukturell zu charakterisieren.

Onlinekontrolle

Eine weit verbreitete, industriell genutzte Beschichtungsmethode ist das Magnetron-Sputtern: Ein hochbeschleunigter Elektronenstrahl schlägt Atomgruppen, einzelne Atome, Ionen oder geladene Cluster aus einem Targetmaterial. Da sich der Elektronenstrahl in einer stark verdünnten Gasatmosphäre bewegt, treffen die Elektronen auf Gasmoleküle und ionisieren diese. Das ionisierte, reaktive Restgas greift ebenfalls das Target an. Die freigesetzten Atome aus dem Target lagern sich zusammen mit geladenen Gaspartikeln der Umgebung auf einem Substrat ab, auf dem die immer stärker werdende Schicht entsteht.

Durch die Wahl des Targets und des umgebenden Gases bestimmt man die Zusammensetzung der wachsenden Schicht. Die Energie und Intensität des Elektronenstrahls, die Konzentration des umgebenden Gases, die Temperatur des Substrats und eine beschleunigende Spannung am

Probenhalter erlauben die Beeinflussung von Struktur, Ausrichtung, Korngröße, Rauigkeit und Wachstumsgeschwindigkeit der entstehenden Schicht. All diese Parameter bestimmen die Mikrostruktur der Schicht, die so genannte Textur. Da es unser Ziel ist, das Wachstum zu lenken, um Schichten mit maßgeschneiderten Eigenschaften herzustellen, haben wir das Wachstum in seiner Abhängigkeit von allen regelbaren Parametern untersucht.

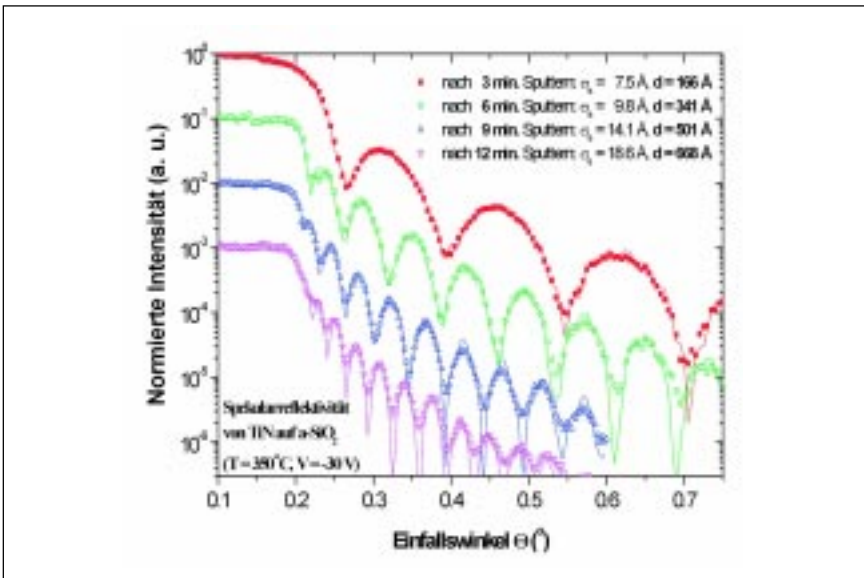
Der Weg dahin war lang. Der erste Schritt war der Aufbau einer geeigneten Beschichtungskammer [4]. Diese enthält alles, was im Experiment benötigt wird: das Target, den Substrathalter mit Heizer und Thermometer, Spannungsversorgung, Gaseinlässe, Sichtfenster, Vakuumpumpen, Kühlleitungen (um eine Hitzebeschädigung der umgebenden Kammer zu vermeiden) und natürlich die Ein- und Austrittsfenster für die Synchrotronstrahlung. Da wir in unseren Experimenten ein breites Spektrum von Substanzen untersuchen wollen, enthält die Kammer zwei so genannte Magnetrans zur Beschichtung. Doch bei all den Möglichkeiten, die unsere Kammer bieten sollte, durften wir eines nicht aus dem Auge lassen: Sie musste klein und leicht genug sein, da-

mit unser Sechs-Kreis-Diffraktometer sie tragen kann.

In intensiver Zusammenarbeit von Experten in Rossendorf und Grenoble mit Kollegen aus Dänemark konnten wir binnen eines guten Jahres von der Idee zur Inbetriebnahme der Kammer gelangen.

Die richtige Orientierung

Titannitrid (TiN) ist eine wichtige, industriell eingesetzte Hartschicht zur Oberflächenvergütung von abriebbeanspruchten Bauteilen. Trotz der schon weit verbreiteten Anwendung als Beschichtungsmaterial sind die physikalischen Mechanismen des Schichtwachstums nicht ausreichend bekannt. Daher haben wir für unsere Versuche Titannitrid gewählt, das wir mit dem Magnetron-Verfahren zuerst auf amorphem Siliziumdioxid (SiO_2) abgeschieden haben. Das Target bestand aus Titan, und das Restgas war eine Mischung aus Argon und Stickstoff. Argon als Edelgas nimmt nicht an der Reaktion teil; Stickstoff hingegen wird vom Elektronenstrahl ionisiert und scheidet sich ebenfalls ab, sodass eine Titannitridschicht entsteht.



Aus der Spekularreflektivität – der Einfallswinkel der Strahlung ist gleich dem Austrittswinkel – erhalten wir sehr genau die Schichtdicke und auch ein Maß für die Oberflächenrauigkeit. Die Abbildung zeigt typische Messergebnisse (Symbole) mit den entsprechenden Modellkurven (Linien). Die Oszillationsfrequenz der Intensität ist umgekehrt proportional zur Filmdicke, d. h., die obere Kurve repräsentiert die dünnste Schicht. Mit Röntgenstrahlung lassen sich damit Genauigkeiten in der Dickenbestimmung von wenigen Ångström (zehn millionstel Millimeter) erreichen.

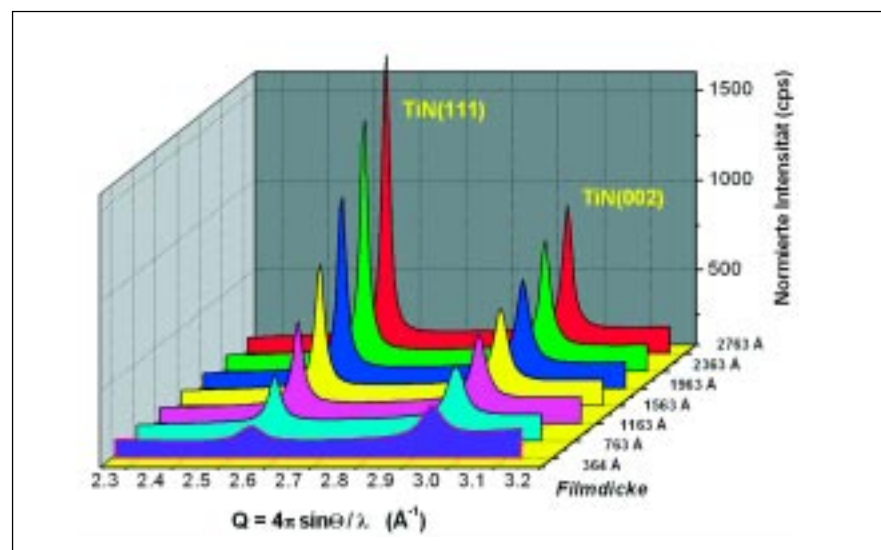
Bei den ersten *In-situ*-Experimenten konnten wir ohne Schwierigkeiten die Geschwindigkeit des Schichtwachstums durch Messung der spekularen Reflektivität überwachen. Bei dieser Methode bilden einfallender und austretender Röntgenstrahl den gleichen, sehr kleinen Winkel mit der Probenoberfläche. Wir konnten zeigen, dass das Schichtwachstum unter unseren Versuchsbedingungen mit einer konstanten Wachstumsgeschwindigkeit von etwa einem zehntel Nanometer pro Sekunde im Bereich bis zu Dicken von einigen zehn Nanometern verläuft. Die Wachstumsgeschwindigkeit hängt von der Temperatur und der angelegten Spannung ab: Je heißer das Substrat, je höher die an der Probe angelegte negative Spannung, desto langsamer wächst die Schicht.

Um die Textur beschreiben zu können, mussten wir die Orientierung der Schicht in den verschiedenen Stadien des Wachstums ermitteln. Die praktizierte Messprozedur bestand darin, zunächst einige Minuten zu beschichten, dann die aktuelle Gesamtdicke und anschließend die mittlere Kornorientierung zu bestimmen. Die Orientierung gewinnt man aus dem Vergleich der Streuintensitäten der so genannten Braggreflexe einer kristallinen Substanz. Vereinfacht gesprochen, wird

die gemessene Intensität größer, je höher der Anteil einer bestimmten Kristallfläche parallel zur Oberfläche der Schicht ist. Das Ergebnis unserer Experimente ist nun, dass für kleine Schichtdicken eine höhere Intensität des TiN(002)-Reflexes gefunden wird, während bei größeren Dicken der TiN(111)-Reflex der stärkere

ist. Die jeweilige ganz dünne Oberflächenschicht (einige zehn Nanometer) besteht überwiegend aus Körnern, die eine TiN(002)-Orientierung aufweisen. Nach und nach orientiert sich diese Schicht um, sodass immer mehr TiN(111) vorliegt. Oberhalb von 100 bis 150 Nanometern Dicke dominiert dann die TiN(111)-Orientierung. Diesen Wechsel, das so genannte „Crossover“, haben wir bei allen unseren Experimenten mit TiN auf amorphem Siliziumdioxid gefunden. Der Übergang ist gleichmäßig, und der Wechsel erfolgt bei der so genannten Crossover-Dicke. Diese Dicke erhöht sich mit steigender Substrattemperatur.

Für industrielle Prozesse ist die TiN(111)-Orientierung bevorzugt, da sie besonders abriebfest ist. Der Orientierungswechsel beim Schichtwachstum ist aus der Literatur bekannt und wird auf ein thermodynamisches Modell zurückgeführt [5], das der Oberflächenorientierung mit der geringsten Gesamtenergie den Vorzug gibt. Zwar ist die Oberflächenenergie von TiN(002) kleiner als die von TiN(111), jedoch ihre Spannungsenergie pro Dicken-einheit ist größer. Dadurch entsteht zuerst eine Schicht mit (002)-Orientierung. Mit dem Wachstum der Schicht erhöhen sich dann aber ihre inneren Spannungen. Ist also eine bestimmte Dicke erreicht, überwiegt die Spannungsenergie und die



Texturentwicklung der Hartschicht TiN auf $\alpha\text{-SiO}_2$. Bei kleinen Filmdicken dominiert die Orientierung TiN(002), um bei größeren Dicken durch TiN(111) verdrängt zu werden. Die Ergebnisse sind zur besseren Darstellung als geglättete Fitkurven dargestellt. Gemessen wurde in symmetrischer Bragg-Brentano-Geometrie: Ein- und ausfallender Synchrotronstrahl bilden den gleichen (großen) Winkel mit der Probenoberfläche und charakterisieren die gesamte Schicht, da die Strahlung hierbei mehrere Mikrometer in die Probe eindringt.



Gesamtenergiebilanz für die TiN(111)-Orientierung wird günstiger. – Das „Warum“ scheint also klar, doch wie dies geschehen soll, konnten Wissenschaftler bisher noch nicht klären.

Mit unserer Depositionskammer war es möglich, die Frage zu klären. Die Kammer ist in dieser Form weltweit wohl einzigartig, da sie die Röntgendiffraktionsuntersuchungen in zwei Ebenen, parallel und senkrecht zur Schicht, zulässt. Dadurch kann man wahlweise die gesamte Schichtdicke (senkrechte Messrichtung) oder nur eine dünne Zone an der Oberfläche (parallele Messrichtung) analysieren. Im Experiment haben wir immer eine dünne Schicht deponiert und hinterher die Orientierung des zuletzt gewachsenen Schichtteils bestimmt. Anschließend wurde die mittlere Orientierung der Gesamtschicht vermessen. Zu vergleichen waren dann die zur aktuellen Gesamtdicke gehörenden Intensitäten der Diffraktionspeaks als Maß für die mittlere Orientierung mit den aufaddierten Intensitäten der einzeln vermessenen Oberflächenschichten eines jeden Depositionsschrittes.

Den Reflex verfolgen

Das Ergebnis war eine Überraschung: Erwartet hätten wir, dass die aufaddierten und tatsächlich für die Gesamtdicke gemessenen Intensitäten der untersuchten Reflexe TiN(111) und TiN(002) gleich sind. Selbst wenn wir etwas zu wenig deponiert hätten beziehungsweise die zuletzt deponierte Oberflächenschicht beim Experiment nicht immer vollständig erfasst worden wäre, sollten die Intensitäten wenigstens proportional zueinander sein. Gefunden aber haben wir, dass die Intensität des TiN(002)-Reflexes der Gesamtschicht ab einer gewissen Schichtdicke unverändert bleibt, während die aufaddierte Intensität von den dünnen Oberflächenschichten für diesen Reflex immer weiter ansteigt. Das kann aber nur bedeuten, dass jede neu deponierte Schicht zwar immer TiN(002)-orientiert aufwächst, sich aber dann, zwischen zwei Beschichtungsschritten (die Zeit betrug einige zehn Minuten), umorientiert. Der Prozess wird offenbar aus der Probentiefe heraus ausgelöst, da

keine anderen Parameter geändert wurden. Solche Prozesse bezeichnet der Materialwissenschaftler als Rekristallisation. Sollte unsere Vermutung richtig sein, müsste sich diese Rekristallisation auch direkt beobachten lassen. Dazu sollten wir nur lange genug die Intensität des Reflexes TiN(002) verfolgen, der die Information über die charakterisierende Orientierung trägt. Und so war es auch. Jetzt, wo wir wussten, wonach wir suchen sollten, war es leicht, die Bestätigung aus der wachsenden Schicht zu bekommen. Durch Aufzeichnung der Reflexintensität von TiN(002) bei der hohen Substrattemperatur des Abscheidungsprozesses über einen Zeitraum von zwei Stunden haben wir die Abnahme beobachtet und so die Änderung der ursprünglichen Kornorientierung bewiesen. Damit konnten wir also für die gewählte Beschichtungsmethode erstmals die Ursache, die für die Texturänderung relevanten Prozess, identifizieren [6].

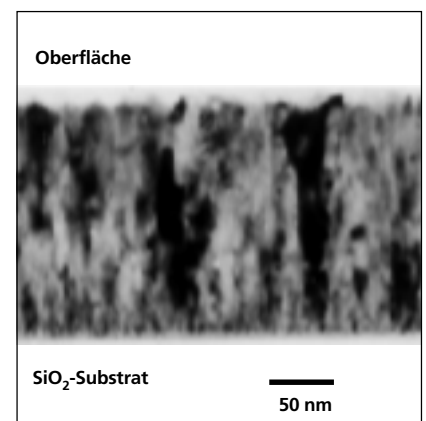
Ohne in Details zu gehen, bekommen wir gleichsam gratis aus den schon aufgenommenen Streuintensitäten weitere wichtige Informationen über die wachsende Schicht: Zunächst besteht sie tatsächlich aus TiN und nicht aus einer anderen Verbindung, etwa Ti_2N . Das liefern die Reflexlagen selbst. Es zeigt sich auch, dass der Atomabstand in den TiN-Kristalliten senkrecht zur Oberfläche leicht größer als derjenige parallel zu ihr ist – die Schicht ist „kompressiv“ verspannt. Diese Verspannung nimmt aber mit zunehmender Schichtdicke ab, sie relaxiert. Als Relaxationsmechanismus lässt sich die Vergrößerung der einzelnen Kristallitkörner identifizieren. Das schließen wir aus der Beobachtung, dass die Halbwertsbreiten der Reflexe mit zunehmender Dicke abnehmen. Die Halbwertsbreiten sind ein Maß für die Korngrößen. Eine spätere elektronenmikroskopische Aufnahme des Probenquerschnittes bestätigte, was wir schon während des Schichtwachstums aus den Diffraktionsdaten folgerten: Die Probe zeigt das in den Werkstoffwissenschaften häufig beobachtete Säulenwachstum. Dabei sind die Kristallite besonders lang gestreckt, und sie stehen senkrecht zur Oberfläche.

Lage um Lage eine glatte Schicht

Nach diesen Erfolgen in der Charakterisierung und im Auffinden der Mechanismen der Texturentwicklung von Titanitrid-Schichten einiger zehn bis hundert Nanometer Dicke fragten wir uns, ob man nicht auch das Geschehen „darunter“, das der ersten zehn Nanometer, beobachten könnte. Was würden wir über die Keimbildung und das allererste Stadium des Wachstums lernen können?

Den Wachstumsbeginn können wir nur dann messtechnisch verfolgen, wenn es sich um eine einkristalline Schicht handelt. Ansonsten sind die Messsignale zu klein und auch nicht eindeutig auswertbar. Um einkristalline Schichten erzeugen zu können, mussten wir zu einem einkristallinen Substrat übergehen. Dadurch wird den sich an der Oberfläche anlagernden TiN-Molekülen vorgegeben, dass Sie sich nach dem Muster des Substrats regelgerecht, also einkristallin, anordnen sollen. Bei übereinstimmenden Strukturen von Substrat und Schicht spricht man von epitaktischem Wachstum. Das bisher eingesetzte amorphe Siliziumdioxid haben wir daher gegen einen Magnesiumoxid-Einkristall ausgetauscht. Dessen Kristallstruktur und atomare Abstände sind denen von Titanitrid nahezu gleich.

Für die Verfolgung des Anfangsstadiums des epitaktischen Wachstums der magnetrongesputterten Schicht mit Synchrotron-Röntgen-Strahlung haben wir eine



Elektronenmikroskopische Hellfeld-Querschnittsaufnahme eines 1430 Å dicken TiN-Filmes. Man erkennt säulenartiges Wachstum mit zunehmender Korngröße.

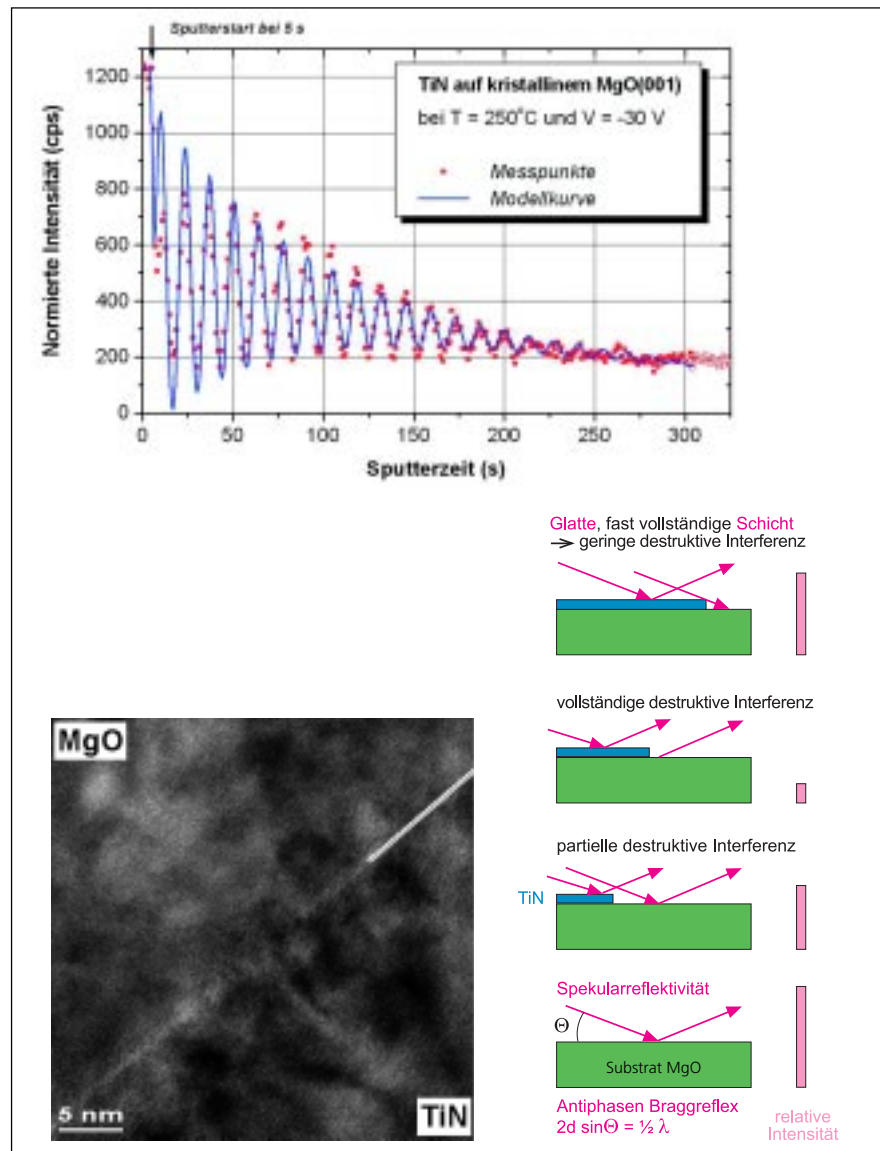


modifizierte Experimentanordnung in unserer Kammer benutzt. Man misst die reflektierte Intensität bei einem kleinen Winkel (etwa zwei Grad). Ist die Oberfläche ideal glatt, so reflektiert sie die Synchrotronstrahlung wie ein guter Spiegel sehr stark, symmetrisch zur Einfallrichtung. Wachsen Teile einer neuen Schicht, so erscheint die Oberfläche rauher, und das Reflexionsvermögen in die Beobachtungsrichtung sinkt. Ist die neue Schicht schließlich komplett, so hat sie wieder ein hohes Reflexionsvermögen. Die gemessene Intensität schwankt damit zwischen einem Maximum bei kompletter Schicht und einem Minimum bei „halb fertiger“ Schicht.

Tatsächlich wuchs die TiN-Schicht in den ersten zehn Nanometern Lage um Lage einkristallin, der Kristallzüchter sagt heteroepitaktisch, weil Schicht und Substrat chemisch verschieden sind [7]. Mit zunehmender Dicke erfolgt dann ein Übergang zu immer rauher werdenden Lagen, und es herrscht schließlich Inselwachstum vor. Die Schicht reißt durch innere Spannungen und Defekte auf und wächst in gegeneinander verkippten Bereichen, den Inseln, weiter. Praktisch bedeutete das, dass die Schicht monatomar glatt ist, solange Lagenwachstum vorherrscht. – Wir konnten den Bereich des Lagenwachstums bis zu größeren Filmdicken ausdehnen, indem wir die Substrattemperatur erhöhten.

Dass der TiN-Film in gleichmäßigen Schichten wächst, konnten wir direkt im *status nascendi* sehen. Nach Abschluss der Beschichtung lieferte schließlich eine spätere höchstauflösende Transmissions-Elektronen-Mikroskopie die endgültige Bestätigung: Die Schichten waren einkristallin.

Die Frage, warum man denn nicht gleich nur das Elektronenmikroskop benutzt, hat es doch den Vorteil einer „unmittelbaren“, das heißt, unserer optischen Wahrnehmung vertraueren Abbildung, im Gegensatz zur indirekten Aussage aus Röntgenstrahlintensitäten, lässt sich schnell beantworten. Drei Gründe sprechen für die Röntgenstrahlen: Erstens taugen die Elektronen nicht für derartige *In-situ*-Messungen (ablenkende Streufelder, schlechtes Vakuum), zweitens ist beim Elektronenmikroskop der abgebildete Bereich immer sehr klein (während Röntgenstrahlen großflächigere Bereiche bis zu Quadratzentimetern abbilden können), und



Die Art des Schichtwachstums lässt sich durch das „crystal truncation rod scattering“ bestimmen. Hierbei positioniert man Probe und Detektor in der Weise, dass die angegebene Antiphasen-Bragg-Bedingung erfüllt ist, die den Abstand der Atome mit der Wellenlänge und dem Ein- bzw. Austrittswinkel der Röntgenstrahlen verknüpft. Nur dann, wenn die wachsende Schicht einen gleichen (vielfachen) Atomabstand und vor allem eine glatte Oberfläche hat, kommt es zu den beobachteten Oszillationen in der detektierten Intensität. Mit zunehmender Schichtdicke werden die Oszillationen schwächer, was auf zunehmende Rauigkeit oder Inselwachstum zurückzuführen ist. Wir haben hier ein Beispiel für Stranski-Krastanov-Schichtwachstum beobachtet. Zuerst wächst die abgeschiedene Schicht lagenweise, dann wächst sie in einzelnen inselartigen Domänenbereichen weiter. Eine hochauflösende Transmissions-Elektronen-Mikroskop-Aufnahme der Grenze Substrat-Schicht mit erkennbaren Atomreihen bestätigt die Röntgendaten.

drittens muss die Probe für die Elektronenmikroskopie sehr aufwändig präpariert werden (schneiden, ionenätzen) – letztlich ist sie nach der Untersuchung zerstört. Dennoch ist es beruhigend, zumindest beim Betreten von Neuland, eine alternative Methode zur Bestätigung zu haben: Wer satellitengestütztes GPS (global positioning system) das erste Mal benutzt, hat wohl auch zusätzlich einen Kompass in der Tasche.

Wohin geht der Weg

Rekapitulieren wir, was wir erreicht haben: Unter ökonomischem Druck bewegt sich die Materialforschung zu funktionalen Dünnschichtsystemen – von der Unterhaltungselektronik über Werkzeugbau bis zu Medizintechnik. Technologische Beherrschung der Dünnschichtherstellung fordert mehr und mehr wissenschaftlich-technisches Verständnis der Schicht-



wachstumsprozesse. *In-situ*-Untersuchungen erlauben detailliertere und eindeutige Aussagen als Analysen der fertigen Schicht. Eine gute Methode dazu ist Röntgenstreuung mit Synchrotronstrahlung – für das Magnetron-Sputtern praktisch die einzige, um effektiv und eindeutig *in situ* das Wachstum zu verfolgen. Wir haben eine für unsere Zwecke und Möglichkeiten optimierte kleine, vielseitige Beschichtungskammer zum Einsatz am zentrumseigenen Messplatz bei ROBL an der Europäischen Synchrotron-Strahlungsquelle in Grenoble entwickelt.

An einer bereits technologisch eingesetzten Hartstoffschicht, dem TiN, haben wir nicht nur die Machbarkeit demonstriert, sondern wir konnten auch einen Reaktionsmechanismus zur Texturentwicklung, die Rekristallisation, identifizieren.

In einem zweiten Schritt konnten wir sogar das Aufwachsen der ersten Atomlagen beobachten.

Mit zukünftigen Experimenten wollen wir den chemischen Reaktionsmechanismus genauer entschlüsseln – unsere Daten lassen ein gleichmäßiges „Doppelschicht-Wachstum TiN/TiN“ vermuten: Warum ist das so, warum nicht Ti/N oder sogar nur Ti, dann N, dann wieder Ti, N und so weiter? Was ändert sich beim Austausch von Titan gegen Chrom als Targetmaterial [8]? Und was passiert, wenn wir gleichzeitig zwei unterschiedliche Metalle abscheiden (Titan und Kupfer etwa; als Nanokomposit verbinden sie hohe Härte mit Biegeelastizität)? – In bester wissenschaftlicher Tradition öffnet die eine beantwortete Frage ein Labyrinth neuer spannender Fragen an die Natur.

Danksagung

Unser Dank gebührt vor allem unseren Kollegen von der Universität Aarhus, Prof. Jørgen Bøttiger mit seinem Team Jacques Chevallier, Per Kringhøj, Jakob Petersen und Klaus Pagh Andreasen. Von der Konzeption über die Experimentdurchführung bis zur Publikation war und ist dies eine fruchtbare und angenehme internationale Zusammenarbeit. Bei dem Design und der kostengünstigen Realisierung der Depositionskammer leistete Wolfgang Neumann von der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik des FZR Beachtliches, ebenso unser Beamline-Techniker Udo Strauch bei der jeweiligen Vorbereitung des gesamten Versuchsaufbaus vor Ort in Grenoble.

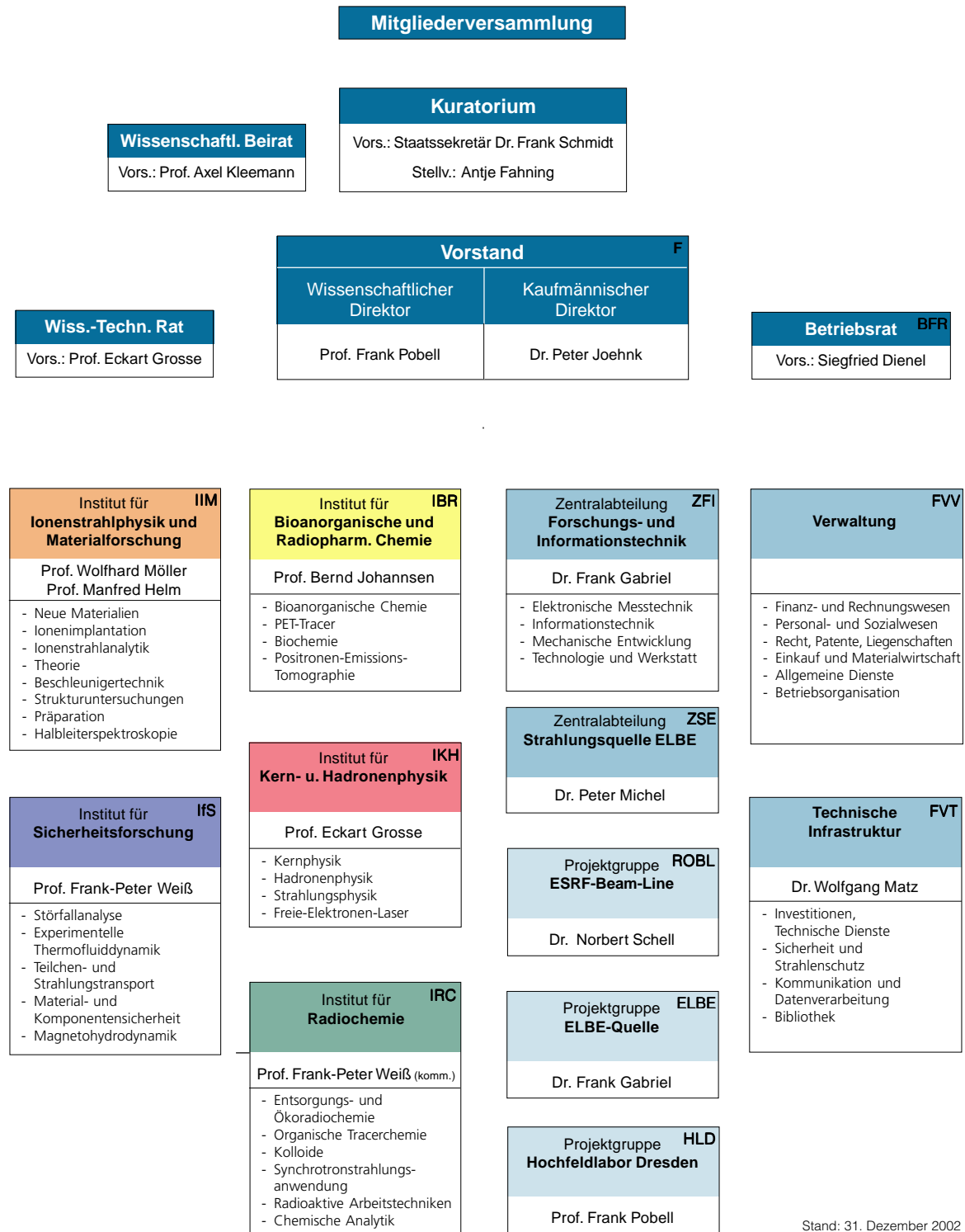
Literaturverzeichnis:

- [1] W. Matz, N. Schell, G. Bernhard, F. Prokert, T. Reich, J. Claußner, et al., *ROBL – a CRG beamline for radiochemistry and materials research at the ESRF*, J. Synchr. Rad. 6 (1999) 1076-1085.
- [2] N. Schell, W. Matz, F. Prokert, F. Eichhorn, F. Berberich, *Synchrotron radiation studies of thin films and implanted layers with the materials research endstation of ROBL*, J. Alloys Comp. 328 (2001) 105-111.
- [3] T. Reich, A. Roßberg, G. Geipel, L. Baraniak, H. Funke, C. Hennig, G. Bernhard, *Moleküle unter der Lupe*, FZR-Jahresbericht 2. Halbjahr 1999/2000, S. 37-41.
- [4] W. Matz, N. Schell, W. Neumann, J. Bøttiger, J. Chevallier, *A two magnetrons sputter deposition chamber for in situ observation of thin film growth by synchrotron radiation scattering*, Rev. Sci. Instrum. 72 (2001) 3344-3348.
- [5] J. Pelleg, L. Z. Zevin, S. Lungo, N. Croitoru, *Reactive-sputter-deposited TiN films on glass substrates*, Thin Solid Films 197 (1991) 117-128.
- [6] N. Schell, W. Matz, J. Bøttiger, J. Chevallier, P. Kringhøj, *Development of texture in TiN films by use of in situ synchrotron x-ray scattering*, J. Appl. Phys. 91 (2002) 2037.
- [7] J. Bøttiger, J. Chevallier, J. H. Petersen, N. Schell, W. Matz, A. Mücklich, *Observation of the growth mode of TiN during magnetron sputtering using synchrotron radiation* J. Appl. Phys. 91 (2002) 5429-5433.
- [8] N. Schell, J. H. Petersen, J. Bøttiger, A. Mücklich, J. Chevallier, K. P. Andreasen, F. Eichhorn, *On the development of texture during growth of magnetron-sputtered CrN*, eingereicht.

DATEN UND FAKTEN



Organigramm



Stand: 31. Dezember 2002

Organe und Gremien

Das Forschungszentrum Rossendorf e.V. (FZR) wurde am 06.12.1991 als gemeinnütziger Verein gegründet. Es wird als Einrichtung der „Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz“ zu je 50 % von der Bundesrepublik Deutschland und den Ländern getragen.

Mitgliederversammlung

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

Kuratorium

Das Kuratorium ist das umfassende Aufsichtsorgan. Es entscheidet in den grundsätzlichen Angelegenheiten des Vereins und bestimmt die Richtlinien seiner Aufgabenstellung. Das Kuratorium überwacht die Einhaltung der satzungsgemäßen Aufgaben und kontrolliert insoweit die Tätigkeit des Vorstands. Im Kuratorium verfügen das Land und der Bund jeweils über drei Stimmen; weiterhin gehören ihm ein von der Mitgliederversammlung gewähltes Mitglied des Vereins sowie ein vom Vorstand vorgeschlagener und von der Mitgliederversammlung zu wählender Sachverständiger an. Den Vorsitz führt ein Vertreter des Landes, stellvertretender Vorsitzender ist ein Vertreter des Bundes. Der Vorstand des Vereins und der Vorsitzende des Wissenschaftlichen Beirats nehmen mit beratender Stimme und der Vorsitzende des Wissenschaftlich-Technischen Rates als weiterer Gast an den Sitzungen des Kuratoriums teil.

Das Kuratorium besteht am Ende des Berichtszeitraums aus folgenden Mitgliedern:

Staatssekretär Dr. Frank Schmidt (Vorsitzender)	Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Antje Fahning (Stellv. Vorsitzende)	Bundesministerium für Bildung und Forschung
MR Dr. Reinhard Zimmermann	Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Dr. Frank Gabriel	Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Prof. Peter Fulde	Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme

Vorstand

Der Vorstand des FZR setzt sich wie folgt zusammen:

Prof. Frank Pobell	Wissenschaftlicher Direktor (Sprecher des Vereins)
Dr. Peter Joehnk	Kaufmännischer Direktor

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.

Mitglieder des
Wissenschaftlichen Beirates:

Prof. Axel Kleemann (Vorsitzender)	
Prof. Hartmut Backe (Stellvertreter)	Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz
Prof. Ulrich M. Gösele	Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle
Prof. Jens Volker Kratz	Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz
Dr. Jörg Hadermann	Paul-Scherrer-Institut, Villingen/Schweiz
Prof. Gerd Folkers	ETH Zürich, Schweiz
Dr. Peter Fritz	Forschungszentrum Karlsruhe
Prof. Werner Mäntele	Johann-Wolfgang-Goethe-Universität
Prof. Hans Hendrik Andersen	Ørsted Laboratoriet, Dänemark
Prof. Willem Vaalburg	University of Groningen, Niederlande

Wissenschaftlicher Beirat des PET-Zentrums Rossendorf

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

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

Wissenschaftlich-Technischer Rat

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

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

Mitglieder des
Wissenschaftlich-Technischen Rates:

Prof. Eckart Grosse (Vorsitzender)	Dr. Frank Gabriel
Dr. Wolfgang Enghardt (Stellvertreter)	Dr. Peter Michel
Prof. Bernd Johannsen	Dr. Gunter Gerbeth
Prof. Wolfhard Möller	Dr. Gerhard Geipel
Prof. Manfred Helm	Dr. Ralf Bergmann
Prof. Frank-Peter Weiß	Dr. Andreas Kolitsch

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

Betriebsrat

Der Betriebsrat des Forschungszentrums Rossendorf setzt sich wie folgt zusammen:

Siegfried Dienel (Vorsitzender)	
Jörg Voigtländer (Stellvertreter)	Joachim Gollert
Monika Bulenda	Sabine Pfortner
Dr. Harald Curian	Steffen Schaller
Christian Damm	Christel Schneiderei
Bernd Hartmann	Dr. Rudi Wünsch

Überblick 2001/2002

Name	FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF e.V.
Träger	Freistaat Sachsen, Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Finanzierung	Grundfinanzierung: 50 % Länder, 50 % Bundesrepublik Deutschland
Planstellen	419,5; davon 121 Wissenschaftlerstellen (2001) 419; davon 121 Wissenschaftlerstellen (2002)
Drittmittelstellen	92,36 Personenjahre (2001) 88,1 Personenjahre (2002)
Doktoranden	29 (davon 9 Abschlüsse 2001) 30 (davon 11 Abschlüsse 2002)
Grundfinanzierung	45 523 TEUR (2001) 48 754 TEUR (2002)
Sondermittel	633 TEUR (2001) 283 TEUR (2002)
Drittmittel	7 121 TEUR (2001) 8 136 TEUR (2002)
Organe	Mitgliederversammlung Kuratorium Vorstand Wissenschaftlicher Beirat
Wissenschaftliche Institute	Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie Institut für Radiochemie Institut für Sicherheitsforschung Institut für Kern- und Hadronenphysik
Wissenschaftliche Infrastruktur	Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE
Projektgruppen	Projektgruppe ELBE-Quelle Projektgruppe ESRF-Beam-Line Projektgruppe Hochfeldlabor

Übersicht über die Forschungsschwerpunkte und -vorhaben 2001/2002

Materialforschung

Nanostrukturen für elektrische und optische Anwendungen	IIM
Dotierung und Defekte in Halbleitermaterialien	IIM
Halbleiterspektroskopie	IIM
Ionengestützte Schichterzeugung und -modifizierung	IIM
Werkstoffe für die Medizintechnik	IIM
Anwendung feinfokussierter Ionenstrahlen	IIM
Plasma-Immersions- und Niederenergie-Implantation	IIM
Hochenergie-Ionenstrahlanalytik	IIM
Material- und Komponentensicherheit	IFS
Teilchen- und Strahlungstransport	IFS

Biomedizin-Radiochemie, Umwelt

Radiotracerdesign und Radiopharmazie	IBR
Untersuchungen zu Neurorezeptoren und Hirnfunktionen	IBR
Untersuchungen zur Tumordiagnostik und Tumorthherapiekontrolle	IBR
Bioaktive Substanzen	IBR
Untersuchungen zu Herz und Gefäßen	IBR
Teilchen- und Strahlungstransport	IFS
Werkstoffe für die Medizintechnik	IIM
Biomedizinische Anwendung physikalischer Methoden	IKH
Aquatische Chemie der Actiniden/Radionuklide	IRC
Modellierung des Radionuklidtransports	IRC
Wechselwirkung von Actiniden/Radionukliden mit Mineral/Gesteinsoberflächen und Kolloiden	IRC
Wechselwirkung von Actiniden/Radionukliden mit biologischen Systemen	IRC
Entwicklung und Anpassung spektroskopischer Methoden	IRC

Sicherheitsforschung

Störfallanalyse von Leichtwasserreaktoren	IFS
Thermofluidodynamik von Mehrphasen-/Mehrkomponentensystemen	IFS
Magnetofluidodynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten	IFS
Material- und Komponentensicherheit	IFS
Sicherheit und Effektivität chemischer Prozesse	IFS
Teilchen- und Strahlungstransport	IFS
Modellierung des Radionuklidtransports	IRC

Kern- und Strahlungsphysik

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

FZR-Projekte

Strahlungsquelle ELBE	ELBE
ESRF-Beamline	ROBL
Hochfeldlabor	HLD

Übersicht über die institutsübergreifende Zusammenarbeit

Forschungsschwerpunkt	Gegenstand der Zusammenarbeit	beteiligt sind
Materialforschung	Untersuchungen mit Photonen <ul style="list-style-type: none"> ■ Rossendorfer Beamline ROBL an der ESRF in Grenoble ■ Feinstrukturuntersuchungen ■ Röntgendiffraktometrie und -reflektometrie ■ Spektroskopie und Materialmodifikation mit den ELBE-FEL's 	IIM, ZFI IIM, IfS IIM, IfS IIM, IKH
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen an modifizierten Materialien und Werkstoffen 	IfS, IIM
Biomedizin-Radiochemie, Umwelt	Positronen-Emissions-Tomographie <ul style="list-style-type: none"> ■ Technologische Entwicklung im PET-Zentrum ■ In-situ-PET-Monitoring für die Schwerionen-Tumorthherapie ■ PET-Verfahren zur Untersuchung fluid-mechanischer Transportvorgänge in Mehrphasensystemen ■ Bildgebende Verfahren zur Untersuchung der Bioaktivität von modifizierten Metalloberflächen 	IBR, ZFI IKH, IBR IfS, IKH, IBR, ZFI IIM, IBR
	Radionuklide in Bio- und Geosphäre <ul style="list-style-type: none"> ■ Chemie des Technetiums und der Actiniden ■ Molekülstrukturanalyse radioaktiver Verbindungen ■ Untersuchungen zum Radionuklidtransport ■ Analysen von Actinidenverbindungen und deren Sorbaten an Oberflächen ■ Wechselwirkung von Mikroorganismen mit Radionukliden 	IBR, IRC IBR, IRC IRC, IfS IRC, IIM IRC, IfS
	Strahlungsquelle ELBE <ul style="list-style-type: none"> ■ Fertigstellung ■ Planung des wissenschaftlichen Programms (IR-, Röntgen- und Bremsstrahlung, Neutronen) ■ Vorbereitung von Experimenten (IR-, Röntgen- und Bremsstrahlung, Neutronen) 	ZFI, ZSE, IKH, IfS IKH, IIM, IRC, IfS IKH, IIM, IRC, IfS, IBR, ZFI

ÜBERBLICK





Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung IIM

Zielstellung – ein Überblick

Ionenstrahl-Anwendungen und Halbleiterforschung – an diesen beiden Schwerpunkten orientieren sich die Arbeiten des Institutes für Ionenstrahlphysik und Materialforschung. Mit der in Europa unikaligen Kombination seiner Anlagen zur Beschleunigung ionisierter Teilchen, dem Rossendorfer Ionenstrahlzentrum, und der Anwendung dieser Ionenstrahlen im Bereich der Materialforschung und der Lebenswissenschaften hat sich das Ionenstrahlzentrum des Instituts zu einer weltweit führenden Einrichtung in diesem Fachgebiet entwickelt. Es betreibt weiterhin anerkannte Forschungsarbeiten zur Ionenstrahlmodifizierung von Festkörperoberflächen, insbesondere Halbleitermaterialien, zur Oberflächenanalyse mittels schneller Ionen, zur ionengestützten Abscheidung dünner Schichten und zur Entwicklung neuer Ionenstrahlverfahren. Die Arbeiten sind auf neue und zukunftsweisende Anwendungen in modernen Technologien ausgerichtet. In diesem Spektrum finden sich neuartige

elektronische und optoelektronische Bauelemente, bioaktive Oberflächen und neue Oberflächenbeschichtungen mit elektronischen und optischen Funktionen sowie zur Verringerung des Verschleißes und Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit. Entsprechend spannt das Institut einen weiten Bogen von der theoretischen und experimentellen Grundlagenforschung bis zur Anwendung innerhalb von Kooperationen mit der Industrie.

Basierend auf dieser Kompetenz und aufgrund seiner breiten apparativen Ausstattung wird das Ionenstrahlzentrum vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie sowie von der Europäischen Kommission als große Nutzereinrichtung (Large-Scale Facility, LSF) gefördert. Darüber hinaus absolvieren Doktoranden aus anderen europäischen Staaten im Rahmen des Marie-Curie-Programmes der europäischen Kommission einen Teil ihrer Arbeit am Institut.



Im Bereich der Halbleiterforschung ist nicht nur ein beträchtlicher Teil der Ionenstrahl-Anwendungen angesiedelt, sondern auch die Kurzzeitspektroskopie an neuen Halbleitermaterialien und Quantenstrukturen zur Erforschung deren Ladungsträger- und Gitterdynamik. Hierzu werden moderne Lasersysteme und, in naher Zukunft, der Freie-Elektronen-Laser am Elektronenbeschleuniger ELBE des FZR eingesetzt.

Das Institut verfügt über ein breites Spektrum von Anlagen zur begleitenden Probenpräparation und Probenanalyse, die auch von den übrigen Instituten des FZR und von Kooperationspartnern genutzt werden. Die Präparationstechnik ist für eine große Anzahl unterschiedlicher Materialien ausgelegt und schließt Standardverfahren der Silizium-Planartechnologie ein, die in einem Reinraum untergebracht sind. Die lokalen Möglichkeiten der Analytik finden eine wesentliche Ergänzung in der Beamline ROBL des FZR an der ESRF in Grenoble, die gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie betrieben wird und die ebenfalls von der europäischen Kommission als Nutzereinrichtung (LSF) gefördert wird. Der dortige Materialforschungs-Messplatz dient nicht nur der hochpräzisen Röntgen-Analyse von vielen Proben, sondern auch eigenständigen Dünnschicht-Experimenten, die einzigartige Möglichkeiten der Echtzeit-in-situ-Diagnostik nutzen.

Wichtigste Ergebnisse

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Instituts orientieren sich an sechs zentralen Themen aus den Bereichen Ionenstrahlanwendungen und Halbleiterforschung: (1) Dünne Schichten, (2) Nanostrukturen, (3) Materialien für die Optoelektronik, (4) Dotierung und Defekte in Halbleitern, (5) Biokompatible Materialien, (6) Ionen-Festkörper-Wechselwirkung. Aus der großen Zahl neuer und wichtiger Ergebnisse innerhalb der einzelnen Forschungsvorhaben, die weiter unten detaillierter dargestellt werden, sind einige internationale Spitzenleistungen hervorzuheben.

Durch In-situ-Messungen am Synchrotron-Messplatz ROBL in Grenoble wur-

den Änderungen der Textur von TiN in Abhängigkeit von der Schichtdicke bei der Magnetronabscheidung gefunden. Spannungsrelaxation in wachsenden cBN-Schichten wurde durch simultane Hochenergieimplantation erreicht. Im Bereich der biokompatiblen Materialien wurde gezeigt, dass das Aufbringen einer spezifischen extrazellulären Matrix auf eine Oberfläche das Anwachsen von Knochenzellen stärker fördert als es Peptide oder einzelne Proteine tun. Eine zu schnelle Abscheidung von Hydroxylapatit aus simulierter Körperflüssigkeit auf Na-implantierten Titanproben führt zu weniger bioverträglichen Schichten, die sogar einen apoptotischen Zelltod von Knochenmarkszellen induzieren können. Mit einer weltweit erstmalig realisierten Apparatur zur Simultanimplantation mit zwei synchronisierten Ionenstrahlen wurden Experimente zur Ionenstrahlsynthese von SiC durchgeführt. Bei der ionengestützten Erzeugung p-dotierter leitfähiger SiC-Schichten wurden große Fortschritte erzielt. Vom Kooperationspartner ISE (Integrated Systems Engineering AG, Zürich/Schweiz) erhielten Mitarbeiter der Theorieabteilung den Auftrag, das im Institut entwickelte Programm CrystalTRIM zur atomistischen Simulation der Ionenimplantation jetzt auch in den von der Firma ISE übernommenen Prozess-Simulator FLOOPS einzubauen. CrystalTRIM wurde schon früher erfolgreich in die Simulatoren TESIM und DIOS integriert. Bei der Charakterisierung von nichtflüchtigen-SRAM-Speicherzellen mit clusterhaltigen Gateoxiden wurde der Nachweis einer gegenüber EEPROM-Speicherzellen deutlich höheren Endurance ($> 10^8$ write/erase-cycles) bei sehr guter Retention (30 Jahre) für das System Si-Nanocluster in SiO₂ erbracht.

Intensive Kontakte zu deutschen und ausländischen Partnern tragen wesentlich zu der hohen Zahl wissenschaftlicher Publikationen des Instituts bei. Ebenso resultierten daraus zahlreiche Einladungen zu Laborbesuchen und Vorträgen auf den wichtigsten internationalen Konferenzen der einzelnen Fachgebiete.

Nach wie vor bearbeitet das Institut viele Drittmittelprojekte, wovon insbesondere zwei große EU-Projekte (im GROWTH Programm) erwähnenswert sind: Eines bein-

haltet die Herstellung von selbstorganisierten Nanostrukturen und deren Anwendung für neuartige elektronische Speicherelemente, das andere beschäftigt sich mit einem neuen Verfahren der Blitzlampenausheilung von SiC-Schichten. Durch die Genehmigung des DFG-Projekts „Infrarotspektroskopie an Quantenkaskadenstrukturen“ ist das Institut seit Ende 2001 auch Mitglied in der Berliner DFG-Forschergruppe „Lichtemitter auf der Basis von Interband-Übergängen“.

Das Institut hat in den Jahren 2001 und 2002 einige Workshops und Sommer Schulen organisiert und mitorganisiert. Die wichtigsten darunter waren die 12. Internationale Sommerschule über „Vacuum, Electron, and Ion Technologies“ in Varna, Bulgarien (2001), der 9. Internationale Workshop über „Slow Positron Beam Techniques for Solids and Surfaces“ (SLOPOS-9) im FZR (2001), die „6th International Conference on Computer Simulation of Radiation Effects in Solids“ (COSIRES) in Dresden (2002) und der Internationale Workshop über „Nanostructures for Electronics and Optics (NEOP)“ in Dresden (2002).

Der Leiter der Abteilung Halbleiterspektroskopie, Dr. Thomas Dekorsy, wurde mit dem Gustav-Hertz-Preis der DPG ausgezeichnet, dem höchsten Preis der DPG für „jüngere Forscher“ (allerdings für Arbeiten, die er noch vor seiner Anstellung am FZR durchgeführt hat). Im Berichtszeitraum wurden sieben Doktorarbeiten und eine Diplomarbeit abgeschlossen.

Institutsübergreifende Zusammenarbeit

Das Rossendorfer Strahlrohr ROBL an der European Synchrotron Radiation Facility in Grenoble, Frankreich, wird vom Institut gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie des FZR betrieben.

Die Labors für Experimente mit den Freielektronen-Lasern an ELBE wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik aufgebaut. Daraus ist das Vernetzungsprojekt „Infrarot-Spektroskopie von Festkörpern und weicher Materie“ unter Leitung ei-



nes Mitarbeiters des Instituts hervorgegangen, an dem vier Institute des FZR beteiligt sind. Erste gemeinsame Experimente wurden am FEL FELIX (Nieuwegein, Niederlande) zur nichtlinearen Suszeptibilität zweiter Ordnung in III-V Halbleitern durchgeführt.

Ebenfalls gemeinsam mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik wurde der 3. Internationale Workshop zum Thema „Infrared and THz radiation: generation and applications“ organisiert. Ein wesentliches Ziel dabei war, eine potenzielle Nutzer-Community der Freie-Elektronen-Laser an ELBE zu etablieren.

Thematische Verbindungen existieren zum Institut für Sicherheitsforschung zum Versprödungsverhalten neutronenbestrahlter Modell-Legierungen durch Positronen-Annihilations-Spektroskopie sowie zum mechanischen Verschleiß von Oberflächen und zur Verbesserung des Kavitationsverhaltens von Edelstahl durch Ionenbehandlung. Berührungspunkte zum Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie existieren in Bezug auf die Forschung an biokompatiblen Materialien.

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

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Die Kooperationen mit externen Partnern sind so zahlreich, dass sie hier nicht vollständig aufgelistet werden können. Es werden repräsentativ nur einige der wichtigsten hervorgehoben.

Zusammenarbeit mit einer großen Zahl von internationalen Partnern gibt es im Rahmen der beiden oben erwähnten EU Projekte und mit nationalen Partnern an Berliner Forschungsinstituten im Rahmen der ebenfalls erwähnten DFG Forschergruppe. Industrielle Kooperationspartner,

insbesondere der Mikroelektronikindustrie, spielen eine wichtige Rolle. Darunter sind Projekte mit den in Dresden angesiedelten Firmen Infineon, AMD und ZMD, aber auch mit kleineren Firmen wie der Rossendorfer GESIM. Die erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Firma ISE AG Zürich auf dem Gebiet der Prozess-Simulation in der Siliziumtechnologie (TCAD) wurde im vergangenen Jahr fortgesetzt. Industriekooperationen gab es aber auch nach Übersee, mit Varian SEA, Gloucester, MA und Applied Materials, Santa Clara, CA, beide in den USA.

Weitere wichtige Kooperationen bestehen mit Aarhus (Dänemark) bei In-situ-Röntgen-Untersuchungen an ROBL. Kooperationen mit Humboldt-Stipendiaten bestehen auf den Gebieten der optischen und der Positronen-Annihilations-Spektroskopie. Enge Kontakte bestehen auch zur Bulgarischen Akademie der Wissenschaften, zu Gruppen in Frankreich (CEMES/CNRS Toulouse, CSNSN/CNRS Orsay), Großbritannien (Universitäten Bath und Newcastle), Schweden (University of Linköping, Royal Institute of Technology, Stockholm), Italien (INFN-MDM Agrate, Milano), Griechenland (NCSR Demokritos), Spanien (Universität Barcelona), Brasilien (Universität Rio Grande do Sul in Porto Alegre), Ungarn (KFKI Budapest), Russland (Akademie der Wissenschaften), Ukraine (Kiew) und anderen.

In Deutschland gibt es vielfältige Kontakte zu Gruppen an verschiedenen Universitäten inkl. der TU Dresden und zu anderen WGL-Instituten (IFW Dresden, IOM Leipzig, MBI Berlin, PDI Berlin).

Die Jahresberichte 2001 und 2002 des Instituts geben eine wesentlich detailliertere Darstellung der Forschungsergebnisse, Kooperationen und Projekte.

Forschungsvorhaben

- Dünne Schichten
- Nanostrukturen
- Materialien für die Optoelektronik
- Dotierung und Defekte in Halbleitern
- Biokompatible Materialien
- Ionen-Festkörper-Wechselwirkung



Statistischer Überblick 2001 / 2002

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		74/73			Wissenschaftler			32/31			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	7/4	3,21/3,75	Doktoranden	6/7	3,65/2,54	Gastwissenschaftler	36/38	5,84/6,47	Hilfskräfte	39/34	5,46/7,35
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	20/19	15,73/14,79	Technisches Personal	6/5	2,58/3,75	Gastwissenschaftler	24/24	4,68/5,52	Doktoranden	3/3	1,46/1,48
Stipendiaten	4/7	1,56/0,85									
Geräteinvestitionen [TEUR]											
grundfinanziert		1.522/1.364			drittmittelfinanziert			358/354			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		-			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			147/146			
Artikel (referiert)		120/110			Diplomarbeiten			1/1			
Artikel (nicht referiert)		17/7			Doktorarbeiten			3/4			
Artikel im Eigenverlag		9/4			Patentanmeldungen			4/4			
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings/Workshops		4/3									

Direktoren:

Prof. Dr. Wolfhard Möller
(geschäftsführend 2001)
Prof. Dr. Manfred Helm
(geschäftsführend 2002)

Tel.: +49 351 260-22 45
E-Mail: w.moeller@fz-rossendorf.de
Tel.: +49 351 260-22 60
E-Mail: m.helm@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter:

Dr. Johannes von Borany

Industriekooperation (bis 10/01)
Strukturdiagnostik (ab 11/01)

Dr. Thomas Dekorsy

Halbleiterspektroskopie

Dr. Manfred Friedrich

Beschleunigertechnik

Dr. Rainer Grötzschel

Ionenstrahlanalytik

Dr. Wolfgang Matz

Strukturuntersuchungen (bis 10/01)

Dr. Matthias Posselt

Theorie

Dr. Edgar Richter

Ionen- und Schichttechnik

Dr. Bernd Schmidt

Prozesstechnologie

Dr. Wolfgang Skorupa

Halbleitermaterialien



Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie IBR

Zielstellung – ein Überblick

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

Eine Richtung befasst sich mit Untersuchungen zu Radiopharmaka für die Positronen-Emissions-Tomographie (PET). In dem gemeinsam mit der Medizinischen Fakultät der TU Dresden betriebenen PET-Zentrum werden Forschungsarbeiten zur Entwicklung neuer Fluor-18- und Kohlenstoff-11-markierter Verbindungen, zur Charakterisierung ihres biologischen Ver-

haltens bis zur Anwendung am Patienten durchgeführt. Gegenwärtig entwickelt sich mit der erstmaligen Erforschung der Verteilung in vivo bioaktiver Substanzen unter Nutzung der Positronenstrahlung eine neue Richtung, die für weitere Bereiche der Lebenswissenschaften Bedeutung gewinnen wird.

Darüber hinaus beteiligt sich das Institut an Grundlagenuntersuchungen zur Klärung des Potenzials der Strahlungsquelle ELBE für neue Therapieansätze bei onkologischen Fragestellungen.

In engem Zusammenhang damit steht die an bioanorganischen Konzepten angelehnte Arbeitsrichtung der Metallopharmaka.

Angesichts des Bedarfs an Radiotherapeutika und der damit einhergehenden Forderung, die betreffende Vorlauftforschung zu verstärken, verlagern sich die bislang auf Technetium-99m konzentrierten Arbeiten auf therapeutisch relevante Metallnuklide.



Wichtigste Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden inhaltliche und personelle Veränderungen vorgenommen.

In Übereinstimmung mit den Empfehlungen des Wissenschaftsrats wurde der Übergang von der Technetium-Diagnostikaforschung zu Radiometalltherapeutika forciert. Bei den PET-Tracern erfolgte eine stärkere Zusammenarbeit mit der Pharmaindustrie.

Wichtige wissenschaftliche Projekte wurden erfolgreich weitergeführt. Die internationale Zusammenarbeit mit Gruppen aus der Schweiz und Portugal über rezeptoraffine Technetium- und Rheniumverbindungen wurde durch einen Posterpreis auf dem 14. Internationalen Symposium über Radiopharmazeutische Chemie (Interlaken, Juni 2001) gewürdigt.

Organisatorisch/personelle Veränderungen ergaben sich zum einen aus der Formierung der Abteilung Radiopharmakologie und der Integration biologischer Aktivitäten in die Abteilung Positronen-Emissions-Tomographie. Aufgrund der Berufung Herrn Prof. Steinbachs zum Direktor des IIF Leipzig wurde die Stelle des Leiters der Abteilung PET-Tracer durch Herrn Dr. Wüst neu besetzt. Herr Prof. van den Hoff wurde als Leiter der Abteilung Positronen-Emissions-Tomographie, verbunden mit der C3-Professur für Positronen-Emissions-Tomographie, zum 1. Februar 2002 berufen.

Weiterhin ist das Institut an der Zuwendung im Rahmen der BMBF-Förderung von Innovations- und Gründerlaboren mit ca. 320 TEUR für den Bereich Radiopharmaka beteiligt.

Hervorzuhebende Ergebnisse

- Es wurde ein neues Ligandsystem entwickelt, das Technetium und Rhenium mit hoher Stabilität bindet (so genannte „4+1“ Gemischtligandkomplexe).
- Im Rahmen eines Projekts mit der Schering AG wurde eine effiziente Synthese von p -[^{18}F]Fluor-benzaldehyd entwickelt und automatisiert,

wodurch die Herstellung großer Mengen dieses wichtigen Kopplungsreagenzes mit hoher spezifischer Aktivität möglich geworden ist.

- Als Ergebnis der Arbeiten zu Technetiumfettsäuren wurden erstmalig [$^{99\text{m}}\text{Tc}$]-markierte Fettsäuren mit einer deutlichen Extraktion im isolierten Herzen erhalten.
- Das Auffinden von Technetiumverbindungen mit subnanomolarer Affinität zu bestimmten Subtypen des Serotoninrezeptors im Gehirn stellt einen Meilenstein in der Entwicklung rezeptoraffiner Koordinationsverbindungen dar.
- Es wurde ein neuer Fluor-18-markierter Ligand (S-[^{18}F](Fluormethyl)-(+)-McN5652) für den Serotonintransporter entwickelt und in Kooperation mit dem PET-Zentrum Turku (Finnland) bezüglich seiner Bindungseigenschaften biologisch charakterisiert.
- In der medizinischen Forschung des PET-Zentrums wurde ein hoher prognostischer Wert der FDG-PET bei der Untersuchung von Lymphompatienten mit residualer Raumforderung nach Chemo- bzw. Radiochemotherapie nachgewiesen. Die Methode liefert bei dieser Patientengruppe wertvolle Informationen im Hinblick auf den zu erwartenden weiteren Krankheitsverlauf.

Eine Reihe von Projekten, u. a. das vom Institut geleitete EU-Projekt über tumoraffine Peptide und nationale Projekte, wurde erfolgreich abgeschlossen.

Der FZR-Doktorandenpreis 2001 wurde an Frau Dr. Antje Gupta vergeben. Ihre Dissertation „In-vivo- und In-vitro-Stabilität und Metabolismus von Gemischtligandkomplexen des $^{99\text{m}}\text{Tc}$ “ enthält wichtige Ergebnisse zu rezeptoraffinen Koordinationsverbindungen.

Institutsübergreifende Zusammenarbeit

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

- Strukturaufklärung von radiopharmazeutisch und bioorganisch relevanten Koordinationsverbindungen mit

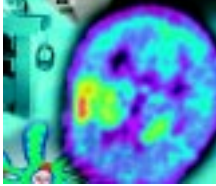
Hilfe der Synchrotronstrahlung am Rossendorfer Strahlrohr ROBL (Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiochemie)

- Am Institut für Sicherheitsforschung sind Untersuchungen zur Fluiddynamik und zum Stofftransport in Zweiphasenströmungen mittels PET begonnen worden. Für diesen speziellen Einsatz wurden die benötigten oberflächenaktiven Radiotracer bereitgestellt.
- Mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik wurde das Vernetzungsprojekt „Photonen-Aktivierungs-Therapie mit quasi-monochromatischer Röntgenstrahlung“ konzipiert, das die Erzeugung quasi-monochromatischer, durchstimmbarer Röntgenstrahlung an der Strahlungsquelle ELBE und strahlenbiologische Arbeiten mit der Forschung zu metalldotierten Biomolekülen im Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie kombiniert. Ziel ist die selektive Zerstörung von Tumorzellen durch Auger-Elektronen-Kaskaden, die durch gezielte Aktivierung von Schweratomen in der Tumorzelle erzeugt werden.
- Weiterhin wirkte das Institut an der Vorbereitung der Vernetzungsprojekte „Positronen-Emissions-Tomographie in Medizin und Technik“ sowie „Infrarot-Spektroskopie in der Festkörperphysik und bei der Untersuchung weicher Materie“ mit.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Innerhalb Deutschlands gibt es Kooperationen auf verschiedenen Gebieten wie Synthese, Strukturanalytik, Molecular Modelling, Medizin, Gentherapie u. a. mit Universitäten (Dresden, Leipzig, München, Bonn, Heidelberg, Marburg), anderen Institutionen (Bundesanstalt für Materialforschung Berlin) und der Industrie (Schering AG, BASF Ludwigshafen, Mallinckrodt Medical, ROTOP, ABX).

Mit ausländischen Partnern bestehen Kooperationen u. a. mit Universitäten (Stockholm/Schweden, Zürich/Schweiz, Ramat-Gan/Israel, Ferrara/Italien, Kitakyushu/Japan) und Instituten (Demokritos Athen/Griechenland, Paul-Scherrer-



Institut Villigen/Schweiz, Institut für Organische Synthese Riga/Lettland, Instituto Tecnológico e Nuclear/Lissabon). Die Zusammenarbeit mit osteuropäischen Ländern wurde erweitert und umfasst jetzt Partner in Bulgarien, Lettland, Polen, Ungarn, Tschechien und Russland. Die Kooperation im europäischen Rahmen findet ihren Ausdruck unter anderem in der Mitarbeit im EU-Programm COST B12 „Radiotracers for in vivo assessment of biological function“. In drei der fünf Arbeitsgruppen sind Wissenschaftler des Instituts vertreten.

Besonders hervorzuheben ist die Zusammenarbeit mit folgenden Partnern:

- Technische Universität Dresden
Hier bestehen Kooperationen auf Gebieten der Chemie und Medizin. Die Zusammenarbeit auf chemischem Sektor bezieht sich auf Fragen der organischen Synthese von Tracervorstufen, auf bioorganische und biochemische Fragestellungen. Dazu gehört auch das Vorhaben „Bioaktive Substanzen“. Auf dem Gebiet der Medizin ist das gemeinsam betriebene PET-Zentrum der wesentliche Faktor der Kooperation. Darüber hinaus besteht eine Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Gentherapie und zur Entwicklung von Technetiumfettsäuren im Rahmen eines gemeinsamen DFG-Projektes.
- Schering AG
Hier besteht eine langjährige Zusammenarbeit auf dem Technetium- und Rheniumgebiet. Zusätzlich wurde mit der Entwicklung eines [^{18}F] Radiotracers zur Rezeptordarstellung begonnen.
- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Die seit Gründung des Instituts bestehende hocheffektive Kooperation auf dem Sektor der Molekülstrukturuntersuchungen ist weiterhin wichtiger Bestandteil der Forschungsarbeit und bisher durch 24 Publikationen ausgewiesen.

Forschungsvorhaben

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



Statistischer Überblick 2001 / 2002

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		38,5/39,5			Wissenschaftler			15/16			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	6/2	3,38/2,00	Doktoranden	8/8	2,13/3,46	Gastwissenschaftler	4/2	0,54/0,32	Hilfskräfte	31/34	3,7/5,23
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	8/6	3,83/4,42	Technisches Personal	4/4	1,8/2,17	Gastwissenschaftler	3/6	0,3/0,28	Doktoranden	4/2	1,25/0,29
Stipendiaten	1/9	0,17/0,73									
Geräteinvestitionen [TEUR]											
grundfinanziert		399/2.225			drittmittelfinanziert			280/190			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		6/11			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			55/44			
Artikel (referiert)		19/24			Diplomarbeiten			2/2			
Artikel (nicht referiert)		17/16			Doktorarbeiten			0/5			
Artikel im Eigenverlag		1/0			Patentanmeldungen			1/0			
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		2/4									

Direktor:

Prof. Dr. Bernd Johannsen

Tel.: +49 351 260-3170

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

Abteilungsleiter:

Dr. Hartmut Spies

Bioanorganische Chemie

Dr. Jörg Steinbach

PET-Tracer (bis 06/2001)

Dr. Frank Wüst

PET-Tracer (ab 08/2001)

Dr. Peter Brust

Biochemie (bis 02/2001)

Dr. Ralf Bergmann

Radiopharmakologie (ab 03/2001)

Dr. Bettina Beuthien-Baumann (kom.)

Positronen-Emissions-Tomographie (bis 12/2001)

Prof. Dr. Jörg van den Hoff

Positronen-Emissions-Tomographie (ab 01/2002)



Institut für Radiochemie IRC

Zielstellung – ein Überblick

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

Der Transport der Radionuklide/Actinide wurde bisher nur makroskopisch beobachtet und phänomenologisch beschrieben. Für eine wissenschaftlich fundierte Prognose der Mobilität von Radionukliden/Actiniden ist es erforderlich, die ablaufenden Vorgänge in Einzelprozesse zu zerlegen und diese auf molekularer Ebene aufzuklären. Unter Verwendung reaktiver Transportmodelle wird es möglich, aus der mikroskopischen Information makroskopische Voraussagen abzu-

leiten. Die dazu benötigten Datenbanken und Modellierungssoftware müssen erweitert und qualitativ verbessert werden.

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

Die Forschungsergebnisse sind wesentlich für die Entwicklung geeigneter Sanierungstechnologien für kontaminierte Flächen, die zum Beispiel als Altlasten



des Uranerzbergbaus in Sachsen und Thüringen, als weitflächige Kontaminationen in den Nachfolgestaaten der früheren Sowjetunion und in den USA, resultierend aus der Kernwaffenentwicklung und -produktion, und als kontaminierte Gebiete durch Nuklearunfälle vorliegen. Eine umfassende Kenntnis der Radionuklidmigration ist unerlässlich für die Abschätzung der radioökologischen Konsequenzen für Mensch und Umwelt bei der Auswahl, Durchführung und nach der Beendigung von Sanierungsmaßnahmen. Die Forschungsergebnisse sind ebenso von grundlegender Bedeutung für die Beurteilung der Langzeitsicherheit von nuklearen Endlagern. Durch die Entwicklung und die Anpassung spektroskopischer Speziationmethoden werden experimentelle Bedingungen geschaffen, Wechselwirkungsmechanismen und Konstitution von Radionukliden/Actiniden auf molekularem Niveau zu untersuchen.

Wichtigste Ergebnisse

Americium und Curium wurden erstmalig am radiochemischen Messplatz des Synchrotronstrahlrohrs ROBL untersucht. Von den Am(III)- und Cm(III)-Aquoionen wurden die Strukturparameter der Hydrathülle mittels EXAFS-Spektroskopie bestimmt.

EXAFS-Untersuchungen zur Sorption von Uran(VI) aus 5×10^{-5} molarer Lösung ergaben, dass das Uran bei pH=5 und Ionenstärke 0,1 M NaClO₄ einen inner-sphärischen, bidentaten Komplex mit den Aluminolgruppen des Montmorillonits bildet.

EXAFS-, TEM- und EDX-Messungen zeigten, dass bei der Wechselwirkung mit *Acidithiobacillus ferrooxidans* das Uran überwiegend an die phosphorhaltigen funktionellen Gruppen der extrazellulären Polysaccharide, der Zellwände und der intrazellulären Polyphosphate gebunden ist.

Die Arbeiten des Instituts zur Arsenat- und Phosphatspeziation des Urans in sechs- und vierwertigem Oxidationszustand wurden vervollständigt. Nun liegen alle für thermodynamische Spezia-

tionsrechnungen benötigten Komplexbildungskonstanten für die Reaktionen mit dem jeweiligen Dihydrogenanion vor.

Mittels der neu entwickelten Fluoreszenzspektroskopie mit ultrakurzen Laserpulsen wurden erstmals Komplexbildungskonstanten für Uran(VI) und Neptunium(V) mit 2,3-Dihydroxybenzoesäure bestimmt. Damit wurde die Leistungsfähigkeit des im Institut entwickelten Systems unter Beweis gestellt.

Das Spektrum der Modell-Huminsäuren (HS) wurde durch die Präparation einer Huminsäure mit ausgeprägter Redoxfunktionalität, basierend auf der Hydrochinon-Oxidation mit Kaliumperoxodisulfat in alkalischer Lösung, vervollständigt. Damit wurde eine entscheidende Voraussetzung zum Studium der Wechselwirkungen von HS und Actiniden unter reduzierenden Bedingungen geschaffen.

Es wurden erstmalig Strukturuntersuchungen an Pu(III)-Huminstoff-Komplexen durchgeführt, um die Nahordnung des Pu(III) zu bestimmen. Durch XANES-Spektroskopie wurde das Vorliegen von Pu(III) in den HS-Komplexen bestätigt. Pu ist darin von sieben Sauerstoffatomen in einem Abstand von 2,45 Å umgeben. Die Koordinationszahl ist mit der von Pu(III)-Hydrat vergleichbar, wobei die Pu-O-Bindung geringfügig verkürzt ist.

Kolloidchemische Untersuchungen an Flutungswasser aus einem Uranbergwerk ergaben, dass die Kolloide einen erheblichen Einfluss auf das Transportverhalten von Uran und anderen radiotoxischen Schwermetallen haben. Die Uransorption an diesen Kolloiden hängt in komplexer Weise von den Umgebungsbedingungen wie pH-Wert und Carbonatkonzentration ab.

Die unikale mineralspezifische Sorptionsdatenbank RES³T wurde weiterentwickelt und einem internationalen Nutzerkreis mit Erfolg vorgestellt und zugänglich gemacht. Das Programm wurde nutzerfreundlicher gestaltet, im Datenumfang stark erweitert und in der Funktionalität um automatische Datenbearbeitung, Zusammenstellung konsistenter Datensätze für komplexe Szenarien sowie statistische Datenauswertung ergänzt.

Im Berichtszeitraum hat das Institut die Einwerbung von Drittmitteln deutlich gesteigert und wurde Partner in drei EU-Projekten.

Institutsübergreifende Zusammenarbeit

Ein Großteil der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist in die zentrumsübergreifenden Vernetzungsprojekte „Radionuklidmigration“ und „Infrarotspektroskopie“ integriert. Die gemeinsamen Forschungsarbeiten mit dem Institut für Sicherheitsforschung im Vernetzungsprojekt „Radionuklidmigration“ konzentrieren sich auf die Beschreibung des Transports von Schwermetallen (Actiniden) in der ungesättigten Zone. Die Modellierung dieses Transports wird begleitet von Säulenexperimenten.

Innerhalb des Vernetzungsprojekts „Infrarotspektroskopie“ erfolgt in einer ersten Etappe der Aufbau eines Infrarot-Messplatzes für Actiniden in enger Kooperation mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik, der Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE sowie dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung.

Der Betrieb und die wissenschaftlichen Experimente am Synchrotronstrahlrohr ROBL erfolgen in enger Kooperation mit der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik und dem Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung. Die programm- und gerätetechnischen Voraussetzungen für die schnelle Spektrenaufnahme (Quick-EXAFS) wurden vollständig geschaffen.

In Zusammenarbeit mit der Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung wurde die numerische Stabilität des auf dem Tichonov'schen Regularisierungsverfahren beruhenden EXAFS-Auswerteprogramms wesentlich verbessert und die Einsatzmöglichkeit des auf der Faktorenanalyse basierenden Programms zur Speziationsanalyse auf die UV/Vis- und die TRLFS-Spektroskopie ausgedehnt. Beide Programme wurden an Nutzer zur Anwendung und eingehenden Testung übergeben.



Gemeinsam mit dem Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie wurden durch EXAFS-Untersuchungen die Strukturparameter analoger Komplexe des Technetiums und Rheniums vom „4+1“-Gemischtligandentyp bestimmt. Weiterhin erfolgten EXAFS-Untersuchungen der Lösungsstrukturen von Tricarbonylkomplexen des Technetiums und Rheniums.

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

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Innerhalb von geförderten wissenschaftlichen Projekten wird mit einer großen Anzahl von nationalen und internationalen Partnern kooperiert. So wird in den drei EU-Projekten BORIS (Building Confidence in Deep Disposal: The Borhole Injection Site Krasnoyarsk-26 and Tomsk-7), ACTAF (Aquatic Chemistry and Thermodynamics of Actinides and Fission Products Relevant to Nuclear Waste Disposal) und HUPA (Humic Substances in Performance Assessment of Nuclear Waste Disposal) mit 23 Partnern aus 10 europäischen Ländern einschließlich Russland kooperiert.

Die Wechselwirkung niederwertiger Actinide und Schwermetalle mit Huminsäuren ist das Thema einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe, den Universitäten Mainz und Saarbrücken und dem Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung Leipzig.

Bei der Entwicklung und Installation fortgeschrittener Programme zur Auswertung röntgenabsorptionsspektroskopischer Messungen an Actiniden wird intensiv mit dem Institut für Metallphysik in Ekaterinburg/Russland und dem Institut für Mikroelektronik-Technologie in Chernogolovka/Russland zusammengearbeitet. Die quantenchemischen Berech-

nungen zu den Strukturen von Th(IV)- und U(VI)-Spezies erfolgten in Zusammenarbeit mit der Universität Tokyo und mit Unterstützung des Rechenzentrums der TU Dresden.

Die mikrobiologischen Arbeiten zur Ermittlung der bakteriellen Diversität in den Halden und Tailings des Uranerzbergbaues erfolgen weiterhin in enger Kooperation mit Wissenschaftlern des Lehrstuhls für Geomikrobiologie der Universität Sofia/Bulgarien und dem Institut für Molekulare Biologie, Bulgarische Akademie der Wissenschaft, Sofia/Bulgarien.

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

Auf den Gebieten der Gesteinscharakterisierung und der Sorption von Actiniden an Gesteins- und Mineraloberflächen wurde intensiv mit der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, dem Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgung, dem Institut für Angewandte Physik der TU Dresden, dem UFZ Leipzig-Halle, der GRS Braunschweig und der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH, Braunschweig zusammengearbeitet.

Eine anwendungsorientierte Projektzusammenarbeit zur Abtrennung von Uran aus Sicker- und Grundwässern mit uranophilen Calixarenen besteht mit dem Deutschen Textilzentrum Nord-West e.V. in Krefeld und mehreren industriellen Partnern.

Forschungsvorhaben

- Aquatische Chemie der Actiniden
- Wechselwirkung Actiniden mit Festphasen
- Actiniden in Biosystemen
- Reaktiver Transport
- Spektroskopische Speziationsmethoden



Statistischer Überblick 2001/2002

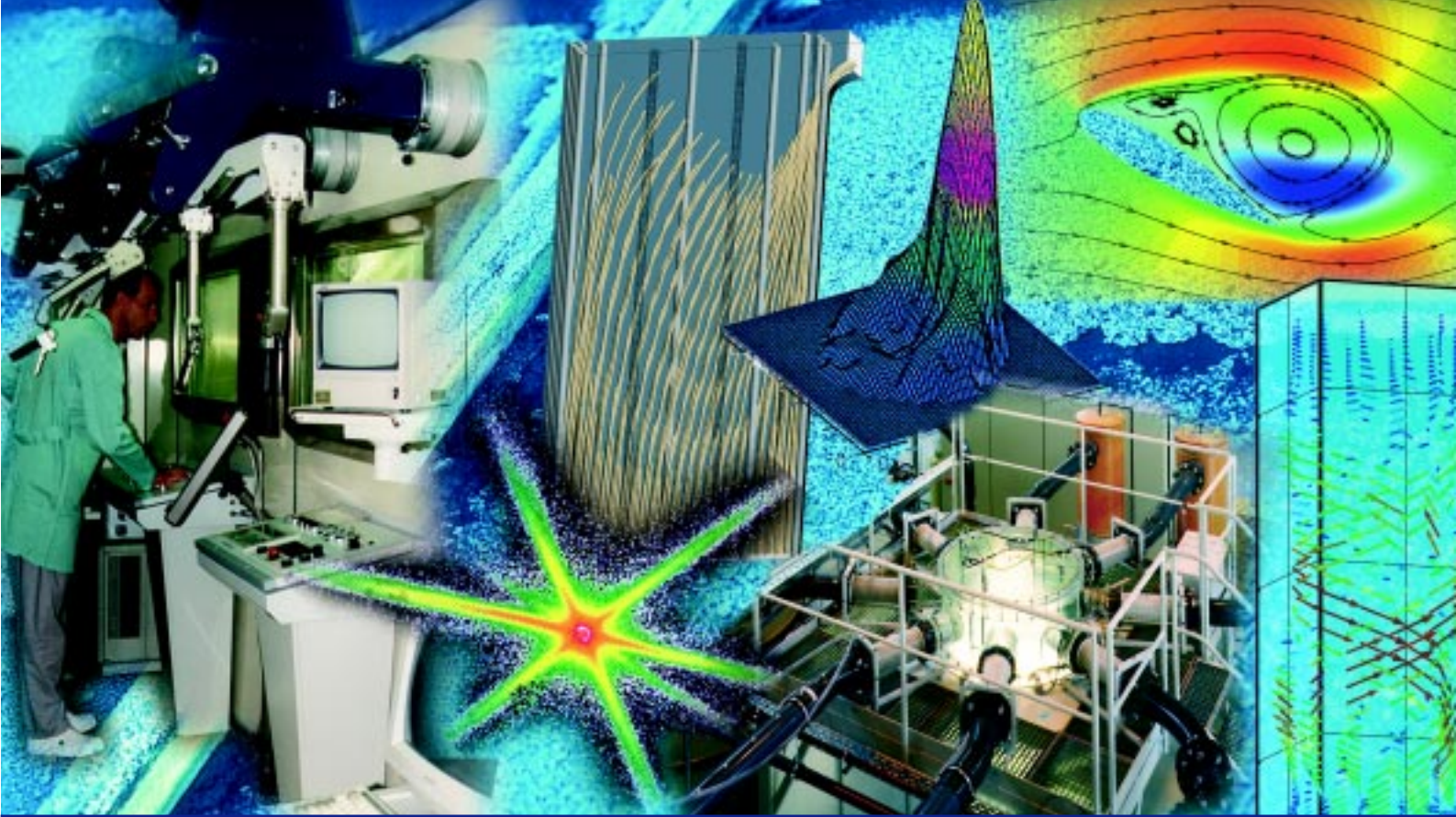
Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		37/37			Wissenschaftler			15/15			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	4/4	3,92/3,83	Doktoranden	4/4	1,5/1,38	Gastwissenschaftler	10/8	1,9/0,84	Hilfskräfte	30/33	2,8/6,36
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	17/17	11,8/11,31	Technisches Personal	7/4	3,5/3,53	Gastwissenschaftler	4/2	0,6/0,78	Doktoranden	-	-
Geräteinvestitionen [TEUR]											
grundfinanziert		464/721			drittmittelfinanziert			142/85,4			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		5/15			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			105/72			
Artikel (referiert)		31/21			Diplomarbeiten			-			
Artikel (nicht referiert)		-			Doktorarbeiten			0/4			
Artikel im Eigenverlag		3/11			Patentanmeldungen			1/1			
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		3/3									

Direktor:

Prof. Dr. Th. Fanghänel Tel.: +49 351 260-32 10
 (bis 31. 3. 2002) E-Mail: th.fanghaenel@fz-rossendorf.de
 Prof. Frank-Peter Weiß Tel.: +49 351 260-34 80
 (kommissarisch ab 1. 4. 2002) E-Mail: f.p.weiss@fz-rossendorf.de

Abteilungsleiter:

Prof. Dr. Gert Bernhard Entsorgungs-und Ökoradiochemie
 Dr. Karl-Heinz Heise Organische Tracerchemie
 Dr. Tobias Reich Synchrotronstrahlungsanwendungen (bis 3/2002)
 N. N. (ab 4/2002)
 Dr. Peter Merker Kolloide (bis 12/2001)
 Dr. Harald Zänker Kolloide (kommissarisch ab 1/2002)
 Dr. Karl Krogner Analytik



Institut für Sicherheitsforschung IfS

Zielstellung – ein Überblick

Das Institut für Sicherheitsforschung (IfS) zielt mit seiner Tätigkeit darauf ab, Risiken und Gefahren aus technischen Aktivitäten für Menschen und Umwelt zu bewerten und Möglichkeiten aufzuzeigen, wie Risiken gemindert und Gefahren ausgeschlossen werden können.

Im Sinne dieser Zielstellung arbeitet das Institut auch an Problemstellungen zur effizienten und umweltschonenden Prozessführung.

Zur Analyse der thermo-fluiddynamischen Prozessphänomene in chemisch/verfahrenstechnischen und kerntechnischen Anlagen werden physikalische Modelle und Computer-Programme für Mehrphasen- und Mehrkomponenten-Strömungen sowie für die orts- und zeitabhängige Leistungsfreisetzung entwickelt. Für die Störfallsimulation in der Kerntechnik werden gekoppelte neutronenkinetisch-thermohydraulische Programmsysteme erarbeitet, die eine räumliche Modellierung wichtiger Teilphänomene (Neutronenkinetik, turbulente Vermischung von Kühlmittelströmen) erlauben. Bei verfahrenstechnischen Anwen-

dungen ist die genaue Kenntnis der thermodynamischen Daten und der Prozessverläufe eine wichtige Voraussetzung für die effiziente und umweltschonende Prozessführung, aber auch für die Störfallprävention. Deshalb wird die Kinetik exothermer chemischer Reaktionen bei normalem Verlauf und bei Runaway experimentell und theoretisch untersucht.

Die Magnetohydrodynamik (MHD) als spezielle Ausprägung der Thermohydraulikforschung des Instituts behandelt das Verhalten elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten unter dem Einfluss externer elektromagnetischer Felder. Die MHD eröffnet eine Vielzahl technologischer und sicherheitsrelevanter Anwendungen, zum Beispiel bei der Züchtung von Halbleiter-Einkristallen, im Schiffbau, der Metallurgie und der Elektrochemie. Diese Anwendungen werden aus der Forschung zu grundlegenden MHD-Effekten heraus erschlossen.

Als Grundlage der theoretischen Arbeiten zur Thermofluidynamik sind experimentelle Untersuchungen unerlässlich.



Deshalb hat das Institut die Versuchsanlage TOPFLOW (Transient Two Phase Flow) für räumlich und zeitlich transiente Zweiphasenströmungen aufgebaut und entwickelt schnelle tomografische Messverfahren für die Analyse der Experimente. TOPFLOW ist das wichtigste Einzelvorhaben des Instituts.

Die Arbeiten zur Material- und Komponentensicherheit sind auf die Untersuchung von Alterungsvorgängen in Konstruktionswerkstoffen von Kernreaktoren, einschließlich Transmutationsanlagen, durch Neutronen- und Gammastrahlen ausgerichtet. Um die Strahlenbelastung der Konstruktionskomponenten zu bestimmen, werden neue Berechnungsverfahren für Teilchen- und Strahlungsfelder entwickelt und angewendet. Die Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften als Folge der Strahlenbelastung wird mit modernen bruchmechanischen Methoden ermittelt. Für die Aufklärung der mikrostrukturellen Schädigungsmechanismen werden hochauflösende Strukturanalysemethoden, vornehmlich Kleinwinkel-Streuanalysen, genutzt. Das IfS hat sich auf dem Gebiet der Materialsicherheit zu einem Zentrum für die Untersuchung bestrahlten Materials entwickelt und hält dafür moderne heiße Zellen bereit.

Die Belastung von mechanischen Anlagenkomponenten ist im Störfall besonders hoch. Ausgehend von den Störfalllasten (Temperaturen und Drücke) und den bruchmechanischen Eigenschaften der sicherheitsrelevanten Komponenten wird die Integrität von Anlagen mit Hilfe strukturmechanischer Berechnungsverfahren untersucht. Zu diesem Zweck werden auch Modelle entwickelt, welche die mechanischen und thermischen Wechselwirkungen zwischen den Fluiden und den Komponenten berücksichtigen.

Da technische Aktivitäten und insbesondere Störfälle zur Emission von Schadstoffen führen können, werden Modelle zur Beschreibung des Transports von Schadstoffen in der Geosphäre benötigt. Dabei konzentriert sich das IfS auf die Modellierung der physikalischen und chemischen Vorgänge beim Transport von Radionukliden im Boden.

Wichtigste Ergebnisse

Das Institut wirbt einen erheblichen Anteil seines Budgets als Drittmittel ein. Jährlich sind dies 2 - 2,5 Millionen Euro, die über Fördermittel des Bundes oder der EU oder über Verträge mit der Industrie zur Verfügung stehen. Nahezu die Hälfte des Personals des IfS wird über diese Drittmittel finanziert.

Im Rahmen der Initiative „Innovative Gründerlabore“ hat das BMBF beispielsweise die Einrichtung eines MHD-Labors im Institut mit 375 Tausend Euro unterstützt. Dieses Gründerlabor schafft permanent die Voraussetzungen für anwendungsorientierte und industrierelevante Entwicklungen, die es den Mitarbeitern ermöglichen sollen, sich auszugründen und Technologiefirmen aufzubauen.

Das wissenschaftliche Leben wird maßgeblich auch durch Meetings und Workshops geprägt, die das Institut ausrichtet. Zu nennen sind vor allem die Abschlusskonferenz des Innovationskollegs der DFG zur „Magnetofluidynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten“, ein OECD-Workshop zur Simulation von Störfallszenarien in Siedewasserreaktoren sowie der nun bereits 5. Workshop zur Entwicklung und Anwendung von Zweiphasenmesstechnik.

Der Aufbau der Thermohydraulik-Versuchsanlage TOPFLOW ist abgeschlossen. Bis Ende 2002 erfolgt die so genannte Warmerprobung.

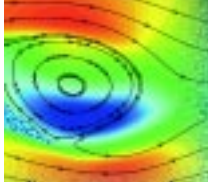
Der Projektträger „Reaktorsicherheit“ des BMWi hat für die Experimente an TOPFLOW ein Förderprojekt mit einem Gesamtumfang von 2,9 Millionen Euro bewilligt. „Kalte Experimente“ mit Luft und Wasser wurden 2002 begonnen. TOPFLOW wird die internationale Stellung des Institutes auf dem Gebiet der Modellierung von Zweiphasenströmungen entscheidend stärken. Dazu trägt die innovative Zweiphasenmesstechnik erheblich bei, die im IfS entwickelt wird. Das gilt sowohl für die so genannten „Gittersensoren“ als auch für die schnelle Gammatomografie, mit der sogar Gasgehaltsverteilungen in Zweiphasenverdichtern sichtbar gemacht werden können.

Am Versuchsstand ROCOM (Rossendorf Coolant Mixing Test Facility) wurden

umfassende Experimente zur Untersuchung der Kühlmittelvermischung bei Deborierungs- und Kaltwassertransienten in Druckwasserreaktoren, unter anderem auch im Auftrage der Reaktorbetreiber, durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurden CFD-Berechnungsmodelle (Computational Fluid-Dynamics) validiert und ein neues semi-empirisches Berechnungsverfahren entwickelt. Durch Kopplung dieses semi-empirischen Modells mit dem Reaktordynamik-Programm DYN3D wurde gezeigt, dass ein abgeschalteter Reaktor beim Eintritt von 36 Kubikmetern Deionats zwar kurzzeitig rekritisch wird, dass aber keine unzulässigen Drücke und Brennstofftemperaturen auftreten.

Mit Methoden der Neutronenkleinwinkelstreuung wurden die durch Neutronenbestrahlung induzierten Gefügeveränderungen in Druckbehälterstählen von WWER-Reaktoren russischer Bauart untersucht. Damit wurden erstmals für WWER-Stähle direkte Korrelationen zwischen den bestrahlungsbedingten mechanischen Eigenschaftsänderungen und den Gefügeänderungen aufgezeigt. Sie liefern den Ansatz zu einer physikalischen Untermauerung der empirisch begründeten, im russischen Regelwerk festgelegten Normative für die Abhängigkeit zwischen empfangener Neutronenfluenz und Zähigkeitsverlust der Stähle.

Das Verhalten der unteren Kalotte eines Reaktordruckbehälters (RDB) bei einem schweren Störfall mit Schmelzeverlagerung in die Bodenkalotte wird in 1:10-Modellversuchen im Rahmen eines EU-Projektes am Königlichen Institut für Technologie Stockholm untersucht. Mit einem im IfS entwickelten Berechnungsverfahren wurden die Versuche mit dem Ziel voraus- und nachberechnet, Zeitpunkt und Art des Versagens des Reaktordruckbehälters zu ermitteln. Temperaturverlauf, Versagensgeometrie und Versagenszeit wurden in sehr guter Übereinstimmung mit dem Experiment berechnet. Die Arbeiten des Instituts führten zu zwei Patenten. Eines davon sieht die mechanische Unterstützung des durch Kriechen verformten RDB und die passive Flutung der Reaktorgrube zur Kühlung der Schmelze vor. Dadurch kann die Zeit bis zum möglichen Versagen des RDB erheblich verlängert werden, sodass



inzwischen Notfallmaßnahmen zur Verhinderung des Durchschmelzens ergriffen werden können.

Die Mitarbeiter des IfS, Dr. G. Gerbeth, Dr. F. Stefani und Dipl.-Ing. Th. Gundrum, erhielten den Forschungspreis 2001 des FZR für ihre Arbeiten zum Nachweis der Magnetfeldselbsterregung in Flüssigmetallströmungen zusammen mit dem Institut für Physik der Universität in Riga. In mehreren, maßgeblich in Rossendorf vorbereiteten Experimenten war es weltweit erstmals gelungen, den so genannten Dynamoeffekt im Experiment zu belegen. Auch im Jahr 2002 ging der Forschungspreis des FZR an das IfS. Dr. E. Altstadt und H.-G. Willschütz wurden für ihre Arbeiten zur theoretischen Modellierung des Verhaltens eines Reaktor-Druckbehälters bei einem schweren Störfall und für die Entwicklung störfallbegrenzender Gegenmaßnahmen ausgezeichnet.

Institutsübergreifende Zusammenarbeit

Das Institut für Sicherheitsforschung orientiert bei den Forschungsarbeiten auf die Vernetzung mit den anderen Instituten des Zentrums. Das gilt in besonderer Weise für die Modellierung des Radionuklidtransports in ungesättigten Bodenzone gemeinsam mit dem Institut für Radiochemie. Die beiden Institute vereinen an dieser Stelle ihre Kompetenz zur Speziationsanalytik einerseits und zur mathematischen Modellierung physikochemischer Prozesse andererseits. Dieses gemeinsame Vorhaben ist als Vernetzungsprojekt des Zentrums ausgewiesen.

Mit dem Institut für Kern- und Hadronenphysik wird am Vernetzungsprojekt zur Erzeugung und Nutzung gepulster schneller Neutronen an ELBE gearbeitet. Der Radiator zur Neutronenerzeugung in flüssigem Blei inklusive Kühlung und Beam Dump wurde im Entwurf ausgearbeitet. Rechnungen zum Strahlungsuntergrund im Kollimator und zur Aktivierung liegen ebenfalls vor. Der Aufbau eines Versuchsmusters des Targets ist weit fortgeschritten. An diesem Vernetzungsprojekt ist auch die TU Dresden beteiligt.

Ein weiteres Vernetzungsprojekt zu PET (Positronen-Emissions-Tomographie) in Medizin und Technik ist mit den Instituten für Kern- und Hadronenphysik sowie Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie definiert worden.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Das IfS war mit der Einwerbung von Fördermitteln der EU auf den Gebieten „Reaktorsicherheitsforschung“ und „Innovative industrielle Technologien“ sehr erfolgreich. Es ist an insgesamt acht Projekten beteiligt, vier davon werden von Mitarbeitern des Instituts koordiniert. Die mit den Projekten verbundenen Zuwendungen betragen nahezu eine Million Euro. Partner in diesen Vorhaben sind hochrangige Institutionen und Firmen aus ganz Europa (zum Beispiel FRAMATOME ANP, EDF, Iberdrola Spanien, Tractebel Belgien, VTT Finnland, ENEA Bologna, CEA Cadarache, CIEMAT Madrid, Universität Delft, AEA Technology in Großbritannien, FZ Karlsruhe, FZ Jülich, Kurchatov-Institut Moskau, KFKI Budapest, NRI Rez/Tschechien).

Ende Juni 2001 fanden die deutsch-russischen Regierungsverhandlungen zur wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit (WTZ) auf dem Gebiet der friedlichen Nutzung der Kernenergie statt. Das IfS hat an diesen Verhandlungen teilgenommen und leitet 9 von 15 vereinbarten WTZ-Projekten zur Reaktorsicherheit.

Der gemeinsame SFB-Antrag mit der TU Dresden und weiteren außeruniversitären Partnern zum Thema „Elektromagnetische Strömungsbeeinflussung in Metallurgie, Kristallzüchtung und Elektrochemie“ wurde erfolgreich verteidigt. Die DFG fördert den SFB seit dem 1. Januar 2002. 5 von 14 bewilligten Teilprojekten werden vom IfS geleitet; an zwei weiteren ist es wesentlich beteiligt.

Forschungsvorhaben

- Störfallanalyse von Leichtwasserreaktoren
- Sicherheit und Effektivität chemischer Prozesse
- Thermofluidynamik von Mehrphasen-/Mehrkomponentensystemen
- Magneto hydrodynamik elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten
- Material- und Komponentensicherheit
- Teilchen- und Strahlungstransport



Statistischer Überblick 2001 / 2002

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		50/50			Wissenschaftler				17/17		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	4/4	3,0/3,0	Doktoranden	2/3	0,68/1,17	Gastwissenschaftler	19/7	1,16/1,85	Hilfskräfte	25/31	2,44/5,91
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	39/39	26,88/28,91	Technisches Personal	6/5	4,27/3,58	Gastwissenschaftler	16/33	0,94/2,31	Doktoranden	1/1	0,38/0,17
Stipendiaten	1/1	0,25/0,25									
Geräteinvestitionen [TEUR]											
grundfinanziert		1.599/2.007			drittmittelfinanziert				357/260		
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		12/31			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster				70/69		
Artikel (referiert)		55/68			Diplomarbeiten				-		
Artikel (nicht referiert)		-			Doktorarbeiten				2/1		
Artikel im Eigenverlag		10/14			Patentanmeldungen				2/7		
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		9/9									

Direktor:

Prof. Dr. Frank-Peter Weiß

Tel.: +49 351 260-3480

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

Abteilungsleiter:

Dr. Horst-Michael Prasser

Dr. Jürgen Böhmert

Dr. Klaus Noack

Dr. Gunter Gerbeth

Dr. Ulrich Rohde

Experimentelle Thermofluidynamik

Material- und Komponentensicherheit

Teilchen- und Strahlungstransport

Magneto-Hydrodynamik

Störfallanalyse



Institut für Kern- und Hadronenphysik IKH

Zielstellung – ein Überblick

Im Institut für Kern- und Hadronenphysik wird etwa zu gleichen Teilen einerseits Grundlagenforschung in der Hadronen-, Kern- und Strahlungsphysik betrieben sowie andererseits die Übertragungsmöglichkeit von deren Methoden und Ergebnissen vor allem in die Lebenswissenschaf-

ten untersucht und genutzt. Typisch hierfür ist das Studium der Dynamik von komplexen Vielteilchensystemen über ihre Kopplung an elektromagnetische Strahlung. Diese Thematik spielt für die geplante multidisziplinäre Nutzung der an ELBE erzeugten Strahlung eine zentrale Rolle.



Wichtigste Ergebnisse

■ Kern- und hadronenphysikalische Projekte

Die seit langem sehr erfolgreiche experimentelle und theoretische kernstrukturphysikalische Forschung des IKH wird mit veränderter Zielsetzung an der Strahlungsquelle ELBE fortgesetzt. Die Untersuchung von Hochspinzuständen verliert dabei an Bedeutung, da in der Wechselwirkung von Photonen aus der Bremsstrahlung mit Kernen weniger nukleare Rotationen angeregt werden, sondern Anregungsmoden mit niedrigem Drehimpuls. In schweren Kernen kann so Spaltung induziert werden und die gute Zeitdefinition des ELBE-Strahls erlaubt eine Flugzeitidentifizierung der Spaltfragmente und somit interessante und neuartige Messungen an Isotopen am Rande der nuklearen Stabilität. Deren Eigenschaften spielen eine wichtige Rolle bei der stellaren Elementsynthese und auch die Beobachtung des Kern-Photoeffekts liefert für deren Verständnis interessante Informationen, da so die thermisch-radiative Dissoziation schwerer Isotope im Labor simuliert werden kann. Damit bei diesen Untersuchungen an ELBE eine signifikant höhere Empfindlichkeit als in bisherigen Experimenten erreichbar wird, werden eine dedizierte Elektronenstrahlführung, ein spezieller Radiator, ein besonders geformter Kollimator, ein gut abgeschirmter Elektronenstrahlfänger, ein ausgedehnter Photonenabsorber hinter dem Target sowie Anti-Compton-Schilde und eine elektronische Unterdrückung der mit dem ELBE-Strahl unkorrelierten Untergrund-Photonen besonders günstige Experimentierbedingungen schaffen.

Die an ELBE möglichen Untersuchungen stehen in engem Zusammenhang zu den Projekten, die bei der GSI Darmstadt mit SIS bzw. dem geplanten neuen Großbeschleuniger wichtige Fragen der Astrophysik klären sollen – sowohl in astrophysikalischen Experimenten mit radioaktiven Strahlen als auch bei Untersuchungen zu im Stoß verdichteter hadronischer Materie, die als Modell dient für das hadronische Medium im Inneren gravitativ kollabierender Sterne. Die von den Experimentatoren und Theoretikern des IKH gemeinsam getragene Untersu-

chung von Mediumeffekten – wie z.B. mit HADES zu beobachten – untersucht zum einen die die hadronische Wechselwirkung beherrschende chirale Symmetrie und zielt zum anderen auf die Vertiefung der Erkenntnisse, betreffend den Ursprung der hadronischen Selbstenergie. Obwohl die Hadronen 99,9 % der sichtbaren Masse des Universums bilden, fehlt ein detailliertes Verständnis der Masse-Generierung durch die starke hadronische Wechselwirkung.

■ Lebenswissenschaftliche Forschungsprojekte

Die Sekundärstrahlung von ELBE eröffnet dem FZR neue Ansätze für die biomedizinische Anwendung physikalischer Methoden und vor allem neue Untersuchungsmöglichkeiten auf zellulärem und subzellulärem Niveau. Besonders interessante Beispiele für den Einsatz nicht-konventioneller Photonenquellen bei biologischen Anwendungen sind die Sekundärstrahlung im IR-Bereich aus den Freie-Elektronen-Lasern und die Röntgenstrahlungs-Erzeugung durch Elektronen-Channeling in Einkristallen. Im Hinblick auf diese neuen Möglichkeiten war die Arbeit im lebenswissenschaftlichen Bereich vor allem geprägt durch die Vorbereitungen für die geplanten Bestrahlungs- und Messplätze sowie die Einrichtung von IR-Labormessplätzen und eines Zelllabors in der ELBE-Halle in unmittelbarer Nähe zu den künftigen Röntgen- und IR-Produktionsanlagen.

Das IKH plant weiterhin am Infrarot-Strahl des ELBE-FEL Experimente, die vorrangig die besonderen Eigenschaften des erzeugten IR-Strahls, insbesondere die leichte Durchstimmbarkeit, die geringe Bandbreite und die kleine Pulslänge, ausnutzen. In detaillierten – und trotz unterschiedlicher numerischer Verfahren konsistenten – Simulationsrechnungen wurden die Bedingungen erfasst, die beim FEL-Betrieb erfüllt sein müssen, um diese Eigenschaften zu erreichen. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die komplexe Justierung der FEL-Undulatoren und deren Kontrolle durch zwei unabhängige Magnetfeldmessmethoden. Weitere numerische Arbeiten befassten sich mit dem FEL-Resonator, der Auskopplung des Strahls und der IR-Strahlführung. In Vorbereitung zeitaufgelöster Messungen

wurden statische IR-Absorptionsspektren von bakteriellen Metall bindenden Proteinen aufgenommen und pH-abhängige Strukturveränderungen nachgewiesen. Ein Verständnis dieser Strukturänderungen ist für die beabsichtigte Nutzung der Proteine für die Entfernung von Uran aus radioaktiv belasteten Wässern erforderlich. Die Möglichkeit, Strukturveränderungen in Biomolekülen mit IR-Strahlung markierungsfrei nachzuweisen, wurde ferner genutzt, um die molekularen Mechanismen beim Sehvorgang zu untersuchen. Es wurden insbesondere solche Strukturmerkmale des Photorezeptors Rhodopsin IR-spektroskopisch charakterisiert, die für eine große Klasse von pharmakologisch wichtigen Membranproteinen bedeutend sind.

Die im IKH entwickelte In-situ-Kontrolle von Tumorbestrahlungen mittels Positronen-Emissions-Tomographie wurde weiter als klinische Routinemethode an der experimentellen Schwerionen-Therapieanlage bei der GSI Darmstadt eingesetzt. Bei den zahlreichen Patientenbestrahlungen mit Kohlenstoffstrahlen wurde zuverlässig gezeigt, dass die PET-Überwachung den behandelnden Radioonkologen die Planung und Durchführung der Therapie in zunehmend schwierigeren Situationen möglich macht. Wichtige Ergebnisse bei den begleitenden Forschungsarbeiten sind einerseits die Entwicklung eines praktikablen Verfahrens zur Quantifizierung von lokalen Dosisabweichungen auf der Basis von PET-Daten und andererseits die Durchführung und vollständige Auswertung der ersten PET-Experimente direkt an einem Protonenstrahl. Die Ergebnisse legen nahe, dass die im FZR zunächst für die Therapie mit Kohlenstoffstrahlen entwickelte Methode auch auf die Qualitätssicherung der weitaus häufiger eingesetzten Protonentherapie übertragbar ist.

Institutsübergreifende Zusammenarbeit

Eine sehr enge Kooperation besteht mit den Zentralabteilungen des FZR, die für den Aufbau und den Betrieb der ELBE-Anlage zuständig sind. Gemeinsam wurden die Voraussetzungen für die Optimierung von Elektronenstrahl-Erzeugung, -Dia-



gnose und -Transport sowie der Auslegung von Undulator und Resonator erarbeitet und die theoretischen Vorarbeiten des IKH haben zu einem Konzept der IR-Strahlführung geführt, das die Wünsche der zukünftigen Nutzer möglichst gut berücksichtigt. Gemeinsam wurden auch mit dem Strahlenschutz und der Strahldiagnose zusammenhängende Probleme bearbeitet sowie die Auswirkungen der besonders geringen Emittanz der lasergetriebenen Elektronenkanone auf den FEL-Betrieb berechnet.

Die Kooperation mit den anderen Instituten des FZR hat weiter zugenommen, was deren wachsendem Interesse an der Nutzung von ELBE-Strahlung zuzuschreiben ist. Das betrifft insbesondere das Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung, das für den geplanten Einsatz der FEL-Infrarotstrahlung in der Halbleiterforschung ähnliche Probleme lösen muss, wie das IKH für die geplante lebenswissenschaftliche Nutzung des FEL. Das Institut für Radiochemie will bei der Aufklärung von chemischen Bindungsstrukturen mit der intensiven IR-FEL-Strahlung die Erfahrungen nutzen, die bei gemeinsamen Experimenten bei FELIX und bei CLIO gewonnen wurden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Sicherheitsforschung wird die Nutzung der an ELBE erzeugten schnellen Neutronen vorbereitet, durch die Beiträge zur Ergänzung der kernphysikalischen Grundlagen der Energietechnik geliefert werden sollen. Eine Machbarkeitsstudie wurde ausgeführt zur Nutzung der quasi-monochromatischen Röntgenstrahlung für Experimente der Abteilung Magnetohydrodynamik des IfS zur Visualisierung von Phasenübergängen und Strömungsvorgängen in Metallschmelzen. Eine thematische Verbindung des IKH mit dem Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie gibt es bei den Arbeiten zur Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und bei den vorbereitenden Untersuchungen für die Photonen-Aktivierungs-Therapie.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Bei der Konzipierung der Bremsstrahlungsanlage an ELBE und der Planung der

dort geplanten Experimente profitierte das IKH von den wertvollen Erfahrungen am S-DALINAC der TU Darmstadt, am DYNAMITRON der Universität Stuttgart und an der Quelle für polarisierte Photonen in Gent. In Experimenten zusammen mit der ISOL-Gruppe am UNILAC wurde der Rossendorfer CLUSTER-Detektor eingesetzt. Durch die anstehende Überführung von weiteren dieser Detektoren aus dem EUROBALL-Projekt zur GSI Darmstadt wird sich die Rossendorfer Kernphysik dort verstärkt an der Gewinnung astrophysikalisch relevanter Kernstrukturdaten beteiligen. Gemeinsame Aktivitäten bestehen auch mit der Universität Sofia und dem INRE Sofia, der University of Tennessee/USA, der Notre Dame University/USA und dem VIK Dubna/Russland.

Die Komplettierung des HADES-Detektors und die Durchführung von Experimenten am SIS der GSI Darmstadt erfolgen im Rahmen einer großen Kollaboration, in der u. a. Gruppen der Universitäten Frankfurt, Giessen, München, Kraków und Praha mitarbeiten. Die im FZR gebauten Drahtkammerzähler werden auch am internen Strahl des Cooler Synchrotrons COSY in Jülich eingesetzt; auch dies mit starker internationaler Beteiligung. Bei theoretischen Untersuchungen wurde profitiert von der Zusammenarbeit mit der McGill University in Montreal, SUBATECH in Nantes, KFKI Budapest, ITP Kiev und dem VIK in Dubna.

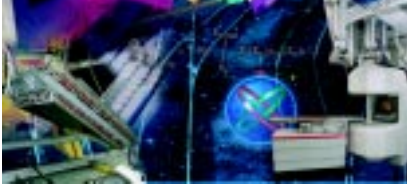
Im FEL-Bereich ist die Zusammenarbeit mit dem DESY-Hasylab hervorzuheben. Sie betraf vor allem Fragen der Elektronenstrahldiagnostik und der Untersuchung der magnetischen Eigenschaften spezieller Undulatorkonfigurationen. In beiden Fällen konnte sich das IKH in gewisser Weise für die gute Unterstützung des ELBE-Projekts durch DESY revanchieren, indem es mit eigenständigen Neuentwicklungen Lösungen erarbeitete, die auch für die TESLA-Test-Facility von Interesse sind.

Die geplanten zellbiologischen Experimente mit quasi-monochromatischer Röntgenstrahlung an ELBE sind Bestandteil des DFG-Forschungsprojekts „Korrelation physikalischer Parameter mit der zellulären Wirkung von niederenergetischen Photonen und geladenen Teil-

chen“, das von den Instituten für Zoologie und Strahlenschutzphysik sowie von der Klinik für Strahlentherapie und Radioonkologie der TU Dresden beantragt wurde. Gemeinsam wurde der Workshop „Zytomorphologie – Erfassung und Einflussfaktoren“ organisiert.

Zu einem gemeinsamen Forschungsvorhaben mit der Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH Leipzig wurden erfolgreich umfangreiche Strahlungstransportrechnungen beigetragen, die die Dosisleistung aus einem industriellen Elektronenbeschleuniger vorhersagen. Gemeinsam mit der Universität Bremen, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und der TU Berlin wurde ein Röntgenreflektor auf der Basis von hoch orientiertem pyrolytischen Graphit entworfen, der die an ELBE erzeugte Channelingstrahlung fokussiert und gleichzeitig durch Monochromatisierung den Bremsstrahlungsuntergrund reduziert. Betreffend die Intensitätsverstärkung von Channelingstrahlung durch Ultraschallanregung des Kristallradiators arbeitet das IKH eng mit der auf diesem Gebiet führenden Theoriegruppe an der Armenischen Akademie der Wissenschaften in Erivan zusammen.

Innerhalb des Deutschen Schwerionentherapie-Projekts wurde die intensive Zusammenarbeit mit der Radiologischen Universitätsklinik und dem Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) in Heidelberg sowie der GSI Darmstadt fortgesetzt. Das betrifft sowohl das gemeinsame Betreiben der experimentellen Therapieanlage bei der GSI Darmstadt als auch die methodische Weiterentwicklung der PET-Methode zur Qualitätssicherung der Therapie, vor allem im Hinblick auf die in Heidelberg zu errichtende dedizierte klinische Therapieanlage. In diesem Rahmen wurden auch die gemeinsamen experiment-technischen Arbeiten mit dem Soltan Institute of Nuclear Studies in Otwock-Swierk/Polen verstärkt.



Forschungsvorhaben

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

Statistischer Überblick 2001 / 2002

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		39/40			Wissenschaftler			17/18			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	6/4	3,08/3,08	Doktoranden	6/6	1,75/2,00	Gastwissenschaftler	17/19	1,73/2,11	Hilfskräfte	9/10	0,67/1,43
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	11/9	4,5/7,01	Technisches Personal	-	-	Stipendiaten	2/2	0,27/1,06	Doktoranden	7/7	3/3,92
Gastwissenschaftler	4/4	0,4/1,37									
Geräteinvestitionen [TEUR]											
grundfinanziert		1.109/1.134			drittmittelfinanziert			14/1,3			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken		-			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			37/11			
Artikel (referiert)		54/31			Diplomarbeiten			-			
Artikel (nicht referiert)		2/2			Doktorarbeiten			4/3			
Artikel im Eigenverlag		-			Patentanmeldungen			-			
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]											
Meetings / Workshops		2/2									

Direktor :

Prof. Dr. Eckart Grosse

Tel.: +49 351 260-22 70

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

Abteilungsleiter:

Prof. Dr. Eckart Grosse

Freie Elektronen Laser

Prof. Dr. Burkhard Kämpfer

Hadronenphysik

Dr. Friedrich Dönau

Kernphysik

Dr. Wolfgang Enghardt

Strahlungsphysik



Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik ZFI

Überblick über die Zielstellung

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

- Messtechnik (sensornahe Hardware, Messmethodik)
- Elektronische Instrumentierung (Instrumentierungssysteme, Rechen-technik, Softwareentwicklung)
- Mechanische Entwicklung (Konstruktion, Projektierung)

Daneben gibt es eine Gruppe für mechanische Technologien mit einer leistungsstarken Versuchswerkstatt, die über ein breites Spektrum verschiedenster Sonder-

technologien verfügt, um den spezifischen Anforderungen seitens der wissenschaftlichen Experimente zu entsprechen.

Schwerpunkte bildeten im Jahre 2002 die Arbeiten am ELBE-Projekt und am Rossendorfer Strahlrohr ROBL, Arbeiten für das Materialprüflabor sowie Entwicklungsarbeiten für den Tandembeschleuniger. An diesen Projekten wirken jeweils mehrere Institute beziehungsweise Zentralabteilungen des FZR mit.

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



Wichtigste Ergebnisse

- Strahlungsquelle - ELBE
siehe Projektgruppe ELBE

- ROBL

Schwerpunkt der Arbeiten war die Einführung von Quick-EXAFS als Standardmessmethode in der Radiochemie. Es wurde eine Lösungskonzeption erstellt und umgesetzt, sodass die Experimentatoren jetzt erste Messungen mit dieser Methodik vornehmen und sie auf erforderliche Verbesserungen hin testen können.

Eine Erweiterung der Slit-Applikation ermöglichen Gap-Shift- und Gap-Offset-Scans in X- und Z-Richtung mit den Experimentblenden (Slits) an den Experimentierplätzen.

Aus dem Programm xatros wurde ein neues Programm minixatros abgeleitet, das für Experimente mit anormaler Streuung in der Materialforschung genutzt werden kann. Es dient der einfacheren Einstellung der Energie am Monochromator auf eine Absorptionskante. Die Beschreibung des Messprogramms xatros wurde in eine englischsprachige Version überführt; die Hard- und Softwaredokumentationen wurden erweitert und verbessert.

Eine Reihe von Arbeiten hatte die Erhöhung der Sicherheit der Strahlrohrkomponenten und ihre einfachere beziehungsweise effektivere Nutzung zum Ziel. Die wichtigsten sind:

- Schutzvorrichtung für die Spiegelbieger nach Druckausfall (Hardwarelösung)
- Automatisierung der Bedienung des Fluoreszenzschirmes
- Erweiterung der Wasserkühlung von Komponenten
- Automatisierung der gleichzeitigen Nutzung von zwei Filterboxen zu je vier Filtern
- Einbau von Schutzmaßnahmen für einen Probenhalter der Handschuhbox des Radiochemiemessplatzes
- Überarbeitung der Antriebe und Fertigung der Positioniereinrichtung für den Lytle-Detektor (Handschuhbox der Radiochemie)
- Weitere Verbesserungen der Messprogramme und Unterstützung für den Messbetrieb
- Einsatzvorbereitung einer Server-Workstation (Sun/E250) zur Verbesserung der rechentechnischen Basis

- Radionuklidlabor für Werkstoffuntersuchungen

Eine Trennschleifmaschine für aktivierte Proben wurde fertiggestellt und erprobt. Mit der Erprobung der Steuerung für das kleine Pendel und die Drahterodiermaschine wurde begonnen.

- Ausbau Ionenstrahltechnik

Für den neuen Strahlabschnitt Gils-Spektrometer wurde ein 4. Schaltschrank installiert. Die Steuerung für das Vakuumsystem und für die Strahlführung wurden fertiggestellt.

Weiterhin wurden verschiedene Komponenten, zum Beispiel eine Target-Schwenk- und Dreheinrichtung gefertigt. Das Bedien- und Beobachtungssystem am Tandem wurde erweitert und fertiggestellt.

- PET- Zentrum

Die Steuerung des Targetwechslers, der die Bestrahlung von Feststofftargets ermöglichen soll, wurde übergeben und in Betrieb genommen.

Weiterhin wurden 20 Rohrpostkassetten gefertigt.

- Dresdner Hochfeldlabor

Zur Vorbereitung der Evaluierung des 100-Tesla-Hochfeldprojekts wurde der Abschnitt über die Energieversorgungsanlage des „Vorschlags zur Errichtung eines Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder in Dresden“ überarbeitet. Dafür wurden insbesondere umfangreiche Simulationsrechnungen der Energieversorgungsanlage für die geplante 100-Tesla-Anlage durchgeführt.

Am 24. und 25. Januar 2002 wurde die erfolgreiche Evaluierung des Dresdner Hochfeldlabors durchgeführt. Sie hatte die sehr positive Einschätzung des deutschen Wissenschaftsrates und dessen Empfehlung zur Errichtung des Labors zum Ergebnis.

Es wurde ständig am Betrieb und der Verbesserung der 50-Tesla/1-Megajoule-Hochfeldanlage im Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW) mitgearbeitet. Für das Hochfeldlabor im IFW wurden neue Thyristorschalter mit direkt lichtgesteuerten Thyristoren entwickelt und eingesetzt.

Die Konzeption für die 50-Megajoule-Pulsanlage im FZR wurde weiter ausgearbeitet. Die Angebote für die Hauptkomponenten der Bank wurden einge-

holt. Die Entwicklung, Konstruktion und Fertigung eines 1,44-Megajoule-Pilotmodells wurde begonnen.

- Sonstiges

Sonstige Werkstattarbeiten wurden für das Institut für Sicherheitsforschung durchgeführt: Ein Schienensystem und zwei Bleitunnel für einen Röntgenteststand, je drei Gittersensoren (Durchmesser 108,4 Millimeter und 54,3 Millimeter) sowie Sonden unterschiedlicher Bauform und Baugröße.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

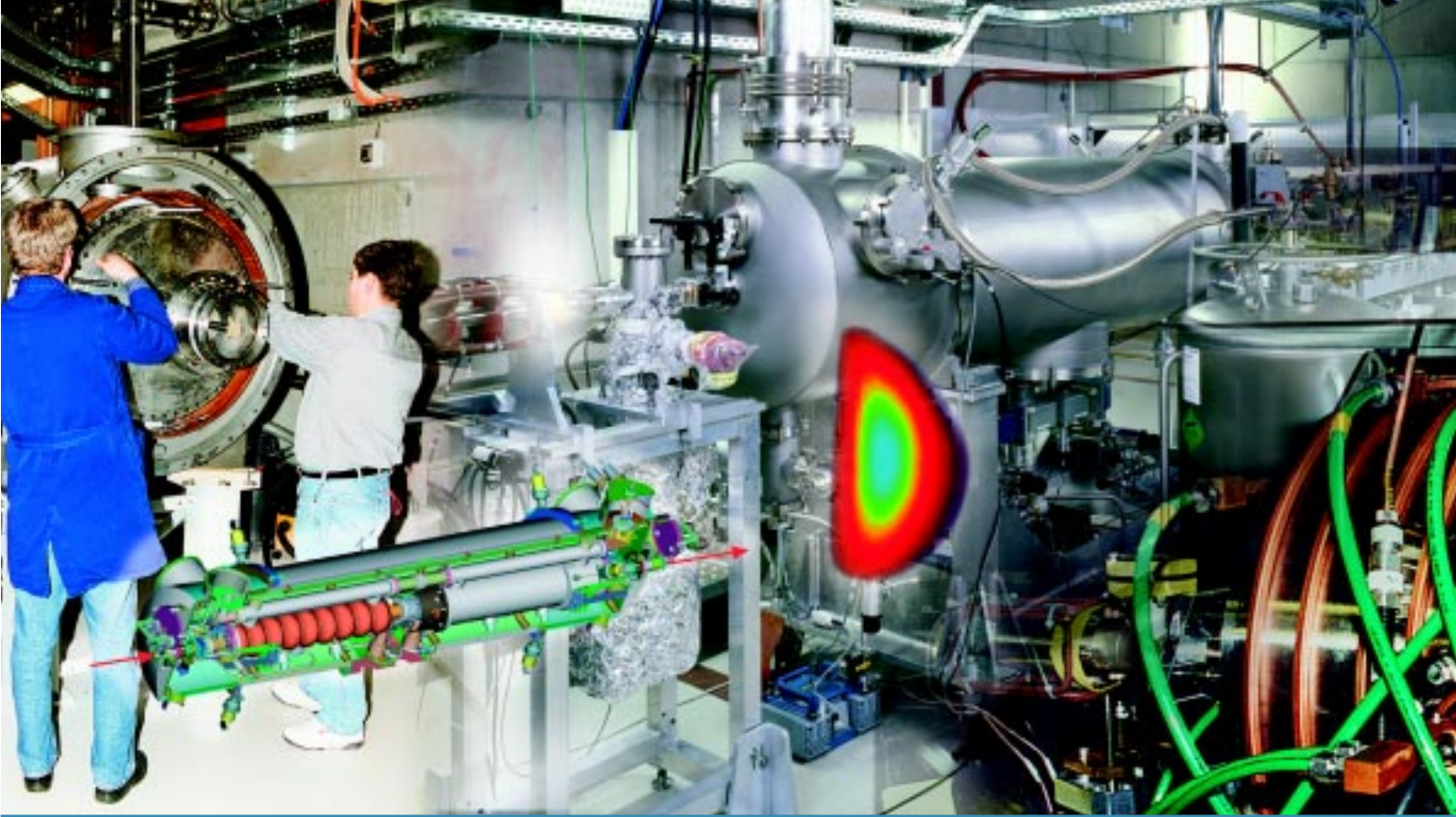
Die wichtigsten Kooperationspartner sind das IFW Dresden und die Firma GBS Elektronik GmbH Rossendorf.



Statistischer Überblick 2001 / 2002

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		48/48				Wissenschaftler			11/11		
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	1/1	1/1	Doktoranden	-	-	Gastwissenschaftler	1/0	0,05/0	Hilfskräfte	14/5	1,4/0,75
Geräteinvestitionen [TEUR]											
grundfinanziert		122/58				drittmittelfinanziert			6,1/0		
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Artikel (referiert)		1/0				Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			1/0		

Zentralabteilungsleiter: Dr. Frank Gabriel



Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE ZSE

Zielstellung – ein Überblick

Die Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE wurde am 1. 1. 2001 gegründet. Neben den ehemaligen 17 Mitarbeitern der Zentralabteilung Neue Beschleuniger wurden zusätzlich 7 Mitarbeiter anderer Einrichtungen des FZR, die bereits zum großen Teil am Aufbau von ELBE maßgeblich mitgewirkt hatten, in die neue Zentralabteilung integriert. Am 1. 3. 2001 war die Umstrukturierung abgeschlossen und die Abteilung ZSE arbeitsfähig. Die mittel- und langfristigen Hauptaufgaben der Zentralabteilung sind der Betrieb des Beschleunigers und der Freie-Elektronen-Laser, die Weiterentwicklung der Anlage und die Betreuung der zukünftigen Nutzer.

Die Hauptarbeitsgebiete im Jahr 2001 betrafen sowohl den direkten Aufbau als auch die langfristige Verbesserung bzw. Erweiterung der Anlage. Schwerpunkte waren die Inbetriebnahme und Optimierung des ersten Beschleuniger- und Strahlführungsabschnitts, die Erarbeitung von theoretischen Modellen zum Verständnis

und zur gezielten Verbesserung der Strahleigenschaften und die Entwicklung von Diagnose- und Auswerteprozeduren. Darüber hinaus wurden wesentliche Beiträge zur Entwicklung und zum Aufbau von Hochfrequenz- und Strahl Diagnosekomponenten für den ELBE-Beschleuniger, zum Betrieb und zur Optimierung der Heliumkälteanlage, zur Gewährleistung des Strahlenschutzes und beim Aufbau und der schrittweisen Übernahme von Gebäude- und Medientechnik an ELBE geleistet.

Das wichtigste eigenständige Forschungsvorhaben ist die Entwicklung einer supraleitenden Foto-Hochfrequenzquelle, die möglicherweise als mittelfristiger Ersatz des derzeitigen thermionischen DC-Injektors an ELBE dienen könnte. Diese Quelle wäre die weltweit erste supraleitende Hochfrequenzquelle und würde wichtige ELBE-Strahlparameter, insbesondere die transversale Emittanz deutlich verbessern.



Wichtigste Ergebnisse

- Inbetriebnahme und Optimierung des ersten Beschleuniger- und Strahlführungsabschnitts

Während der Teststrahlzeit von April bis Dezember 2001 wurden alle Komponenten der 20-MeV-Beschleunigerstufe erfolgreich in Betrieb genommen und teilweise wesentlich verbessert. Am 3. 5. 2001 gelang die Beschleunigung von Elektronen im supraleitenden 20-MeV-Modul. Danach wurden schrittweise die Designparameter für Strahlenergie, Bunchladung, mittleren Strahlstrom, transversale Emittanz, Energiebreite und Bunchlänge eingestellt. Trotz Schwierigkeiten, verursacht durch verunreinigte Beschleunigerkavitäten infolge eines Vakuumeinbruchs, wurde im August 2001 zweifelsfrei gezeigt, dass ELBE die notwendigen Strahl- und Betriebsparameter zur Erzeugung von Sekundärstrahlung mit den geplanten Eigenschaften erreicht. Durch umfassende theoretische Untersuchungen der gemessenen Strahleigenschaften konnten die physikalischen Prozesse beim Einfang des Elektronenstrahles in den Hauptbeschleuniger verstanden und der Einfluss auf den longitudinalen Phasenraum erklärt werden. Es wurden mehrere Softwaremodule entwickelt, die sowohl für die derzeitigen Untersuchungen der ELBE-Strahleigenschaften als auch für den späteren Routinebetrieb benutzt werden sollen.

Nach einer 8-monatigen Umbau- und Erweiterungsphase wurde am 1. 9. 2002 der Teststrahlbetrieb an ELBE wieder aufgenommen. Durch deutlich verbesserte Strahl Diagnoseeinrichtung zum Schutz der Anlage und optimale Einstellung der Heliumkälteanlage konnte in kurzer Zeit ein stabiler Strahlbetrieb gewährleistet werden.

- Hochfrequenztechnik und Diagnosekomponenten

Im Jahr 2002 wurden von der ZSE diverse Komplettierungsarbeiten beim Aufbau der HF-Leistungsversorgung des ersten Beschleunigermoduls ausgeführt. Es wurden Demodulationsbaugruppen für Richtkoppler entwickelt und aufgebaut, die Hohlleiter für den zweiten Beschleunigermodul verlegt und sämtliche Leis-

tungselektronik in das Steuerungssystem von ELBE eingebunden.

Zur Messung des ELBE-Strahlverlustes wurden verschiedene Detektorsysteme auf der Basis von Photomultipliern, Compton-detektoren, Ionisationskammern entwickelt und am Strahl getestet. Als optimale Lösung für ein Strahlverlust-Interlock-System erwiesen sich lange Ionisationskammern (Heliax-Hochfrequenzkabel). Ein solches System wurde aufgebaut und erfolgreich erprobt. Für die Onlinebestimmung der Strahlage wurden Striplinemonitore und eine neuartige Ausleseelektronik entwickelt und getestet.

Mittlerweile werden ca. 20 Monitore einschließlich der zugehörigen Ausleseelektronik aufgebaut und zum Teil in die Strahlführung installiert.

- Heliumkälteanlage und Medientechnik

In Hauptverantwortung der ZSE wurde die Heliumkälteanlage erstmalig zur Durchflussversorgung eines Kryostaten eingesetzt. Dabei wurden einige Probleme in Bezug auf die angestrebten Parameter der Anlage sichtbar. In Zusammenarbeit mit der TU Dresden und dem Hersteller konnten eine Reihe von Verbesserungen erreicht werden. Zum Teil erhebliche Schwierigkeiten bezüglich der Stabilität der Anlage und Kryostatenversorgung während der ersten Messphase (April - Dezember 2001) konnten nach Wiederinbetriebnahme im September durch Veränderungen im Betriebsregime und durch optimierte Betriebsparameter fast vollständig überwunden werden. Dies war vor allem dadurch möglich, dass während der Betriebspause entsprechende Untersuchungen und Tests in enger Zusammenarbeit mit der TU Dresden durchgeführt und die Resultate zur Anwendung gebracht wurden. Außerdem wurden Prozeduren für den Betrieb und die Wartung erarbeitet und erprobt, die den Routinebetrieb erst ermöglicht haben. Durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Erbauern von Infrastruktur- und Medientechnik im ELBE-Gebäude und ZSE konnte für eine Reihe von Anlagenkomponenten ein reibungsloser Übergang in die Verantwortung der zukünftigen Nutzer erreicht werden. Teile der Versorgungssysteme befinden sich bereits in der Zuständigkeit von ZSE.

- Strahlenschutz

Der Sicherheitsbericht zur Strahlungsquelle ELBE wurde für die Weiterleitung des Elektronenstrahls in die Strahlräume Kernphysik, Strahlungsphysik und FEL vervollständigt und bei der zuständigen Behörde mit dem Antrag auf Erweiterung des 20-MeV-Probetriebs eingereicht. Des Weiteren wurden 7 Mitarbeiter zu Strahlenschutzbeauftragten (SSB) qualifiziert und berufen.

- Supraleitende Foto-Hochfrequenzquelle (SRF-Gun)

Der zur Aufnahme des Gunresonators notwendige Kryostat wurde vollständig aufgebaut und erprobt. Im Herbst wurde der Treiberlaser in Betrieb genommen und die Präparation der fotoempfindlichen Kathoden erfolgreich durchgeführt. Zur Vorbereitung einer Strahlzeit zum Test dieser Quelle wurde ein Versuchstand mit umfangreicher Strahl Diagnose, Experimentautomatisierung und diversen Softwaretools zur Auswertung der Messergebnisse aufgebaut. Von Januar bis Juni 2002 erfolgte die Inbetriebnahme der Gun-Testanlage und es konnten erste Strahlparameter gemessen werden. Dabei gelang es, im Februar 2002 den weltweit ersten Elektronenstrahl aus einer supraleitenden HF-Quelle zu extrahieren. Obwohl aufgrund technischer Randbedingungen am Testaufbau nicht alle physikalisch wichtigen Parameter dieser Quelle ermittelt werden konnten, waren die gewonnenen Daten und Betriebsparameter ausgesprochen vielversprechend. Ein Vortrag von Dr. Dietmar Janssen bei der 24. FEL-Konferenz in ARGONNE, USA, erzeugte eine hohe Resonanz auf die erreichten Ergebnisse. Die Arbeiten für die Entwicklung einer an ELBE einsetzbaren Quelle dieser Technologie soll nun im Rahmen eines BMBF-Förderprojektes durchgeführt werden. Dazu werden derzeit die entsprechenden Unterlagen erstellt. Um die Abhängigkeit der wesentlichen Charakteristika der Foto-Hochfrequenzquelle von der Anzahl ihrer Zellen zu untersuchen, wurden in Zusammenarbeit mit Kollegen vom BINR Novosibirsk die Bunchlänge einer 5 1/2-zelligen SRF-Gun numerisch optimiert und die Intensität der kohärenten Undulatorstrahlung berechnet. Dabei konnten



für Wellenlängen >100 µm Intensitäten im Wattbereich erzielt werden. Weiterhin wurde in Modellrechnungen das Prinzip eines Tuners für den Resonator einer 5½-zelligen SRF-Gun entwickelt. Mehrere Gastaufenthalte von Mitarbeitern vom BINR Novosibirsk und TJNAF, Newport News, trugen zur erfolgreichen Bearbeitung dieses Themas bei und belegen das große internationale Interesse an diesen Arbeiten.

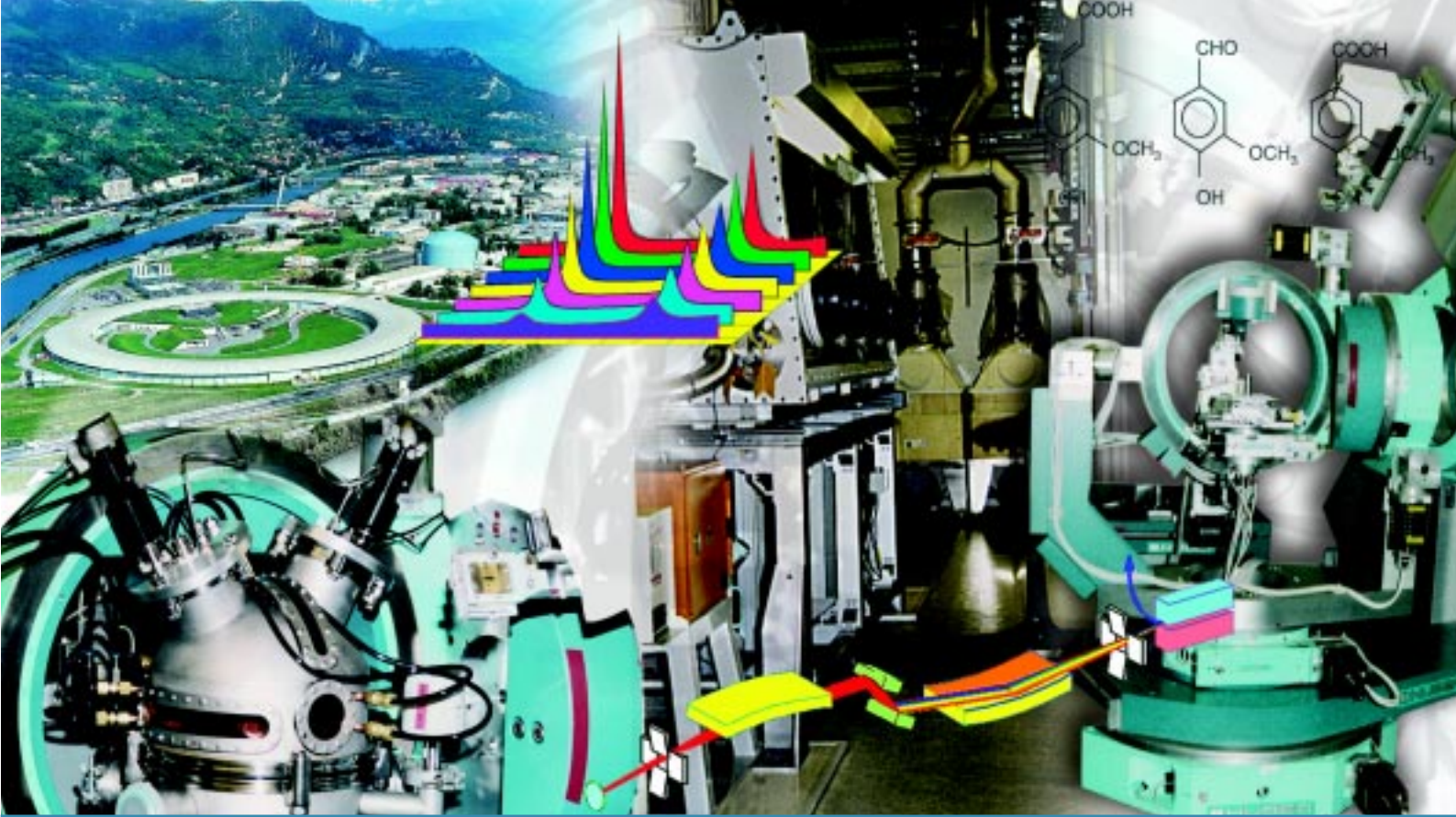
Zusammenarbeit mit externen Partnern

Die Entwicklungsarbeiten am ELBE-Beschleuniger und der Foto-HF-Quelle entstanden sowohl in enger Zusammenarbeit mit Partnern in Deutschland, wie DESY Hamburg, der TU Darmstadt und dem Max-Born-Institut Berlin, als auch mit ausländischen Kooperationspartnern, wie dem Stanford FEL-Center (CA, USA), dem TJNAF Newport News (VA, USA) und dem BINR (Novosibirsk, Russland).

Statistischer Überblick 2001 / 2002

Mitarbeiter [Planstellen]											
Gesamt		16/16			Wissenschaftler			6/5			
Annexpersonal [Anzahl Personenjahre]											
Postdoc	0/1	0/0,42	Doktoranden	1/1	0,13/0,38	Gastwissenschaftler	0/3	0/0,24	Hilfskräfte	6/6	0,58/0,71
Drittmittelfinanziertes Personal [Anzahl Personenjahre]											
Wissenschaftler	0/1	0/1	Gastwissenschaftler	2/1	0,14/0,24	Technisches Personal	-	-	Stipendiaten	-	-
Geräteinvestitionen [TEUR]											
grundfinanziert		292/130			drittmittelfinanziert			-			
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]											
Artikel (referiert)		2/1			Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster			8/15			

Zentralabteilungsleiter: Dr. Peter Michel



Projektgruppe ESRF-Beam-Line ROBL

Zielstellung – ein Überblick

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

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

werden vom FZR, Kooperationspartnern und externen Wissenschaftlergruppen genutzt.



Wichtigste Ergebnisse

Im Berichtszeitraum 2001/2002 wurden etwa 9800 Stunden Strahlzeit für wissenschaftliche Experimente an den beiden ROBL-Messplätzen genutzt. Da es keine anlagentechnisch bedingten Messzeitausfälle gab, konnten alle 95 geplanten Experimente realisiert werden. Davon förderte die EU im Rahmen des Programms „Transnational Access to Major Research Infrastructures“ 18 Experimente externer Forschergruppen aufgrund einer wissenschaftlichen Begutachtung durch ein international besetztes Gremium. Damit nahm die Bedeutung von ROBL als eine europäische Großanlage auch im zweiten und dritten Jahr der EU-Förderung zu. Weitere 25 Experimente externer Nutzer der insgesamt 95 durchgeführten, hatte die ESRF entsprechend den Empfehlungen ihrer internationalen Gutachterkommission ausgewählt und finanziert. Damit betrug der Anteil der EU- und ESRF-Experimente, die von den in Grenoble arbeitenden Mitarbeitern betreut wurden, 36 Prozent der für wissenschaftliche Experimente aufgewendeten Strahlzeit.

Für die Erprobung, der an den technischen Systemen der Steuerung und Überwachung von Beamline-Optik und Messeinrichtungen vorgenommenen Verbesserungen, wurden circa 1100 Stunden Strahlzeit verwendet. Der Si(111)-Kristallbieger wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Damit war es möglich, in Experimenten die Intensität des Synchrotronstrahls sagittal auf 0,4 Millimeter zu fokussieren und dadurch die Nachweispfeindlichkeit unter Ausnutzung der Gesamtphotonenzahl, der am Ablenkmagneten emittierten Synchrotronstrahlung zu erhöhen. Entwicklung und Erprobung eines speziellen Steuer- und Spektrenaufnahmeprogramms für schnelle EXAFS-Messungen (Quick-EXAFS) wurden erfolgreich abgeschlossen. Weitere Verbesserungen betrafen insbesondere die Steuer- und Messprogramme von MRH und RCH und die Inbetriebnahme eines linear-ortsempfindlichen Zählrohres, mit dem, aufgrund entfallender Scanbewegungen, die Zeitauflösung der Datenaufnahme um fast zwei Größenordnungen am Materialforschungsmessplatz bei der Untersuchung von Schicht-

wachstums- und Phasenänderungsprozessen erhöht werden konnte.

Die FZR-eigenen Experimente sind thematisch in die Forschungsprogramme des Instituts für Radiochemie und des Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung integriert. Die Transuranelemente Americium und Curium wurden bei ROBL erstmals untersucht und die Strukturparameter der Americium(III)- und Curium(III)-Aquoionen mittels EXAFS-Spektroskopie bestimmt. Die zum Abschluss gebrachten EXAFS-Untersuchungen an Neptunium(V)-Humaten verschiedener Huminsäuretypen zeigten, dass die Carboxylgruppen die Komplexbildung mit dem Neptunium dominieren. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Bioorganische und Radiopharmazeutische Chemie wurden EXAFS-Untersuchungen zu Technetium- und Rheniumverbindungen durchgeführt. Die im Jahr 2000 in Betrieb genommene Kammer zum In-situ-Abscheiden von magnetron-gesputterten Schichten wurde erstmals zur Untersuchung der Texturentwicklung von Titanitrid- und Chromitrid-Schichten eingesetzt. Dabei konnte der dominante zugrundeliegende Mechanismus als Rekristallisation identifiziert werden. Bei der Abscheidung von Titanitrid-Kupfer-Nanokompositen wurde das zeitliche Strukturverhalten in Abhängigkeit der Depositionsparameter verfolgt und bei der Abscheidung von Gold-Clustern das dynamische Kornwachstum studiert.

Als Untersuchungsschwerpunkte seien genannt:

- Korrelation von Spannungsfeldern und Kristallisation bei der ionenstrahlgestützten Synthese von Siliziumkarbid
- Untersuchung von Halbleiter-Hetero- und selbst organisierten Quantenstrukturen
- Studium der Struktur und Grenzflächenmorphologie in GMR-Multischichten mit Reflektometrie
- Erforschung des Wachstums und der Texturentwicklung magnetron-gesputteter Nitrid-Filme sowie der Nanokomposite Titanitrid-Kupfer- und von Gold-Clustern
- Bestimmung der Temperaturstabilität einer durch Ionenstrahlimplantation erzeugten neuen Titanhydridphase

- EXAFS-Studien zur Wechselwirkung von Uran mit Mikroorganismen und Pflanzen
- EXAFS-Messungen am Americium(III) bei der Komplexbildung mit Glykolsäure und bei der Sorption an Smectit
- EXAFS-Messungen am Americium(III) und Curium(III) zur Bestimmung ihrer Hydratkomplexe
- Strukturuntersuchungen zur Uran(VI)-Komplexbildung mit alpha-substituierten Carbonsäuren
- EXAFS-Untersuchungen zur Komplexbildung verschiedener Huminsäuretypen mit Neptunium und Plutonium
- Bestimmung von EXAFS-Strukturparametern zur Sorption von Uran(VI) an Mineraloberflächen (Goethit, Schwetmannit, Chlorit, Montmorillonit)

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Die ESRF war der Hauptpartner der Zusammenarbeit zur Verbesserung der Ausrüstung von ROBL. Wissenschaftliche Kooperationen wurden mit den folgenden Forschungseinrichtungen durchgeführt:

AMD Dresden; CENIMAT, Campus da FCT/UNL, Caparica/Portugal; Friedrich-Schiller-Universität Jena; Geoforschungszentrum Potsdam; TU Berlin; TU Chemnitz; TU Dresden; TU München; Hahn-Meitner-Institut Berlin; FZ Karlsruhe; Institut für Physik, Polnische AdW, Warschau/Polen; Institut für Elektronik, Bulgarische AdW, Sofia/Bulgarien; Institute of Electronic Materials & Technology ITME, Warschau/Polen; Institut für Metallphysik, Russische AdW, Ekaterinburg/Russland; PSI Villigen/Schweiz; Universität Aarhus/Dänemark; Johannes-Kepler-Universität Linz/Österreich; Nuclear Physics Institute, Tschechische AdW, Prag/Tschechische Republik; Universität des Saarlandes; Université Joseph Fourier, Grenoble/Frankreich; Université Louis Pasteur, Strasbourg/Frankreich; Katholieke Universiteit Leuven/Belgien; Institut de Recherches Subatomiques, Strasbourg/Frankreich; Limburgs Universitair Centrum, Diepenbeek/Belgien; Institut de Physique Nucléaire, Université Paris XI/Frankreich; Polytechnical University of



Catalonia, Barcelona/Spain; Commissariat à l'Énergie Atomique, Cadarache/France; Commissariat à l'Énergie Atomique, Valduc/France; University of Manchester, Centre of Radiochemistry Research/Great Britain.

Statistischer Überblick 2001 / 2002

The project group consists of staff from the Institute for Radiochemistry, the Institute for Ion Beam Physics and Materials Research, and the Central Department of Research and Information Technology. Six staff members work in Grenoble at ROBL. The remaining staff members are usually only partially active in the project group. Scientific publications were produced internally at FZR as well as through external groups, so there is some overlap with the statistics of the above-mentioned institutes.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen (Anzahl)			
Monografien/Beiträge zu Sammelwerken	0/1	Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster	32/34
Artikel (referiert)	17/13	Diplomarbeiten	-
Artikel (nicht referiert)	2/1	Doktorarbeiten	1/1
Artikel im Eigenverlag	1/0	Patentanmeldung	-
Wissenschaftliche Veranstaltungen (Anzahl)			
Meetings/Workshops	1/0		

Projektgruppenleiter:
 Dr. Wolfgang Matz (bis 08/2001)
 Prof. Tobias Reich (bis 03/2002)
 Dr. Norbert Schell (ab 04/2002)



Projektgruppe ELBE-Quelle ELBE

Zielstellung – ein Überblick¹⁾

Die Projektgruppe verfolgt das Ziel, am Forschungsstandort Rossendorf einen supraleitenden 40-MeV-Elektronenbeschleuniger (ELBE) und mehrere Freie-Elektronen-Laser (FEL) für den Infrarotbereich aufzubauen. Für die Nutzung der FEL-Strahlung wird eine sogenannte „User Facility“ eingerichtet, sodass auch externen Wissenschaftlern die Möglichkeit geboten wird, diese einzigartige Strahlungsquelle für Forschungszwecke zu nutzen.

Des Weiteren wird der Elektronenstrahl für strahlungs- und kernphysikalische Untersuchungen verwendet werden; die Erzeugung von Neutronen für Materialuntersuchungen wird gemeinsam mit der TU Dresden durchgeführt. Außerdem gibt es ein Projekt zum Aufbau einer intensiven Positronen-Quelle an ELBE.

¹⁾Da viele der nachfolgend genannten Aufgaben sowohl von der Projektgruppe ELBE als auch von der Zentralabteilung Strahlungsquelle ELBE durchgeführt werden, finden sich diese ebenfalls im Forschungsprogramm der Zentralabteilung. Es kommt somit zu einem bestimmten Überlappungsbereich, der aber durchaus der Struktur der am ELBE-Aufbau beteiligten Gruppen entspricht.



Wichtigste Ergebnisse

- Messung der Strahleigenschaften
Folgende Designparameter wurden erreicht:
 - Strahlenergie: 20 MeV
 - Strahlstrom: 850 μ A
 - Strahlemittanz: 8 π mm
 - Bunchlänge: 2 ps
 - Energieunschärfe: 40 keV

- Beschleuniger, Strahlführung allgemein
 - Revision und Optimierung der Helium-Verflüssigeranlage
 - Umbauten und Erweiterungen im Gebäude, in den Nutzerlaboren und an den Hilfseinrichtungen (u.a. Durchbrüche für die Beamlines zu den Experimentierräumen und für den Einbau von zwei 50 kW-Beamdumps)
 - Abschluss der Optimierung des Injektors
 - Untersuchungen am Gun-Versuchsstand zur Emittanzverbesserung durch Einsatz alternativer Kathoden-Gitter-Anordnungen
 - Inbetriebnahme und Optimierung der Betriebsparameter des ersten Beschleunigermoduls LA1
 - Entwicklung, Fertigung und Erprobung verschiedener Strahldiagnostik-Komponenten, bes. Beamposition- und Beamloss-Monitore
 - Aufbau der Beamlines im Beschleunigerraum mit den Anschlüssen für Kernspektroskopie, Strahlungsphysik, FEL und Neutronenphysik
 - Optimierung des Maschinen-Sicherheitssystems, spez. Beamloss-Monitore
 - Inbetriebnahme und Testbetrieb der Strahlführung bis zum Kernspektroskopie-Beamdump mit max. 20 MeV
 - Konzeption und Aufbau eines ortsempfindlichen Strahlverlust-Monitor-systems
 - Aufbau und Erprobung eines Stripline-Positions-Monitor-systems
 - Aufbau des optimierten zweiten Beschleuniger-Moduls

- Beamline für Kernspektroskopie-Experimente
 - Aufbau der gesamten Beamline incl. 50-kW-Beamdump mit Sekundärkühlung
 - Einsatz von unterschiedlichen Radiatoren

- Fertigung und Einbau eines Kollimators incl. Beamshutter
- Inbetriebnahme, Erprobung und Optimierung der Beamline zum Bremsstrahlungsradiator

- Beamline für Strahlungsphysik-Experimente
 - Fertigung der Strahlführungselemente
 - Montage der Beamline incl. 50-kW-Beamdump mit Sekundärkühlung

- Beamline für Neutronenlabor
 - Konzipierung der Strahlführung unter der Option des Einbaus eines Positronentargets

- FEL U27 und U50
 - Aufbau des optischen Resonators des U27
 - Simulationsrechnungen zur Modenausbreitung und zur erreichbaren Verstärkung im U50 unter Einbeziehung eines Waveguides
 - Konzipierung und Konstruktion des optischen Resonators des U50, Vorversuche
 - Fertigung der optischen Beamline vom U27 ins Diagnoselabor
 - Aufbau und Test der Elektronenstrahl-diagnose sowie der Diagnose des Infrarotstrahles
 - Konzipierung und Konstruktion der optischen Beamline vom U50 ins Diagnoselabor
 - Konzipierung und Konstruktion der optischen Beamline in die Nutzerlabors

- Steuerung, Leitsystem
 - Kontinuierliche Erweiterung der Steuerung für die hinzukommenden Strahlführungselemente
 - Weiterentwicklung der schnellen Datenerfassung, bes. für die Strahldiagnose
 - Erstellung und Erprobung von Auswertesoftware zur routinemäßigen Bestimmung von Strahl- und Betriebsparametern
 - Umstellung des Leitsystems auf eine neue Betriebssystemversion sowie auf eine neue Version des WinCC-Systems
 - Erhöhung der Systemsicherheit durch Inbetriebnahme eines redundanten WinCC-Servers
 - Weiterentwicklung der Datenbank für das Leitsystem

- Interlock, Strahlenschutz
 - Interlocksystem wurde durch Einbeziehung aller Experimentierräume erweitert
 - behördliche Genehmigung für den Testbetrieb des Kernspektroskopie-Strahlrohres erfolgte Anfang September
 - Erarbeitung der Genehmigungsunterlagen für die Strahlführung in den Strahlungsphysik-Experimentierraum

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Zu den wichtigsten Kooperationspartnern zählen das Institut für Kernphysik der Universität Darmstadt, das TESLA-Projekt bei DESY Hamburg, das Hansen Experimental Physics Laboratory (HEPL) der Universität Stanford (Kalifornien, USA), das Thomas Jefferson National Accelerator Facility (TJNAF) Newport News (Virginia, USA), das Institut für Kernphysik der Universität Mainz, das Physikalische und das Geodätische Institut der Universität Bonn sowie der Fachbereich Physik der Universität Dortmund.



Statistischer Überblick 2001 / 2002

Geräteinvestitionen [TEUR]			
grundfinanziert	1.164/954	drittmittelfinanziert	-
Wissenschaftliche Veröffentlichungen [Anzahl]			
Monografien / Beitr. zu Sammelwerken	-	Vorträge/Konferenzbeiträge/Poster	5/8
Artikel (referiert)	1/0	Diplomarbeiten	-
Artikel (nicht referiert)	-	Doktorarbeiten	1/0
Artikel im Eigenverlag	2/0	Patentanmeldungen	2/0

Projektgruppenleiter: Dr. Frank Gabriel



Projektgruppe Hochfeldlabor HLD

Zielstellung – ein Überblick

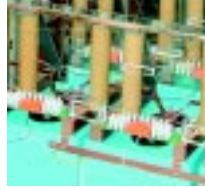
In Erkenntnis des Defizits bei der Verfügbarkeit sehr hoher Magnetfelder, insbesondere für die physikalische Forschung, haben sich Ende 1997 das Forschungszentrum Rossendorf sowie vier Dresdner Partnerinstitute (s. u.) in einem Konsortium zusammengeschlossen und unter Federführung des FZR den „Vorschlag zur Errichtung eines Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder“ erarbeitet. Dieser Vorschlag wurde den Zuwendungsgebern erstmals im Jahre 1999 zur Kenntnis gegeben und ist im Januar 2002 von einer Gutachtergruppe des Wissenschaftsrats begutachtet worden. Der Wissenschaftsrat hat am 12. Juli 2002 seine Empfehlung bekannt gegeben, dass dieser Vorschlag „ohne Vorbehalt für förderungswürdig“ betrachtet wird.

Die Partner des Konsortiums hatten sich frühzeitig darauf geeinigt, dass das Labor auf dem Gelände des Forschungs-

zentrums Rossendorf in unmittelbarer Nähe der Strahlungsquelle ELBE errichtet werden soll. Hierdurch soll die Möglichkeit eröffnet werden, den Infrarotstrahl der Freie-Elektronen-Laser der Strahlungsquelle ELBE in das Hochfeldlabor zu leiten und dadurch weltweit einzigartige Hochfeld-Infrarot-Spektroskopie-Experimente zu ermöglichen. Der Dresdner Vorschlag sieht vor, für externe und interne Nutzer gepulste Magnetfelder mit folgenden Werten anzubieten:

- 60 T / Pulsdauer 1000 ms / Bohrung 50 mm
- 70 T / Pulsdauer 100 - 200 ms / Bohrung 24 mm
- 100 T / Pulsdauer 10 - 20 ms / Bohrung 20 mm

Die Spulen sollen aus einer neu zu entwickelnden 50 MJ/24 kV-Kondensatoranlage gespeist werden.



Wichtige Arbeiten und Ergebnisse

Die Arbeiten im Jahre 2002 und die dabei erzielten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Es wurden die Computersimulationen für den Aufbau und die Funktion von gepulsten Hochfeldspulen fortgesetzt und ein neues Aufbauprinzip für derartige Spulen entwickelt. Dieses Prinzip beruht im Wesentlichen darauf, dass auf die Spulen axial und radial mechanische Kräfte aufgeübt werden, die einstellbar sind.

An der im gemeinsam aufgebauten Hochfeld-Testlabor des IFW Dresden betriebenen 1 MJ/10 kV-Stromversorgung wurden weitere Verbesserungen vorgenommen. Im Testlabor wurden zwischenzeitlich Pulsfelder bis zu 52 T/20 ms erreicht. An der Anlage wurden zahlreiche Experimente im Bereich des Magnetismus sowie der Supraleitung durchgeführt. Diese Experimente wurden insbesondere von Mitgliedern der Kooperationspartner IFW und TUD vorgenommen.

Im FZR wurden die Vorbereitungen und die Analyse eines weiteren Stromversorgungs-Testmoduls mit 1,44 MJ/24 kV durchgeführt. Dieser Modul soll im Jahre 2003 im FZR aufgebaut und getestet werden. Daneben wurden weitere Über-

legungen und Festlegungen für die 50 MJ/24 kV-Stromversorgung des Hochfeldlabors getroffen. Hierzu fanden auch intensive Beratungen mit der Industrie statt.

In Gesprächen und Verhandlungen mit der beauftragten Planungsfirma wurden die Planungen für das Gebäude des Hochfeldlabors sowie seine technische Infrastruktur abgeschlossen. Der Bauantrag konnte noch vor Jahresende gestellt werden, sodass mit dem Baubeginn im Frühjahr/Sommer 2003 zu rechnen ist. Bei den Planungen spielten auch Sicherheitsaspekte eine bedeutende Rolle.

Im IFW wurden die Arbeiten zur Entwicklung der für die Hochfeldspulen notwendigen hochfesten, gut leitfähigen elektrischen Leiter fortgeführt. Dabei konzentrieren sich die Arbeiten auf Mikrokomposite aus Kupfer mit Ausscheidungen aus Silber sowie aus Makrokompositen aus Kupfer in einer Stahlummantelung. Bei den Entwicklungen konnten Festigkeitswerte erreicht werden, die über den bisher in der Literatur zu findenden Werten liegen.

Im Juni 2002 wurde im FZR ein zweitägiger internationaler Workshop durchgeführt, der sich mit allen wesentlichen

technologischen Fragen des Aufbaus und Betriebs eines international führenden Hochfeld-Pulslabors befasste. Die Kenntnisse der Dresdner Beteiligten am Hochfeldprojekt konnten durch Besuche weiterer führender Hochfeldexperten weiter vertieft werden.

Zusammenarbeit mit externen Partnern

Die wichtigsten externen Partner sind die vier weiteren Mitglieder im Dresdner Hochfeld-Konsortium: das Institut für angewandte Physik der TU Dresden, das Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe Dresden, das Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme Dresden sowie insbesondere das Leibniz-Institut für Festkörperphysik und Werkstoffforschung Dresden.

Darüber hinaus bestehen Kooperationsverträge mit dem führenden amerikanischen Hochfeldlabor, dem National Laboratory for High Magnetic Fields, Tallahassee/Los Alamos, sowie den beiden führenden europäischen Pulsfeldlaboren, dem Laboratoire National des Champs Magnetique Pulses Toulouse und dem High Field Magnet Laboratory, University of Nijmegen.

Statistischer Überblick 2002

Mitarbeiter [Planstellen]*									
Gesamt		1,2			Wissenschaftler			1,2	
Grundfinanziertes Projektpersonal									
Wissenschaftler		1	Techniker		1				
Finanzmittel [TEUR]									
256									
Wissenschaftliche Veranstaltungen [Anzahl]									
Workshop		1							

* Zusätzlich arbeiten 0,8 Wissenschaftler sowie 0,6 technische Angestellte der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik in der Projektgruppe mit.

Projektgruppenleiter: Prof. Frank Pobell



Administrative und technische Infrastruktur

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

2001/2002 beschäftigte das FZR 419,5/419 Personen auf grundfinanzierten Planstellen, davon 19 mit kW-Vermerken. Daneben wurden 29/30 Doktoranden und 20/20 Postdoktoranden aus Annex-, HSP III- und Drittmitteln beschäftigt. Es bestanden Arbeitsverträge mit weiteren 97/91 Mitarbeitern in Drittmittelprojekten. 24/24 Azubis in 10 Ausbildungsberufen befanden sich in der aus Annex-Mitteln finanzierten Ausbildung. Weitere 4/4 Azubis wurden über von Dritten bereitgestellte Mittel ausgebildet. Im Berichtszeitraum haben 9/11 Mitarbeiter

promoviert, 12/7 Azubis beendeten ihre Ausbildung mit guten und sehr guten Ergebnissen.

Das FZR verfügte 2001/2002 über ein Finanzvolumen von insgesamt 53/57 Mio. Euro. Neben den Mitteln aus der Grundfinanzierung (45,5/48,8 Mio. Euro), die jeweils zur Hälfte durch den Bund und die Länder, vor allem dem Freistaat Sachsen, bereitgestellt wurden, konnten 7,1/8,1 Mio. Euro aus zusätzlichen Förderprojekten und Drittmittelverträgen nationaler und internationaler Einrichtungen sowie der Industrie eingeworben werden. 0,63/0,28 Mio. Euro wurden aus Sondermitteln bestritten.

Die Abteilung Technische Dienste hat 2002 in Zusammenarbeit mit Ingenieurbüros detaillierte Analysen zu Potenzialen der Betriebskostensenkung für das FZR erarbeitet. Diese bilden die Grundlage für Prioritätensetzungen bei den Sanierungsarbeiten der nächsten 5 Jahre.

Die Gruppe Investitionen betreute zahlreiche Baumaßnahmen im Umfang von insgesamt 14,7 Mio. DM im Jahre 2001 und von 5,4 Mio. Euro im Jahre 2002 zur Sanierung von Gebäuden und der



technischen Infrastruktur. Es wurden vor allem Laboratorien modernisiert sowie 4 Seminarräume nach modernsten Gesichtspunkten umgebaut. Das Bürogebäude (97b) des Institutes für Ionenstrahlphysik und Materialforschung wurde 2002 komplett saniert und den Wissenschaftlern zur Nutzung übergeben. Mit mehreren größeren Investitionsvorhaben wurden Voraussetzungen für neue Forschungsarbeiten im FZR geschaffen: Die Sanierungs- und Umbauarbeiten im Gebäude 68 wurden abgeschlossen und das Gebäude dem Institut für Sicherheitsforschung für den Aufbau und Betrieb der Thermohydraulikversuchsanlage TOPFLOW übergeben. Im wichtigsten Investitionsvorhaben, der Strahlungsquelle ELBE, wurden umfangreiche Arbeiten zur Erweiterung der technologischen Ausrüstung, insbesondere für die Strahlführung und die optischen Labors, durchgeführt. Für das Projekt „Neubau Hochfeldlabor Dresden“ wurden die Genehmigungsplanung erarbeitet und der Oberfinanzdirektion Chemnitz zur Prüfung übergeben.

Die Gruppe Betriebsdienst hat im Berichtszeitraum neben dem Unterhalt der Gebäude und Anlagen umfangreiche Maßnahmen mit dem Ziel der Einsparung von Heizenergie realisiert (z.B. Einbau moderner Wärmeübergabestationen, programmierte Temperaturabsenkung außerhalb der Arbeitszeiten). In Verantwortung der Gruppe wurden 2002 die Hauptarbeiten zum Abschluss der „Betrieblichen Deponie Rossendorf“ gemäß Auflagen der Umweltbehörden realisiert.

Die Abteilung Kommunikation und Datenverarbeitung hat im Bereich der IT-Sicherheit und des Datenschutzes folgen-

de wichtige Maßnahmen realisiert: Auf dem zentralen Mail-Server wurde ein Virenscreening eingeführt, eine neue Firewall wurde im Verwaltungsgebäude 4a installiert und die Funktionalitätserweiterung des Standort-Eingangsrouters zum Router-Firewall wurde realisiert. An den zentralen Servern sind 850 Nutzer registriert, 450 davon nutzen zentrale Dienste. Vier zentrale Windows-2000-Server wurden im Jahre 2001 installiert und eingerichtet, die dazugehörigen DNS/WINS-Strukturen und das Active Directory Schema entwickelt und implementiert. Zum Ende des Jahres 2002 ist der überwiegende Teil der PCs des FZR auf das Betriebssystem WINDOWS 2000 umgestellt. Die verfügbare Rechenleistung erhöhte sich 2001 durch die Installation eines Linux-Hochleistungsrechen-Clusters von 8 auf 20 Gflops. Eine neue zentrale Fileserver, als zentrale Speicherlösung für das gesamte FZR wurde 2002 konzipiert und in Betrieb gesetzt. Er bietet Speicherkapazität von ca. 1,7 TByte mit einem schnellen Zugriff über GigaBit Ethernet und Fibre-Channel Platten. Diese Lösung ermöglicht u.a. die zentrale Verwaltung aller Nutzerdaten des FZR sowie die zugehörige Archivierung und Backup.

Das Datennetz des FZR wurde planmäßig in den Gebäuden erneuert, die baulich saniert wurden. Darüber hinaus wurden die Arbeitsräume des Institutes für Sicherheitsforschung im Gebäude 5 mit Lichtwellenleitern verkabelt, um Datenraten von 100 Gbit direkt bis zum Arbeitsplatz zu gewährleisten.

Die Beratung und Unterstützung aller Organisationseinheiten zu einer breiten Palette von Problemen der Gestaltung von Verträgen, ihrer Durchführung und Kon-

trolle sowie die Betreuung des Patentwesens bildeten Schwerpunkte der Arbeit im rechtlichen Bereich. Im Berichtszeitraum sind 2 Mitarbeiterausgründungen auf der Grundlage von Miet-, Mitnutzungs- und Lizenzverträgen erfolgreich vollzogen worden. Es sind 27 Arbeitnehmererfindungsmeldungen eingegangen, 16 Anmeldungen beim Deutschen Patent- und Markenamt sowie 6 Anmeldungen beim Europäischen Patentamt und 6 internationale Anmeldungen vorgenommen worden. Zudem sind 13 nationale Nachmeldungen bezüglich zwei aus der europäischen Anmeldephase kommender Erfindungen zu verzeichnen.

Die feste Einbindung des FZR in nationale und internationale Wissenschaftskooperationen wird nicht nur an den beiden vom FZR betriebenen und von der Europäischen Union geförderten „Large Scale Facilities“ (Ionenstrahlanwendungen „AIM“ und Rossendorfer Synchrotron-Beamline „ROBL“ an der ESRF Grenoble) sowie den zahlreichen Projekten, zu denen Rossendorfer Forscher wissenschaftliche und technische Beiträge leisten, deutlich, sondern auch an der hohen Zahl von über 400 Gastwissenschaftlern aus mehr als 20 Ländern, die am Forschungszentrum wissenschaftliche Arbeiten durchführten.

Auch im administrativen Bereich bestehen zahlreiche internationale Kontakte. So hospitierten in der Administration des FZR zwei Mitarbeiterinnen aus dem vietnamesischen Ministerium Wissenschaft und Technologie. Eine Delegation aus dem vietnamesischen Wissenschaftsministerium tauschte sich im FZR zu Fragen des Personalmanagements aus.